主管：中华人民共和国住房和城乡建设部

主办：中国建筑西南设计研究院有限公司
中国建筑学会建筑电气分会
全国建筑电气设计技术协作及情报交流网

ISSN 1003-8493
CN 51-1297/TU

建筑电气®

BUILDING ELECTRICITY

建设部优秀期刊　中国科技论文统计源期刊
Http://www.jzdq.net.cn

9
2026

总第346期（第45卷）

中力智慧电气CIES系统

使用方和设计方行使意志与愿望的软硬件平台



C-POWER 中力智电　C-POWER 中力防雷

广告

建筑电气®
JIANZHU DIANQI
BUILDING ELECTRICITY

建设部优秀期刊
中国科技论文统计源期刊

月刊　公开发行
2026 年第 9 期（第 45 卷　总第 346 期）
2026 年 9 月 25 日出版　1981 年 10 月创刊

主管单位　中华人民共和国住房和城乡建设部
主办单位　中国建筑西南设计研究院有限公司
中国建筑学会建筑电气分会
全国建筑电气设计技术协作及情报交流网

编　委　会　（以姓氏笔画为序）

主任委员　蒋晓红

副主任委员　丁宏军　王东林　王迎春　任建平　刘叶语
孙　兰　孙成群　杜毅威　李　蔚　李俊民
李炳华　杨德才　沈育祥　汪　隽　陈　琪
陈众励　陈建飚　邵民杰　林卫东　周名嘉
周爱农　钟景华　俞　洋　俞志敏　洪　伟
夏　林　徐　华　郭晓岩　熊　江
郑庆军（常务）

顾问委员　丁　杰　丁新亚　王金元　卞铠生　尹秀伟
邓　昭　吕　立　任　红　任元会　刘武奕
刘迪先　李赛民　杨辉煦　肖　冰　吴成东
吴恩远　张　钊　张文才　张明科　陈汉民
陈惟崧　赵彤霞　段玉荣　施沪生　凌智敏
唐　明　黄铁兵　曹　华　董文彩　樊保国

委　　员　万　力　万　宁　王学锋　王建华　王晓静
尹慧玲　丛　军　朱亮亮　庄孙毅　刘　凯
衣建全　孙文华　孙胜进　李　疆　李宝军
邹　军　宋建刚　陈　旭　陈　谦　陈礼贵
陈永江　陈志萍　陈肖梅　陈梦晖　金　超
周传喜　胡　斌　洪友白　袁幼哲　顾继明
徐建兵　高　飞　席　伟　海　青　黄　洲
黄志强　梁志超　彭美玲　韩　帅　韩　强
程　澍　焦建雷　曾敬梅　谢　炜　谢正荣
管清宝　廖　昕

社长、总编　郑庆军 (028) 6180 8671
责任编辑　岳　杰
办公室、发行部　(028) 6180 8673
编　辑　部　(028) 6180 8675
广　告　部　(028) 6180 8698
网　站　部　(028) 6180 8678
微　信　部　(028) 6180 8677
编辑、出版　建筑电气杂志社
地　　址　四川省成都市天府大道北段 866 号
邮政编码　610042
电子邮箱　jzdq@jzdq.net.cn
ad@jzdq.net.cn（广告部）
网　　址　http://www.jzdq.net.cn
查阅网址　http://www.cnki.net
http://www.wanfangdata.com.cn
http://www.cqvip.com

国内总发行　中国邮政集团有限公司四川省报刊发行分公司
订　　阅　全国各地邮政局（所）　邮发代号　62-170
国外总发行　中国国际图书贸易集团有限公司
（北京 399 信箱）
国外发行代号　M3282
内页制作　成都励创广告有限公司
印　　刷　成都兴晟华印务有限公司
(028) 8582 8455

中国标准连续出版物号　ISSN 1003-8493 / CN 51-1297/TU

广告发布登记　川广更字〔2018〕003 号
国内发行定价　邮发每期 RMB 16.00，全年 RMB 192.00
零售每期 RMB 18.00
国外发行定价　每期 USD 14.00，全年 USD 168.00

致　读　者　漏订请到当地邮局或联系本社发行部补订
印刷、装订质量问题，请致电印刷厂调换

目　次

供电与配电

1　最小能量矩法的简易算法及其纳入 IEC 标准的现实价值　王　漪　韩占强　劳大实　赵晓阳
6　超大型地下商业综合体变电所负荷动态均衡研究　谢智雄
10　机场货运站供配电系统设计要点　邱永红　邱　悦
15　数据中心 10 kV 发电机组 LOOP 并机系统设计思路　王　群　廖　霄　李卓晖
18　直流微电网在绿色建筑中的应用与经济性分析　许　奎
22　消防末端配电箱供电方案分析与探讨　张文华

电缆电线

26　再探阻燃及耐火电缆的设计表达　陈　刻

电气防火

31　排烟防火阀联动停风机的解决方案　魏明艳　廖　昕　谢雪梅
36　GB 17945—2024 对消防应急照明集中电源选型的影响　王俊嵇　王　亮
41　消防泵组主备切换控制电路改进与仿真验证　何京伟

数据中心

46　非晶合金变压器在数据中心节能领域的应用研究　时庆兵

防雷与接地

50　金属屋面防雷与防水规范间的冲突及应对策略探讨　黄志源　朱光金

照明设计

54　平均照度计算及其在 BIM 设计中的实践　马亚雄　陶星名　周马军　梁泰山

施工与监理

59　无人机吊装的山地光伏工程施工技术与效率研究　杨　静

动态与消息

14　深圳铁塔与达实物联强强联合，持续拓展智慧服务边界
40　四川省土木建筑学会安装专业委员会技术交流会暨“好房子”创优现场观摩活动在乐山成功举办

建筑电气论坛　jzdq1981

版权所有　未经杂志社书面许可不得转载

BUILDING ELECTRICITY

The Excellent Journal of the Construction Ministry

The Statistical Source Journal of Chinese Scientific Papers

CONTENTS

Power Supply and Distribution

1 A Simplified Calculation Method for the Minimum Energy Moment Method and Its Practical Value in IEC Standards — *WANG Yi HAN Zhanqiang LAO Dashi ZHAO Xiaoyang*

6 Study on Dynamic Load Balancing of Substations in Super-large Underground Commercial Complexes — *XIE Zhixiong*

10 Key Points in the Design of Power Supply and Distribution Systems for Airport Cargo Terminals — *QIU Yonghong QIU Yue*

15 Design Concept of 10 kV Generator Set LOOP Paralleling System for Data Centers — *WANG Qun LIAO Xiao LI Zhuohui*

18 Application and Economic Analysis of DC Microgrids in Green Buildings — *XU Kui*

22 Analysis and Discussion of Power Supply Schemes for Fire Protection Terminal Distribution Boxes — *ZHANG Wenhua*

Cables and Wires

26 Further Discussion on the Design Expression of Flame-retardant and Fire-resistant Cables — *CHEN Chan*

Electrical Fireproofing

31 Solutions for Linkage Shutdown of Exhaust Fans by Smoke Exhaust Fire Dampers — *WEI Mingyan LIAO Xin XIE Xuemei*

36 Impact of GB 17945—2024 on the Selection of Centralized Power Supplies for Fire Emergency Lighting — *WANG Junji WANG Liang*

41 Improvement and Simulation Verification of the Control Circuit for Duty and Standby Fire Pump Set Switching — *HE Jingwei*

Data Center

46 Application of Amorphous Alloy Transformers for Energy Conservation in Data Centers — *SHI Qingbing*

Protection against Lightning and Earthing

50 Discussion on Conflicts and Response Strategies Between Lightning Protection and Waterproofing General Codes for Metal Roofs — *HUANG Zhiyuan ZHU Guangjin*

Illuminating Engineering Design

54 Average Illuminance Calculation and Its Application in BIM Design — *MA Yaxiong TAO Xingming ZHOU Majun LIANG Taishan*

Construction and Supervision

59 Study on Construction Technology and Efficiency of Drone-based Hoisting for Mountainous Photovoltaic Projects — *YANG Jing*

Monthly Public Issue
No.9 of 2026 (Vol.45 Serial No.346)
Published on Sep. 25, 2026 Founded in Oct. of 1981

Supervised by
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China
Sponsored by
China Southwest Architectural Design and Research Institute Corp. Ltd
Branch Committee on Building Electricity of Architectural Society of China
The National Building Electricity Design Cooperation and Information Exchange Network
President / Editor in Chief ZHENG Qingjun
International Standard Serial Numbering ISSN 1003-8493
CN Serial Numbering CN 51-1297/TU
Edited and Published by Building Electricity Magazine Agency
Issued by Sichuan Province Newspaper and Periodical Distribution Bureau
Domestic Subscription Local Post Office
Domestic Postal Distribution Code 62-170
Distributor Abroad
China International Book Trading Corporation (P. O. Box 399, Beijing, China)
Overseas Postal Distribution Code M3282
Address 866 Northern Tianfu Avenue, Chengdu, Sichuan, China
Post Code 610042 **Telephone** 86-28-6180 8671
Website http://www.jzdq.net.cn **E-mail** jzdq@jzdq.net.cn
Website (for searching) http://www.cnki.net
http://www.wanfangdata.com.cn
http://www.cqvip.com

彩页广告信息索引

天津市中力神盾电子科技有限公司 …… 封一

深圳达实物联网技术有限公司 …… 封二

广州市新兴电缆实业有限公司 …… 封三

《建筑电气》 …… 封四

建筑电气
BUILDING ELECTRICITY
ISSN 1003-8493
CN 51-1297/TU

欢迎订阅 欢迎投稿

《建筑电气》
绚丽您的电气之路

建筑电气论坛

jzdq1981

国内外公开发行，月刊，每期16元，全年192元

- **邮局订阅：** 全国各地邮局均可订阅，邮发代号：62-170
- **微信订阅：** “建筑电气杂志”微信公众号“微信小店”订阅
- **网上订阅：** 建筑电气网站（www.jzdq.net.cn）网上书屋在线订阅

征订热线： 028-61808673　　**E-mail：** jzdq@jzdq.net.cn　　**QQ：** 1043909791

地址： 中国四川省成都市天府大道北段866号C座

广告

中国标准连续出版物号 ISSN 1003-8493 CN 51-1297/TU　　广告发布登记 川广更字〔2018〕003号
http://www.jzdq.net.cn

发行 国内 邮发代号 62-170　每期 16.00 元　全年 192.00 元　零售 18.00 元
国外 发行代号 M3282　每期 14.00 美元　全年 168.00 美元

建筑电气论坛　jzdq1981

ISSN 1003-8493
09
9 771003 849262

最小能量矩法的简易算法及其纳入 IEC 标准的现实价值

王 漪[1,2]，韩占强[3]，劳大实[1]，赵晓阳[1]（1. 中国中元国际工程有限公司，北京市 100089；
2. 中国勘察设计协会，北京市 100840；3. 中国中建设计研究院有限公司，北京市 100037）

A Simplified Calculation Method for the Minimum Energy Moment Method and Its Practical Value in IEC Standards

WANG Yi[1,2], HAN Zhanqiang[3], LAO Dashi[1], ZHAO Xiaoyang[1]
（1. China IPPR International Engineering Co., Ltd., Beijing 100089, China;
2. China Engineering & Consulting Association, Beijing 100840, China;
3. CSCEC Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100037, China）

Abstract: In response to the relatively cumbersome calculation process of the existing minimum energy moment method, which is neither intuitive nor convenient and has therefore not been widely promoted or applied, a simplified calculation method for determining the load center of building engineering projects based on the minimum energy moment principle is derived and illustrated through examples. The simplified method is submitted to the IEC as a proposal for the first time and is incorporated as Annex A.4 of IEC 60364-8-81: 2026 *Low-voltage electrical installations — Part 8-81: Functional aspects — Energy efficiency*.

Keywords: load center calculation; minimum energy moment method; center of gravity method; simplified calculation method; IEC 60364-8-81: 2026

摘 要： 针对既有最小能量矩法计算过程较为繁琐，不够直观方便，没有得到很好推广、应用的情况，通过原理推导和举例说明最小能量矩法计算建筑工程负荷中心的简易计算方法。该简易算法首次提交 IEC 提案，已作为附录 A.4 纳入 IEC 60364-8-81: 2026 *Low-voltage electrical installations — Part 8-81: Functional aspects — Energy efficiency*。

关键词： 负荷中心计算；最小能量矩法；重心法；简易算法；IEC 60364-8-81：2026

DOI：10.3969/j.issn.1003-8493.2026.09.001

文献[1]首次提出了最小能量矩法计算建筑工程系统负荷中心的方法。最小能量矩法基于建筑物经纬柱网、线路经纬路径，而建筑内线路路由一般也是沿经纬路径敷设，所以有其客观和工程实用价值，是真正反映工程实际情况的一种方法。最小能量矩法是计算系统最小线路损耗的方法，在大负荷比较突出的系统中路径相同的情况下，比重心法（系统线路损耗平衡）更精准。

2022 年，最小能量矩法获得发明专利[2]，并被纳入上海市绿色建筑协会标准 T/SHGBC 006—2022《民用建筑电气绿色设计与应用规范》；2023 年，最小能量矩法纳入中国工程建设标准化协会标准 T/CECS 1718—2024《建筑电气系统能效评价标准》。本计算方法虽然得到行业的技术认可，但由于既有最小能量矩法计算过程较为繁琐，不够直观方便，方法没有得到很好的推广、应用。结合新一轮 IEC 60364-8-81 文件修编征求意见的契机，笔者根据最小能量矩法的原理，提出了更为快捷的计算方法，并通过全国建筑物电气装置标准化技术委员会（SAC/TC205）秘书处，正式向 IEC/TC64 标准工作组提交有关最小能量矩法的提案。2024 年 10 月，提案正式纳入 IEC 60364-8-81 的 CDV（征询意见阶段）文件（附录 A.4 节）；2025 年 12 月，FDIS（最终国际标准草案）文件最终投票通过；2026 年 2 月，包含最

作者信息

王 漪，女，中国中元国际工程有限公司，正高级工程师；中国勘察设计协会，常务副秘书长。
韩占强，男，中国中建设计研究院有限公司，正高级工程师，电气专业总工程师。
劳大实，男，中国中元国际工程有限公司，正高级工程师，电气专业总工程师。
赵晓阳，男，中国中元国际工程有限公司，高级工程师。

中国知网 https://www.cnki.net

小能量矩法的国际标准 IEC 60364－8－81：2026 *Low-voltage electrical installations — Part 8－81: Functional aspects — Energy efficiency*[3] 正式发布。

1 最小能量矩简易算法

最小能量矩是基于建筑物经纬柱网、线路经纬路径计算系统的总能量矩，通过找到使系统总能量矩最小的供电点位置来确定系统的负荷中心。

能量矩是负荷的预计年用电量（下文均简称为能耗）与负荷到供电点距离的乘积。系统总能量矩是供电点到所有负荷的各轴能量矩之和，反映系统总的线路损耗。如不方便预测负荷能耗，亦可通过负荷安装容量及预计年用电小时数测算。消防负荷年用电小时数极低，分析负荷中心时，微观上可不予以考虑。

简易算法：将系统各负荷坐标分解到 X、Y、Z 三轴（或 X、Y 两轴），按负荷 X 轴坐标从小到大的顺序，依次将对应的各负荷的能耗值进行数值累加；当累加到某个负荷，累加值首次超过系统总能耗值的 1/2 时，此负荷点对应的 X 轴坐标即为负荷中心的 X 轴坐标；同样方法，可求得负荷中心在 Y 轴和 Z 轴坐标；在计算出系统的负荷中心后，可以计算系统的平均负荷距离。

通过上述算法可以得出如下推论：

a. 当系统中最大负荷点的能耗大于系统总能耗的 1/2，则该点即为负荷中心（不用计算即可直接得出结论）。

b. 当能耗在两个负荷轴线坐标间平衡，负荷中心的轴线坐标可为两个负荷轴线坐标间任意一点。

2 负荷中心坐标计算

系统有 n 个负荷，年预估能耗 E_i（kWh），坐标为（x_i，y_i，z_i），系统总能耗 $E_\Sigma=\sum_{i=1}^{i=n}E_i$（kWh），根据最小能量矩法定义的负荷中心坐标为（X_0，Y_0，Z_0）。将各负荷分别沿着 X、Y、Z 轴线从小到大排序，即 X 轴坐标排序为 x_1，x_2，x_3，……，x_n，x_a 表示负荷 1～n 中任一负荷的 X 轴坐标，能耗量分别对应为 E_{x1}，E_{x2}，E_{x3}，……，E_{xn}，Y、Z 轴同理，可以通过下列方式确定：

a. 若 $\sum_{i=1}^{i=a}E_{xi}>\frac{1}{2}E_\Sigma$ 且 $\sum_{i=1}^{i=a-1}E_{xi}<\frac{1}{2}E_\Sigma$，则 $X_0=X_a$。即当 $E_{x1}+E_{x2}+\cdots\cdots+E_{xa}$ 大于系统总能耗的一半，且 $E_{x1}+E_{x2}+\cdots\cdots+E_{x\,(a-1)}$ 小于系统总能耗的一半，此时 X_a 就是负荷中心的 X 轴坐标。

b. 若 $\sum_{i=1}^{i=a}E_{xi}=\frac{1}{2}E_\Sigma$，则 $X_0\in[X_a,\ X_{a+1}]$。即当 $E_{x1}+E_{x2}+\cdots\cdots+E_{xa}$ 等于系统总能耗的一半，此时负荷中心的 X 轴坐标是在 X_a 到 X_{a+1} 之间任何一点。

c. Y、Z 轴同理，即若 $\sum_{i=1}^{i=b}E_{yi}>\frac{1}{2}E_\Sigma$ 且 $\sum_{i=1}^{i=b-1}E_{yi}<\frac{1}{2}E_\Sigma$，则 $Y_0=Y_b$；若 $\sum_{i=1}^{i=b}E_{yi}=\frac{1}{2}E_\Sigma$，则 $Y_0\in[Y_b,\ Y_{b+1}]$；若 $\sum_{i=1}^{i=c}E_{zi}>\frac{1}{2}E_\Sigma$ 且 $\sum_{i=1}^{i=c-1}E_{zi}<\frac{1}{2}E_\Sigma$，则 $Z_0=Z_c$；若 $\sum_{i=1}^{i=c}E_{zi}=\frac{1}{2}E_\Sigma$，则 $Z_0\in[Z_c,\ Z_{c+1}]$。

系统中能耗最大的单个负荷能耗为 E_{max}，其坐标为（X_{max}，Y_{max}，Z_{max}）。若 $E_{max}>\frac{1}{2}E_\Sigma$，则（$X_0$，$Y_0$，$Z_0$）=（$X_{max}$，$Y_{max}$，$Z_{max}$）。即系统中能耗最大的负荷能耗大于系统总能耗的 1/2 时，其坐标即为系统的负荷中心。

3 系统最小总能量矩及系统最小平均负荷距离

系统最小总能量矩 M_{min}：

$$M_{min}=\sum_{i=1}^{i=n}(E_i\cdot|x_i-x_0|+E_i\cdot|y_i-y_0|+E_i\cdot|z_i-z_0|) \tag{1}$$

系统最小平均负荷距离 l_{avg}：

$$l_{avg}=\frac{M_{min}}{E_\Sigma} \tag{2}$$

求系统最小平均负荷距离，也是最小能量矩法的一个特点，通过系统平均负荷距离的大小可以判断系统的供电范围是否合适：当系统的平均负荷距离过大，应考虑设置多个系统。实际工程中变电所选址往往不在理想的负荷中心，但可以通过比较不同选址方案对应的平均负荷距离，获得可实施的最佳选址方案。

4 原理推导

4.1 最小能量矩法证明

系统 n 个负荷，X、Y、Z 坐标轴分别将负荷按坐标大小排序，以 X 轴为例（如图 1 所示）：

X 轴总能量矩：

$$M_x=\sum_{i=1}^{i=n}E_{xi}\cdot|x-x_i|=E_{x1}\cdot|x_1-x|+E_{x2}\cdot|x_2-x|$$

中国知网 https://www.cnki.net

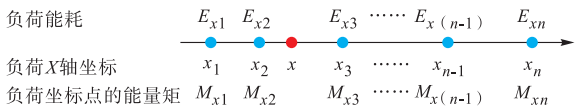


图 1　最小能量矩法负荷轴坐标（以 X 轴为例）

$$+ \cdots\cdots + E_{xn} \cdot |x_n - x \tag{3}$$

当 x 在 $x_1 \sim x_2$ 之间时，$M_x = E_{xi} \cdot (x - x_1) + E_{x2} \cdot (x_2 - x) + E_{x3} \cdot (x_3 - x) + \cdots\cdots + E_{xn} \cdot (x_n - x) = (E_{x1} - \sum_{i=2}^{i=n} E_{xi}) \cdot x - E_{x1} \cdot x_1 + \sum_{i=2}^{i=n} E_{xi} \cdot x_i$；当 x 在 $x_2 \sim x_3$ 之间时，$M_x = E_{x1} \cdot (x - x_1) + E_{x2} \cdot (x - x_2) + E_{x3} \cdot (x_3 - x) + \cdots\cdots + E_{xn} \cdot (x_n - x) = (\sum_{i=1}^{i=2} E_{xi} - \sum_{i=3}^{i=n} E_{xi}) \cdot x - \sum_{i=1}^{i=2} E_{xi} \cdot x_i + \sum_{i=3}^{i=n} E_{xi} \cdot x_i$；当 x 在 $x_{n-1} \sim x_n$ 之间时，$M_x = E_{x1} \cdot (x - x_1) + E_{x2} \cdot (x - x_2) + \cdots\cdots + E_{x(n-1)} \cdot (x - x_{n-1}) + E_{xn} \cdot (x_n - x) = (\sum_{i=1}^{i=n-1} E_{xi} - E_{xn}) \cdot x - \sum_{i=1}^{i=n-1} E_{xi} \cdot x_i + E_{xn} \cdot x_n$。

由此可以推导出：当 x 在 $x_a \sim x_{a+1}$ 之间时，因 $\sum_{i=1}^{i=a} E_{xi} + \sum_{i=a+1}^{i=n} E_{xi} = E_\Sigma$，$M_x = (\sum_{i=1}^{i=a} E_{xi} - \sum_{i=a+1}^{i=n} E_{xi}) \cdot x - \sum_{i=1}^{i=a} E_{xi} \cdot x_i + \sum_{i=a+1}^{i=n} E_{xi} \cdot x_i = (\sum_{i=1}^{i=a} E_{xi} - \sum_{i=a+1}^{i=n} E_{xi}) \cdot (x - x_i) = (E_\Sigma - 2\sum_{i=a+1}^{i=n} E_{xi})(x - x_i)$。

由上述推导可以得出如下结论：

a.　M_x 在各负荷点间形成一条斜率为 $(E_\Sigma - 2\sum_{i=a+1}^{i=n} \cdot E_{xi})$ 的线段，系统总能量矩由多个不同斜率的线段组成，如图 2 所示。

b.　线段的斜率取决于供电点左右两侧能耗的差值。当 $\sum_{i=a+1}^{i=n} E_{xi} > \frac{1}{2} E_\Sigma$，即 $\sum_{i=1}^{i=a} E_{xi} < \frac{1}{2} E_\Sigma$，斜率为负；当 $\sum_{i=a+1}^{i=n} E_{xi} < \frac{1}{2} E_\Sigma$，即 $\sum_{i=1}^{i=a} E_{xi} > \frac{1}{2} E_\Sigma$，斜率为正；当 $\sum_{i=a+1}^{i=n} E_{xi} = \frac{1}{2} E_\Sigma$，线段斜率为 0。

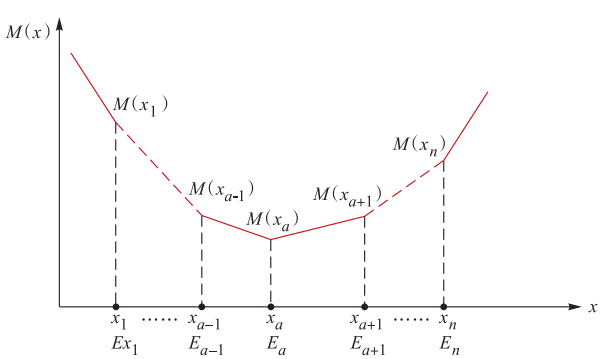


图 2　X 轴系统总能量矩斜率

c.　当 $\sum_{i=1}^{i=a} E_{xi} > \frac{1}{2} E_\Sigma$ 且 $\sum_{i=1}^{i=a-1} E_{xi} < \frac{1}{2} E_\Sigma$，系统总能量矩斜率在 x_a 处发生正负变化，它是系统总能量矩的拐点，此点的能量矩 M_a 最小。

d.　当 $\sum_{i=a+1}^{i=n} E_{xi} = \sum_{i=1}^{i=a} E_{xi} = \frac{1}{2} E_\Sigma$，$x_a \sim x_{a+1}$ 之间系统总能量矩斜率为 0，$x_a \sim x_{a+1}$ 之间的任何点的 M_x 相同且均为最小。

4.2　系统总能量矩和系统最小总能量矩

沿三维各坐标轴的总能量矩定义为：X 轴总能量矩 $M_x = (\sum_{i=1}^{i=n} |x - x_i| \times E_i)$；$Y$ 轴总能量矩 $M_y = (\sum_{i=1}^{i=n} |y - y_i| \times E_i)$；$Z$ 轴总能量矩 $M_z = (\sum_{i=1}^{i=n} |z - z_i| \times E_i)$。系统总能量矩定义为沿各轴的能量矩之和，即 $M_\Sigma = M_x + M_y + M_z$。系统最小总能量矩出现在系统供电点设在负荷中心时，即为 $M_{min} = \sum_{i=1}^{i=n} (E_i \cdot |x_i - x_a| + E_i \cdot |y_i - y_b| + E_i \cdot |z_i - z_c|)$。

5　举例

5.1　例 1

如图 3 所示是 GB/T 16895.35—2023/IEC 60364-8-1：2019《低压电气装置　第 8-1 部分：功能方面　能源效率》[4] 附录 A.1 中的案例，系统 4 个负荷的能耗与坐标分别为：E_1，120 kWh，(4，4)；E_2，80 kWh，(9，1)；E_3，20 kWh，(9，8)；E_4，320 kWh，(6，12)。系统总能耗 $E_\Sigma = 120 + 80 + 20 + 320 = 540$ kWh。

5.1.1　重心法

负荷中心坐标计算：

$X_0 = (120 \times 4 + 80 \times 9 + 20 \times 9 + 320 \times 6) / (120 + 80 + 20 + 320) = 6.11$

$Y_0 = (120 \times 4 + 80 \times 1 + 20 \times 8 + 320 \times 12) / (120 + 80 + 20 + 320) = 8.44$

如图 3 所示，图中绿点（6.11，8.44）处即为计算负荷中心。

系统最小总能量矩及最小平均负荷距离计算：

$M_{min} = M_{xmin} + M_{ymin} = [120 \times (6.11 - 4) + 80 \times (9 - 6.11) + 20 \times (9 - 6.11) + 320 \times (6.11 - 6)] + [(120 \times (8.44 - 4) + 80 \times (8.44 - 1) + 20 \times (8.44 - 8) + 320 \times (12 - 8.44)] = 577.4 + 2\,276 = 2\,853.4$ kWh·m

$$l_{avg} = \frac{M_{min}}{E_\Sigma} = \frac{2\,853.4}{540} = 5.28 \text{ m}$$

中国知网　https://www.cnki.net

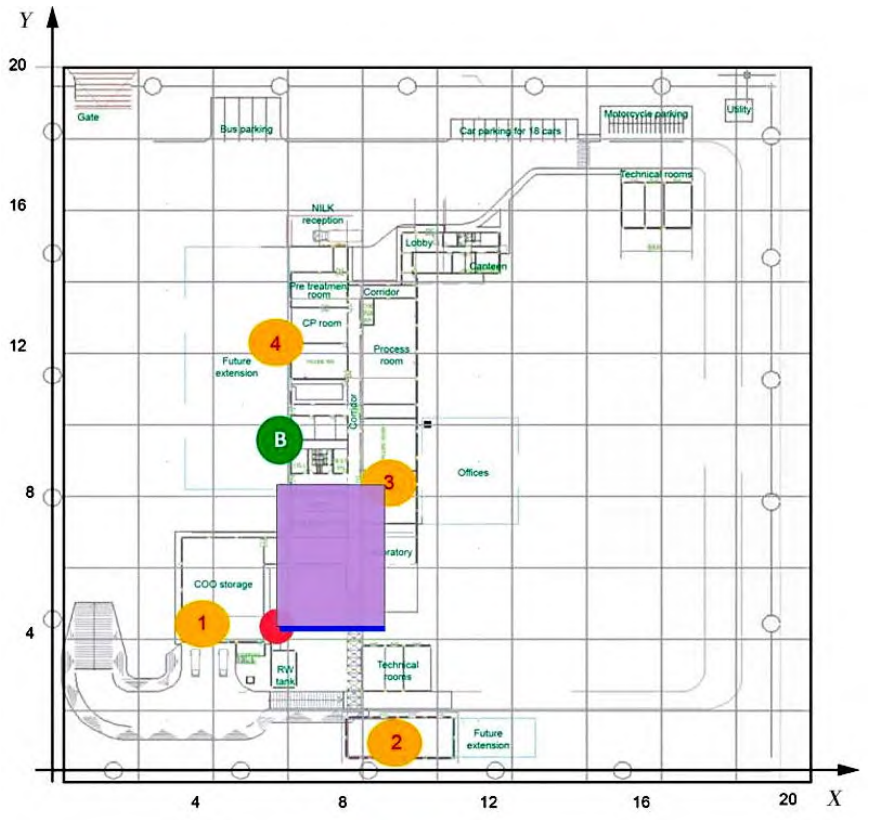


图 3　文献［4］中的案例

5. 1. 2　最小能量矩法

负荷中心坐标计算：其中 $E_4 = 320 > \frac{1}{2}E_\Sigma$，故图 3 中 E_4 的坐标（6，12）即为负荷中心。

系统最小总能量矩及最小平均负荷距离计算：

$M_{min} = M_{xmin} + M_{ymin} = [120 \times (6-4) + 80 \times (9-6) + 20 \times (9-6) + 320 \times (6-6)] + [120 \times (12-4) + 80 \times (12-1) + 20 \times (12-8) + 320 \times (12-12)] = 540 + 1\,920 = 2\,460$ kWh·m

$$l_{avg} = \frac{M_{min}}{E_\Sigma} = \frac{2\,460}{540} = 4.56 \text{ m}$$

5. 1. 3　计算结果对比

上述两种算法比对可以看出，两种算法的结果还是存在较大差异：对于系统的最小平均负荷距离，重心法为 5.28 m，而最小能量矩法为 4.56 m，是重心法的 86.4 %。按照线路损耗为系统总损耗的 5 % 计算，在重心法的基础上，最小能量矩法确定的整个系统再节能 0.68 %，也将是很可观的数字。

5. 2　例 2

沿用 5.1 节例子，仅将 E_4 改为 100kWh，则系统总能耗 $E_\Sigma = 120 + 80 + 20 + 100 = 320$ kWh。

5. 2. 1　重心法

负荷中心坐标计算：

$X_0 = (120 \times 4 + 80 \times 9 + 20 \times 9 + 100 \times 6) / (120 + 80 + 20 + 100) = 6.19$

$Y_0 = (120 \times 4 + 80 \times 1 + 20 \times 8 + 100 \times 12) / (120 + 80 + 20 + 100) = 6$

$M_{min} = M_{xmin} + M_{ymin} = [120 \times (6.19-4) + 80 \times (9-6.19) + 20 \times (9-6.19) + 100 \times (6.19-6)] + [120 \times (6-4) + 80 \times (6-1) + 20 \times (8-6) + 100 \times (12-6)] = 562.8 + 1\,280 = 1\,842.8$ kWh·m

$$l_{avg} = \frac{M_{min}}{E_\Sigma} = \frac{1842.8}{320} = 5.76 \text{ m}$$

5. 2. 2　最小能量矩法

负荷中心坐标计算：$E_{max} = E_1 < \frac{1}{2}E_\Sigma$。沿 X 轴各负荷的能耗排序为 E_1、E_4、E_2、E_3，从 E_1 开始累加能耗：$E_1 = 120 < \frac{1}{2}E_\Sigma$，$E_1 + E_4 = 120 + 100 = 220 > \frac{1}{2}E_\Sigma$，则 $x = x_4 = 6$；沿 Y 轴各负荷的能耗排序为 E_2、E_1、E_3、E_4，从 E_2 开始累加能耗：$E_2 = 80 < \frac{1}{2}E_\Sigma$，$E_2 + E_1 = 80 + 120 = 200 > \frac{1}{2}E_\Sigma$，则 $y = y_1 = 4$；负荷中心坐标为（6，4），如图 3 红点处。

$M_{min} = M_{xmin} + M_{ymin} = [120 \times (6-4) + 80 \times (9-6) + 20 \times (9-6) + 100 \times (6-6)] + [120 \times (4-4) + 80 \times (4-1) + 20 \times (8-4) + 100 \times (12-4)] = 540 + 1\,120 = 1\,660$ kWh·m

$$l_{avg} = \frac{M_{min}}{E_\Sigma} = \frac{1\,660}{320} = 5.19 \text{ m}$$

5. 2. 3　计算结果对比

上述两算法比对可以看出：对于负荷能耗比较均衡系统的最小平均负荷距离，重心法为 5.76 m，最小能量矩法为 5.19 m，是重心法的 90.1 %，重心法与最小能量矩法差异缩小。

5. 3　例 3

沿用 5.2 节例子，各负荷坐标不变、负荷能耗变化：

中国知网 https://www.cnki.net

a. 当$E_1 + E_2 > E_3 + E_4$，且 $E_1 + E_4 = \frac{1}{2}E_\Sigma$ 时，即 X 轴某区域两侧负荷能耗相同，负荷中心位于（6，4）到（9，4）之间各点（如图 3 中蓝色线段）。

b. 当 $E_1 + E_2 = \frac{1}{2}E_\Sigma$，且 $E_1 + E_4 = \frac{1}{2}E_\Sigma$ 时，即 4 个负荷能耗相同，负荷中心位于（6，4）、（9，4）、（8，9）、（6，9）形成矩形中的任意一点（如图 3 中紫色区域）。

5.4 例 4

假设系统 4 个负荷能耗与坐标分别为：E_1，120 kWh，（40，40）；E_2，80 kWh，（90，10）；E_3，20 kWh，（90，80）；E_4，100 kWh，（60，120）。系统总能耗 $E_\Sigma = 120 + 80 + 20 + 100 = 320$ kWh。相较于例 2，各负荷能耗未变，间距扩大了 10 倍。

5.4.1 单系统设置

经最小能量矩法计算，负荷中心坐标为（60，40），最小平均负荷距离为 51.9 m。考虑到配电箱下端配电线路平均超过 50 m，末端负荷平均供电距离超过 100 m，线路损耗较大。

5.4.2 多系统设置

根据负荷分布，考虑将负荷 E_1 与 E_2 作为系统 1，E_3 与 E_4 作为系统 2。

系统 1 负荷中心坐标为（40，40），最小平均负荷距离 $l_{avg} = \frac{M_{min}}{E_\Sigma} = \frac{(90-40)\times 80 + (40-10)\times 80}{120+80} = 32$ m。

系统 2 负荷中心坐标为（60，120），最小平均负荷距离 $l_{avg} = \frac{M_{min}}{E_\Sigma} = \frac{(90-60)\times 20 + (120-80)\times 20}{20+100} = 11.6$ m。

通过计算量化两个系统的能耗差异，相较于单系统设置，多系统设置更加有利于减少线路损耗。当然系统的设置还要综合考虑其他因素。

6 Excel 快速计算

以上文例 4 为例，将各负荷的能耗按照 X / Y 坐标轴由小到大顺序列入 Excel 表格（如表 1 所示），总能耗为 320 kWh。通过 Excel 表格从左向右累计，很容易算出：当 X 轴负荷能耗累计首次大于总能耗一半，即 $E_1 + E_4 = 220 > 160$ 且 $E_1 < 160$，负荷中心 X 轴坐标为 E_4 的坐标；Y 轴当负荷能耗累计首次大于总能耗一半，即 $E_2 + E_1 = 200 > 160$ 且 $E_2 < 160$，负荷中心 Y 轴坐标为 E_1 的坐标；故负荷中心坐标为（60，40）。实际工程中多个供电点比选，坐标接近负荷中心的方案为优。

表 1 各负荷由小到大顺序排列

X 轴	负荷坐标 / m	40	60	90	
	负荷编号	E_1	E_4	E_2、E_3	
	负荷能耗 / kWh	120	100	80 + 20	
Y 轴	负荷坐标 / m	10	40	80	120
	负荷编号	E_2	E_1	E_3	E_4
	负荷能耗 / kWh	80	120	20	100

另外，为了更好地推广、应用本文探讨的最小能量矩简易算法，笔者团队目前正在开发配套的计算程序，将适时与大家分享。

7 结语

最小能量矩法是在重心法基础上的优化，在大负荷比较突出的系统中比重心法（系统能耗平衡）更精准，并可通过系统的平均负荷距离判断系统规模，指导供电系统设计，使变电所布局、选址与负荷中心优化从“经验拍板”跃升为“数据决策”，从源头系统性减小供配电损耗、提升选址的科学性。最小能量矩算法得到 IEC 同行的关注，创新的简易算法已列入 IEC 60364－8－81：2026 附录 A.4。简易算法使用直观简便，本文通过对简易算法的系统介绍，旨在进一步推动业内的推广与应用，也欢迎行业同仁一起沟通交流。

在此致谢 SAC / TC205 秘书处陈彦秘书长、专家组丁杰组长及唐颖等专家在提案过程中给予的支持和帮助！

参考文献

[1] 王漪．建筑工程电气负荷中心的矢量计算［J］．建筑电气，2019，38（12）：45－49.

[2] 王漪，胡明，李亮，等．建筑工程电气负荷中心矢量计算方法及变电所设计方法：CN201810390330.4［P］．2022－06－28.

[3] IEC 60364－8－81：2026 Low-voltage electrical installations Part 8－81：Functional aspects－Energy efficiency［S］.

[4] GB / T 16895.35 — 2023 / IEC 60364－8－1：2019 低压电气装置 第 8－1 部分：功能方面 能源效率［S］.

2026－01－12 来稿
2026－09－04 修回

中国知网 https://www.cnki.net

超大型地下商业综合体变电所负荷动态均衡研究

谢智雄（福州市规划设计研究院集团有限公司，福州市 350108）

Study on Dynamic Load Balancing of Substations in Super-large Underground Commercial Complexes

XIE Zhixiong（Fuzhou Planning & Design Research Institute Group Co., Ltd., Fuzhou 350108, China）

Abstract: To address the issue that the electricity demand of urban commercial complexes varies with changes in tenant mix during leasing, which conventional design approaches cannot effectively accommodate, a low-voltage main wiring scheme with tie connections for substations is proposed. The scheme can flexibly accommodate dynamic changes in load capacity resulting from changes in the tenant mix, make full use of the spare capacity of substations with low load factors, and effectively balance the load factors among substations.

Keywords: underground commercial complex; tenant mix; unit load index; load factor; dynamic load allocation

摘 要： 针对城市商业综合体用电容量跟随招商业态的变化而变动，常规设计无法有效应对的问题，提出采用变电所带联络的低压主接线方案，可灵活解决商业综合体招商带来的负荷容量动态变化影响，充分利用低负载率变电所的剩余容量，有效平衡各个变电所之间的负载率。

关键词： 地下商业综合体；招商业态；单位负荷指标；负载率；负荷动态分配

DOI：10.3969/j.issn.1003－8493.2026.09.002

0 引言

某超大型地下商业综合体项目总建筑面积约18.4万 m^2，共有115个防火分区，其中商业区12万 m^2，项目集餐饮、休闲、娱乐、儿童城、科技、文化、购物、服务、电影院、地下停车场、城市地下通道于一体。项目停车场面积约4.4万 m^2，可提供一千多个机动车位，是集商业、车库、城市交通通道于一体的超大型综合工程，提供了多种商业消费经济业态，也缓解了城市交通拥堵、停车位不足的压力，是利民、利行、利经济的超大型工程。

城市商业综合体是近年来的新生业态，综合体内的业态跟随招商工作变动频繁[1]，导致用电容量时常跟随变动[2-3]；常规设计采用固定区域对应固定变电所进行配电，导致业态变化时变电所负载率的大幅波动，不同的变电所之间负荷极度不均衡。为了保证负荷均衡，就必须限制业态的用电容量，但这给招商带来不利的限制条件，不够灵活，影响商业综合体的发展。为了解决这一问题，本文提出一套带联络的负荷动态均衡方案，可灵活解决商业综合体招商带来的负荷容量动态影响。下面以该超大型商业综合体为例，详细阐述该方案的具体实施方法。

1 商业业态及负荷变化分析

本工程商业区分为A、B、C三个功能分区，业态主要分为两大类型，即餐饮和一般商业，其中餐饮相对集中设置在C区。餐饮区每个防火分区面积约为1 000 m^2，一般商业区每个防火分区面积约为2 000 m^2。A、B、C三个区域分区中不同业态对应的负荷指标和安装容量如表1所示[4]。

由表1可知，不同的业态形式对应不同的单位面积负荷指标，当这些区域的业态发生变化时，对应的负荷也随之变化（如某个防火分区的业态由普通零售业态改为超市/生鲜业态时，负荷安装容量将由300 kW

作者信息
谢智雄，男，福州市规划设计研究院集团有限公司，高级工程师，电气专业副总工程师。

中国知网 https://www.cnki.net

表 1　商业建筑不同业态形式的负荷指标和安装容量

功能分区编号	业态形式	单位面积负荷指标 /（W / m²）	每个防火分区负荷安装容量 / kW
A 区购物类	普通零售区（服饰、美妆）	150	300
	精品零售区（奢侈品）	200	400
	高端超市 / 生鲜区	250	500
	数码卖场及科技互动体验店	200	400
	银行网点（营业厅）	150	300
B 区休闲类	健身房（含器械区）	250	500
	儿童游乐区（室内）	180	360
	休闲书店（含阅读区）	120	240
	电影院	225	450
	KTV	270	540
C 区餐饮类	快餐厅（汉堡、简餐）[1]	300	300
	正餐餐厅（中餐、西餐）[1]	400	400
	饮品店（咖啡、奶茶）[1]	220	220

增加至 500 kW）。为了平衡一般商业区和餐饮区的负荷，使得餐饮区每个防火分区负荷容量与一般商业区的单区负荷容量不至于相差太大，设计将餐饮区每个防火分区面积设置为一般商业区的一半，以便于后续业态发生变化时，更容易进行变电所的跨区负荷动态均衡。如当一般商业区的精品零售减少一个防火分区面积（负荷 400 kW）时，餐饮区的中西餐餐厅就可以多开一个防火分区面积（负荷 400 kW），增加的餐饮负荷正好可以调整到负荷减少的变压器容量中。

2　商业变电所平面布局及装机容量

因本工程为地下一层的商业功能区，无上部建筑，故 1#、2#、3#商业变电所只能设于地下一层[5-6]，其平面布局如图 1 所示。

考虑到商业变电所的合理供电半径及供电范围[5, 7-8]，将 1#、2#、3#商业变电所分别尽量靠近 A、B、C 功能分区负荷中心[7]。该地下空间南北长 342 m，东西长 655 m，商业变电所的最长供电距离为 242 m，符合相关规范要求。该变电所的布局模式，使得 3 个商业变电所可以在合理的供电半径下互为备用，为变电所间的负荷动态均衡提供了基础条件。同时各个商业变电所的容量大小也是负荷在各个变电所间进行动态均衡的关键因素。

商业变电所的变压器装机容量配置须和对应的主用、备用服务范围功能区的面积相匹配。A、B、C 功能区负荷计算容量和 1# ~ 3#商业变电所的变压器装机容量、初始负载率及服务范围如表 2 所示。

本工程商业变电所变压器的初始负载率约为 81 %。同一商业变电所内的变压器装机容量同时考虑了其中一台变压器故障、另一台与之配对的变压器可紧急带载所有特级、一级、二级负荷的情形[9-11]。这样做的好处是既可以保障特级、一级、二级负荷的供电可靠性，又可以使变压器在平时正常工作时有更多的冗余容量，以便于不同变电所之间的负荷动态均衡。

3　变电所低压主接线设计

由于各个商业变电所的负荷性质存在差异[2-3]，用电高峰不出现在同一时段：1#商业变电所负荷主要为购物类业态，白天用电负荷较高，晚上较低；3#商业变电所负荷主要为餐饮类业态，上午负荷较低，晚

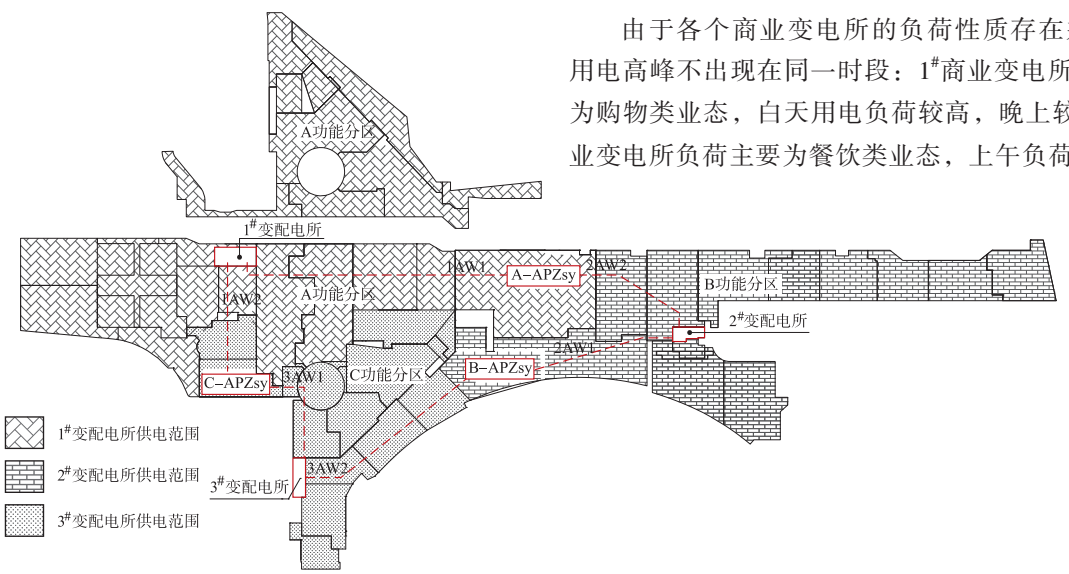


图 1　商业变电所平面布局示意

中国知网　https://www.cnki.net

表 2　商业变电所变压器装机容量、初始负载率及服务范围

商业变电所编号	1#	2#	3#
变压器装机容量 / kVA	2 000 × 2 + 1 600 × 2	2 000 × 2	2 000 × 2
负荷计算容量 / kW	5 314	2 916	2 880
初始负载率	82 %	81 %	80 %
主用服务范围	A 功能区	B 功能区	C 功能区
备用服务范围	B、C 功能区	A、C 功能区	A、B 功能区

注：负荷计算功率因数取 0. 9。

上很高；2#商业变电所负荷主要为休闲娱乐类，其负荷高峰介于 1#和 3#之间。若在不同性质负荷的变电房之间设有联络，就可以解决某个商业变电所在负荷增加时负载率过高的问题。譬如晚上通过错峰供电，1#商业变电所空余出来的用电容量可供给 3#商业变电所餐饮区配电。

为了满足业主单位对低压配电系统灵活性高的特殊要求，使得 A、B、C 三个功能区的负荷可以在 3 个商业变电所之间进行相互调配，经对建筑平面的分析研究，选择在 A、B、C 三个功能区内的中心位置分别设置区域配电间，内设区域配电柜 A－APZsy、B－APZsy、C－APZsy（如图 1 所示）。区域配电柜的电源一路引自本功能区主用变电所，另一路低压联络线就近引自相邻备用变电所，每个区域配电柜的安装负荷按 300 kW 配置。带变电所联络线的类环网低压主接线系统如图 2 所示。

由图 2 可知，由变压器及其母线、区域配电柜及其主备用进出线缆回路构成了一个类环网低压配电系统。A 功能区的区域配电柜 A－APZsy 引入两路电源，主用回路 1AW1 引自 1#商业变电所，备用联络回路 2AW2 引自 2#商业变电所；B 功能区的区域配电柜 B－APZsy 引入两路电源，主用回路 2AW1 引自 2#商业变电所，备用联络回路 3AW2 引自 3#商业变电所；C 功能区的区域配电柜 C-APZsy 引入两路电源，主用回路 3AW1 引自 3#商业变电所，备用联络回路 1AW2 引自 1#商业变电所。

4　负荷动态均衡操作实例

A、B、C 三个功能区的初始计算负荷及 1#、2#、3#商业变电所的装机容量如表 2 所示，变压器的初始

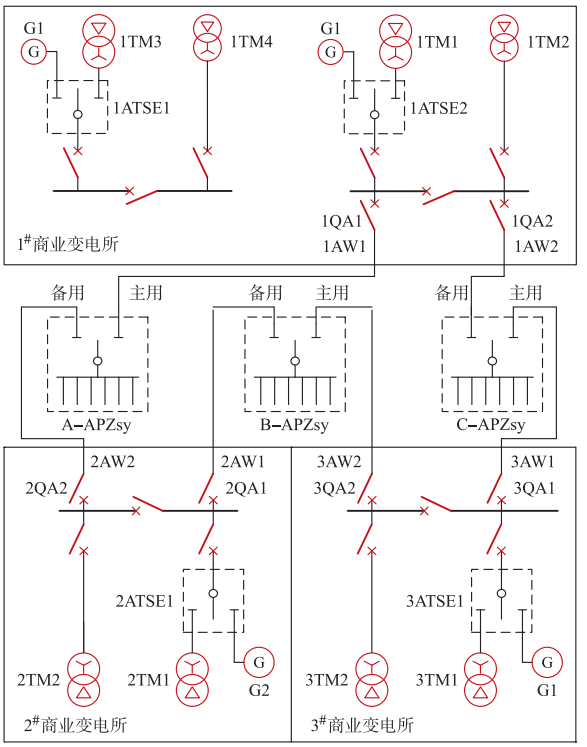


图 2　商业变电所类环网低压主接线系统示意

负载率约为 81 %。可动态均衡转移的负荷为区域配电间 A－APZsy、B－APZsy、C－APZsy 配电柜安装容量约为 300 kW 的负荷。分以下几种情形进行实例说明：

a.　情形 1：当 A 功能区面积 2 000 m² 的普通零售（服饰、美妆等，总负荷为 300 kW）改为快餐厅（汉堡、简餐等，总负荷为 600 kW），A 功能区负荷容量增加 300 kW；B 功能区业态不变，负荷容量亦不变；C 功能区 1 000 m² 的正餐餐厅（中餐、西餐等，总负荷容量为 400 kW）改为精品零售区（奢侈品，总负荷容量为 200 kW），C 功能区负荷容量减少了 200 kW。在此情形下，1#商业变电所负载率升高为 87 %，2#商业变电所负载率不变，3#商业变电所负载率降低至 74 %。在该情形下负荷动态均衡的倒闸操作流程如表 3 所示，业态变化后与负荷动态均衡后各个商业变电所负载率变化如表 4 所示。由表 3、表 4 可知，负荷动态均衡后，1# ~ 3#商业变电所的负载率分别为 82 %、81 %、83 %。

b.　情形 2：当 A 功能区业态不变；B 功能区面积 1 000 m² 的休闲书店（总负荷为 120 kW）改为 KTV（总负荷为 270 kW），以及 1 000 m² 的儿童游乐区（总负荷为 180 kW）改为快餐厅（汉堡、简餐，总负荷为 300 kW），B 功能区负荷容量增加 270 kW；C 功能区

中国知网 https://www.cnki.net

表 3　负荷动态均衡倒闸操作流程

商业变电所编号		1#	2#	3#
断路器编号	1QA1	分闸	—	—
	1QA2	分闸	—	—
	2QA1	—	分闸	—
	2QA2	—	合闸	—
	3QA1	—	—	合闸
	3QA2	—	—	合闸
负载转移过程		A－APZsy 配电柜 300 kW 安装容量转移至 2#商业变电所、B－APZsy 配电柜 300 kW 安装容量转移至 3#商业变电所、C－APZsy 配电柜 300 kW 安装容量保留在 3#商业变电所		

表 4　业态变化后与负荷动态均衡后各个商业变电所负载率变化

商业变电所编号	1#	2#	3#
变压器装机容量 / kVA	2 000 × 2 + 1 600 × 2	2 000 × 2	2 000 × 2
业态变化后负荷容量 / kW	5 314 + 300	2 916 + 0	2 880 − 200
业态变化后负载率	87 %	81 %	74 %
负荷动态均衡后负荷容量 / kW	5 314 + 300 − 300	2 916 + 0	2 880 − 200 + 300
负荷动态均衡后负载率	82 %	81 %	83 %

1 000 m² 的正餐餐厅（中餐、西餐等，总负荷容量为 400 kW）改为数码卖场及科技互动体验店（总负荷容量为 200 kW），C 功能区负荷容量减少了 200 kW。在此情形下，1#商业变电所负载率不变，2#商业变电所负载率升高为 89 %，3#商业变电所负载率降低至 74 %。负荷动态均衡后，1# ~ 3#商业变电所的负载率分别为 82 %、80 %、83 %。

c. 情形 3：当 A 功能区面积 2 000 m² 的高端超市 / 生鲜区（总负荷为 500 kW）改为普通零售商店（总负荷为 300 kW），A 功能区的总负荷减少 200 kW；B 功能区面积 2 000 m² 的休闲书店（总负荷为 240 kW），改为 KTV（总负荷为 540 kW），B 功能区负荷容量增加 300 kW；C 功能区业态不变。在此情形下，1#商业变电所负载率降低至 74 %，2#商业变电所负载率升高为 89 %；3#商业变电所负载率不变。负荷动态均衡后，1# ~ 3#商业变电所的负载率分别为 83 %、81 %、80 %。

由情形 1 ~ 3 的案例可知，当 A、B、C 功能区有相关业态变化时，可通过动态调配 A－APZsy、B－APZsy、C－APZsy 的负荷接入位置来保证 1# ~ 3#商业变电所的负载率大致均衡在初始负载率 81 %，该灵活的低压主接线型式避免了对变压器的增容改造，使得业主的招商工作较灵活地开展，同时也降低了运营成本。

5　结语

本文提出的带变电所联络线的类环网低压主接线系统，可灵活解决商业综合体招商带来的负荷容量动态变化的影响，实际运行效果良好，充分利用了低负载率变电所的剩余容量，有效平衡了各个变电所之间的负载率。通过类环网低压主接线系统，可灵活应对供电区域因使用功能变化导致用电负荷及变压器负载率的变化。该类环网低压主接线系统除了可应用于大型商业综合体外，对变电所数量较多，使用功能随需求动态变化的场所亦有参考价值。

参考文献

[1] 李凯，周玉娟．商业综合体内餐饮业态负荷密度取值范围研究 [J]．建筑电气，2018（12）：11－15.

[2] 肖铁军．大型商业中心建筑用电负荷密度调研 [J]．建筑电气，2015（3）：23－29.

[3] 穆景光，穆薇羽．商业综合体建筑用电指标跟踪分析 [J]．建筑电气，2019（10）：15－18.

[4] 李炳华，潘鑫，岳云涛，等．商业综合体建筑电气负荷密度研究 [J]．建筑电气，2021（5）：5－11.

[5] GB 51348—2019　民用建筑电气设计标准 [S].

[6] 李毅．大型商业综合体供电方案限制要素及对策分析 [J]．建筑电气，2018（1）：20－24.

[7] 谢结弟．某商业综合体电气设计体会 [J]．建筑电气，2016（8）：41－45.

[8] GB 50053—2013　20 kV 及以下变电所设计规范 [S].

[9] 中国航空工业规划设计研究总院有限公司．工业与民用供配电设计手册 [M]．4 版．北京：中国电力出版社，2016.

[10] GB 50052—2009　供配电系统设计规范 [S].

[11] JGJ 48—2014　商店建筑设计规范 [S].

2025－12－01 来稿
2026－08－28 修回

中国知网　https://www.cnki.net

机场货运站供配电系统设计要点

邱永红，邱　悦（中建研科技股份有限公司西南分公司，成都市　610095）

Key Points in the Design of Power Supply and Distribution Systems for Airport Cargo Terminals

QIU Yonghong, QIU Yue (CABR Technology Co., Ltd. Southwest Company, Chengdu　610095, China)

Abstract: Loads of electrical equipment are classified according to relevant codes and standards. The electrical load indicators and power supply schemes of three project cases are introduced and comparatively analyzed. The demand factors and power factors of common process equipment are presented. The design principles for transformer load factor, equipment room location, equipment selection, power source transfer locations in the power distribution system, circuit division, and distribution box layout are discussed.

Keywords: airport cargo terminal; logistics building; electrical load indicator; demand factor; transformer load factor; power supply scheme; equipment room layout; distribution box layout

摘　要：依据规范对用电设备进行负荷分级，介绍并对比分析 3 个项目案例的用电指标及供电方案，列举常见工艺设备的需要系数及功率因数，阐述变压器负载率、设备房位置、设备选择、配电系统的电源切换位置、回路划分、配电箱布置的设计原则。

关键词：机场货运站；物流建筑；用电指标；需要系数；变压器负载率；供电方案；设备房设置；配电箱布置

DOI：10.3969/j.issn.1003－8493.2026.09.003

0　引言

随着全球物流业不断发展，航空货运需求越来越大。众所周知，航空货运核心就体现在“快”。据统计，航空普货运输大半时间都花在地面处理上。为了提高航空货运效率，必须大力减少地面处理时间。而作为航空货运地面设施的核心，机场货运站成为影响航空货运效率的关键因素，其安全、可靠、高效运行是保障航空货运高效、快捷、安全运行的重要基础。合格且合理的机场货运站电气设计，不仅是实现航空货运高效快捷运行的基础，也是机场货运站安全可靠运行、便捷高效管理、绿色经济运维必需的技术前提。机场货运站随着航空货运需求逐年增加而不断建设，但相对而言仍属于小众建筑，有关其设计经验的公开文献不多，笔者将结合部分项目案例，对该类建筑的供配电系统设计要点予以介绍和分析。

1　负荷分级

机场货运站是一种物流建筑，包括收发、安检、分拣、拆装、搬运、储存等功能，可能是多种功能组合在一起的单栋建筑，也可能是多栋不同功能建筑形成的建筑群。物流建筑按使用功能特性，分为作业型、存储型、综合型物流建筑；按建筑内处理物品的特性，分为普通、特殊、危险品物流建筑；按建筑层数和建筑高度，分为单层、多层、高层物流建筑。大多数机场货运站为单层或多层普通作业型物流建筑，为火灾危险性丙类中的可燃固体厂房，但其中管理用房、宿舍、食堂等属于公共建筑。本文仅论及单层或多层普通作业型丙类厂房类型的机场货运站。

根据 GB 51157—2016《物流建筑设计规范》[1] 第 13.1.1 条规定，机场货运站各用电设备的负荷

作者信息
邱永红，男，中建研科技股份有限公司西南分公司，高级工程师，西南分公司电气总工程师。
邱　悦，女，中建研科技股份有限公司西南分公司，工程师。

中国知网 https://www.cnki.net

等级如表 1 所示。

表 1　机场货运站用电设备的负荷等级

一级负荷	贵重物品库房用电；安全等级为一级的应急物流中心、邮政枢纽分拣中心及其他重要的大型、超大型物流建筑的物品自动搬运、输送、分拣设备用电及作业区、储存区的照明用电；中型及以上规模等级物流建筑的安全防范系统、通信系统、计算机管理系统
二级负荷	安全等级为二级的邮政枢纽分拣中心、较重要的中型及以上规模物流建筑的物品自动搬运、输送分拣等设备用电，以及存储区域和作业区域照明用电；消防水泵、消防风机、应急照明、防火卷帘门、消防控制室等消防设备用电
三级负荷	其他负荷

注：对于建筑群的部分单体建筑，若为室外消防用水量不大于 25 L / s 的公共建筑或不大于 30 L / s 的丙类厂房，其消防用电负荷等级按规范可为三级，宜按二级负荷供电。

2　负荷计算

2. 1　方案阶段

方案设计阶段，采用单位面积法估算变压器容量。表 2 为 3 个机场货运站项目案例的电气设计信息，由表可知，3 个项目的安装容量、变压器装机容量指标差别较大。经进一步分析，项目 C 的工艺用电预留容量比项目 A、B 的明显大得多，项目 B 最小；同时项目 A、C 运营单位要求较高，其变压器负载率比项目 B 低；项目 B 的变压器装机容量指标明显比项目 A、C 低得多。对于设计人员而言，方案阶段应充分了解运营单位的需求，宜按运营单位提供的设计标准确定变压器单位面积安装容量指标；若运营单位无法提供具体设计指标，也宜明确项目基本定位。比如项目 B，运营单位对其定位稍低，其变压器负载率相对项目 A、C 高一些，其装机容量冗余指标较项目 A、C 稍低，该方案在满足项目实际需求的前提下，可有效节约前期投资。

表 2　机场货运站项目电气设计信息汇总

项目	项目 A	项目 B	项目 C
建筑面积 / m^2	90 389	82 491	84 206
安装容量 / kW	8 536	4 966	12 202
工艺用电 / kW	2 531	1 704	6 740
变压器容量 / kVA	14 600	7 200	15 830
中压柴油发电机组容量 / kW	3 × 2 000	未设置	4 × 2 000
低压柴油发电机组容量 / kW	500	未设置	2 500
变压器平均负载率 / %	49. 1	64	52. 6
电源	双市电 + 中压柴油发电机组 + 低压柴油发电机组	双市电	双市电 + 中压柴油发电机组 + 低压柴油发电机组
中压柴油发电机组供电范围	50 % 变压器	未设置	50 % 变压器
低压柴油发电机组供电范围	消防负荷、非消防备用照明	未设置	消防、弱电、航空障碍灯、X 光机

注：表中安装容量含工艺用电；双市电满足双重电源要求；中压柴油发电机组采用 $N+1$ 架构并机运行，表中容量未含备用机组。

2. 2　初设及施工图阶段

2. 2. 1　安装容量

初设及施工图阶段，在确定了设备安装容量后，采用需要系数法计算负荷。常规的风机、制冷机组、空调水泵、空调机组、风扇、水泵、电热水器、电梯、提升门等设备，其安装容量由相关专业提资；工艺用电（如 X 光机、冷库、汽车调平台、升降式转运车、皮带输送机、辊道输送机、起重机、电动葫芦、分拣设备、叉车充电等设备），其安装容量由工艺提资；厨房设备安装容量由厨房设计公司提资。对于常规场所（如办公、会议、食堂、管理用房、宿舍等），照明、插座用电按民用建筑同类场所的单位建筑面积指标确定其安装容量；对于厂房、仓库，除工艺外的插座用电较少，照明、插座用电安装容量可分别按 20 ~ 30 W / m^2、10 ~ 15 W / m^2 确定。

2. 2. 2　需要系数

计算变压器容量时，常规用电设备的需要系数、功率因数按常规设计取值，工艺设备的需要系数、功率因数可参照表 3 取值[2-3]，功率因数在设备采购后应根据实际产品铭牌参数调整。

2. 2. 3　变压器负载率

变压器故障排除可能需要较长时间，更换变压器所需时间更长。机场货运站有的需 24 h 运行，有的在夜间连续运行，即使三级负荷长时间断电，也不利于人员和设备的正常工作，可能影响该建筑运行效率。机场货运站所用变压器负载率不宜过高，一般宜为 50 % ~ 70 %，上限值宜结合变压器产品在强制风冷时的实际过载能力确定，以保障两台一组变压器中的一台故障时，另一台能为该组变压器的所有必需负荷供电。

中国知网　https://www.cnki.net

表 3　工艺设备的需要系数、功率因数

用电设备	需要系数	功率因数
X 光机	0. 3 ~ 0. 4	0. 55
冷库	0. 6 ~ 0. 8	0. 8
汽车调平台	0. 3 ~ 0. 5	0. 5
升降式转运车	0. 5 ~ 0. 6	0. 8
皮带、辊道输送机	0. 65 ~ 0. 7	0. 75
起重机、电动葫芦	0. 2 ~ 0. 45	0. 5
打包机	0. 2 ~ 0. 3	0. 6
分拣设备	0. 65 ~ 0. 8	0. 8
充电设备	0. 5 ~ 0. 7	0. 85

3　供电方案

由表 1 可知，机场货运站有较多一级负荷和二级负荷。根据 GB 50052 — 2009《供配电系统设计规范》第 3. 0. 2 条[4] 和 GB 55024 — 2022《建筑电气与智能化通用规范》第 3. 1. 2 条[5] 的规定，一级负荷应由双电源供电。根据相关规范规定，双电源的其中一路为市政电源，另一路可为前述市政电源故障时不会同时受到损坏的市政电源，也可为柴油发电机、蓄电池组。由于机场货运站的一、二级负荷容量大，运行时间长，根据经济性原则，第二电源优先采用市政电源，然后可采用柴油发电机，一般不采用蓄电池。由于机场货运站临近机场，大多具备采用市政电源作为第二电源的条件。除满足规范要求外，部分项目应运营单位或地方供电部门要求，可能增设柴油发电机。

机场货运站供电方案应根据负荷容量、负荷级别、市政条件，在满足规范要求的基础上，结合运营单位需求、属地供电部门规定确定。图 1 为表 2 中项目 A 的供电方案，项目 C 的供电方案与项目 A 近似，图 2 为项目 B 的供电方案。项目 A 除按常规设置市政双电源外，为满足运营单位使用需求，还增设中压柴油发电机组及低压柴油发电机组：中压柴油发电机组采用 3 用 1 备并机运行方式，在两路市政电源均停电时，

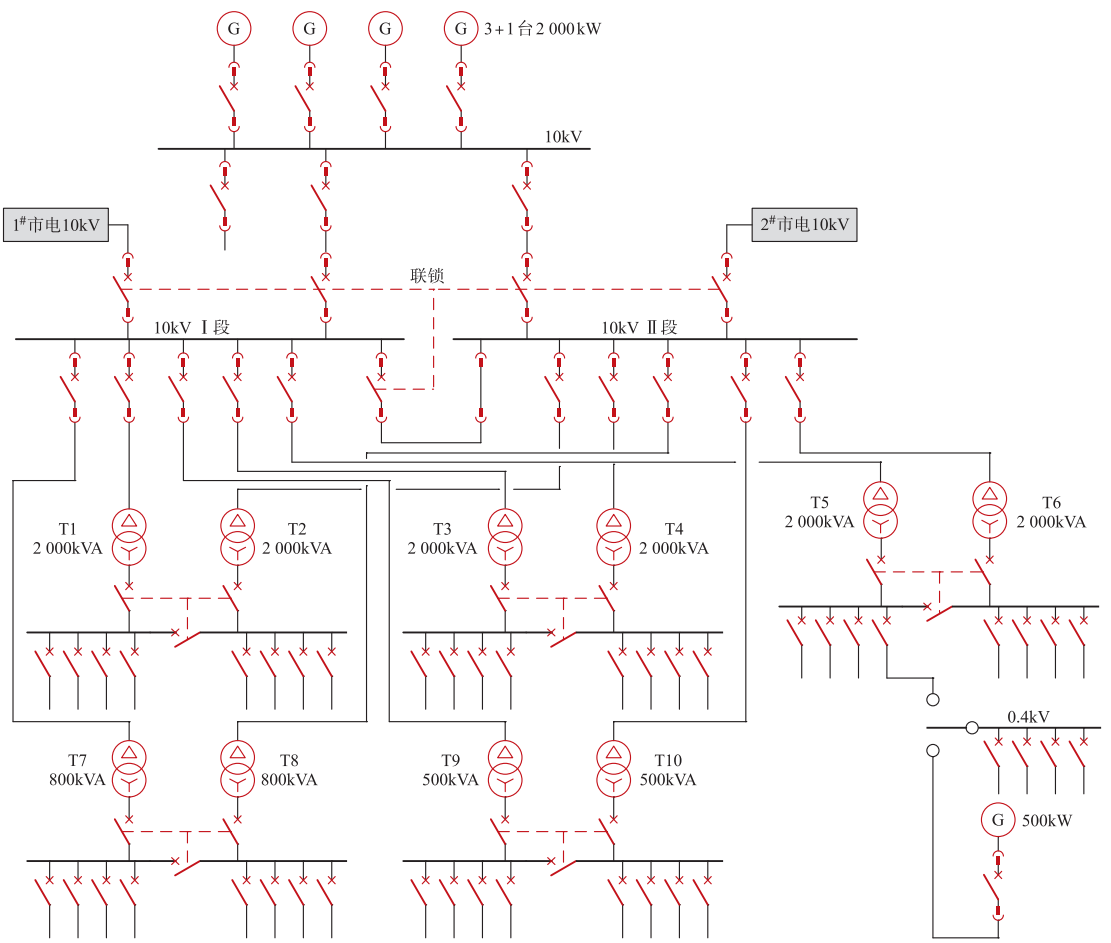


图 1　项目 A 供电方案

中国知网 https://www.cnki.net

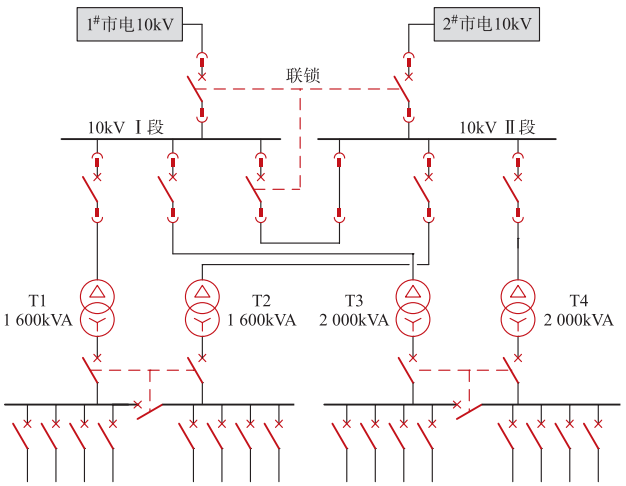


图 2　项目 B 供电方案

为 10 kV Ⅰ段或Ⅱ段母线中任一段的变压器，即全部变压器供电负荷的一半供电；低压柴油发电机组在 T5、T6 变压器对应的低压母线段均失电时，为消防负荷及非消防备用照明提供保障电源。图 1 供电方案若取消低压柴油发电机组，除变压器负载率外，其他与 A 级数据中心 2*N* 供电架构典型方案一致[6]，该方案的缺点是系统设备较多且占用空间大，前期投资较高，后期维护较困难，优点是供电可靠性高。图 2 的供电方案规避了图 1 的缺点，满足绝大多数机场货运站建筑的实际需要，为机场货运站典型供电方案之一，其缺点是供电可靠性比图 1 供电方案略低。

4　设备房设置

当机场货运站为建筑群时，分拣大楼属于整个建筑群的核心区，其内常规设备和工艺设备多，总的设备功率大，应设置变电所为本楼及其附近建筑供电，该楼一层工艺占用面积较大，变电所宜布置在其他楼层，亦可根据变压器容量及用电设备分布情况分层设置变电所；建筑群的其余建筑可在部分楼栋内设置变电所为该楼及其附近建筑供电。当机场货运站为单栋建筑时，变电所设置原则同前述分拣大楼变电所。柴油发电机房设置位置应根据供电方案确定，如图 1 的供电方案，若无其他因素制约，就节约前期投资而言，中压柴油发电机房宜设在中压配电室附近，并应设置中压柴油发电机组并机室、假负载室，柴油发电机房室外设置埋地油罐，油罐的容积应满足运营单位使用需求；低压柴油发电机房宜设在变压器 T5、T6 所在变电所附近。变电所和柴油发电机房设置的一般原则符合相关规范规定即可，不再赘述。

5　设备选择

根据 GB 55015 — 2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》[7] 第 3.3.1 条规定，变压器的能效水平应高于能效限定值或能效等级 3 级的要求，通常为考虑节能和减少后期运行成本，同时兼顾建设期投资成本，变压器能效水平不应低于能效等级 2 级的要求。鉴于目前同类型硅钢带 1 级能效变压器成本比 2 级的高约 10 % ~ 15 %，而 1、2 级能效变压器负载损耗值相同[8]，建议一般项目选择 2 级能效的变压器。根据 GB / T 2820.1 — 2022 / ISO 8528 - 1：2018《往复式内燃机驱动的交流发电机组　第 1 部分：用途、定额和性能》的规定，柴油发电机组性能等级包括 G1、G2、G3、G4 共 4 种，其中 G2 级的电压特性与公用电力系统的非常类似，即当负载发生变化时，有暂时可允许的电压和频率的偏差。机场货运站的柴油发电机组的性能等级不应低于 G2 级。柴油发电机组的功率定义较多，包括持续功率（COP）、基本功率（PRP）、限制运行功率（LTP）、应急备用功率（ESP）、数据中心功率（DCP）[9]。机场货运站的柴油发电机组，应根据市政电源的断电概率、停电时间和用电负荷的实际需求，采用 PRP 或 LTP 功率，仅为消防设备供电的柴油发电机可采用 ESP 功率。

6　配电系统

6.1　电源切换位置及回路划分

消防负荷采用双电源末端切换方式配电，非消防一级负荷及部分二级负荷（如安全防范系统、通信系统、计算机管理系统等智能化系统、变电所及柴油发电机机房用电、垂直电梯、X 光机、安检机房、冷库及生鲜用电、航空障碍照明、生活泵及潜污泵等较重要设备），宜采用双电源末端切换方式配电，其他非消防二级负荷可采用双电源首端切换方式配电，三级负荷采用单电源配电。消防和非消防负荷应分回路配电；工艺设备用电、普通负荷用电，不同负荷等级、不同用途的设备宜分回路配电，特别是变压器负载率较高时，若成组变压器中一台变压器发生故障，应切除由该组变压器供电的所有三级负荷，由另一台变压器为该组变压器供电的所有一、二级负荷继续供电，为此须将三级负荷与一、二级负荷的供电回路严格分开。

中国知网　https://www.cnki.net

6.2 配电箱布置

除防火卷帘门、挡烟垂壁、排烟窗、消防潜污泵等在设备就地设置控制箱外，其他消防设备的配电箱、控制箱、应急照明集中电源应设在电井或相应设备房内。分拣大楼楼层较高，单层面积大，且因工艺需要楼层中间不宜设置隔墙，电井或配电间一般设在建筑边沿，若配电箱集中在电井或配电间设置，一方面配电箱距末端设备控制箱较远，导致平时管理电源不便，另一方面，配电箱与控制箱间的支线较长，若采用断路器的瞬动保护兼作接地故障保护电器，因支线电缆长，回路阻抗大，接地故障发生时故障电流较小，可能导致前端断路器无法及时脱扣，短路灵敏度无法满足。鉴于前述原因，分拣大楼配电箱宜分区域集中落地或挂柱安装，负责为该区域的用电设备供电。分拣大楼属于高大空间，其普通照明配电箱宜分区设置，每个区域宜设置两台分别由不同变压器供电的配电箱，本区域普通照明灯具由这两台配电箱交叉配电。

7 结语

本文简要介绍了航空货运的特点、机场货运站的主要功能，结合项目案例重点阐述该类建筑的用电指标、需要系数、供电方案等供配电系统设计的重点及难点，供同行参考。部分运营单位对该类建筑的供电可靠性要求可能比规范要求高，有的甚至高很多，电气设计人员对此必须有充分认识，如此方可保证设计既符合规范，同时也满足实际运营需求。感谢党健在本文撰写过程中给予的大力帮助。

参考文献

[1] GB 51157—2016 物流建筑设计规范[S].
[2] 中国航空规划设计研究总院有限公司. 工业与民用供配电设计手册：上册[M]. 4版. 北京：中国电力出版社，2016：10-15.
[3] 卢伟. 物流建筑供配电系统[J]. 建筑电气，2013，32(12)：19-25.
[4] GB 50052—2009 供配电系统设计规范[S].
[5] GB 55024—2022 建筑电气与智能化通用规范[S].
[6] 邱永红，邱悦. A级数据中心空调系统供配电探讨[J]. 建筑电气，2024，43(1)：13-16.
[7] GB 55015—2021 建筑节能与可再生能源利用通用规范[S].
[8] 杜毅威. 变压器能效标准升级及选择[J]. 建筑电气，2025，44(1)：3-7.
[9] GB/T 2820.1—2022/ISO 8528-1：2018 往复式内燃机驱动的交流发电机组 第1部分：用途、定额和性能[S].

2025-06-09 来稿
2026-09-02 修回

深圳铁塔与达实物联强强联合，持续拓展智慧服务边界

2026年9月11日，中国铁塔股份有限公司深圳市分公司（以下简称“深圳铁塔”）与深圳达实物联网技术有限公司（以下简称“达实物联”）正式签署战略合作协议。双方将充分发挥各自核心业务优势，围绕智慧城市、智慧园区、智慧社区、空间物联网、数字基础设施建设等领域开展深度战略合作。

本次战略合作，是基础设施底座+数字化智能技术的强强联合。双方将发挥各自优势，聚焦三大方向协同发力：一是综合智慧能源业务，依托铁塔机房、楼宇空间，落地AI全局能耗优化、能源托管、建筑碳中和方案，挖掘存量设施节能潜力，探索碳资产开发，助力政企客户ESG建设；二是边缘算力协同落地，盘活铁塔存量机房资源，联合打造模块化边缘算力节点，面向高校科研、企业算力需求提供一体化规划、建设与长期运维服务，探索长周期闭口合同商业模式；三是物联网与数字资产运营，依托铁塔广覆盖基础设施，叠加达实AIoT平台能力，推进物联感知网络建设、数字资产运营，打造可复制的数字化标杆场景。

双方将以标杆示范项目为突破口，组建联合工作专班，快速推进试点落地。将深圳打造成为样板，形成可复制、可推广的业务模式，后续向铁塔全国体系输出经验。在做强业务创造经济效益的同时，主动践行央企社会责任，助力深圳数字基础设施升级、绿色低碳城市建设，服务新质生产力发展，实现经济效益、社会效益双赢。

下一步，双方将持续深化对接，把战略共识转化为项目落地实效，共同探索基础设施复用、节能降碳、边缘算力等新赛道，携手服务深圳数字经济高质量发展。

深圳达实物联网技术有限公司 供稿
本刊 摘编

中国知网 https://www.cnki.net

数据中心 10 kV 发电机组 LOOP 并机系统设计思路

王　群，廖　霄，李卓晖（中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司，广州市　510663）

Design Concept of 10 kV Generator Set LOOP Paralleling System for Data Centers

WANG Qun, LIAO Xiao, LI Zhuohui（China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou　510663, China）

Abstract: By analyzing the applicability of standard models in the national standard atlas *Engineering Design and Installation of Data Center*（18DX009）for 10 kV generator set parauling system of data centers under the *Code for Design of Data Centers*（GB 50174 — 2017）and the Uptime Institute framework, a 10 kV generator set LOOP paralleling system for data centers is proposed. The superiority of the LOOP paralleling system under this power supply architecture is demonstrated from multiple dimensions, including reliability and cost.

Keywords: data center; backup power supply; single-bus paralleling system; dual-bus paralleling system; LOOP paralleling system; reliability

摘　要：通过分析国标图集 18DX009《数据中心工程设计与安装》中 10 kV 发电机组并机供电系统在 GB 50174 — 2017《数据中心设计规范》和 Uptime Institute 体系下不同等级数据中心的适用性，提出数据中心 10 kV 发电机组 LOOP 并机系统，并从可靠性、成本等维度论证该供电架构 LOOP 并机系统的优越性。

关键词：数据中心；后备电源；单母线并机系统；双母线并机系统；LOOP 并机系统；可靠性

DOI：10.3969/j.issn.1003 - 8493.2026.09.004

作为数据中心供电系统的最后一道保障，后备电源的高可靠性毋庸置疑。大型数据中心后备电源[1-2]通常采用 10 kV 发电机组并机供电架构，国标图集 18DX009《数据中心工程设计与安装》[3]示出了单母线并机系统和双母线并机系统。在 GB 50174 — 2017《数据中心设计规范》[4]和 Uptime Institute 分级标准框架下，其可靠性与成本匹配是否存在最优解？本文从可靠性与成本维度探讨一种更优的解决方案——LOOP 并机系统[5]。

1　3 种 10 kV 发电机组并机系统的比较

1.1　国标图集 18DX009 发电机并机供电系统型式

基于 GB 50174 — 2017 A 级数据中心 2*N* 供电架构，国标图集 18DX009 第 31 页“10 kV 发电机组供电系统图”给出了两种并机供电系统型式[6]：

a.　型式 1：单母线并机系统。发电机组为 *N* 或 *N* + *X*（*X* = 1 ~ *N*，余同）配置，所有发电机组在一段母线上并机运行。

b.　型式 2：双母线并机系统。发电机组为 *N* 或 *N* + *X* 配置，每台发电机组出口处设置开关柜，将发电机组输入一分为二，分别在两段母线上并机运行。

1.2　型式 3：LOOP 并机系统

发电机组为 *N* 或 *N*+*X* 配置，每台发电机组出口处设置开关柜，将发电机组输入一分为二，左右手拉手、闭环并机运行，如图 1 所示。

1.3　3 种 10 kV 发电机组并机系统分析比较

a.　型式 1：单母线并机系统。这种型式采用单一母线，满足 GB 50174 — 2017 A 级数据中心供电系统备用电源要求[4]。该系统单母线并机数量越多，短路风险越大，不满足 Tier Ⅲ、Tier Ⅳ供电系统备用电源要求。

b.　型式 2：双母线并机系统。这种型式采用双母

作者信息

王　群，男，中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司，高级工程师。

廖　霄，女，中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司，基础设施部设计总工程师。

李卓晖，男，中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司，基础设施部部长。

中国知网　https://www.cnki.net

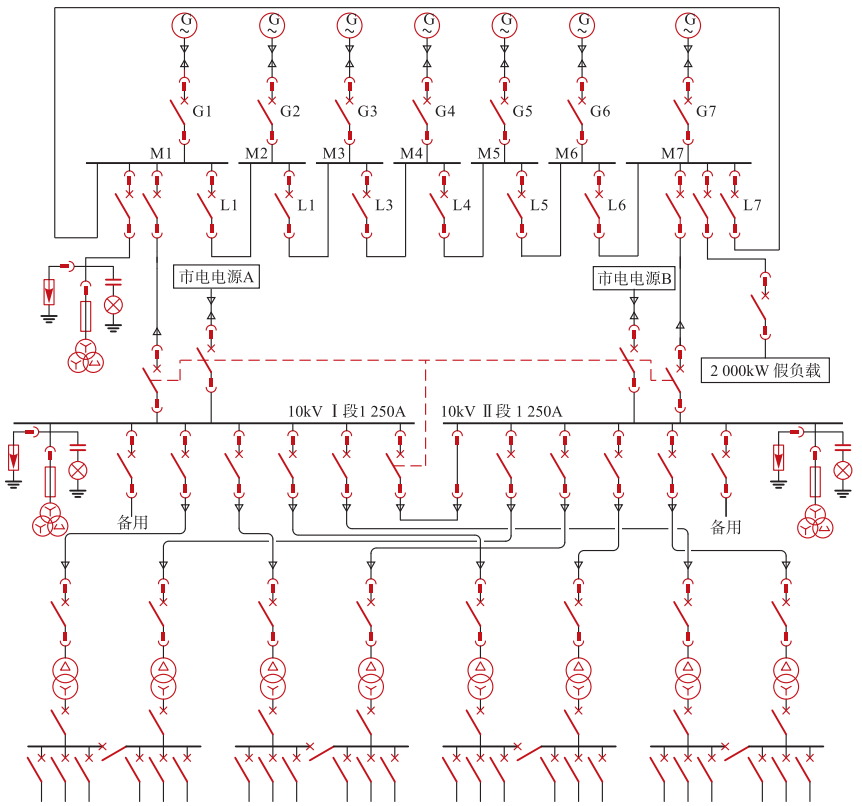


图 1　2*N* 供电架构下 LOOP 并机系统

线，满足 GB 50174 — 2017 A 级数据中心供电系统备用电源要求，同时满足 Tier Ⅲ、Tier Ⅳ供电系统备用电源要求。双母线并机系统相较单母并机线系统，提高了冗余度和可靠性，但牺牲了成本。以标准 6 + 1 发电机单母线并机系统为例，单母线并机系统需要配置 10 面开关柜，双母线并机系统需要增加 22 面开关柜，总共需要配置 32 面开关柜。

c.　型式 3：LOOP 并机系统。采用“左右手拉手闭环运行”架构，发电机组按 *N* + *X* 配置。

以 6 + 1 发电机组构成 LOOP 并机系统为例（如图 1 所示），正常运行时，发电机启动成功后按并机系统逻辑闭合 G1 ~ G7 开关，M1 ~ M7 母线得电，联络开关 L1 ~ L7 开始闭合自动组成 LOOP 结构，系统闭环运行。当单台发电机故障时，G1 ~ G7 开关触发保护，自动切除故障发电机组，系统仍按闭环运行。当 M1 ~ M7 母线发生短路故障时，闭环系统自动在故障母线处裂解；隔离故障后，系统开环继续正常运行。由以上分析可知，其可靠性远高于双母线并机系统。

成本方面，以标准 6 + 1 发电机单母线并机系统为例，单母线并机系统需要配置 10 面开关柜，双母线并机系统需要配置 32 面开关柜、两套并机控制系统，LOOP 并机系统仅需要配置 18 面开关柜、一套并机控制系统，成本上较双母线并机系统具有显著的优势。

系统可用度方面[7]，参照 ETAP 软件提供的可用度数据进行测算，分析结果详表 1。结果表明，LOOP 并机系统的可用度高于单母线并机系统和双母线并机系统。

3 种 10 kV 发电机组并机供电系统在规范适用性方面的比较详表 2。

2　LOOP 并机系统设计思路

2. 1　系统架构

a.　LOOP 并机系统采用环形母线结构，以实现多台发电机的并机运行和灵活切换。环形母线提供了

表 1　3 种并机系统可用度比较

序号	系统名称	可用度	年停电时长
1	6 + 1 单母线并机系统	99. 996 %	< 35 min
2	6 + 1 双母线并机系统	99. 998 %	< 10 min
3	6 + 1 LOOP 并机系统	99. 999 %	< 5 min

表 2　3 种 10 kV 发电机并机系统规范适用性比较[5, 7]

系统型式		发电机组配置	并机方式	GB 50174 — 2017			Uptime Institute			
				A 级	B 级	C 级	Tier Ⅰ	Tier Ⅱ	Tier Ⅲ	Tier Ⅳ
国标图集推荐	型式 1：单母线并机系统	*N* + *X*	在一段母线上并机	是	是	是	是	是	否	否
	型式 2：双母线并机系统	*N* + *X*	在两段母线上并机	是	是	是	是	是	是	是
本文提供新思路	型式 3：LOOP 并机系统	*N* + *X*	在环网上并机	是	是	是	是	是	是	是

中国知网 https://www.cnki.net

比双母线更高的可靠性，适合于 2*N*、DR 及环网供电架构[8-9]。

b. 设置同步装置，用于监测和调整发电机的频率、电压和相位，确保各台发电机能够同步运行。同步装置通常具有自动同步和手动同步功能，以满足不同的运行需求。

c. 配置断路器和隔离开关，用于实现发电机的接入和退出，以及系统的故障隔离。断路器应具备快速跳闸和可靠关合的能力，以保障系统的安全运行[9]。

d. 设置保护装置（如过流保护、过压保护、欠压保护、差动保护等），以防止发电机和系统出现故障时对设备和人员造成损害。保护装置应具有快速动作和准确判断的能力，以确保系统的安全稳定运行[9]。

2.2 控制策略

a. 采用主从控制或对等控制策略，以实现多台发电机的协调运行。主从控制策略中，通常有一台主发电机负责控制整个系统的频率和电压，其他从发电机则跟随主发电机运行；对等控制策略中，各台发电机之间相互通信和协调，共同控制系统的运行。

b. 设计自动电压调节（AVR）和自动频率调节（AFR）系统，以维持系统的电压和频率稳定。AVR 系统通过调节发电机的励磁电流来控制电压，AFR 系统通过调节发电机的调速器来控制频率。

c. 实现负荷分配功能，根据各台发电机的容量和运行状态，自动分配负荷，以确保各台发电机的负载均衡。负荷分配可以采用比例调节或积分调节等方式，以提高系统的稳定性和可靠性。

2.3 监控通信

a. 安装电力监控系统，用于实时监测发电机的运行状态，系统的电压、频率、电流等参数，以及保护装置的动作情况。监控系统应具备数据采集、处理、显示和报警功能，以便运行人员及时了解系统的运行状况。

b. 配置通信系统，用于实现监控系统与各台发电机、保护装置之间的通信，以及各台发电机之间的通信。通信系统可以采用以太网、现场总线等技术，以满足不同的通信需求。

c. 设计远程监控和管理功能，以便运行人员可以通过远程终端对系统进行监控和管理，提高系统的运行效率和可靠性。

3 结语

数据中心 LOOP 并机系统正常状态自动并机、同步闭环运行，环内发生单点故障一次自动开环运行。LOOP 并机系统可靠性显著高于双母线并机系统，成本显著低于双母线并机系统。在工程实践中，在需要考虑双母线的高可靠应用场景下，LOOP 并机系统是一种优秀的解决方案[6]。

笔者建议，在工程实践中：① 当发电机组采用单母线并机系统运行时，并机系统可靠性与并机发电机组的数量直接相关。以标准 6 + 1 发电机组并机系统为例，采用单母线并机系统，即可满足国标 A 级数据中心要求；当发电机组数量超过这个范围，多达十几台时（例如：8 + 1、10 + 1），单母线并机系统的可靠性将会显著降低。因此，建议按 *N* + *X* 发电机组数量多少来选择并机方式。当并机数量 < 8 时，仍按单母线并机系统运行；当并机数量 ≥ 8 时，建议按 LOOP 并机系统运行。② 当发电机组采用双母线运行时，无论并机机组数量多少，从可靠性和成本角度考虑，统一按 LOOP 并机系统运行[10-11]。

参考文献

[1] 钟景华．数据中心供配电系统架构及备用电源的选择[J]．建筑电气，2018，37（1）：3-7.

[2] 李国会．A 级数据中心 10 kV 发电机设计探析[J]．建筑电气，2022，41（9）：51-56.

[3] 中国电子工程设计院有限公司，中国建筑标准设计研究院有限公司．数据中心工程设计与安装：18DX009[M]．北京：中国计划出版社，2018.

[4] GB 50174—2017 数据中心设计规范[S]．

[5] Julien Moreau，Malik Megdiche，Daniel Radu．大型数据中心中压发电机供电系统架构的优化：第 262 号白皮书[R]．

[6] 晁怀颇．18DX009 国标图集 10 kV 发电机组供电系统解读[J]．建筑电气，2019，38（1）：9-13.

[7] 晁怀颇．浅析数据中心高可用供配电系统[J]．智能建筑电气技术，2019，13（6）：26-33.

[8] 黄博，贾锋泽，宋世杰，等．数据中心 RR 架构分析及应用实践[J]．建筑电气，2022，41（12）：49-55.

[9] 许京哲．市电及应急发电机联动控制逻辑设计研究[J]．智能建筑电气技术，2024，18（2）：109-112.

[10] 钟景华．中国数据中心运维管理指南[M]．北京：机械工业出版社，2016.

[11] 中国航空规划设计研究总院有限公司．工业与民用供配电设计手册[M]．4 版．北京：中国电力出版社，2016.

2025-02-28 来稿
2026-07-28 修回

中国知网 https://www.cnki.net

直流微电网在绿色建筑中的应用与经济性分析

许　奎（武汉蕃华施工图设计审查有限公司，武汉市　430050）

Application and Economic Analysis of DC Microgrids in Green Buildings

XU Kui（Wuhan Fanhua Construction Drawing Design & Review Co., Ltd., Wuhan　430050, China）

Abstract: The application scenarios, adaptability, and economic performance of DC microgrids in green buildings are investigated. Based on an analysis of the power ratings and voltage compatibility ranges of major loads such as LED lighting and DC heat pumps, distributed energy access topologies and control strategies are designed. Differentiated adaptation schemes are developed according to the characteristics of office and residential buildings, and a life cycle cost assessment framework is established. The results show that, in office buildings, a centralized energy storage system combined with a DC ring-busbar architecture can improve energy efficiency by 2 % ~ 4 %, while a distributed photovoltaic system combined with a household energy storage configuration in residential buildings can increase the proportion of self-consumption by 10 % ~ 20 %. The economic assessment indicates that, with proper configuration, the dynamic payback period of a project can be controlled within 6 ~ 8 years.

Keywords: DC microgrid; green building; adaptability analysis; economic assessment; distributed energy

摘　要： 聚焦直流微电网在绿色建筑中的应用场景、适配性及经济性展开研究。通过分析LED照明、直流热泵等主流负荷的功率等级与电压适配范围，设计分布式能源接入拓扑与控制策略，结合办公、住宅建筑特性制定差异化适配方案，并构建全生命周期成本评估框架。研究表明，办公建筑采用集中式储能+直流环网母线可提升能效2 % ~ 4 %，住宅建筑分布式光伏 + 分户储能模式能提高自发自用占比10 % ~ 20 %；经济性评估显示，合理配置下项目动态回收期可控制在6 ~ 8年。

关键词： 直流微电网；绿色建筑；适配性分析；经济性评估；分布式能源

DOI：10.3969/j.issn.1003 - 8493.2026.09.005

0　引言

随着“双碳”目标推进，绿色建筑作为低能耗、低排放的重要载体，其能源系统的高效化与清洁化转型迫在眉睫，传统交流配电系统存在多环节能量损耗、分布式能源接入兼容性不足等问题，而直流微电网凭借能效高、适配直流负荷与分布式能源等特性，逐渐成为绿色建筑能源系统的重要选择，结合GB/T 50378—2019《绿色建筑评价标准》[1]，直流微电网通过缩短功率变换链路（如直流负荷直供减少AC - DC/DC - AC转换环节）降低能源损耗，直接支撑“节能与能源利用”指标中建筑能效水平提升的要求，同时其适配分布式光伏、储能直连的特性，能提高清洁能源消纳比例，减少化石能源消耗与碳排放，精准契合“环境与资源利用”指标下的低碳发展导向[2]。鉴于此，本文围绕绿色建筑中直流微电网的应用场景特征，开展负荷侧适配性评估、分布式能源接入分析及场景差异化策略制定，并通过全生命周期成本模型评估其经济性，旨在为直流微电网在绿色建筑中的规模化应用提供理论依据与实践指导。

1　直流微电网在绿色建筑中的应用场景特征解析

直流微电网指在建筑范围内把直流母线作为电能

作者信息
许　奎，男，武汉蕃华施工图设计审查有限公司，高级工程师，电气负责人。

中国知网 https://www.cnki.net

分配核心的局部电网，依靠分层母线、功率电子接口以及能量管理策略来进行功率协调。针对典型直流负荷，以 LED 照明的恒流驱动特性作为约束，单灯模块常见 DC 30 ~ 60 V，成组后宜接入 DC 48 V 支路[3]；直流变频空调的内置母线作为直供端，参考国内外相关逆变器产品参数，常见 DC 310 ~ 380 V，直供能够绕开整流级并减少一次变换损耗；将光伏以及储能视作直流源，光伏在最大功率点多处于 DC 600 ~ 900 V，锂电储能常见 DC 200 ~ 750 V，经 DC / DC 接口耦合至建筑 DC 380 V 主母线。相较交流配电，直流形态在缩短功率变换链路、消除谐波以及无功影响、提升分布式能源直连能力方面更具优势，源荷匹配路径显著压缩[4]。在功率控制策略上，可将母线电压稳定放在一体化 EMS 统筹之下，关键设备执行下垂协同以抑制扰动引起的电压波动。结合应用场景，办公楼负荷曲线较平稳且信息设备占比高，适宜采用 DC 380 V 主母线叠加 DC 48 V 支路[5]；住宅更关注户用光伏反向上送以及晚峰削峰，宜配置小容量储能与低压直流支路；商业综合体公共照明比重大、冷站集中，需要更高额定短路能力和多端口功率调度。整体架构见图 1。

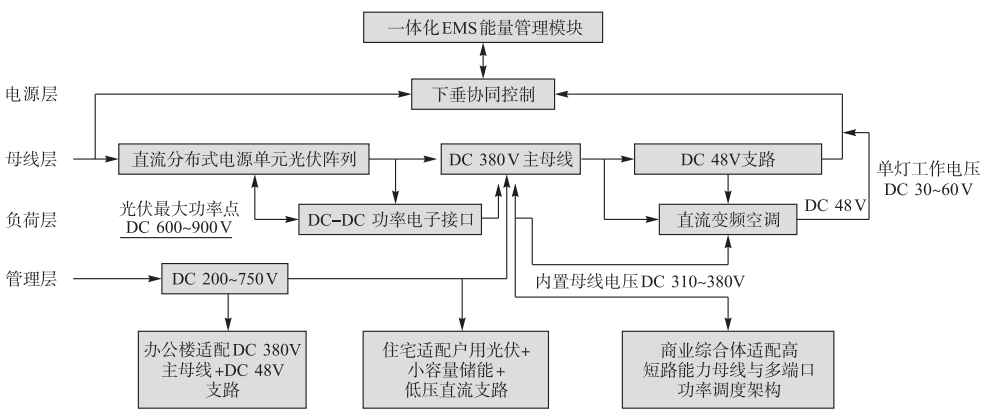


图 1　典型绿色建筑直流微电网系统架构

2　直流微电网与绿色建筑应用场景的适配性分析

2. 1　负荷侧直流适配性评估

面向绿色建筑的负荷侧直流化评估应把功率等级与电压对接作为主轴，围绕 LED 照明以及直流热泵两类主流负荷建立可量化判据，LED 照明显现恒流驱动特性，单灯 5 ~ 30 W，成组回路 100 ~ 300 W，直流驱动器输入 DC 24 ~ 60 V，适宜挂接 DC 48 V 支路[3]，恒流输出 350 ~ 1 050 mA，直供形态把整流与功率因数校正从链路中剔除，根据 LED 驱动电源厂家规格书，驱动端效率可提升至 0. 92 ~ 0. 94，低压直流导致回路电流上升，需缩短配线并提高导体截面积；直流热泵内置直流母线，功率 2 ~ 20 kW，机内母线约 DC 310 ~ 380 V，宜接入 DC 380 V 主母线以减少一级变换，制冷季部分负荷下性能系数保持更高水平。就改造费用与收益对比而言，照明侧以驱动替换及直流保护配置为主，增量投资约占原交流方案的 15 % ~ 25 %，可换取年能耗 2 % ~ 4 % 的下降，热泵侧以网侧整流旁路与直流接触器增配为主，单台投资占比更高，但长时运行能通过耗电降低对冲新增器件成本，由此推导，具备集中 DC 380 V 主母线与就近 DC 48 V 支路的建筑更契合直流化路径，关键判据与接口要点见表 1，关键判据与接口要点可固化为可实施清单[5]。

2. 2　分布式能源接入适配性协同设计

围绕分布式能源的直流特性，绿色建

表 1　绿色建筑典型负荷直流适配性参数

负荷类型	典型单元功率	接入电压范围	推荐母线层级	接口方式	关键参数	预期能效增益	改造要点
LED 照明	单灯 5 ~ 30 W；回路 100 ~ 300 W	DC 24 ~ 60 V	DC 48 V 支路	隔离型恒流 DC - DC 驱动器	输出电流 350 ~ 1 050 mA；驱动效率 ≥ 0. 92	2 % ~ 4 %	驱动更换；短支路布线；配置具直流灭弧能力的断路器与熔断器
直流热泵	2 ~ 20 kW	DC 310 ~ 380 V	DC 380 V 主母线	网侧整流旁路加直流接触器与 EMI 滤波	变频范围 20 ~ 120 Hz；母线纹波 < 5 %	2 % ~ 4 %	增设直流短路与浪涌保护；校核电缆载流量与接地措施

中国知网 https://www.cnki.net

筑的接入方案需要对电压窗口、控制模式以及保护策略进行协同设计。光伏组件经串列后适配直流母线接入，选用含最大功率点跟踪的变换装置，将功率稳定注入主母线，当母线接近上限时切入限功率或关断通道；涉及消防电气隔离时倾向高频隔离方案，常规情形可采用高效率非隔离拓扑。磷酸铁锂储能配置双向变换装置来承担恒功率充放电以及母线支撑；BMS 即电池管理系统负责单体电压与温度监测以及荷电状态估算，EMS 基于荷电状态窗口分配功率指令，使循环深度保持在可接受范围。拓扑层面，光伏侧宜多支路并联形成分段汇流，电池侧采取模块化机架并联，AC 侧配置双向 AC－DC 作为公共电网接口并保留黑启动路径。并网模式下，AC－DC 以电流内环和功率外环跟踪有功指令，母线电压由储能侧下垂控制来主导，光伏侧按照可用辐照量提供最大可用功率，同时承担谐波抑制以及直流侧低频纹波缓冲[6]。离网模式下，储能侧切换为电压型主导以维持母线稳定，光伏侧由母线电压上升触发限功率，关键负荷经直流断路器获得优先供电；当辐照量骤降或负荷突增，储能以限流启动将浪涌抑制到安全范围。功率交互兼容性取决于下垂系数、变换装置带宽以及短路开断能力的协同配置，可把光伏、储能、AC 口的下垂斜率拉开层级以获得有序分担；可靠性评估聚焦故障下母线维持、黑启动路径完整性以及消防隔离动作时间 3 项指标，从而支撑跨模式连续运行。

2.3 基于绿色建筑评价标准的场景差异化适配策略

针对不同建筑形态运行规律，差异化策略需协同配置母线层级、源荷耦合方式及能量管理，并结合 GB / T 50378 — 2019《绿色建筑评价标准》核心指标深化适配[6]：办公场景中，直流系统省去交流配电多环节变换损耗（如照明驱动少整流级、热泵少网侧整流）。假设负荷中照明占 25 %、热泵占 35 %，交流变换损耗分别为 8 %、10 %，直流系统损耗降至 2 %、4 %，综合节能率为 25 % ×（8 % － 2 %）＋ 35 % ×（10 % － 4 %）= 3.6 %（处于 2 % ~ 4 % 区间），可再生能源利用率提升至 30 % 以上（满足标准 ≥ 20 % 要求），供电可靠性达 99.99 %（符合 A 级要求）；住宅场景中，户用光伏日均发电量约 12 kWh，原交流系统无储能时自发自用占比约 40 %，配置 5 ~ 10 kWh 分户储能可存储白天富余电量 2 ~ 3 kWh 供晚峰使用，占比提升至 50 % ~ 60 %（即 10 % ~ 20 % 增幅），可再生能源利用率提升至 25 % 以上，断电时维持关键负荷 24 h 以上（符合应急供电要求），办公采用 DC 380 V 环网主母线 + DC 48 V 支路、集中储能（充放电功率取建筑峰值负荷 P_{peak} 的 0.2 ~ 0.3 倍，额定储能放电时长 1 ~ 2 h）及预冷移峰策略，住宅采用户用光伏 + 分户储能、能量路由器共享方案，落地难度分别为中等偏高与偏高[7]。

3 直流微电网在绿色建筑中的经济性评估

绿色建筑同时面临能耗强度管控与碳排放约束双重要求，直流微电网经济性评估必须立足全生命周期视角，统筹全生命周期投入与综合收益，通过成本精准核算、收益多维量化、科学建模，层层递进判定项目经济可行性，为工程落地提供严谨的量化决策依据。

3.1 全生命周期成本构成与动态回收期计算

鉴于绿色建筑强调能耗强度与碳排放双重约束，直流微电网的经济性评估需采用全生命周期成本（*LCC*）模型统筹衡量，其公式为：

$$LCC = \text{初始投资} + \text{运维成本现值} + \text{退役处置成本} - \text{残值现值} + \text{电费节约现值} \tag{1}$$

其中，初始投资包含直流母线、双向变换器、能量管理系统、储能电池及配线改造等增量成本[8]；运维成本现值包含设备维护、人工及电池更换等；退役处置成本与残值现值涉及设备拆除、环保处置及残值抵扣；电费节约现值包含能效提升、自发自用比例提升等收益，系统能效差异带来的电费增减，是区分直流与传统交流系统成本的关键。

动态回收期计算需先确定各年度净现金流量（年度收益减年度成本，收益含分时电价套利、碳减排价值等，参考文献［1］），再按绿色融资折现率 4 % ~ 8 % 计算各年净现金流量现值，累计现值后采用公式（2）进行计算：

$$P_t = T - 1 + \frac{\text{累计净现值在 } T-1 \text{ 年的值}}{\text{净现值在 } T \text{ 年的值}} \tag{2}$$

式中：P_t 为动态回收期，T 为累计净现值首次为正的年份。结合文献［9］中户用储能收益数据，合理配置下项目动态回收期可控制在 6 ~ 8 年，同时需对电池价格、碳价等关键参数进行敏感性分析以确保评估结果的稳健性。

为确保核算精准，评估选取搭载光伏、储能等设备的 1 万 m^2 A 级办公楼为标准对象，精准划定增量成本边界。具体核算时，将直流系统核心设备及改造费用列为增量投入，扣除替换常规交流设备节省的成本，核算出真实净增投资。

中国知网 https://www.cnki.net

初始增量投资约 50 万元（含直流母线、双向变换器、储能电池等），运维中电池每 5 年更换一次（单次成本 12 万元），年均运维成本（含人工）约 3 万元，电费节约收益包含：能效提升年节约电费 8 万元、自发自用年增收益 6 万元，折现率取 4 %；通过累计净现金流计算，前 5 年累计投入 77 万元、累计收益 70 万元，第 6 年收益 14 万元后累计净现金流转正，动态回收期约 6. 26 年，符合 6 ~ 8 年的范围。

3. 2　多维收益核算与科学评估方法构建

直流微电网收益具有多元性，需划分为可计量显性收益与隐含隐性价值两大类。可计量显性收益涵盖分时电价套利、需量费降低、光伏自发自用增效、碳减排与可再生能源绿色电力证书（以下简称“绿证”）交易收益及需求响应补偿，其中碳减排收益需先核算直流系统替代传统交流系统减少的化石能源消耗量，乘以对应能源的碳排放系数得到年度减排量，再乘以碳交易市场碳价计算年度收益；绿证交易收益则基于光伏等可再生能源自发自用发电量，按绿证核发标准折算成绿证数量，乘以绿证交易价格，并考虑绿证有效期与交易流通规则确定收益。隐含隐性价值包括降损电费节约与供电韧性提升的货币化价值，评估方法采用年度现金流建模，选用匹配绿色融资成本的折现率，针对电池价格、碳价等关键因素开展敏感性分析，选取净现值、内部收益率等核心指标并结合情景分析进行稳健性评估。

4　结语

本研究明确绿色建筑主流负荷直流适配参数，设计分布式能源接入拓扑与控制逻辑，提出差异化适配策略并构建全生命周期评估框架，其能效提升、自发自用占比提高等特性，符合 GB / T 50378 — 2019《绿色建筑评价标准》中节能、可再生能源利用及供电韧性等核心指标要求，为绿色建筑达标及建筑领域“双碳”目标达成提供技术支撑与决策参考。

参考文献

［1］ GB / T 50378 — 2019　绿色建筑评价标准［S］.

［2］ 唐洪伟，于涛，王玥，等． 微电网系统全生命周期经济性评估方法研究［J］. 电气技术与经济，2025（2）：10 – 12.

［3］ 袁金荣，赵志刚，姜颖异，等． 基于近用户侧直流用电电器的电压等级选择［J］. 供用电，2021，38（1）：11 – 16.

［4］ 李建标，陈建福，陈夏，等． 低压直流供用电技术在零碳建筑中的探索应用［J］. 供用电，2022，39（8）：67 – 74.

［5］ 高海力，谭建成． 直流微网技术及发展［J］. 农村电气化，2018（4）：63 – 66.

［6］ 余万荣，丁宇洁，李欢，等． 不平衡电网下储能系统直流纹波分析及抑制策略［J］. 电气传动，2021，51（5）：31 – 37.

［7］ 张虹，张泽熙，李亚洲，等． 基于分布式信息交互的微电网多智能楼宇区间滚动 P2P 电能交易策略［J］. 电工技术学报，2025，40（13）：4292 – 4305.

［8］ 韩瀛，乌聪敏． 基于直流微电网的建筑供用电系统设计与监控［J］. 现代建筑电气，2021，12（10）：26 – 30.

［9］ 杨广磊，刘臣臣，史英． 光储直柔系统在农村能源转型中的应用研究［J］. 建筑电气，2025，44（2）：56 – 60.

2026 – 01 – 27 来稿
2026 – 08 – 31 修回



中国知网　https://www.cnki.net

消防末端配电箱供电方案分析与探讨

张文华（深圳市建辰投资发展有限公司，广东省深圳市 518000）

Analysis and Discussion of Power Supply Schemes for Fire Protection Terminal Distribution Boxes

ZHANG Wenhua（Shenzhen Jianchen Investment Development Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong Province, China）

Abstract: Based on the characteristics of fire compartments in the underground parking garage of an office and commercial project, four typical power supply schemes for fire protection terminal distribution boxes are comparatively analyzed. Modeling and simulation are conducted to comprehensively evaluate the schemes in terms of power supply reliability, project cost, construction difficulty, and subsequent operation and maintenance, based on which an economical and practical power supply scheme is proposed.

Keywords: underground parking garage; fire compartment; terminal distribution box; power supply scheme; cost analysis

摘 要： 基于某商办项目地下车库的防火分区特点，对消防末端配电箱的4种典型供电方案展开对比分析，通过建模仿真，从供电可靠性、工程造价、施工难度及后期运维等方面进行综合比选，进而提出经济实用的供电方案。

关键词： 地下车库；防火分区；末端配电箱；供电方案；成本分析

DOI：10.3969/j.issn.1003－8493.2026.09.006

0 引言

在当前房地产行业追求精细化设计与成本控制的背景下，在确保工程安全可靠的前提下，实现技术方案的经济性、施工便捷性与运维可持续性已成为设计优化的核心目标。消防供配电系统作为保障建筑安全的关键环节，其方案选择需在项目全生命周期进行综合权衡[1-4]。本文以某商办项目地下车库为具体研究对象，针对防烟与排烟风机等消防设备的末端配电，依据国家相关规范，从技术可行性、经济成本、施工组织及后期运维等维度，对4种典型供电方案进行深入分析与对比，以期为类似项目的方案决策提供量化与定性相结合的优选依据。

1 项目概况

某商办项目地下四层，地下总建筑面积为2.1万m^2，每层地下室划分为两个防火分区，共计8个防火分区。自地下一层至地下四层，每个防火分区均设有上下贯通的竖向电井（兼作配电小间）。对于消防风机等消防设备的供电，GB 55037—2022《建筑防火通用规范》第10.1.6条明确规定“防烟和排烟风机房的消防用电设备的供电，应在其配电线路的最末一级配电箱内或所在防火分区的配电箱内设置自动切换装置。防火卷帘、电动排烟窗、消防潜污泵、消防应急照明和疏散指示标志等的供电，应在所在防火分区的配电箱内设置自动切换装置。”[5] 此外，GB 51348—2019《民用建筑电气设计标准》第13.7.4条第6款指出“消防末端配电箱应设置在消防水泵房、消防电梯机房、消防控制室和各防火分区的配电小间内；各防火分区内的防排烟风机、消防排水泵、防火卷帘等可分别由配电小间内的双电源切换箱放射式、树干式供电。”[6] 本文的方案设计与分析均以上述规范为依据。

作者信息
张文华，男，深圳市建辰投资发展有限公司，高级工程师。

中国知网 https://www.cnki.net

2 供电方案

根据规范要求，各防火分区内的消防设备可由配电小间内的双电源切换箱（以下简称 ATSE 箱）供电。各分区 ATSE 箱的电源引接方式有多种，本文重点分析工程中常见的 4 种供电方案：

a. 方案一（如图 1 所示）：防火分区 ATSE 箱放射式供电。在每个防火分区的配电小间设置消防 ATSE 箱，其两路电源（常用与备用）分别由地下室配电房内的两段低压母线（普通母线及消防负荷应急母线）直接放射式供电。该方案从电源端至末端 ATSE 箱无中间配电节点，各 ATSE 箱的供电电缆路径完全独立，可靠性最高。

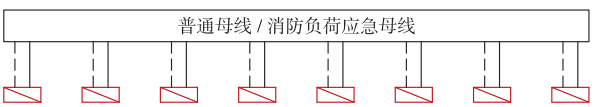


图 1 方案一

b. 方案二（如图 2 所示）：分层设置电源总箱放射式供电。在每层设置电源总箱（层总箱），其两路电源分别引自配电房的普通母线段及消防负荷应急母线段。该层各防火分区内的 ATSE 箱（主要为防排烟风机、防火卷帘、消防潜污泵、消防应急照明等可在防火分区配电箱内切换的消防设备，不包含消防控制室、消防水泵房等需在最末一级配电箱切换的消防用电设备）均由该层总箱放射式供电。此方案在配电房与末端 ATSE 箱之间增加了一级配电。根据规范对消防用电设备供电可靠性和专用回路的要求，消防负荷的供电回路应独立设置[7]，本方案中的层总箱在设计中应确保为消防专用配电箱，其进线电源引自配电房的专用消防回路，以满足消防供电的专用性要求。其设置需确保满足规范对消防配电线路可靠性和专用性要求。

c. 方案三（如图 3 所示）：防火分区竖向电井设置电源总箱放射式供电。在地下一层各防火分区的竖向配电小间内分别设置电源总箱，其两路电源直接取

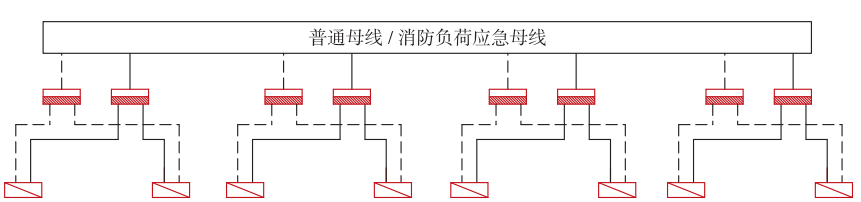


图 2 方案二

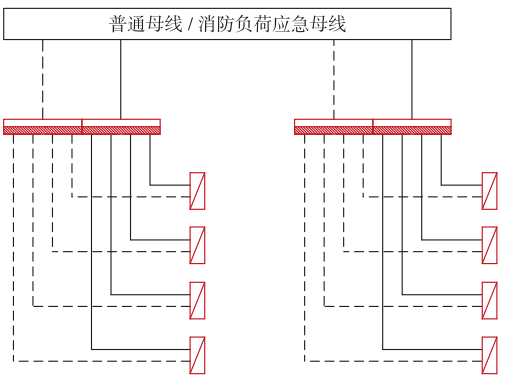


图 3 方案三

自配电房内的普通母线段及消防负荷应急母线段。该总箱作为二级配电装置，负责向本竖向电井贯穿的所有楼层所在防火分区的 ATSE 箱放射式供电。

d. 方案四（如图 4 所示）：竖向干线 T 接供电。从配电房的普通母线段及消防负荷应急母线段分别放射式引出一路主干电缆，沿竖向配电小间分别 T 接至地下一至四层。各防火分区配电小间的 ATSE 箱电源通过 T 接箱从该竖向干线上分别就近 T 接引出，为地下一层至地下四层相应防火分区的消防负荷供电。

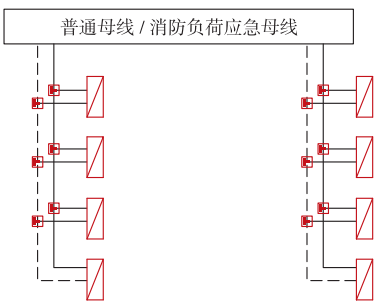


图 4 方案四

3 成本对比分析

通过建模对 4 种方案进行了量化分析，各方案建造成本差异主要集中于配电房低压柜出线保护开关、各级低压电缆、配电箱及 T 接箱等部分。分析设定以下固定边界条件：以项目地下四层、共 8 个防火分区的典型场景为基础，并假定各方案配电小间位置与主干线缆路由基本一致。在此前提下，对各方案主要设备材料的工程量及成本进行了详细统计与估算，具体数据见表 1。

中国知网 https://www.cnki.net

从表 1 数据可以看出，方案一的建造成本显著高于其他方案，这主要由于其完全放射式的供电结构导致低压出线回路最多、电缆总长度最大。方案二通过引入“层总箱”这一级配电，有效减少了从配电房引出的主干电缆数量与规格，实现了成本节约。方案三在方案二的基础上，将总箱设置于防火分区竖向电井，使放射电缆路径更短、更规整，成本进一步优化。方案四采用干线 T 接，电缆与开关总用量最少，材料成本最低，但其可靠性及运维风险需重点关注。

4 综合对比分析

消防设备供电方案的选择需统筹考量供电可靠性、工程造价、施工难度及后期运维管理等多个维度，4 种方案的综合对比如表 2 所示。

表 1 4 种供电方案主要设备材料及成本对比

比较项目	产品	规 格	数量	综合单价 / 元	总长度 / m	总价 / 元	成本统计 / 元
方案一	保护开关	MCCB / 160A / 3P	4	2 151	—	8 604	261 427. 9
		MCCB / 125A / 3P	8	1 093	—	8 744	
		MCCB / 80A / 3P	2	884	—	1 768	
		MCCB / 63A / 3P	2	884	—	1 768	
	电缆	BTTRZ – 3 × 70 + 2 × 35	—	595. 35	120	71 442	
		BTTRZ – 3 × 50 + 2 × 25	—	462. 49	295. 6	136 712	
		BTTRZ – 3 × 25 + 2 × 16	—	220. 33	81. 2	17 890. 8	
		BTTRZ – 5 × 16	—	178. 56	81. 2	14 499. 07	
方案二	保护开关	MCCB / 250A / 3P	2	2 203	—	4 406	240 114. 77
		MCCB / 200A / 3P	4	2 193	—	8 772	
		MCCB / 160A / 3P	2	2 151	—	4 302	
	电缆	BTTRZ – 3 × 120 + 2 × 70	—	929. 68	28	26 031. 04	
		BTTRZ – 3 × 95 + 2 × 50	—	628. 26	73. 4	46 114. 28	
		BTTRZ – 3 × 70 + 2 × 35	—	595. 35	83. 1	49 473. 59	
		BTTRZ – 3 × 50 + 2 × 25	—	462. 49	93	43 011. 57	
		BTTRZ – 3 × 25 + 2 × 16	—	220. 33	5	1 101. 65	
		BTTRZ – 5 × 16	—	178. 56	44	7 856. 64	
	配电总箱	—	8	6 130. 75	—	49 046	
方案三	保护开关	MCCB / 320A / 3P	4	3 512	—	14 048	174 954. 4
	电缆	BTTRZ – 3 × 185 + 2 × 95	—	1 279. 21	60. 8	77 775. 97	
		BTTRZ – 3 × 70 + 2 × 35	—	595. 35	10	5 953. 5	
		BTTRZ – 3 × 50 + 2 × 25	—	462. 49	61. 6	28 489. 38	
		BTTRZ – 3 × 25 + 2 × 16	—	220. 33	25. 2	5 552. 32	
		BTTRZ – 5 × 16	—	178. 56	17. 2	3 071. 23	
	配电总箱	—	4	10 016	—	40 064	
方案四	保护开关	MCCB / 320A / 3P	4	3 512	—	14 048	155 800. 29
	电缆	BTTRZ – 3 × 185 + 2 × 95	—	1 279. 21	89. 6	114 617. 22	
		BTTRZ – 3 × 70 + 2 × 35	—	595. 35	10	5 953. 5	
		BTTRZ – 3 × 50 + 2 × 25	—	462. 49	20	9 249. 8	
		BTTRZ – 3 × 25 + 2 × 16	—	220. 33	5	1 101. 65	
		BTTRZ – 5 × 16	—	178. 56	5	892. 8	
	T 接箱	—	12	828. 11	—	9 937. 32	

注：本案例所涉材料综合单价皆参考自项目成本预算清单，该单价已包含设备安装及相关施工措施费用。

中国知网 https://www.cnki.net

表 2　4 种供电方案综合对比分析

方　案	方案一	方案二	方案三	方案四
供电可靠性	最高。各 ATSE 箱直接从配电房双回路放射式供电，路径独立，互不影响，故障影响范围最小；配电无分级	高。分层总箱故障会影响本层所有 ATSE 箱，但双回路在总箱处已实现保障，ATSE 箱前端仍为放射式供电，可靠性较好	较高。电源总箱服务范围覆盖多个防火分区，故障影响范围较方案二略大，但仍具备较好的可靠性	较低。干线故障（尤其是 T 接点故障）会导致其后所有 ATSE 箱失电，且 T 接工艺对施工质量要求高，易成为故障点
建造成本	最高。电缆、桥架用量大，低压柜数量多，材料与安装成本显著高于其他方案	较低。主干电缆和配电房成本显著节约，层总箱的成本增加低于方案一的线缆费用，经济性较好	低。分区设置缩短放射电缆，进一步节省电缆成本，性价比较高	最低。干线电缆和开关用量最少，桥架截面积与长度最小，材料成本最低
现场施工	最复杂，工期长。电缆数量多，桥架拥挤，路径协调困难，施工工作量最大	较简单。减少了主干电缆数量，层内放射电缆较短，施工组织相对容易	简单。电源总箱位于各分区配电小间，放射线路较短、较规整，管线敷设较为便捷	最简单，工期短。干线电缆数量少、布线简洁，但 T 接需要现场制作，对工艺与检查要求高
运维管理	最清晰，但工作量大。故障点易定位，各回路独立，但配电房出线回路多、巡检路线长、界面繁杂	便于分层管理。故障可先定位至层总箱，再排查下属分支，管理责任清晰，配电房出线回路减少	便于分区管理，运维便捷。管理单元与消防责任分区一致，故障影响范围明确，利于消防联动与应急处置	不易管理，风险高。T 接点易松动、发热，属于隐蔽巡检难点，运维风险最高
综合对比	不推荐（仅适用于可靠性要求极高、预算充足的特殊项目）	良（适用于楼层功能明确、分层管理的项目）	优（适用于按防火分区严格管理的各类地下空间及大型建筑）	中（适用于成本极度敏感、且能保障高质量施工与严格运维的简易项目）

基于以上分析，对于本文所述类型的地下车库项目，方案三（防火分区竖向电井设置电源总箱放射式供电）在供电可靠性、经济性、施工便利性和运维管理方面取得了较好平衡。其核心优势在于：以防火分区为清晰的管理单元设置电源总箱，既满足了规范对分区供电可靠性的要求，又通过合理的配电级数（两级）大幅优化了电缆路径与用量，从而在控制成本的同时，带来了施工敷设的便利和后期运维界面的清晰。因此，方案三是综合推荐的优选方案。

5　结语

本文结合具体工程实例，对地下车库消防末端配电的 4 种典型供电方案进行了技术、经济、施工与运维对比分析。结论表明，采用“防火分区竖向电井设置电源总箱放射式供电”（方案三）能够较好满足现行消防规范对供电可靠性的要求，同时实现较低的建造成本、简化的施工流程，并符合以防火分区为单元的清晰、高效运维管理需求，具有较高的综合应用价值。相比之下，方案一可靠性最高但经济性最差，方案四经济性最优但可靠性及运维风险较高，在消防配电设计时需格外谨慎。方案二则介于二者之间，是分层管理项目的可行选择。在实际工程设计中，建议根据项目具体特点、可靠性要求、投资预算及运维管理模式进行审慎比选。

参考文献

[1] 李周林，梁志超．消防风机供电方案分析与探讨[J]．建筑电气，2025，44（3）：25－28.

[2] 张娜．高层办公建筑中竖向供电干线及租户配电电气方案[J]．现代建筑电气，2021（6）：42－45.

[3] 李忠良．办公与商业建筑消防配电设计优化探讨[J]．智能建筑与智慧城市，2024（S1）：65－67.

[4] 刘相前，张淑雯，张雁．基于成本管控的高层住宅项目竖向配电方案研究[J]．建筑电气，2022，41（8）：57－63.

[5] GB 55037—2022　建筑防火通用规范[S].

[6] GB 51348—2019　民用建筑电气设计标准[S].

[7] GB 50052—2009　供配电系统设计规范[S].

2026－01－13 来稿
2026－08－26 修回

中国知网　https://www.cnki.net

再探阻燃及耐火电缆的设计表达

陈　剡（成都市建筑设计研究院有限公司，成都市　610041）

Further Discussion on the Design Expression of Flame-retardant and Fire-resistant Cables

CHEN Chan（Chengdu Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Chengdu　610041, China）

Abstract: In view of the complexity of current approaches to specifying the flame-retardant and fire-resistant performance of cables used in buildings, the relevant standards that primarily affect cable flame-retardant and fire-resistant performance are analyzed. Recommendations are proposed for specifying the performance of flame-retardant and fire-resistant cables in design documents, namely, that cable specifications may be indicated in accordance with the requirements of GB 31247 — 2014 *Classification for Burning Behavior of Electric and Optical Cables*, and XF / T 306 — 2025 *Performance Requirements and Test Methods for Flame-Retardant and Fire-Resistant Electrical Cables*.

Keywords: cable; flame retardancy; combustion performance; fire resistance; insulating materials; sheathing materials

摘　要：针对目前有关建筑用电缆阻燃和耐火性能设计表达方式繁杂的情况，通过对目前主要影响电缆阻燃和耐火性能相关标准的分析，提出笔者关于阻燃和耐火电缆性能的设计表达建议，即按照GB 31247 — 2014《电缆及光缆燃烧性能分级》和XF / T 306 — 2025《阻燃及耐火电缆性能要求和试验方法》的要求标注电缆即可。

关键词：电缆；阻燃性能；燃烧性能；耐火性能；绝缘材料；护套材料

DOI：10. 3969 / j. issn. 1003 - 8493. 2026. 09. 007

0　引言

笔者上个世纪90年代参加工作时，就跟着前辈用附加汉语拼音字母（如阻燃用“Z”或“ZR”，耐火用“N”或“NH”等）方式定性表达线缆的阻燃和耐火要求。当时仅知道厂家添加了对应的添加剂，但并无意识去了解其具体材质、含量，更不知道有什么标准。因此当依据IEC标准编制、也采用拼音字母作性能代号的GB / T 19666 — 2005《阻燃和耐火电线电缆通则》（已废止）发布实施后，就自然而然地被包括笔者在内的电气设计人员所接受。所以当GB 51348 — 2019《民用建筑电气设计标准》（以下简称《民标》）发布实施的同时，替代GB / T 19666 — 2005的GB / T 19666 — 2019《阻燃和耐火电线电缆或光缆通则》也发布实施后，广大电气专业设计人员陡增困惑。

《民标》所依托的GB 31247 — 2014《电缆及光缆燃烧性能分级》由于在标准名称上没用“阻燃”“无卤”和“低烟”等术语表述，难以从文字上与之前发布的设计标准（例如JGJ 242 — 2011《住宅建筑电气设计规范》）条文要求对应，使得设计人员只好在继续使用“W”“D”“Z”等性能代号基础上增加GB 31247 — 2014中燃烧性能等级要求。广东、重庆、上海和山东等地方标准要求把上述两个标准的参数兼顾表达[1-4]。杜毅威[5]、郑宇[6]等专家解读过GB / T 19666 — 2019和GB 31247 — 2014的各项指标，其结论是它们之间并无可以简单对应的逻辑关系。因为电缆生产厂家也会按照设计文件或地方标准要求提供同时满足两个标准的产品，那么设计人员采用两者兼顾的表达方式似乎也就顺理成章了。

以常见的YJY电缆为例，笔者见到不同设计单位对于有相同低烟无卤阻燃要求的电缆表达方式至少有如下几种：① WDZB - YJY - 0. 6 / 1 kV（在设计说明中表达满足GB 31247 — 2014的要求）；② WDZB1 - YJY - 0. 6 / 1 kV；③ WDZB（B1）- YJY - 0. 6 / 1 kV；

作者信息
陈　剡，男，成都市建筑设计研究院有限公司，正高级工程师，常务副总工程师，电气总工程师。

中国知网 https://www.cnki.net

④ WDZ－YJY－B1（d1，t1）－0.6/1 kV；⑤ B1（d1，t1，a1）－WDZA－YJY－0.6/1 kV。

这种状况也印证了笔者对于当前设计环境的思考不无意义[7]。因为设计人员都不得不遵守来源不同、方法不同、参数要求不同，但又同时指导同一设计内容和产品的不同标准。这是造成设计行业“卷”的原因之一，也增加了电缆生产企业和整个社会的成本。笔者认真学习和梳理了几个标准的内容，并与多个主流电缆生产厂家的技术老总深度交流，认为在电缆的“阻燃”（或“燃烧”）和“耐火”性能要求上可以只按照《民标》所依托的 GB 31247—2014 和 XF/T 306—2025《阻燃及耐火电缆性能要求和试验方法》要求去表达，探讨如下。

1 两个标准阻燃（燃烧）性能比较

GB 31247—2014 和 GB/T 19666—2019 的“阻燃”（或“燃烧”）性能比较如表 1 所示（为行文方便，本文只讨论燃烧性能中常见的“B_1”“B_2”级电缆）。

从表 1 可以得出结论：

表 1 两个标准阻燃（燃烧）性能对比

电缆性能	GB 31247—2014	GB/T 19666—2019	结 论
“燃烧性能”与“阻燃性能”	虽然标准名称没提“阻燃”，但其“引言”中明确了“推广使用阻燃电缆及光缆……”	“燃烧特性代号”用以表达包括“阻燃”在内特征的文字代号，“燃烧性能”则表达了与上述“特征代号”相对应的试验标准和试验结果参数	文字上 GB 31247—2014“燃烧性能”等同于 GB/T 19666—2019“阻燃性能”，但参数存在差异
“阻燃”效果	① 试验方法 GB/T 18380.12（单根电缆）；② 试验方法 GB/T 31248—2014（GB/T 18380.31 成束电缆）；③ 有总热值、火灾蔓延（炭化长度）、热释放总量、产烟速率和产烟总量、燃烧滴落物以及烟密度等多个参数	① 试验方法 GB/T 18380.12（单根）和“滴落物”引燃其下方可燃物的可能性；② 试验方法 GB/T 18380.31、33～36（成束），炭化长度仅有 2.5 m 一项	① 二者对于单根和成束电缆的试验装置相同；② GB 31247—2014 关注线缆燃烧后对环境的影响，也就是对人的影响；③ GB/T 19666—2019 从电缆自身耐受能力和会否二次引燃来判断
“B_1”级烟密度（最小透光率）	试验方法 GB/T 17651.2，烟密度≥60 %	试验方法 GB/T 17651.2，“D”低烟性能≥60 %	① 烟密度试验方法和参数相同；② GB 31247—2014 的“B_1”烟密度指标与 GB/T 19666—2019 的“D”可相互替代
“B_2”级烟密度（最小透光率）	试验方法 GB/T 17651.2，烟密度≥20 %	无对应项	依据 GB/T 19666—2019 无法选择符合 B_2 级性能电缆
“B_1”“B_2”级火灾蔓延（长度）	试验方法 GB/T 18380.12，判断结论为垂直火焰蔓延≤425 mm	① 单根电缆针对不同外径采用试验方法（供火时间不同）和判断结论均按 GB/T 18380.12；② 成束根据电缆非金属含量分别采用 GB/T 18380.33～36 试验方法和判断结论	① GB 31247—2014 更简单、清晰；② GB/T 19666—2019 更严谨（复杂）
“B_1”“B_2”级对应的其他参数如总热值、热释放总量、产烟速率和产烟总量等	试验方法 GB/T 31248—2014，有对应参数	无对应试验方法和参数	依据 GB/T 19666—2019 无法选择
附加信息中的“燃烧滴落物”	① 试验方法 GB/T 31248—2014，“燃烧滴落物/微粒等级”是表达在 20 min 燃烧过程中无滴落物（d_0 级），或滴落物持续时间不超过 10 s（d_1 级）；② 针对单根和成束电缆	① 试验方法 GB/T 18380.13，在不超过 480（±2）s 的时间内“滴落物”引燃其下方可燃物的可能性；② 仅针对单根电缆	① 两者从试验方法和结果判断上来说差距较大；② GB/T 19666—2019 针对单根电缆更难以通过，但无成束的要求
附加信息中的“烟气毒性”	试验方法 GB/T 20285，燃烧时间 30 min 产生的有毒烟气不会致实验动物死亡	在无卤的基础上测试氮和硫，以及含有氮和硫时的后续燃烧析出物分析，并加以计算	① GB 31247—2014 更简单、清晰；② GB/T 19666—2019 太复杂，内容有瑕疵
附加信息中的“腐蚀性”	试验方法 GB/T 17650.2，通过电导率（a_1 级≤2.5 μs/mm，a_2 级≤10 μs/mm）和 pH 值（≥4.3）判断	① 试验方法 GB/T 17650.2（测试无卤性能）；② 试验方法 GB/T 17650.1（卤酸气体）；③ 测试方法 IEC 60684－2 中的 45.2（测试卤素含量）	① GB 31247—2014 更简单，且与 GB/T 19666—2005 相同；② GB/T 19666—2019 更严谨（复杂）

中国知网 https://www.cnki.net

a. 虽然 GB 31247 — 2014 从标准名称上只有“燃烧性能”而没提“阻燃”，但在其“引言”中就明确了“推广使用阻燃电缆及光缆”，意思还是大家传统上所说的阻燃性能。

b. GB 31247 — 2014 的燃烧性能分级完全采用 GB 8624 — 2012《建筑材料及制品燃烧性能分级》（GB 8624 — 2025 将于 2027 年 1 月 1 日正式施行）的分级标准。从 GB 31247 — 2014 所表达各项参数来说，有总热值、火灾蔓延（长度）、热释放总量、产烟速率和产烟总量以及烟密度等多个主要参数，以及燃烧滴落物 / 微粒等级、烟气毒性等级和腐蚀性等级几个附加参数。很明显像其他建筑材料或制品一样，GB 31247 — 2014 关注在建筑物内敷设线缆燃烧时对环境的负面影响，间接关注了对可能处在同一环境中人的影响。而 GB / T 19666 — 2019 相同或相类似的燃烧性能指标，主要用以指导不同场合使用要求下电缆非金属材料的添加。

c. GB 31247 — 2014 对电缆的材质未提出任何要求，只须按其相关试验标准所测试的各主要指标和附加指标符合对应级别即可。而 GB / T 19666 — 2019 除了标注“低烟”性能指标与 GB 31247 — 2014 的 B_1 级一致以外，其他的指标如“无卤”和“低毒”则完全是通过对电缆非金属材料的测试确定，其测试过程严谨、细致但繁琐。其实这里面的部分测试可以由电缆厂家通过对其所采购的原材料自行进行，属于生产过程的一部分，设计人员可以学习了解。

d. GB 31247 — 2014 依托的燃烧方法标准既有单根试验标准（如 GB / T 18380.12），也通过 GB / T 31248 — 2014《电缆或光缆在受火条件下火焰蔓延、热释放和产烟特性的试验方法》采用了 GB / T 18380.31，并在此试验装置基础上增加了试验设备以测试诸如燃烧耗氧量、二氧化碳生成量、气体体积流量和烟气透光率等参数。这样在同一个标准体系覆盖下完成包括单根电缆和成束电缆的燃烧试验，设计人员可以不用再考虑 GB / T 19666 — 2019 的成束燃烧指标（尽管两个标准在参数上存在差异）。

2 对于电缆阻燃性能的表达思路

《民标》第 13.8 节和第 13.9 节分别对于一些特定场所采用消防和非消防电缆时的燃烧性能指标作了要求。对于之前发布尚有效的标准中那些性能要求，又该怎么去理解和处理呢？

从表 2 可以看出，再用之前的拼音代号已经不能满足 GB 31247 — 2014 要求。但反之，在“无卤”这个性能要求上，可以在 GB 31247 — 2014 附加腐蚀性等级指标上反映出来。所以，设计人员只要依据《民标》所示场所，按照 GB 31247 — 2014 完整表达电缆型号规格和其燃烧性能等级以及附加信息等级（GB 31247 — 2014 第 5.1.2 条要求燃烧性能为 B_1 级和 B_2 级的电缆应表达附加指标信息），厂家自然会根据设计要求采用不含卤素绝缘层和护套层电缆基础上添加其他非金属材料去满足。

在选择 YJY 电缆时，是否其绝缘层和护套层不含卤素就是“无卤”电缆？其实 GB / T 19666 — 2019 之所以在 2005 版基础上增加了“卤素含量”和“卤酸气体释出量”两个指标，就是因为电缆在生产中除了绝缘层和护套层外，尚有填充层材料，以及阻燃剂、增塑剂、润滑剂、抗氧剂等多种添加剂。这些添加剂的具体材质并非设计人员所熟悉，必须靠测试才行；同时各厂家针对同样的燃烧性能指标，对于如 YJY 电缆所添加的非金属材料种类和比例有较大差别。

表 2 两个标准关于阻燃性能指标对比

电缆性能	GB 31247 — 2014	GB / T 19666 — 2019	结论
阻燃“Z”	包含炭化长度、滴落物和其他燃烧性能的多个参数，可根据《民标》等确定的场所类别选用 A、B_1 或 B_2 级	仅有炭化长度和滴落物两项指标，且炭化长度无法满足 GB 31247 — 2014 “B_1” 级燃烧性能参数要求	采用 GB 31247 — 2014 标准可完全覆盖 GB / T 19666 — 2019 阻燃“Z”指标
低烟“D”	有“B_1”和“B_2”级燃烧性能	“D”仅含等同 GB 31247 — 2014 的“B_1”级燃烧性能	简单依据 GB / T 19666 — 2019 无法选择符合“B_2”级燃烧性能电缆
无卤“W”	未专门提及，但通过同 GB / T 19666 — 2005 腐蚀性指标表达	在 GB / T 19666 — 2005 基础上增加“卤酸气体释出量试验”和“卤素含量”测试	GB / T 19666 — 2019 针对性测试内容增加，但依然描述为“非金属材料卤素含量均很少，燃烧产物的腐蚀性和毒性较低”
低毒“U”	附加属性 t_0、t_1“低毒”试验方法标准为 GB / T 20285，且与 GB / T 19666 — 2019 第 3.5 条“低毒”术语内容对应	“毒性指数”测量和计算严谨但复杂，且未见与第 3.5 条“低毒”术语对应内容	GB / T 19666 — 2019 有瑕疵，可采用 GB 31247 — 2014“低毒”指标

中国知网 https://www.cnki.net

GB / T 19666 — 2019 仅仅是对常用的添加剂进行了针对性测试，设计人员完全可以按照 GB 31247 — 2014 去表达建筑物内使用电缆的要求，也不必关心具体的电缆材质特别是主材以外添加的材质。

GB / T 19666 — 2019 第 3.5 条关于“低毒”定义的描述为“燃烧时产生的毒性烟气的毒效和浓度不会在 30min 内使活体生物产生死亡的特性”。这种解释和 GB / T 20285 相同，但整个 GB / T 19666 — 2019 后续内容中都没有和这个定义相关联的任何内容。在其第 6.5 节中，除排除了卤素外，似乎过于精细地表达了可能造成窒息或毒害的几种气体的临界浓度、试管测定方法和燃烧释出物分析方法，以及最后的毒性指数计算公式。这种得出毒性指数 ≤ 5 才算低毒性能的过程，是 GB / T 19666 — 2019 采用其他标准的方法，估计也是针对电缆行业使用材料中大概率会遇到的情况。这虽严谨但太过复杂繁琐，且与 GB / T 19666 — 2019 中对于“低毒”的定义没有逻辑关系，笔者认为这是 GB / T 19666 — 2019 的瑕疵。

前已述及，GB 31247 — 2014 针对单根电缆和成束敷设电缆，其试验的结论要求是一样的。对于《民标》第 13.9.2 条所提到的“不能满足阻燃要求”的理解，就可以认为因为“受非金属含量限制”，是“不满足 GB 31247 — 2014 的要求”的原因，也可以和该条条文解释中提到的“选择（换成）燃烧性能为 A 级的电缆”对应。

虽然 GB 31247 — 2014 和 GB / T 19666 — 2019 主要采用的试验装置相同，但其参数和评判依据来源不同。GB / T 31248 — 2014 在前言明确其采用的是欧盟标准 EN 50399：2011《电缆在受火条件下的通用试验方法　电缆在火焰传播试验中的热释放和产烟特性测试　试验装置、程序和结果》（英文版），且依据《中华人民共和国标准化法》，GB 31247 — 2014 有强制性属性，设计和产品均应满足其要求。而 GB / T 19666 — 2019 为推荐性标准，当不将它作为设计依据、也不按照其性能代号表达电缆时，是可以不用执行的。

值得欣慰的是，陕西省 2025 年 5 月开始执行的地标[8] 对于燃烧性能，已经只要求按照 GB 31247 — 2014 表达。

3 “耐火”性能

相较于 GB / T 19666 — 2005，GB / T 19666 — 2019 多了 830 ℃ 耐火温度和 120 min 时间要求，但依然缺乏满足 950 ℃ / 180 min 要求的电缆规定。要满足多个地方设计标准中对电缆 950 ℃ / 180 min 的要求，依据 GB / T 19666 — 2019 还是无法选择对应的电缆。

XF / T 306 — 2025 有两个特点：一是在“阻燃”性能上完全等同 GB 31247 — 2014；二是对于“耐火”性能，在保留原有 750 ℃ 基础上，并没有采用 830 ℃，而是坚持了对于 950 ℃ 的温度要求。而且 XF / T 306 与 GB 31247 — 2014 一样是针对建设工程，部分解决了笔者当初的期盼[9]，同时冯军[10] 提到的耐火电缆试验方法国家标准 GB / T 47322 — 2026《建筑火灾升温条件下电缆耐火性能试验方法》于 2026 年 10 月 1 日正式实施[11]。

表 3 对比了 XF / T 306 — 2025、GB / T 19666 — 2019 和 T / ASC 6002 — 2021《消防用电线电缆耐火性能试验方法》“耐火”代号的表达。

4 有关电缆非金属含量及 GB / T 19666 — 2019 中“ZA”“ZB”“ZC”“ZD”的正确理解

笔者注意到，多年来部分地方标准和行业标准对于

表 3　不同标准关于“耐火”代号的表达

温度/℃	燃烧时间和其他参数	XF / T 306 — 2025 代号	GB / T 19666 — 2019 代号	T / ASC 6002 — 2021 代号
750	纯供火	NIV	N	—
830	90 min，纯供火	—	—	—
	120 min，纯供火	—	NJ	—
	120 min，供火 + 喷水	—	NS	—
	90 min，供火 + 机械冲击 + 喷水			NH6
	120 min，供火 + 机械冲击 + 喷水			NH5
	180 min，供火 + 机械冲击 + 喷水	—	—	NH4
950	90 min，供火 + 机械冲击 + 喷水	NⅢ	—	NH3
	120 min，供火 + 机械冲击 + 喷水	NⅡ	—	NH2
	180 min，供火 + 机械冲击 + 喷水	NⅠ	—	NH1

有燃烧试验标准支撑

中国知网 https://www.cnki.net

GB / T 19666 — 2019 中有关成束阻燃性能的理解，是根据场所（如人员密集程度）等条件来选择符合对应燃烧试验级别代号（如“ZA”“ZB”）的电缆，这是不正确的：

a. “ZA”“ZB”“ZC”“ZD”并非燃烧级别的高低强弱关系，仅仅与同路径电缆成束后非金属含量总和相关（文献[10]也持此见解）。

b. 设计选用单根电缆时，仅表达“Z”即可；采用 GB 31247 — 2014 后，不表达“Z”也无妨。

c. 按照 GB / T 19666 — 2019 第 6.1.2 条要求，对于不同部位成束敷设的电缆，先计算其非金属含量之和，再按照“ZA”~“ZD”对应试验标准进行燃烧试验作验证。比如某一路径成束敷设的所有电缆计算出来其非金属材料体积总计达到 3.5 L / m，就应采用 GB / T 18380.34（如供火时间 40 min）判断是否满足“ZB”级要求。如不能达到要求，则应改变敷设方式、减少成束电缆的数量以降低其非金属含量后再行测试，或改换“A”级电缆。采用 GB 31247 — 2014 后，不再表达“ZA”~“ZD”没有任何问题。

d. 不同厂家对于相同规格电缆的外径差距较大，且 XF / T 306 — 2025 第 5.1.2 条和第 5.2.2 条明确了阻燃和耐火电缆的外径允许供需双方协商确定，这使得设计人员不易准确把握。以阻燃 YJY - 0.6 / 1 kV - 1（4 × 50 + 1 × 25）电缆为例，表 4 汇总了不同地方标准的外径、非金属含量和对应成束代号的电缆根数。

电缆的绝缘层、护套层、填充层及外护套等大量使用非金属材料，对这些非金属材料的选择和使用，是电缆生产厂家为满足其使用场所包含阻燃、耐火在内的性能要求而不懈努力的工作内容。

又比如设计大量使用的 YJY 电缆，其自身阻燃性能有限，设计标注了“WDZ”等信息，或是仅仅表达要求其满足 GB 31247 — 2014 相应参数，厂家都会采用各种非金属（含高分子）辅助材料作为添加剂。添加结果会使其燃烧性能、耐火性能以及外径等参数与原来纯粹的“YJY”有较大偏差。至于添加剂里是否含卤素、是否低烟、是否有毒等，都按照 GB 31247 — 2014 对应试验方法进行测试即可得出结论。

表 4 不同地方标准对于 YJY - 0.6 / 1 kV - 1（4 × 50 + 1 × 25）电缆外径、非金属含量和对应成束代号的电缆根数

标准编号	外径 / mm	非金属含量 /（L / m）	ZA 根数	ZB 根数	ZC 根数
DBJ / T 15 - 226 — 2021	27.7	0.378 6	18	9	4
DBJ50 / T - 164 — 2021	27.7	0.378 6	18	9	4
DG / TJ 08 - 2048 — 2024	33.4 / 29.6	0.650 7 / 0.462 8	11 / 16	6 / 8	—
DB37 / T 5056 — 2025	33.4 / 29.6	0.650 7 / 0.462 8	11 / 15	5 / 8	2 / 3

5 结论

综上所述，笔者认为设计人员可以只依据 GB 31247 — 2014 和 XF / T 306 — 2025 的要求标注电缆。比如满足原有规范要求的“低烟、无卤、阻燃”场所选用电缆时，针对《民标》中的“其他场所”，如选择 YJY 电缆时，可依据 GB 31247 — 2014 表达为“B_2（d_1、t_1、a_2）- YJY - 0.6 / 1 kV - 1（5 × 16）”；而对于需要满足火灾延续时间 180 min 要求选择柔性矿物绝缘耐火电缆时，则可以表达为“A - NI - RTTZ - 0.6 / 1 kV - 1（4 × 70 + 1 × 35）”。

参考文献

[1] DBJ / T 15-226 — 2021 民用建筑电线电缆防火技术规程[S].

[2] DBJ50 / T - 164 — 2021 民用建筑电线电缆防火设计标准[S].

[3] DG / TJ 08 - 2048 — 2024 民用建筑电线电缆防火设计标准[S].

[4] DB37 / T 5056 — 2025 民用建筑电线电缆防火设计标准[S].

[5] 杜毅威. 民用建筑阻燃电缆型号标注问题探讨[J]. 建筑电气，2024，9（43）：3 - 8.

[6] 郑宇. 民用建筑阻燃线缆特性分析与应用[EB / OL].（2021 - 12 - 24）[2025 - 08 - 10]. https：// mp.weixin.qq.com / s / N75b5BmC _ qrAoCziMGisQw.

[7] 陈剑. 当前设计标准环境及其对策思考[J]. 建筑设计管理，2023，40（8）：8 - 14.

[8] DB 61 / T 5056 — 2025 民用建筑电气线路防火设计标准[S].

[9] 陈剑. 民用建筑耐火电缆选择应注意的问题[J]. 建筑电气，2022，12（41）：18 - 22.

[10] 冯军. 阻燃电缆及耐火电缆标准现状及发展趋势分析[EB / OL].（2025 - 12 - 15）[2026 - 08 - 15]. https：// mp.weixin.qq.com / s / 4sj5mnQWDrrkqb0U8qj9ZQ.

[11] 国家防火建材质检中心. 一图读懂丨建筑火灾升温条件下电缆耐火性能试验方法（GB / T 47322 — 2026）[EB / OL].（2026 - 04 - 09）[2026 - 08 - 15]. https：// mp.weixin.qq.com / s / TYbmpQC3pduaM2PNVyIigQ.

2025 - 08 - 11 来稿
2026 - 09 - 08 修回

中国知网 https://www.cnki.net

排烟防火阀联动停风机的解决方案

魏明艳，廖　昕，谢雪梅（深圳市建筑设计研究总院有限公司，广东省深圳市　518000）

Solutions for Linkage Shutdown of Exhaust Fans by Smoke Exhaust Fire Dampers

WEI Mingyan, LIAO Xin, XIE Xuemei (Shenzhen General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Shenzhen　518000, Guangdong Province, China)

Abstract: In response to code requirements for linkage shutdown of exhaust fans at the temperature of 280 ℃ by smoke exhaust fire dampers installed on main exhaust ducts, branch main ducts, and branch ducts, the priority of linkage control among smoke exhaust fire dampers and smoke exhaust dampers is clarified based on the HVAC concept of a "single fire point". Two solutions are proposed: direct hardwired interlocking and interlocking via fire protection modules through an automatic fire alarm system. The two solutions are compared in terms of circuit diagram standardization, cost, failure rate, and construction and maintenance difficulty. The solution using fire protection modules for interlocking is recommended.

Keywords: smoke exhaust fan; make-up air fan; module interlocking; smoke exhaust fire damper; smoke exhaust damper; smoke control zone

摘　要：针对规范对总管、支干管、支管排烟防火阀在 280 ℃ 时自行关闭和联动关闭风机的要求，结合暖通专业"单着火点"理念，明确各排烟防火阀与排烟阀的联动控制优先级。提出"硬线"直接连锁与经消防模块通过火灾自动报警系统联锁两种方案，并从电路图标准化程度、成本、故障率、施工维护难度等方面进行比选，推荐采用经消防模块联锁的方案。

关键词：排烟风机；补风机；模块联锁；排烟防火阀；排烟阀；防烟分区

DOI：10.3969/j.issn.1003－8493.2026.09.008

排烟系统是建筑火灾防控的核心组成部分，其运行可靠性直接影响火灾现场的烟气控制效果与人员疏散安全，而排烟防火阀联动关闭排烟风机及补风机的控制逻辑，是防止带火烟气或高温烟气蔓延、避免火灾扩大的关键环节。

随着消防规范的迭代更新，GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》[1]（以下简称《火规》）和 GB 51251—2017《建筑防烟排烟系统技术标准》[2]（以下简称《烟规》）对排烟防火阀联动控制的要求出现差异；GB 55036—2022《消防设施通用规范》[3]（以下简称《通规》）则明确了联动要求，却凸显出相关国家标准图集 16D303－2《常用风机控制电路图》无法适配新规范的问题——原有电路图难以实现支干管、支管防火阀联动停风机，且多防烟分区系统中，排烟阀启动风机与防火阀停止风机的优先级逻辑缺失，易引发控制混乱。

为解决上述规范理解分歧与实践技术痛点，保障排烟系统在火灾场景下的精准、可靠运行，本文首先梳理各规范核心要求与行业争议点，再结合工程实践分析联动控制优先级，最终提出两种联动解决方案并进行比选，旨在为建筑消防排烟系统的设计、施工及规范落地提供清晰指引与可行路径。

1　现有规范条文的不同理解

a.　根据《火规》，排烟系统中仅排烟风机入口处总管上设置的 280 ℃ 排烟防火阀在关闭后直接"硬线"连锁（特指 280 ℃ 排烟防火阀 KH 的无源触点经 2 芯通信

作者信息

魏明艳，女，深圳市建筑设计研究总院有限公司，高级工程师，电气副总工程师。

廖　昕，男，深圳市建筑设计研究总院有限公司，教授级高级工程师，电气总工程师。

谢雪梅，女，深圳市建筑设计研究总院有限公司，教授级高级工程师，电气副总工程师。

中国知网　https://www.cnki.net

线直接接入风机控制箱内的 DC 24V 控制回路）控制排烟风机停止，但未对相应的补风机进行连锁停机。

b. 《烟规》对于排烟系统风机的联动功能做了不同要求，除风机入口总管上的排烟防火阀连锁风机外，其余支干管、支管上的排烟防火阀也应具有连锁风机的功能。

对此，设计、审查、验收等相关单位出现了不同理解，有理解认为电气联动控制应遵循《火规》相关要求，有理解认为应当以最新的《烟规》控制要求为准，广东省勘察设计协会针对争议点曾回复：应以《火规》的相关规定为准执行[4]。

因此，大部分设计还是保留了仅风机入口总管上的 280 ℃ 排烟防火阀熔断连锁关闭停止风机的做法，不同的是在《火规》基础上，增加了排烟防火阀连锁补风机的功能，且均采用“硬线”连锁方式。支干管、支管上的排烟防火阀并未设计连锁风机。

c. 《通规》响应了《烟规》中的相关条文；为防止带火烟气或高温烟气通过支干管、主管蔓延到其他区域，扩大火灾危险；排烟系统除总管上的排烟防火阀外，支干管、支管上的排烟防火阀均应具有在 280 ℃ 时自行关闭和联锁关闭相应排烟风机、补风机的功能。

2 实践需求痛点

国家标准图集在建筑电气设计领域发挥了全面且高效的指引作用，但《通规》实施后，图集中排烟及补风机的控制电路图并不能满足支干管、支管上排烟防火阀联动关闭风机的功能：当风机处于自动控制状态，某一防烟分区着火时，排烟系统风机经消防模块联动启动后，系统无法通过消除启动的触发信号来实现关闭风机的功能。

规范不仅要求总管、支干管、支管上的排烟防火阀熔断关闭时均能联动停止风机，同时要求任一排烟阀或排烟口开启时，相应的排烟风机、补风机均应能联动启动。如图 1 所示，当一套排烟系统服务于多个防烟分区时，主管、支干管、支管上的排烟防火阀与支管上的排烟阀数量繁多，这就要求风机存在多次启停的可能性，并不同于原来启停控制仅需一次就能满足要求，因此排烟阀启动风机与各个排烟防火阀停止风机之间存在优先控制逻辑，此部分也亟待解决并需应用于风机控制电路图中。

当排烟主管内烟气温度达到 280 ℃ 时，烟气中已带火，此时应停止排烟，否则烟火扩散到其他部位会造成新的危害，因此主管上的排烟防火阀应具有最高控制优先级，其熔断关闭连锁停止风机，其他支管上的排烟阀开启时，不应再启动风机[5]。

当着火防烟分区支管或支干管上的排烟防火阀在 280 ℃ 熔断连锁关闭风机时，若其他防烟分区支管上的排烟阀开启，风机是否需要再次启动以及风机启停的优先级如何考虑是需要探讨的问题。

3 联动控制优先级的探讨

为了减少对排烟区的干扰和分流，也为了防止烟气蔓延到非着火区，《烟规》5.2.4 条要求，担负两个及以上防烟分区的排烟系统，应仅打开着火防烟分区的排烟阀或排烟口，其他防烟分区的排烟阀或排烟口应呈关闭状态（即仅考虑单点着火）。但规范同时提到，对于净高为 6 m 及以下的场所，应按同一防火分区内任意两个相邻防烟分区排烟量之和的最大值考虑。也就是设备排烟量可按 2 个最大防烟分区考虑，但着火点仅考虑一个防烟分区。

笔者通过多方征询了解到，暖通专业虽不考虑不同防烟分区同时着火情况，但不排除火灾蔓延到相邻防烟分区，当相邻防烟分区因为蔓延的火灾烟气引发火灾探测器报警时，火灾自动报警系统会自动联动相邻防烟分区的排烟阀打开，此时排烟系统会同时担负 2 个或以上防烟分区的排烟。

那么着火点所在防烟分区、相邻防烟分区，以及其

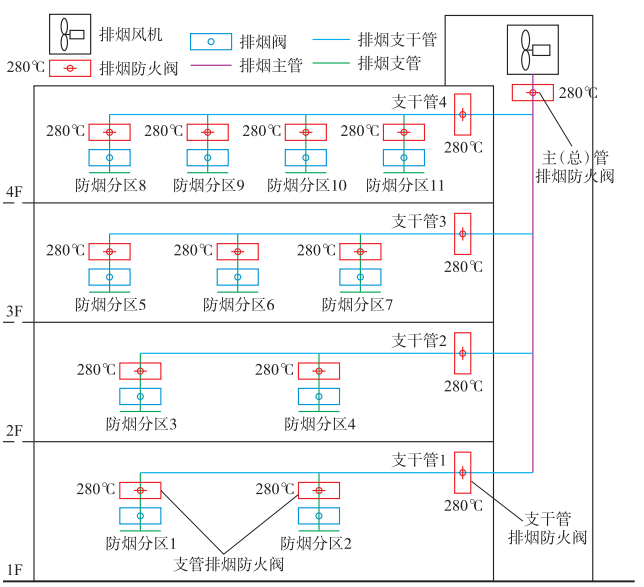


图 1 排烟系统示意[5]

中国知网 https://www.cnki.net

支干管上的排烟防火阀和各个防烟分区支管上的排烟阀就会存在动作的先后顺序和优先级控制；结合暖通专业单点着火的理念，联动控制优先级可根据 2 种阀门动作的先后顺序按如下原则考虑（以图 1 首层为例）：

a. 当防烟分区 1 着火，该防烟分区火灾探测器报警，触发对应支管上的排烟阀开启，消防联动控制器联动控制风机启动，同时其他防火分区及防烟分区的排烟阀仍呈关闭状态。

b. 当防烟分区 1 支管上的排烟防火阀在 280 ℃熔断时，连锁关闭对应的排烟及补风机。

c. 若此后火灾蔓延到相邻防烟分区 2，对应分区支管的排烟阀开启后，开启信号应优先于防烟分区 1 支管上排烟防火阀的关闭信号，此时风机仍能启动；即相邻防烟分区排烟阀的启动信号优先级高于着火防烟分区的关闭信号。

d. 而支干管 1 上排烟防火阀的关闭信号应优先于本层各个防烟分区排烟阀的开启信号，即支干管上排烟防火阀熔断关闭风机后，其所负担的任何防烟分区排烟阀开启，风机均不启动。

e. 风机入口总管上的排烟防火阀应具有最高优先控制权，其熔断连锁关闭风机后，其他任何防烟分区排烟阀开启，风机均不再启动[5]。

4 解决方案

为了响应《通规》要求，排烟防火阀在 280 ℃熔断关闭时，联动停止对应的排烟风机和补风机有两种方式可选择：① 排烟防火阀直接通过“硬线”连锁；② 经消防模块通过火灾自动报警系统联锁[7]。

4.1 方案 1

方案 1 通过“硬线”连锁控制，此方案无需经过火灾自动报警系统，排烟防火阀熔断信号经通信线直接接入风机控制箱。如图 2 所示，为更好地理解，图 2 中防烟分区支管及支干管基于图 1 示意图中的数量为例说明，由于篇幅有限，本示意图仅表达了与排烟防火阀以及排烟阀联动控制相关的电路图。依据本文第 3 章的控制优先级，此电路的控制逻辑为：

a. 当防烟分区 1 着火 → 对应支管的排烟阀开启 → 继电器 KAq1 触发得电 → KAq1 常开触点闭合 → KAf1 继电器得电并自保持 → KAf1 常开触点闭合 → QAC 线圈得电 → QAC 常开触点闭合 → 风机主回路通电启动风机。

b. 当防烟分区 1 支管的排烟防火阀 280 ℃熔断关闭 → KAz1 继电器线圈得电 → KAz1 常闭触点断开 → KAf1 继电器线圈失电 → KAf1 触点断开 → QAC 线圈失电 → QAC 触点断开 → 风机主回路失电停机。

c. 若相邻防烟分区 2 因火灾蔓延引发火灾探测器报警 → 防烟分区 2 支管的排烟阀开启 → 继电器 KAq2 触发得电 → KAq2 常开触点闭合 → KAf2 继电器得电并自保持 → KAf2 常开触点闭合 → QAC 线圈得电 → QAC 常开触点闭合 → 风机主回路通电启动风机，即着火防烟分区的排烟防火阀熔断连锁关闭风机后，相邻防烟分区支管排烟阀开启时，风机仍能启动。

d. 当支干管 1 的排烟防火阀 280 ℃熔断关闭 → KAzg1 继电器线圈得电 → 对应本支干管所带防烟分区 1 和防烟分区 2 控制回路中的 2 个 KAzg1 常闭触点断开 → KAf1 和 KAf2 继电器均失电 → KAf1 和 KAf2 触点断开 → QAC 线圈失电 → QAC 触点断开 → 风机主回路失电停机，此时支干管 1 所服务的防烟分区 1 和防烟分区 2 任何排烟阀开启，风机都无法启动，即支干管排烟防火阀动作的优先级高于其支管上任一排烟阀的动作信号。

以上控制逻辑以图 1 示意图中首层的 2 个防烟分区为例，其他楼层防烟分区控制逻辑同理。

由此可见，“硬线”连锁控制的优点在于不受火灾自动报警系统故障因素和电源中断的影响，控制逻辑由电路图中的继电器实现，可靠性更高，但缺点也显而易见：

a. 每套排烟系统的排烟风机和补风机用于接收启动信号的消防模块和继电器、用于直接接收 KH 熔断信号的继电器、用于启动控制功能的继电器均需要与防烟分区一一对应，另外还需要增加用于接收支干管上 KH 熔断信号的继电器；以图 2 为例，当一套排烟系统服务 4 个楼层（4 个支干管）、11 个防烟分区时，排烟风机或补风机相较于传统风机电路需要增加 2 × 11 + 10 + 4 = 36 个继电器及其接触器，增加 10 个消防模块，不仅增加了制造成本，且继电器、接触器接点多，故障率也大大提高。

b. 风机控制电路图不能标准化，电路图的变量受制于排烟系统所担负的防火分区（楼层）和防烟分区数量；对产品制造商和设计要求提高，更容易出差错。

c. 控制逻辑复杂，由于电路图的非标准化，每一套排烟系统的控制逻辑可能都不一样，同一套排烟系统不同防火分区（楼层）的控制逻辑也不一样。

d. 在设计图中，所有排烟防火阀均需设计连锁“硬线”引至对应排烟风机及补风机，施工难度增加且布线成本高，从而增加故障点、降低了可靠性。

中国知网 https://www.cnki.net

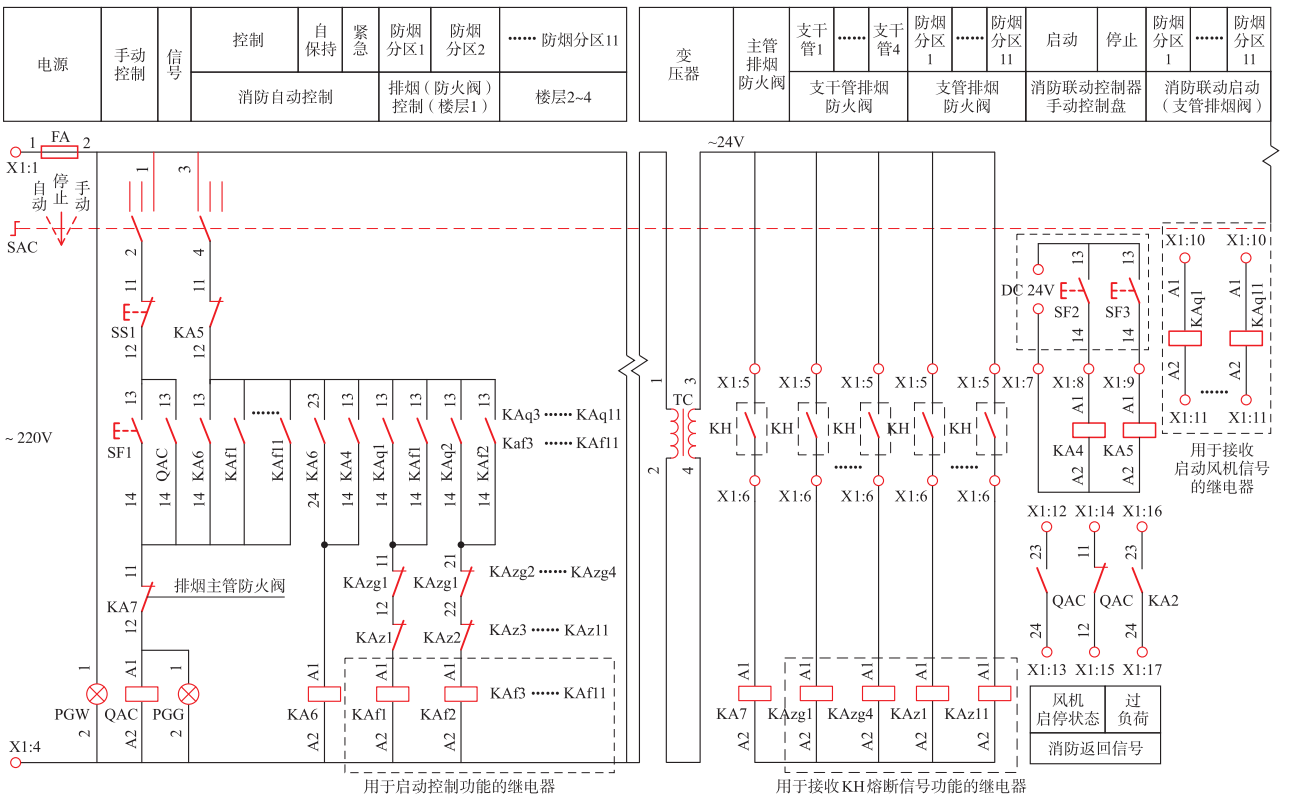


图 2　排烟风机经防火阀连锁控制电路[8]

4.2　方案 2

方案 2 经消防模块通过火灾自动报警系统联锁[7]，此方案将火灾自动报警主机的停机控制指示以 DC 24V 有源输出信号的形式传输至风机控制箱，只需要在原标准图集电路图中增加一个专门用于接收关闭风机信号的“KA8”继电器，如图 3 所示，排烟防火阀熔断关闭的动作信号作为排烟风机停止的联动触发信号，由消防联动控制器联动控制风机的关闭，此时的控制电路逻辑为：继电器 KA8 线圈得电 → KA8 常闭触点打开→继电器 KA6 线圈失电 → KA6 触点断开 → 交流接触器 QAC 线圈失电 → QAC 触点断开 → 风机主回路断电停止风机。

此方案的实施基于消防联动模块均应提供 DC 24V 脉冲信号的前提，若提供有源连续信号，消防联动控制器的手动启动功能将会失效，当系统发出停机信号 → 消防模块提供 DC 24V 有源连续信号 → KA8 继电器线圈持续得电 → KA8 常闭触点持续断开 → 按下手动控制盘 SF2 启动按钮 → KA4 线圈得电 → KA4 常开触头闭合，由于 KA8 触点持续保持断开，控制回路依然处于断开状态，因此风机主回路无法通电开启。

方案 2 的控制电路图仅增加了一个 KA8 继电器线圈和接触器，并且可以做到标准化设计，控制逻辑由消防联动控制器进行编程即可，减少了设计、产品制造商、施工单位的成本及工作量，同时也减少了故障率。

4.3　方案对比（如表 1 所示）

由表 1 可知，方案 1 虽然不受火灾自动报警系统故障和电源中断的影响，直接由连锁“硬线”通过控制电路的继电器完成风机的停止功能；但是电路中复杂的控制逻辑和繁多的继电器接点也在一定程度上拉高了故障率；同时增加了许多连锁“硬线”，导致成本、施工难度增加，以及故障排查、维护困难。

除此之外，当方案 1 中风机由消防联动控制器手动开启后，排烟防火阀连锁关闭风机的功能将会失效，只能手动关闭风机；而方案 2 完善了此处缺陷，在保证消防联动控制器手动控制优先级的情况下，手动控制与系统联动控制的功能互不影响，提高了系统的可靠性。故方案 2 更适合实际工程应用。

5　结语

首先，结合暖通专业“单着火点”理念与工程实

中国知网 https://www.cnki.net

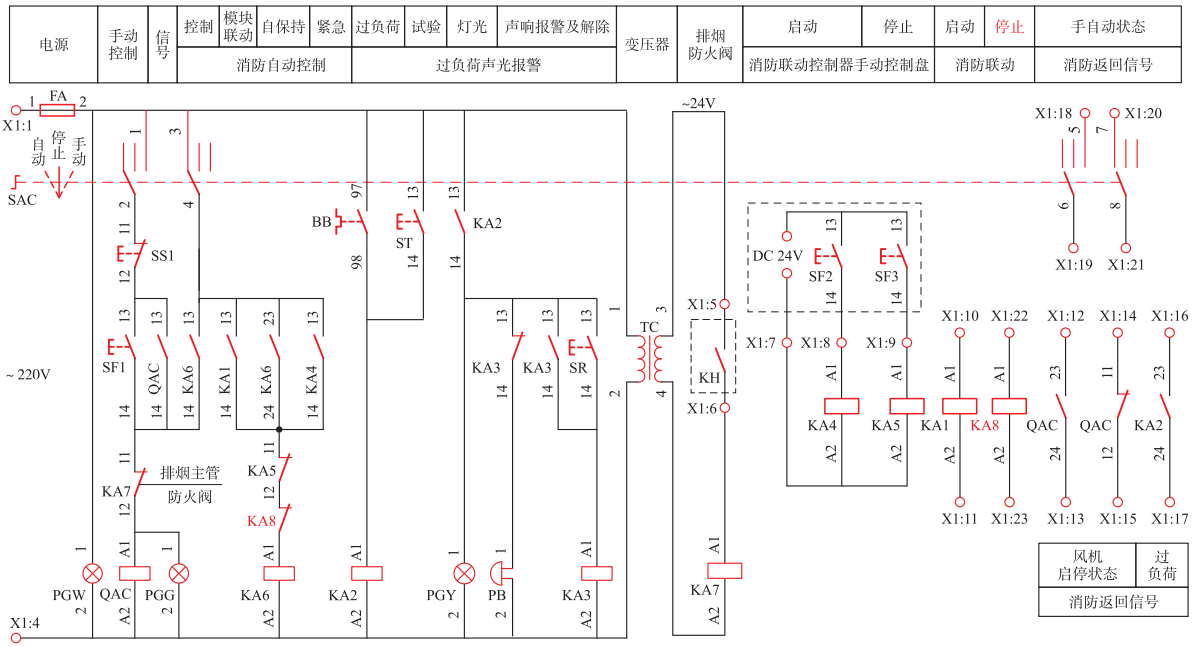


图 3　排烟（补）风机经消防模块联锁控制电路[8]

表 1　方案优缺点对比

方案	方案 1（硬线连锁）	方案 2（系统联锁）
控制逻辑	由继电器完成	由消防联动控制器编程实现
控制电路图	不能标准化设计，控制电路图中接点繁多复杂	可以标准化设计，相比原标准图集仅增加一个接点
接线	接线复杂，所有排烟防火阀均需分别设计连锁“硬线”至排烟风机和补风机；每个防烟分区的排烟阀 / 口均需设置联动启动风机的消防模块并相应增加通信线	接线简单，相比原设计仅增加一个用于联动停风机功能的消防模块及 2 芯通信线即可
施工及维护	施工难度增加，维护困难，故障点多	施工维护相对简单、故障点较少

践，明确了联动控制优先级规则：风机入口总管排烟防火阀优先级最高，其熔断停风机后任何排烟阀开启均不重启；其次为支干管排烟防火阀，其动作后所负担防烟分区排烟阀开启无法启动风机；支管排烟防火阀优先级最低，相邻防烟分区排烟阀开启信号可优先于其关闭信号，确保火灾蔓延时排烟系统仍能有效工作。

在此基础上，提出“硬线连锁”与“经消防模块通过火灾自动报警系统联锁”两种解决方案，通过对比控制逻辑、控制电路图标准化程度、接线复杂度、成本及故障率可知，后者仅需新增 1 个 KA8 继电器即可实现标准化设计，大幅减少布线成本与施工难度，降低故障点，更适配通规要求与工程实际，故作为推荐方案。

最后需强调，排烟防火阀联动停风机功能的规范落地，需电气专业与暖通专业协同明确控制逻辑、落实硬件设计，同时联动风机控制箱及火灾自动报警系统生产商配合实现技术落地。本文研究成果可为建筑消防排烟系统的设计优化、施工简化及运行可靠性提升提供实践参考，助力解决行业在规范执行中的技术痛点，保障建筑火灾场景下排烟系统的精准控烟作用。

参考文献

[1] GB 50116—2013　火灾自动报警系统设计规范 [S].

[2] GB 51251—2017　建筑防烟排烟系统技术标准 [S].

[3] GB 55036—2022　消防设施通用规范 [S].

[4] 广东省工程勘察设计行业协会．广东省工程勘察设计行业协会关于印发《建筑防烟排烟系统技术标准》问题释疑的通知 [EB/OL]. [2018-12-10]. https://www.gdkcsj.com/newsinfo_2_1847.html.

[5] 徐建兵，郭东．排烟防火阀联动控制消防风机的措施探讨 [J]. 建筑电气，2023，42（10）：8-14.

[6] 中国建筑标准设计研究院．《火灾自动报警系统设计规范》图示：14X505-1 [M]. 北京：中国计划出版社，2014.

[7] 广东省住房和城乡建设厅．广东省建设工程消防设计审查疑难问题解析 [EB/OL]. [2023-04-12]. http://zfcxjst.gd.gov.cn/attachment/0/518/518519/4152699.pdf

[8] 中国建筑标准设计研究院．常用风机控制电路图：16D303-2 [M]. 北京：中国计划出版社，2016.

2025-09-09 来稿
2026-08-28 修回

中国知网　https://www.cnki.net

GB 17945—2024 对消防应急照明集中电源选型的影响

王俊嵇[1]，王　亮[2]
（1. 四川省建筑设计研究院有限公司，成都市　610000；2. 国网攀枝花供电公司，四川省攀枝花市　617000）

Impact of GB 17945—2024 on the Selection of Centralized Power Supplies for Fire Emergency Lighting

WANG Junji[1], **WANG Liang**[2]（1. Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu　610000, China; 2. State Grid Panzhihua Power Supply Company, Panzhihua　617000, Sichuan Province, China）

Abstract: The impact of GB 17945—2024 *Fire Emergency Lighting and Evacuation Indicating System* on the selection of centralized power supplies is analyzed. A market survey of newly certified centralized power supply products is conducted in conjunction with relevant design codes and standards. The results show that centralized power supplies with lithium-ion batteries are mainly suitable for short-duration, low-power applications, while those with lead-acid batteries have a wider range of applications. In some engineering scenarios, the available product specifications are limited, and the time-related requirements between product standards and engineering design standards still require further clarification. During engineering design, relevant product parameters should be verified, and manufacturers are advised to improve the corresponding product specifications.

Keywords: fire emergency lighting; centralized power supply; minimum initial continuous emergency operating time; rated capacity; battery type

摘　要： 分析 GB 17945—2024《消防应急照明和疏散指示系统》对集中电源选型的影响，结合设计规范、标准对新认证的集中电源产品进行市场调查。结果表明：锂离子蓄电池集中电源主要适用于短时、小功率场景，铅酸蓄电池集中电源适用范围更广泛；部分工程场景下可选产品规格受限，产品标准与工程设计标准之间的时间口径仍需进一步明确。工程设计时应校核产品相关参数，生产企业宜完善相应产品规格。

关键词： 消防应急照明；集中电源；最小初装持续应急工作时间；额定容量；蓄电池类型
DOI：10.3969/j.issn.1003－8493.2026.09.009

0　引言

GB 17945—2024《消防应急照明和疏散指示系统》明确了集中电源最小初装持续应急工作时间和额定容量上限[1]，其额定输出功率不能仅由所配接的灯具负荷确定，还需综合考虑蓄电池类型及适用场所所需持续应急工作时间；同时，还需验证现有产品供给能否满足设计需求。本文建立不同蓄电池类型的“时间—功率”关系模型，并结合认证产品的市场调查，以常见民用建筑场景为例，提出面向工程设计的选型建议。

1　集中电源理论选型分析

GB 17945—2024 规定了集中电源额定容量上限，根据不同场所所需持续应急工作时间，应分别计算其最大理论功率 P_{max}，本文按下式分析：

$$P_{max} = E / T \quad (1)$$

式中：E 为集中电源额定容量；T 为最小初装持续应急工作时间。

分别代入锂离子蓄电池集中电源额定容量上限 0.5 kVAh、铅酸蓄电池集中电源额定容量上限 5 kVAh，得到表 1、表 2。

作者信息
王俊嵇，男，四川省建筑设计研究院有限公司，工程师。
王　亮，男，国网攀枝花供电公司，工程师。

中国知网 https://www.cnki.net

表 1　锂离子蓄电池集中电源的时间 — 功率关系

t_1 / min	t_2 / min	$t = t_1 + t_2$ / min	$T = 2t$ / min	P_{max} / kVA	工程设计选型适用性
30	0	30	60	0. 50	适合短时、小功率或非集中控制型系统场景
30	15	45	90	0. 33	
30	30	60	120	0. 25	适合小功率或非集中控制型系统场景
60	0				
60	30	90	180	0. 167	工程适用性较弱

注：t_1 为备用电源连续供电时间，由建筑类型确定[2]；t_2 为集中控制型系统主电源断电后的灯具持续应急点亮时间[3]，由设计确定，其作用是为避免建筑物内人员恐慌，有效辅助人员安全疏散和应急处置[4]，山东省、广东省的设计审查相关文件给出了 t_2 不小于 10 min 的要求或建议[5-7]；t 为适用场所所需持续应急工作时间，集中控制型系统按 $t = t_1 + t_2$ 确定，非集中控制型系统按 $t = t_1$ 确定。

表 2　铅酸、镉镍、氢镍蓄电池集中电源的时间 — 功率关系

t_1 / min	t_2 / min	$t = t_1 + t_2$ / min	$T = 3t$ / min	P_{max} / kVA	工程设计选型适用性
30	30	60	180	1. 67	集中电源设置于电井时，首先受到 GB 51309 — 2018《消防应急照明和疏散指示系统技术标准》规定的 1 kW 上限限制
60	0				
60	30	90	270	1. 11	
90	10	100	300	1. 00	达到 5 kVAh 上限，理论上可以选用 1 kVA 型号
90	30	120	360	0. 833	宜选用 0. 8 kVA 及以下型号

综合以上表格分析，可得到以下集中电源理论选型建议：

a.　锂离子蓄电池集中电源受 0. 5 kVAh 的额定容量上限制约，对其功率影响明显。适合短时、小功率、非集中控制型系统场景。在集中控制型系统中，只能选用 0. 3 kVA 以下的型号。

b.　铅酸蓄电池集中电源额定容量上限并非在所有场景下都构成选型限制。仅在 $t_1 + t_2 > 90$ min 时，需适当降低功率或限定 t_2 的取值。

2　消防认证产品的市场调查

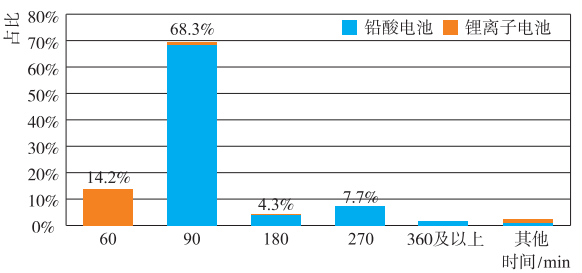
2. 1　调查对象与统计方法

为验证理论推导是否能反映实际产品供给，笔者对集中电源市场供给情况进行了调查，以中国消防产品信息网（https：// www. cccf. com. cn /）公示的采用新标准认证的集中电源产品为样本进行统计。截至 2026 年 6 月 11 日，共收集了 171 个厂家的产品认证信息 939 条。将额定输出功率、额定输出电压、额定容量、最小初装持续应急工作时间、电池配置作为要点统计产品信息。

2. 2　样本总体特征分析

调查统计结果显示，目前集中电源产品基本形态是“铅酸电池 + A 型 + 集中控制型 + DC 36V + 90 min”，共有 574 条，占总体的比重为 61. 1 %。分项看铅酸电池 783 条（83. 4 %），A 型 912 条（97. 1 %），集中控制型 929 条（98. 9 %）。

如图 1 所示，从最小初装持续应急工作时间的产品分布看，90 min 的集中电源产品是当前的主力规格。



注：90 min 锂离子电池 1. 1 %；180 min 锂离子电池 0. 2 %；其他锂离子电池 1. 2 %。

图 1　集中电源不同初装应急工作时间分布

如图 2 所示，从额定功率的产品分布看，主要分为 ≤ 0. 3 kVA、0. 31 ~ 0. 6 kVA、0. 61 ~ 1. 0 kVA 三档，产品数量分布均匀。

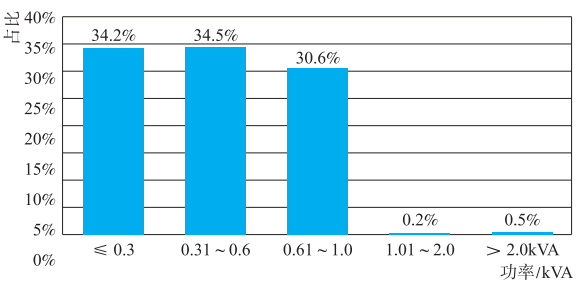


图 2　集中电源不同功率段产品分布

2. 3　产品特征分析

2. 3. 1　锂离子蓄电池集中电源产品特征

在统计样本中，采用锂离子蓄电池的集中电源额定功率最大为 0. 5 kVA，且仅有集中控制型集中电源。

中国知网　https://www.cnki.net

统计结果如表 3 所示。

由表 3 可见，锂离子蓄电池集中电源最小初装持续应急工作时间为 60 min 的产品占据绝对主流。在工程设计中若计入 t_2，则可选的最大功率产品型号为 0. 3 kVA。

2. 3. 2　铅酸蓄电池集中电源产品特征

在统计样本中，主要功率集中在 0. 3 kVA、0. 5 kVA、0. 6 kVA、1 kVA，占比为 86 %。还有极少量的 B 型或非集中控制型铅酸蓄电池集中电源。由于样本规格较为分散，选取有代表性的功率型号统计结果如表 4 所示。

由表 4 可见，铅酸蓄电池集中电源产品规格分布更均衡，既能满足各种负荷需求，也能适应持续应急工作时间较长的工程场景，可作为工程设计首选。

2. 4　市场调查小结

通过对消防认证集中电源产品的统计可以看出，当前产品供给具有较为明显的集中化和标准化特征。现有产品开发主要围绕 A 型集中控制型系统展开。

其中 T = 90 min 产品数量占比最多，为 70 %；T = 60 min 的产品全部为锂离子蓄电池；额定输出功率分布均匀，0. 3 ~ 1 kVA 功率的产品均有充分的覆盖。铅酸电池产品数量多、适用范围广，可以作为工程设计首选型号。

调查同时发现，部分认证产品的额定容量标注方式存在差异，少部分厂家以集中电源所使用的蓄电池组容量作为集中电源的额定容量进行标注。在本次样本反映出的认证实践中，以额定输出功率与最小初装持续应急工作时间的乘积确定额定容量是采用比例较高的认证口径。

表 3　锂离子电池集中电源不同时间 — 功率组合的认证产品数量分布

P / kVA	认证产品数量				备　注
	60 min	90 min	120 min	180 min	
0. 1	10	0	0	0	适用于短时且小容量场景
0. 15	13	3	4	2	适用于小容量场景
0. 2	12	0	1	0	当 t_2 取 30 min 时可选
0. 25	7	0	1	0	
0. 3	45	7	0	0	反推 t_2 可取 15 min
0. 45 / 0. 48	8	0	0	0	—
0. 5	43	0	0	0	此型号无法兼顾 t_2 取值

注：依据设计规范，对不同时间规格产品的适用场所及对应时间参数进行判定：60 min 产品适用于非集中控制型系统；90 min 产品对应 t_1 = 30 min、t_2 = 15 min；120 min 产品对应 t_1 = 30 min、t_2 = 30 min；180 min 产品对应 t_1 = 1 h、t_2 = 30 min。

表 4　铅酸电池集中电源不同时间 — 功率组合的认证产品数量分布

P / kVA	认证产品数量					备　注
	90 min	180 min	270 min	360 min	540 min	
0. 15	21	3	1	1	0	适合小容量场景
0. 2	20	0	0	0	0	
0. 3	129	9	10	1	2	可作为工程设计主要选型
0. 5	143	6	13	2	1	
0. 6	73	4	12	2	0	
0. 8	6	1	0	1	0	360 min 的产品为 B 型、非集中控制型
1	216	13	32	1	0	1 kVA、360 min 产品额定容量超 5 kVAh，证书有误

注：依据设计规范，对不同时间规格产品的适用场所及对应时间参数进行判定：90 min 产品适用于非集中控制型系统；180 min 产品对应 t_1 = 30 min、t_2 = 30 min；270 min 产品对应 t_1 = 60 min、t_2 = 30 min；360 min 产品对应 t_1 = 90 min、t_2 = 30 min。

3　综合分析及应用建议

3. 1　综合分析

将理论分析与市场调查结果进行对照，可以发现市场供给情况大体与理论计算一致，但还存在一些偏差：

a.　集中电源产品类型与理论适用场景存在偏差。根据理论分析，锂离子蓄电池集中电源适用非集中控制型系统场景。在非集中控制型系统场景中，理论最大功率可达 0. 5 kVA，在同样的工况下采用铅酸蓄电池所需的电池容量是锂离子蓄电池的 1. 5 倍，使用锂离子蓄电池能降低产品成本。但样本统计显示，锂离子蓄电池集中电源无非集中控制型产品。

b.　最小初装持续应急工作时间（T）与持续应急工作时间（t）换算的偏差。样本统计显示，T = 60 min 的产品均为锂离子蓄电池，T = 90 min 的产品占据市场主导地位且多数为铅酸蓄电池，这两种型号占据市场主流，但均无法满足设计文件中 t_2 的需求。分析其中的规律不难发现，当 t_1 = 30 min 时，按 $t = t_1$ 来换算，60 min、90 min 恰好分别对应锂离子蓄电池和铅酸蓄电池的最小初装持续应急工作时间换算要求。经过与业内厂家沟通确认，大多数生产者并未考虑设计文件中确定的 t_2 取值，并且 GB 17945 — 2024 第 5. 7. 8 条也将 t 取值为 30 min 的倍数，而 t_1 = 30 min 是当前最

中国知网 https://www.cnki.net

广泛、建筑数量最多的场景，其市场需求最大，从而使得 T = 90 min 的产品成为市场主流。

其次 GB 51309 — 2018 附录 E 的“集中控制型系统功能调试、检测、验收”章节中，对于系统初装容量的验收要求并未按正文第 3.2.4 条第 6 款规定计入 t_2，而是按 3.2.4 条第 1 ~ 4 款所规定的持续工作时间的 3 倍验收。这便使得设计文件中确定的 t_2 并未纳入产品生产、工程验收。

这些偏差反映出市场产品供给与设计文件的脱节，产品生产、工程验收对设计文件要求的 t_2 取值关注不足。同时，也有厂家反映部分项目设计文件仅引用规范原文即 $t_2 \leqslant 30$ min，这使得 $t_2 = 0$ 的解释成为可能，也提醒设计师需明确给出设计取值，以免引起误读。

3.2 工程设计中集中电源的选型建议

理论分析及市场调查均表明在 GB 17945 — 2024 实施后，锂离子蓄电池集中电源受到了极大的限制，市场调查过程中也有厂家反馈，锂电池行业乱象增加了其使用风险。GB 17945 — 2024 对锂离子蓄电池集中电源 0.5 kVAh 额定容量上限的限制，可理解为通过限制单台设备的储能规模，降低电池故障可能造成的火灾后果。笔者建议仅在持续应急工作时间较短、负荷较小且便于安全管理的场景选用锂离子蓄电池集中电源。由于 B 型及非集中控制型系统应用场景较少，故本文不再展开分析。

本文根据现有产品规格，按 A 型、集中控制型系统提出以下选型建议，并给出所选型号能配接的灯具最大功率[4, 8]：

a. 建筑高度大于 100 m 的民用建筑集中电源选型建议见表 5。

b. 建筑高度不大于 100 m 的医疗建筑，老年人照料设施，总建筑面积大于 100 000 m²的公共建筑和总建筑面积大于 20 000 m²的地下、半地下建筑集中电源选型建议见表 6。

c. 其他建筑（除城市轨道交通工程、交通隧道、水利水电工程）集中电源选型建议见表 7。

3.3 产品开发与标准实施建议

a. 建议厂家完善集中电源产品规格体系。建议厂家在执行产品标准时，同时关注设计文件的需求，完善产品规格体系使产品参数更好地匹配工程设计、审查和验收需求。

表 5 t_1 为 90 min 的民用建筑集中电源选型建议

可选蓄电池类型	t_1	t_2	最大可选型号	最大配接灯具功率
铅酸蓄电池	90 min	≤ 30 min	0.6 kVA	480 W

表 6 t_1 为 60 min 的民用建筑集中电源选型建议

可选蓄电池类型	t_1	t_2	最大可选型号	最大配接灯具功率
锂离子蓄电池	60 min	≤ 30 min	0.15 kVA	120 W
铅酸蓄电池	60 min	≤ 30 min	1 kVA	800 W

表 7 t_1 为 30 min 的民用建筑集中电源选型建议

可选蓄电池类型	t_1	t_2	最大可选型号	最大配接灯具功率
锂离子蓄电池	30 min	15 min	0.3 kVA	240 W
锂离子蓄电池	30 min	30 min	0.25 kVA	200 W
铅酸蓄电池	30 min	≤ 30 min	1 kVA	800 W

b. 建议相关标准明确衔接口径。建议通过标准解释、实施指南或相关技术文件等，进一步明确产品标准与设计标准之间的衔接口径，以免留下不同解释空间导致设计与产品脱节。

建议修正 GB 51309 — 2018 附录 E 中规定的系统初装容量为持续工作时间 3 倍的验收要求。初装容量可按不同类型蓄电池衰减系数[4] 确定，或按产品标准要求 —— 锂离子蓄电池初装容量按 2t 确定，铅酸蓄电池初装容量按 3t 确定，并根据正文第 3.2.4 条第 5 ~ 6 款计入 t_2，避免验收阶段与工程设计、产品生产采用不同换算口径。

4 结语

GB 17945 — 2024 实施后，消防应急照明集中电源的选型应综合考虑产品最小初装持续应急工作时间、蓄电池类型、额定容量上限及市场产品供给情况。铅酸蓄电池集中电源具有不同功率档位完整、产品数量多、适用范围广等优势，可作为 A 型集中控制型系统的主要选型对象。

由于目前产品生产和验收过程中对设计文件要求的 t_2 取值覆盖不足，能满足设计文件需求的 t_1 = 90 min、t_2 = 30 min 的产品仅个别厂家有相关型号。设计单位应首先在设计文件中明确 t_1、t_2 的取值，生产企业、验收环节也宜关注 t_2 是否计入产品参数，避免设计选型、产品供给与验收要求之间出现脱节。需要注意的是“功率换时间”的方式具有一定的局限性[8]，且 GB 17945 — 2024 已将“最小初装持续应急工作时

中国知网 https://www.cnki.net

间”作为产品认证的关键参数，设计师在选型时应将产品认证信息作为依据，不宜再仅通过降低实际配接负荷以满足更长持续工作时间的要求。

本文结论受现行标准衔接口径和认证产品样本时限限制，若后续标准解释、验收要求或产品规格发生调整，相关选型建议仍需结合新的执行依据重新校核。

参考文献

［1］ GB 17945 — 2024 消防应急照明和疏散指示系统［S］.

［2］ GB 55037 — 2022 建筑防火通用规范［S］.

［3］ GB 51309 — 2018 消防应急照明和疏散指示系统技术标准［S］.

［4］《消防应急照明和疏散指示系统》编委会．消防应急照明和疏散指示系统［M］. 成都：四川科学技术出版社，2019.

［5］ 广东省住房和城乡建设厅，广东省消防救援总队．广东省建设工程消防设计审查疑难问题解析［EB / OL］.（2023 - 03 - 31）［2026 - 06 - 26］. https：// zfcxjst. gd. gov. cn / gkmlpt / content / 4 / 4152 / post_4152699. html.

［6］ 山东省勘察设计协会．山东省施工图审查常见问题解答：第一册 房屋建筑［EB / OL］.（2024 - 02 - 28）［2026 - 06 - 26］. http：// sjw. qingdao. gov. cn / cxjsj15 / cxjsj102 / 202402 / t20240228 _ 7873870. shtml.

［7］ 山东省住房和城乡建设厅．山东省建设工程消防设计审查验收疑难解析 2. 0［EB / OL］.（2025 - 11 - 25）［2026 - 06 - 26］. http：// zjt. shandong. gov. cn / art / 2025 / 11 / 25 / art_102884 _ 10350670. html.

［8］ 张哲逸．针对《消防应急照明和疏散指示系统》（GB 17945 — 2024）中集中电源功率和电池容量的探讨［J］. 福建建设科技，2025（6）：139 - 142.

2026 - 06 - 26 来稿
2026 - 09 - 01 修回

四川省土木建筑学会安装专业委员会技术交流会暨“好房子”创优现场观摩活动在乐山成功举办

2026 年 8 月 21 日，四川省土木建筑学会安装专业委员会技术交流会暨“好房子”创优现场观摩活动在乐山市乐山师范学院苏稽校区成功举办。本次活动以“安全引领·智能建造 —— 机电安装专业赋能高质量开局”为主题，由四川省土木建筑学会指导，四川省土木建筑学会安装专业委员会（以下简称“专委会”）主办，四川华西集团、四川省工业设备安装集团有限公司协办，四川省建筑机械化工程有限公司、建筑电气杂志社承办。

开幕式上，四川华西集团有限公司总工程师、四川省土木建筑学会副理事长吴体，四川省土木建筑学会秘书长龚璇，全国建筑物电气装置标准化技术委员会（SAC / TC205）观察员、中国建筑学会低空发展基础设施专业委员会执行副主任委员汤威，专委会副主任委员杨帆代表主任委员李宇舟出席会议并致辞。大会由 SAC / TC205 委员、专委会副主任委员于峰主持。

技术交流会围绕活动主题，特邀 SAC / TC205 专家及安装一线技术专家，就施工现场用电安全问题、建筑电气布线与安装工程中的导线连接器技术等内容进行了深入探讨，与会的企业技术负责人、工程技术部部长、项目经理、项目技术负责人等一线工程技术人员获益匪浅：SAC / TC205 专家组成员、中国航空规划设计研究总院有限公司电气副总师刘叶语作《施工中的若干安全问题探讨》报告；中国华西企业股份有限公司项目经理张杰作《分布式光伏全生命周期项目实施》报告；山西省安装集团股份有限公司集团高级技术专家奥云军作《大型能源站机电工程数字化装配式建造技术》报告；专委会副主任委员、中建西南院总承包工程有限公司电气总工程师朱海军作《设计牵头总承包的设计施工融合》报告；SAC / TC205 专家组成员任长宁作《向来枉费推移力，此日中流自在行 —— 建筑电气·细导线连接技术与应用》报告；四川省工业设备安装集团有限公司第三分公司工程部部长韩金林作《技术引领·智能建造 —— 山东裕龙石化项目机电安装质量管理经验交流》报告；四川省第三建筑工程有限公司项目技术负责人杨睿作《关于抗震烈度 8 度及以上地区项目给排水抗震软管施工探讨》报告；四川省建筑机械化工程有限公司乐山市校地共建产教融合基地建设项目项目负责人孙逊作《乐山师院 EPC 项目机电管理》报告。

专题报告结束后，参会代表在乐山市校地共建产教融合基地建设项目（乐山师范学院苏稽校区）内开展创优现场观摩。

本次技术交流会暨创优现场观摩活动既是一次实践成果的集中展示，更是一场思想碰撞与经验共享的行业盛会，对于宣传贯彻 GB / T 16895 系列标准技术要点，提升施工现场电气安全技术的落地实施，推动四川省机电安装行业规范化、高品质发展起到积极作用。

建筑电气杂志社

中国知网 https://www.cnki.net

消防泵组主备切换控制电路改进与仿真验证

何京伟（北京城建天宁消防有限责任公司，北京市 100053）

Improvement and Simulation Verification of the Control Circuit for Duty and Standby Fire Pump Set Switching

HE Jingwei（Beijing Urban Construction Tianning Fire Protection Co., Ltd., Beijing 100053, China）

Abstract: To address the issue that the existing duty and standby fire pump switching control is triggered only by electrical fault signals, which may fail to detect insufficient water supply pressure caused by mechanical faults, motor aging, and other problems, an improved control strategy based on dual criteria of pressure signals and electrical faults is proposed. For conventional buildings, a pressure signal-triggered circuit is added while retaining the existing control logic of the commonly used "one duty, one standby" configuration. For buildings with stringent fire water supply requirements, the circuit structure is further improved by designing a "mutually redundant" control mode with pressure signal-triggered switching without time delay, ensuring that the duty and standby pumps switch instantaneously upon activation of the pressure signal without triggering shutdown protection. The CADe - SIMU simulation software is used to construct a control circuit model and simulate the switching response under typical operating conditions, including electrical faults of the duty pump and insufficient pressure caused by mechanical faults. The feasibility of the improved circuit is thereby verified.

Keywords: fire pump; duty and standby pump changeover; pressure signal; control circuit improvement

摘 要： 针对现行消防水泵主备切换控制仅通过电气故障信号触发，存在因机械故障、电机老化等问题导致供水压力不足而漏判的问题，提出基于压力信号与电气故障双判据的改进控制策略：对于通常建筑，在保持常用"一用一备"原有控制逻辑基础上增设压力信号触发电路；对于保障消防供水要求极高的建筑，进一步改进电路结构，设计具备压力信号触发无延时切换功能的"互为备用"控制模式，确保因压力信号触发主备泵互为备用无延时切换且不触发停机保护。采用 CADe - SIMU 仿真软件构建控制电路模型，模拟工作泵发生电气故障、机械故障导致压力不足等典型工况下的切换响应过程，验证改进电路的可行性。

关键词： 消防泵；主备泵互投；压力信号；控制电路改进

DOI：10.3969/j.issn.1003 - 8493.2026.09.010

消防水泵主备泵切换维持正常是保障消防水系统可靠、安全运行的必要条件[1]。GB 50974—2014《消防给水及消火栓系统技术规范》[2] 第 5.1.10 条规定，除建筑高度小于 54 m 的住宅和室外消防给水设计流量小于等于 25 L/s 的建筑以及室内消防给水设计流量小于等于 10 L/s 的建筑，消防水泵应设置与工作泵性能一致的备用泵。根据规范要求及目前建筑情况，消防水系统设置消防水泵备用泵是常规配置，现行消防水泵主备泵互投控制原理为：主泵发生过载、短路、断电等电气故障断路，通过接触器的辅助触点状态变化直接触发备用泵启动（后文称电流信号触发）。其优点是能够直接反映电机的工作状态，对电机故障较为敏感；缺点是无法反映水泵运行后出水管道压力情况，若主泵出现卡死、停转等机械故障或电机老化无法正常供水，但电机供电正常、接触器电路未断电的情况，不能有效触发备用水泵切换。

本文在现行常用消防水泵主备切换控制电路的基础上，增加水泵出水口压力信号作为触发备用水泵切

作者信息

何京伟，男，北京城建天宁消防有限责任公司，高级工程师。

中国知网 https://www.cnki.net

换条件之一，改进常用消防泵组主备泵切换控制电路原理（后文称压力信号触发）。参考国标图集 16D303－3《常用水泵控制电路图》[3] 第 22 页“消防水泵一用一备全压启动控制电路图 XKF－1－2”主备泵切换控制原理，提高切换可靠性。用 CADe－SIMU 仿真软件设计简易电流信号触发电路，使其具备国标图集中消防泵组主备泵切换核心功能，基于简化模型改进引入压力信号触发切换的“一用一备”和“互为备用”两种控制原理的电路模型，分别对应通用建筑及对消防供水要求极高的建筑应用场景，并测试电路控制逻辑功能的正确性。

1　简易电流信号触发电路

1.1　简易电流信号触发电路模型设计

常用电流信号触发主备泵切换动作的控制电路简易模型如图 1 所示。其中，主电路中 S1、S2 表示主电路通断开关，QAC1、QAC2 表示接触器主触点，M1、M2 表示两台消防水泵电机，后续用 1#泵、2#泵表示；控制回路 1-1 至 1－3 及 2－1 至 2－3 分别为 1#泵和 2#泵的控制电路。电路中开关 SAC 模拟自动状态下的转换开关功能，通过操作可实现“1#用 2#备”或“2#用 1#备”状态的转换；开关 SF 动作模拟已确认的外部火灾启泵信号，信号同步 1#泵和 2#泵控制电路且保持；开关 SS1 和 SS2 动作模拟 1#泵和 2#泵在运行过程中电流信号导致相应接触器线圈失电状态；时间继电器 KF1 和 KF2 设定备用水泵切换投入的延时时间。

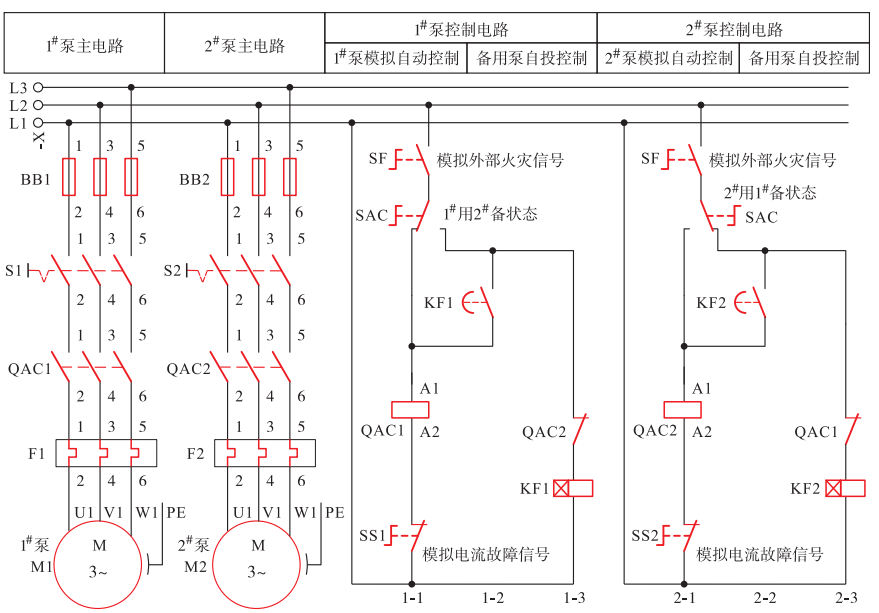


图 1　简易电流信号触发电路模型

1.2　简易电流信号触发电路模型控制逻辑功能测试

闭合主回路开关 S1、S2，转换开关 SAC 调至“1#用 2#备”状态：

a.　接通开关 SF 模拟外部火灾启泵信号动作且保持，电路变化情况如下：① 回路 1-1 中 QAC1 线圈得电，QAC1 主触点闭合，1#泵启动；② 回路 2－3 中 QAC1 辅助触点断开，此时 1#泵启动并保持运行状态。

b.　断开开关 SS1，模拟电流信号触发控制回路 1－1 中 QAC1 线圈失电，电路变化情况如下：① 回路 1－1 中 QAC1 线圈失电，QAC1 主触点断开，1#泵停止；② 回路 2－3 中 QAC1 辅助触点闭合，时间继电器 KF2 得电开始计时；③ KF2 计时达设定参数后，回路 2－2 中 KF2 辅助触点闭合；④ 回路 2－1 中 QAC2 线圈得电，QAC2 主触点闭合，2#泵启动；⑤ 回路 1－3 中 QAC2 辅助触点断开，此时 2#泵在 1#泵停止运行后通过 KF2 设定延时时间启动并保持运行。

c.　停止运行恢复初始状态后，闭合主回路开关 S1、S2，转换开关 SAC 调至“2#用 1#备”状态，针对 2#泵控制回路重复上述步骤，此时结果一致。

通过以上测试可知，图 1 的简易电流信号触发电路模型具备常用消防泵主备泵切换核心功能，可以作为后续测试的基础电路模型。

2　引入压力信号触发改进电路（一用一备）

2.1　改进电路（一用一备）模型

在原有控制电路模型图 1 中增加时间继电器、中间继电器等元器件，使用 CADe－SIMU 软件改进引入压力信号触发电路（一用一备），电路模型如图 2 所示。其中控制电路增加时间继电器 KFY1 和 KFY2，用于实现规范要求的消防水泵启动后应达到正常工作状态的时间，在此段时间之前，不会因当前工作泵出水口压力信号的变化而触发备用泵的切换操作；压力信号 P1 断开 / 闭合状态模拟水泵启动后系统压力监测装置（电接点压力表或压力传感器）达到 / 未达到设定压力值的状态，信号分别同步 1#泵和

中国知网 https://www.cnki.net

2#泵控制电路中。

2.2 改进电路模型（一用一备）控制逻辑功能测试

闭合主回路开关 S1、S2，转换开关 SAC 调至“1#用 2#备”状态：

a. 接通开关 SF 模拟外部消防泵启动信号接入，电路变化情况如下：① 回路 1－1 中 QAC1 线圈得电，QAC1 主触点闭合，1#泵启动；② 回路 2－5 中 QAC1 辅助触点断开；③ 回路 1－2 中 QAC1 辅助触点闭合，时间继电器 KFY1 得电开始计时；④ KFY1 计时达到设定参数后，回路 1－3 中 KFY1 辅助触点闭合。此时 1#泵启动并保持运行状态。

b. 断开开关 SS1，模拟电流信号触发控制回路 1－1 中 QAC1 线圈失电，电路变化情况如下：① 回路 1－1 中 QAC1 线圈失电，QAC1 主触点断开，1#泵停止；② 回路 1－2 中 QAC1 辅助触点断开；③ 回路 2－5 中 QAC1 辅助触点闭合，KF2 得电开始计时；④ KF2 计时达到设定参数后，回路 2－4 中 KF2 辅助触点闭合；⑤ 回路 2－1 中 QAC2 线圈得电，QAC2 主触点闭合，2#泵启动；⑥ 回路 1－5 中 QAC2 辅助触点断开；⑦ 回路 2－2 中 QAC2 辅助触点闭合，KFY2 得电开始计时；⑧ KFY2 计时达到设定参数后，回路 2－3 中 KFY2 辅助触点闭合；此时 2#泵在 1#泵停止运行后经 KF2 设定延时时间后启动并保持运行；⑨ 停止运行恢复初始状态后，进行至前述 a 节第 ③ 所述状态，此时回路 1－2 中 KFY1 开始计时，KFY1 未计时触发压力信号 P1 电路无变化；⑩ 停止运行恢复初始状态后，进行至前述 a 中第 ④ 所述状态，在 KFY1 未计时结束时断开开关 SS1，测试结果与 b 中① ~ ⑧ 一致。由此可知，电路模型控制电路中原电流信号触发主备泵延时切换功能仍然可以实现且不受引入电压信号触发电路的影响。

c. 当 KFY1 计时达到设定参数后，回路 1－3 中 KFY1 辅助触点闭合，此时 1#泵启动时间已超过规范允许投入正常使用的时间限制，模拟监测系统压力未达到设定压力值再次接通压力信号 P1，电路变化情况如下：① 回路 1－3 中继电器 KX1 线圈得电接通，KX1 辅助触点闭合形成自锁；② 回路 1－1 中 KX1 辅助触点断开，QAC1 线圈失电断开，QAC1 主触点断开，1#泵停止；③ 回路 2－5 中 QAC1 辅助触点闭合，KF2 开始计时；④ KF2 计时达到设定参数后，回路 2－4 中 KF2 辅助触点闭合；⑤ 回路 2－1 中 QAC2 线圈得电，QAC2 主触点闭合，2#泵启动；⑥ 回路 1－5 中 QAC2 辅助触点断开；⑦ 回路 2－2 中 QAC2 辅助触点闭合，KFY2 得电开始计时；⑧ KFY2 计时达到设定参数后，回路 2－3 中 KFY2 辅助触点闭合。电路中新引入压力信号触发主备泵延时切换功能可以实现。

d. 当 2#备用泵启动达到规范规定的正常运行最大时间后，控制回路 2－3 中 KFY2 辅助触点闭合，此时再次接通压力信号 P2，模拟监测系统压力值在切换至 2#泵启动后仍未能达到设定参数动作压力值的情况，此时电路变化情况如下：① 回路 2－3 中 KX2 线圈得

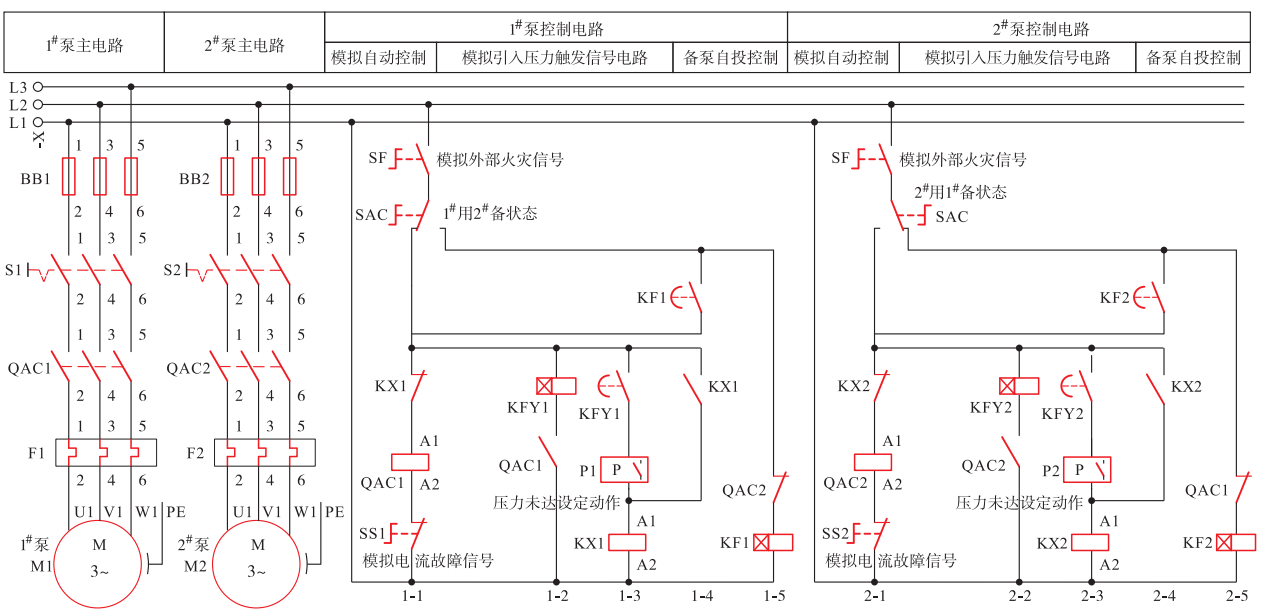


图 2 引入压力信号改进电路（一用一备）模型

中国知网 https://www.cnki.net

电吸合，辅助触点闭合形成自锁；② 回路 2－1 中 KX2 辅助触点断开，QAC2 线圈失电断开，QAC2 主触点断开，2#泵停止；③ 回路 1－5 中 QAC2 辅助触点闭合，回路通断无变化；④ 回路 2－2 中 QAC2 辅助触点断开，回路断开；⑤ 此时控制回路 1－1、2－1 中 KX1 及 KX2 辅助触点自锁在断开状态，压力信号 P 的接通不会再引起 QAC1 和 QAC2 通电变化。

e. 停止运行恢复初始状态后，闭合主回路开关 S1、S2，转换开关 SAC 调至“2#用 1#备”状态，针对 2#泵控制回路重复上述步骤，此时结果一致。

通过以上测试说明，引入压力信号触发的控制电路不仅可以实现消防泵组（一用一备）电流信号触发主备泵切换的功能与逻辑，同时具备通过监测工作泵出水口实际压力是否达标来触发切换上述功能，使得消防泵组（一用一备）控制电路的功能与逻辑更完善，且增加电路简单、易于维护检修，适宜常规建筑中消防系统水泵控制。

3 引入压力信号触发改进电路（互为备用）

引入压力信号触发主备泵切换（一用一备）控制电路在备用泵投入使用并达到设定时间时，若监测备用泵出水口压力仍达不到设计及规范要求，虽然外部消防启动信号仍然存在，主泵与备泵都会停止运行。但在大型建筑、重要公共建筑以及对消防供水可靠性要求更高的场所，消防系统启动后水泵因出水口压力达不到设计要求而停止运行或延时一段时间才切换互投比继续运行带来的损失更大。

3.1 改进电路（互为备用）模型

对消防供水可靠性要求更高的场所，除了采用同时具备电流信号和压力信号触发消防泵组之外，为适应消防功能要求还应实现的功能包括：① 两台消防水泵互为备用，接到外部消防启动信号后，工作泵由于压力信号触发备用泵切换时宜立即投入[4]，且备用泵投入使用后，达到规定启动时间、出水口压力仍未达到设计要求时，宜再次切换至原工作泵投入使用，周而复始；② 无论是未切换过的初始启动工作泵，还是由于压力信号切换后的当前启动水泵，电流信号触发备泵切换时备泵宜延时投入，且当备用泵投入使用后，不再因压力信号停泵[5-6]。使用 CADe－SIMU 软件改进引入压力信号触发电路（互为备用）电路模型如图 3 所示。“互为备用”电路模型与“一用一备”电路模型对比并未增加元器件，通过调整元器件的接线，实现上述功能。

3.2 改进电路模型（互为备用）控制逻辑功能测试

a. 首先闭合主回路开关 S1、S2，转换开关 SAC 调至“1#用 2#备”状态，接通开关 SF 模拟外部消防泵启动信号接入，电路变化情况如下：① 主电路 QAC1 主触点接通，1#泵启动；② 回路 1－1 中 QAC1 得电接通；③ 回路 1－3 中 QAC1 辅助触点闭合，KFY1 开始计时；④ 设定参数计时结束后，回路 1－4 中 KFY1 辅助触点闭合；⑤ 2#泵控制电路中，回路 2－2、2－5、2－6 中 QAC1 辅助触点断开，此时 1#泵启动并保持运行状态。

b. 接通压力信号 P1，电路变化情况如下：① 回路 1－4 中 KX1 线圈得电并形成自锁电路；② 回路 1－1 中 KX1 辅助触点断开，QAC1 线圈失电断开，1#泵停止；③ 回路 2－4 中 KX1 辅助触点闭合；④ 回路 2－1 中 QAC2 线圈得电，2#泵启动；⑤ 回路 2－6 中 KX1 辅助触点断开，此时电流信号触发电路未接通，实现了与电流信号触发电路分离且无延时切换功能。

c. 当回路 2－3 中 KFY2 计时结束，回路 2－4 中 KFY2 辅助触点闭合，此时接通压力信号 P2，电路变化情况如下：① 接通瞬间，回路 2－4 中 KX2 线圈得电自锁；② 回路 2－1 中 KX2 辅助触点断开，QAC2 线圈失电断开，2#泵停止；③ 回路 1－2 中 QAC2 及回路 1－3、1－4 中 KX2 辅助触点闭合；④ 同时，回路 1－1 中 KX2 辅助触点断开，回路 1－4 中 KX1 线圈失电，回路 1－1 中 KX1 辅助触点闭合，此时回路 1－1 中 QAC1 线圈得电吸合，1#泵启动。回路 1－4 中 KX1 线圈失电时，回路 2－1 和 2－4 中 KX1 辅助触点分别闭合和断开，此时回路 2－4 中 KX2 线圈再次失电，回路 1－1 和 1－3 中 KX2 线圈分别再次闭合、断开；此时电路与步骤 a 节第 ⑤ 状态相同，电路模型实现压力信号引起主备泵切换无延时且互为备用功能。

d. 断开开关 SS1，模拟电流信号触发控制回路 1－1 中 QAC1 线圈失电，电路变化情况如下：① 回路 1－1 中 QAC1 线圈失电断开，QAC1 主触点断开，1#泵停止；② 回路 2－6 中 QAC1 辅助触点闭合，KF2 得电开始计时；③ KF2 计时达到设定参数后，回路 2－2、2－5 中 KF2 辅助触点闭合；④ 回路 2－1 中 QAC2 线圈得电吸合，QAC2 主触点闭合，2#泵启动；⑤ 回路 2－4 中 KF2 辅助触点断开。此时，即便回路 2－3 中 KFY2 设定参数计时结束，回路 2－4 中压力信号 P2 动作，回路 2－4 仍处于断开状态，不受压力信号 P2 状态影响。电路模型实现了不因压力信号触发

中国知网 https://www.cnki.net

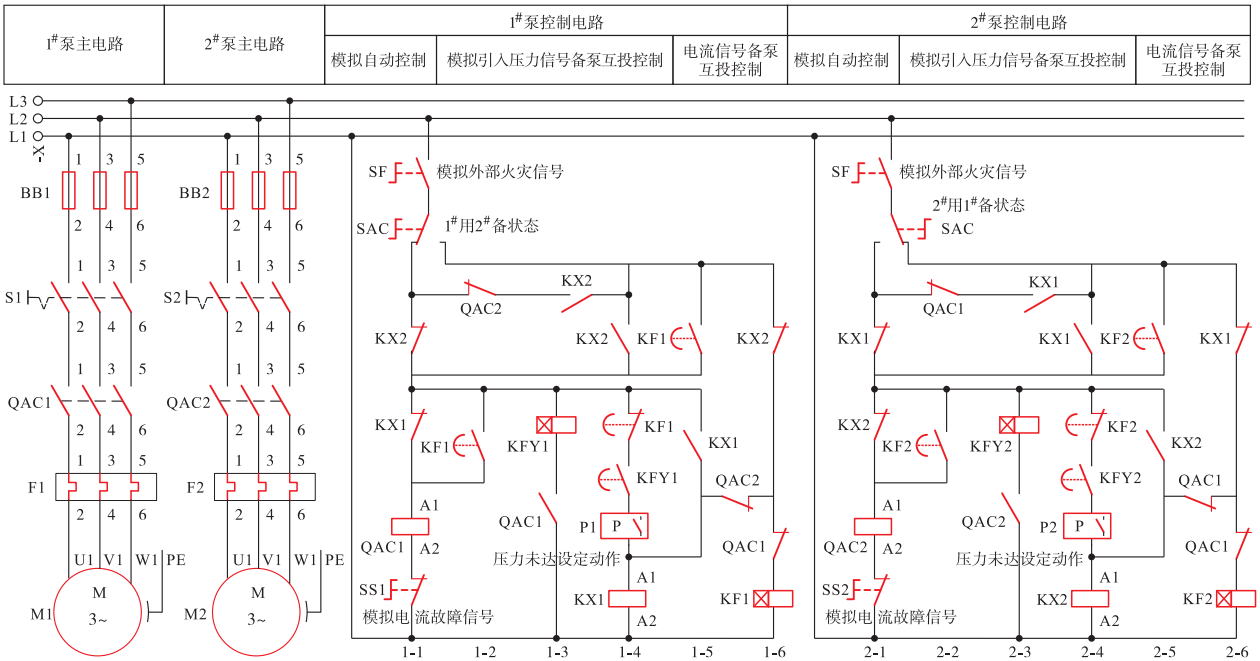


图 3　引入压力信号改进电路模型（互为备用）

主备泵切换导致泵组停止运行的功能。

e.　当电路处于 b 节第 ⑤ 状态时，断开开关 SS2，模拟电流信号触发控制回路 2－1 中 QAC2 线圈失电，电路变化情况与步骤 d 相同，但由于转换开关 SAC 当前调至“1#用 2#备”状态，当仅回路 1－6 中 QAC2 辅助触点闭合时回路并未接通，因此在回路 1－5 和 1－6 中用 QAC2 辅助触点连接，使得回路 1－6 中 KF1 可以接通，实现备用泵投入使用。电路模型可以实现因压力信号触发切换备用水泵投入使用后，再因电流信号触发仍可再次切换备用水泵投入工作的功能。

f.　停止运行恢复初始状态后，闭合主回路开关 S1、S2，转换开关 SAC 调至“2#用 1#备”状态，针对 2#泵控制回路重复上述步骤，此时结果一致。

以上步骤 a～c 测试，验证图 3 电路可以实现：当工作泵由于压力信号触发备用泵切换时立即投入，且备用泵投入使用后，达到规定启动时间出水口压力仍未达到设计要求，再次切换至原工作泵投入使用，可重复切换；步骤 d～f 测试，验证电路可以实现：无论是未切换过的初始启动工作泵，还是由于压力信号切换后的当前启动水泵，由于电流信号触发备泵切换时备泵延时投入，且当备用泵投入使用后，不再因压力信号停泵。对比图 2 电路，图 3 电路由于压力信号触发的主备泵切换无延时且可重复互为备用，电流信号触发的主备泵切换保留延时且切换后不再受压力信号的影响，保障消防系统工作状态下无延时持续供水，但维护检修较为困难，更适合对消防供水可靠性要求更高的场所。

4　结语

消防备用水泵投入使用的触发条件是工作泵在启动达到规定时间后未投入正常运行状态，在控制电路中引入工作泵的压力信号作为消防主备泵切换的触发条件，可以提高消防系统供水的可靠性。本文通过 CADe－SIMU 仿真软件设计的电路模型，验证了压力信号触发电路（一用一备、互为备用）引入常用水泵控制电路（一用一备）后的可行性，提高了消防主备泵切换的可靠性。

参考文献

[1]　施寅濠．对消防水泵故障切换检查的几点思考[J]．今日消防，2022，7（2）：21－23.
[2]　GB 50974—2014　消防给水及消火栓系统技术规范[S].
[3]　中国建筑标准设计研究院．常用水泵控制电路图：16D303－3[M]．北京：中国计划出版社，2016.
[4]　GB 16806—2006/XG1—2016　消防联动控制系统[S].
[5]　GB 55037—2022　建筑防火通用规范[S].
[6]　GB 55036—2022　消防设施通用规范[S].

2025－04－08 来稿
2026－08－30 修回

中国知网　https://www.cnki.net

非晶合金变压器在数据中心节能领域的应用研究

时庆兵（中国移动通信集团设计院有限公司安徽分公司 AIDC 交付服务部，合肥市 230041）

Application of Amorphous Alloy Transformers for Energy Conservation in Data Centers

SHI Qingbing（AIDC Delivery Service Department, Anhui Branch, China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Hefei 230041, China）

Abstract: By analyzing the characteristics and manufacturing processes of amorphous alloy materials and considering the energy consumption structure of data centers and the need to optimize power usage effectiveness (PUE), the significant effects of amorphous alloy transformers in reducing no-load losses and improving energy efficiency are discussed. A combination of theoretical calculations and empirical case studies is used to compare the energy efficiency of amorphous alloy transformers with that of conventional silicon steel transformers. The results show that, under the same capacity and operating conditions, amorphous alloy transformers can reduce no-load losses by 60 % ~ 80 % compared to conventional silicon steel transformer, with annual electricity savings reaching hundreds of thousands of kilowatt-hours. This performance is well suited to the operating characteristics of data centers and delivers significant energy-saving benefits.

Keywords: amorphous alloy transformer; data center; PUE; no-load loss; life-cycle assessment; carbon emission reduction

摘 要： 通过分析非晶合金材料的特性、制备工艺，结合数据中心能耗结构与 PUE 值优化需求，阐述非晶合金变压器在降低空载损耗、提升能源利用效率方面的显著效果。研究采用理论计算与实证案例相结合的方法，对比分析非晶合金变压器与传统硅钢变压器的能效差异。结果表明，在相同容量和运行条件下，非晶合金变压器空载损耗比传统硅钢变压器降低 60 % ~ 80 %，年节电量可达数十万 kWh，契合数据中心运行特性，节能效益显著。

关键词： 非晶合金变压器；数据中心；PUE；空载损耗；全生命周期评估；碳减排

DOI：10.3969 / j. issn. 1003 - 8493. 2026. 09. 011

0 引言

随着人工智能时代的到来，数据中心能耗问题日益凸显。中国信息通信研究院数据显示[1]，截至 2025 年底，全国在用数据中心（算力中心）机架总规模已达 1 373 万标准机架，数据中心能耗总量预计到 2030 年将超过 7 000 亿 kWh，二氧化碳排放量或将超 2 亿 t。

衡量数据中心能源效率的关键指标是电能利用效率（PUE），其定义为数据中心总耗电量与信息设备耗电量的比值。早在 2022 年，工信部等六部门就发布了《工业能效提升行动计划》[2]，要求到 2025 年，新建大型、超大型数据中心 PUE 需优于 1. 3。在此之后，国家发改委等部门又出台了《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》（2024 年）[3]，明确到 2025 年底，新建及改扩建大型 / 超大型数据中心 PUE 降至 1. 25 以内、国家枢纽节点数据中心 PUE 不得高于 1. 2 的刚性目标要求。据国家发改委 2025 年 10 月新闻发布会消息，对新上算力项目严格实施节能审查和碳排放评价，鼓励各地区结合实际对新上项目提出更高要求。同时，国家发改委修订印发的《固定资产投资项目节能审查和碳排放评价办法》（国家发展改革委令 2025 年

作者信息
时庆兵，男，中国移动通信集团设计院有限公司安徽分公司 AIDC 交付服务部，高级工程师。

中国知网 https://www.cnki.net

第 31 号）已于 2025 年 9 月 1 日起施行，首次将碳排放评价纳入节能审查环节，为算力等高耗能项目的能效与碳效准入提供了制度依据[4]。据国家能源局数据，2025 年全国算力中心总用电量达 1 700 亿 kWh。按供配电系统损耗占数据中心总能耗 5 % ~ 10 %估算，该环节年损耗电量约为 85 亿 ~ 170 亿 kWh；其中变压器单独损耗约占数据中心总能耗的 1 % ~ 1. 5 %，对应年损耗约 17 亿 ~ 26 亿 kWh。鉴于数据中心耗电基数庞大，促进包括变压器在内各个环节的节能降耗十分有必要。降低供配电系统损耗尤其是变压器损耗，成为优化数据中心 PUE 的重要途径之一。

2006 年至今我国多次修订变压器能效标准，最新版国标 GB 20052 — 2024《电力变压器能效限定值及能效等级》[5] 对变压器能效提出了更高要求，已于 2025 年 2 月 1 日正式施行。在新标准同一能效等级下，非晶合金变压器相对于硅钢变压器具有明显的能效优势，尤其是在空载损耗方面优势尤为突出，相对于传统硅钢变压器可降低 60 % ~ 80 %损耗，在行业内被誉为“没有发电机的绿色发电厂”。非晶合金变压器凭借其超低损耗特性，正成为满足新标准下的优选电能转换设备。

本文将从新材料应用、能效分析、政策标准及实际应用等多个维度，探讨非晶合金变压器在数据中心节能领域的技术优势与应用前景。

1 非晶合金材料科学与制备技术

非晶合金又称金属玻璃，是通过急速冷却技术将熔融状态下的合金金属以每秒百万摄氏度的冷却速度快速凝固形成的非晶态材料。这种特殊的制备工艺使原子排列呈现无序结构，避免了晶界的形成，从而赋予了材料优异的电磁性能。非晶合金带材一次成型且厚度仅有 0. 03 mm，生产流程和路径相比传统硅钢生产工艺大幅缩短。

非晶合金的制备过程主要采用的是单辊熔体甩带法：合金块体先由电弧熔炼制备，再装入石英管，放到单辊熔体甩带设备内，在真空条件下充入氩气，单辊以 2 000 ~ 3 000 r / min 的转速旋转，喷射压强为 20 ~ 120 kPa，将熔融合金以高于 10^4 K / s 的速率急速冷却得到合金薄带[6-7]。这种超快速冷却技术阻止了原子有序排列成晶体结构，从而形成非晶态固体。非晶合金与传统硅钢材料性能对比如表 1 所示。

非晶合金具有低矫顽力、高磁导率和高电阻率等特性。其磁化过程易于进行，且高电阻率显著降低了涡流损耗，使非晶合金铁心的空载损耗远低于传统硅钢铁心。这些特性使得非晶合金特别适用于变压器铁心节能应用。

表 1 非晶合金与传统硅钢材料性能对比

材料类型	非晶合金	传统硅钢
厚度 / mm	0. 02 ~ 0. 03	0. 23 ~ 0. 35
电阻率 /（μΩ·cm）	130 ~ 150	40 ~ 50
空载损耗 /（W / kg）	0. 1 ~ 0. 2	0. 5 ~ 0. 8
矫顽力 /（A / m）	1 ~ 3	20 ~ 40
饱和磁感 / T	1. 5 ~ 1. 6	2. 0 ~ 2. 1

2 非晶合金变压器的节能优势分析

2. 1 能效特性与节能机制

非晶合金变压器的核心优势在于其极低的空载损耗。空载损耗是变压器在通电状态下不带负载时消耗的功率，主要由铁心的磁滞损耗和涡流损耗组成。非晶合金材料的高电阻率和薄带结构显著降低了涡流损耗，而其独特的非晶态结构减少了磁滞损耗。

非晶合金变压器空载损耗比硅钢变压器降低 60 % ~ 80 %。这一特性在数据中心应用场景中尤为重要。数据中心不间断运行的供电高可靠性决定了其供电架构中变压器多采用冗余备份的运行方式，变压器的负载率通常在 30 % ~ 50 %之间，空载损耗在总损耗中占比较高。GB 20052 — 2024 10 kV 干式 2 500 kVA 变压器能效对比见表 2。

非晶合金变压器的节能机制主要体现在 3 个方面：① 材料层面的非晶态结构减少了磁畴转向能耗；② 物

表 2 GB 20052 — 2024 10 kV 干式 2 500 kVA 变压器能效对比

能效等级	变压器类型	空载损耗 / kW	负载损耗 / kW	50 %负载率下效率 / %
1 级	非晶合金	0. 40	17. 5	99. 70
	硅钢	1. 15	18. 5	99. 30
2 级	非晶合金	0. 50	18. 0	99. 65
	硅钢	1. 35	19. 0	99. 25
3 级	非晶合金	0. 60	18. 5	99. 60
	硅钢	1. 55	19. 5	99. 20

中国知网 https://www.cnki.net

理层面的薄带结构增加了电阻率，降低了涡流损耗；③ 结构层面的立体卷铁心设计实现了三相磁路完全对称，进一步减少了磁通泄漏和铁损。

2.2 全生命周期评估与碳减排效益

非晶合金变压器的节能优势需要从全生命周期角度进行评估。变压器全生命周期运行损耗电费计算公式如下：

$$B = C \times th \times ty \times (P_o + P_k \times L^2) \quad (1)$$

式中：B —— 变压器全生命周期损耗的电费，元；

C —— 电价，0.8 元 / kWh；

th —— 全年运行小时数，8 760 h；

ty —— 运行年限，30 年；

P_o —— 空载损耗（忽略温度变化的影响），kW；

P_k —— 负载损耗（忽略温度变化的影响），kW；

L —— 变压器负载率，50 %。

以 10 kV 干式 2 500 kVA 变压器为例，1 级能效非晶合金变压器（P_o = 0.40 kW，P_k = 17.5 kW）与同等容量硅钢变压器（P_o = 1.15 kW，P_k = 18.5 kW）相比，30 年运行期间的总能耗差异为 210 240 元。

计算结果表明，单台非晶合金变压器 30 年运行可节省电费约 21 万元，节电量达 262 800 kWh，相当于减排 CO_2 约 325 t（按每节约 1 kWh 电减排 0.997 kgCO_2 计算）。

此外，非晶合金材料的生产制造过程也比硅钢节能 80 % 以上。每生产 1 t 非晶带材比 1 t 硅钢少排放 730 kg CO_2，且非晶铁心的回收过程达到了主元素 100 % 再利用，不会造成二次浪费[7]。这种全生命周期的绿色特性使非晶合金变压器成为数据中心实现“双碳”目标的重要技术路径。

3 非晶合金变压器在数据中心能效提升、节能减排中的实践与应用

3.1 PUE 优化效果与节能降碳效应分析

在优化数据中心的电能利用效率（PUE）、增加节能量与碳减排效应时，有多种考量因素。其中，降低供配电系统损耗是其中重要途径。以 PUE 为 1.25 的数据中心为基准，其供配电系统损耗经优化后可降至约 3 %，其中变压器自身的空载与负载损耗合计通常不高于 1 %，考虑到线缆等少量附加损耗，整体变压器相关损耗约占数据中心总能耗的 1.2 % 左右。

以一个装机规模为 10 000 标准机架的数据中心为例，假设每个机架平均功率为 4 kW，IT 设备总功率为 40 MW，年运行时间为 8 760 h。采用不同能效水平的变压器时，对比结果如表 3 所示。

表 3 数据中心采用不同变压器时的 PUE 对比分析

场景描述	变压器类型	变压器年损耗 /（GWh / 年）	数据中心总能耗 /（GWh / 年）	PUE 值
基准场景	传统硅钢变压器（国标 2 级）	5.26	438.00	1.250
1 级能效方案	非晶合金变压器（降损 70 %）	1.58	434.42	1.240
超 1 级能效方案	非晶合金变压器（降损 80 %）	1.05	433.79	1.238

由表 3 可知，非晶合金变压器对数据中心 PUE 的直接优化幅度约为 0.012（从 1.250 降至 1.238），虽然 PUE 仅小幅下降，不能以此低估其在绝对能耗和碳减排方面的技术价值。以 40 MW 的 IT 负载计算，采用非晶方案后，该数据中心年节电量最高达 421 万 kWh，相当于减少 CO_2 排放约 4 200 t，节省电费达 337 万元（按 0.8 元 / kWh 计算）。

非晶合金变压器的低损耗特性还带来附加节能效益。其低发热特性可有效降低机房内部空调的显热负荷，从而在供配电系统节能之外，产生额外的制冷系统节能收益。若将此全链路等效节能效应纳入计算，非晶变压器对数据中心整体能效的实际贡献将更为显著。因此，在数据中心节能改造的工程实践中，非晶合金变压器的核心价值在于从源头上降低了电能的损耗，其对于降低运营成本与实现“双碳”目标具有不可替代的现实意义。

3.2 实际应用案例

近年来，非晶合金变压器在数据中心的应用已经取得了显著成效。以下为两个典型应用案例：

a. 某信息港数据中心共采用 42 台 SCBH15 型非晶合金变压器（依据标准 GB 20052 — 2024），每年可节省用电 50.4 万 kWh，减排 503 t CO_2。

b. 某大数据智算中心全线采用 76 台 1 级能效非

中国知网 https://www.cnki.net

晶合金变压器，每年可节省用电 95 万 kWh，减排 CO_2 947 t。

这些案例证明，非晶合金变压器在大规模数据中心应用中具有显著的节能效果和环保效益。特别是在负载率相对较低的数据中心场景中优势更加明显。近年来，国内已有多家大型数据中心建设单位将非晶合金变压器的应用作为重要的节能措施和技术手段（中国移动已经将采用非晶合金等节能变压器列入《中国移动数据中心及通信枢纽机电工程建设指导意见》中）。

3.3 谐波环境下的性能优势

数据中心内 IT 设备、UPS、变频设备等在运行时会产生大量谐波，谐波的存在会导致变压器附加损耗增加，效率降低。非晶合金变压器相比传统硅钢材料变压器在谐波环境下表现出了显著优势。实验研究表明，在相同质量、均为额定磁密的情况下，硅钢铁心在不同电压谐波总畸变率（THD_u）下，谐波损耗显著高于非晶铁心。相关实验证明，非晶合金变压器能有效降低 3 次、5 次、7 次主谐波含量与单相负载所产生的 3 次谐波，有效转移中性点电流产生的热效应，降低对数据通信设备的影响。

在不同谐波电压工况下，非晶磁心不但损耗的绝对数值远远低于硅钢磁心，并且由于谐波引发的损耗增加的比例也低于硅钢磁心，这充分说明了非晶磁心在降低谐波损耗方面具有显著的优势。

4 结论与展望

非晶合金变压器凭借其卓越的节能特性，在数据中心节能领域发挥着越来越重要的作用。本文通过材料分析、能效计算和案例研究，得出以下结论：

首先，非晶合金材料具有独特的非晶态结构和优异的电磁性能，其空载损耗比传统硅钢材料降低 60 % ~ 80 %，契合数据中心的运行特性，节能效益和环保效益显著。

其次，非晶合金变压器在谐波环境下表现出优异性能，谐波损耗仅为硅钢铁心的约 1 / 5，能有效过滤谐波，减少对数据通信设备的影响。这对于富含谐波的数据中心供电环境具有重要意义。

能效标准的持续升级为非晶合金变压器的推广应用创造了良好环境。随着“双碳”目标的推进和数据中心能效要求的提高，非晶合金变压器将迎来更广阔的市场空间。近年来，我国非晶合金技术不断创新，民族企业不断创新发展，开发的非晶立体卷铁心从结构上解决了变压器三相结构根本性对称问题，被工信部列为先进技术大力推广。未来非晶合金变压器技术的发展将集中在以下几个方面：一是材料创新，如开发新一代超低损耗非晶带材，进一步降低铁心损耗，提升设计磁密；二是结构优化，如立体卷铁心技术的推广应用，进一步降低损耗和噪音；三是系统集成，将非晶合金变压器与数据中心供电系统整体优化，实现能效最大化。

综上所述，采用非晶合金变压器是数据中心节能降耗的关键技术之一，具有显著的经济效益、社会效益和环境效益。随着技术的不断进步和成本的进一步降低，非晶合金变压器将在数据中心领域得到更广泛的应用，为实现我国碳达峰碳中和目标做出重要贡献。

参考文献

[1] 中国信息通信研究院．算力中心服务商分析报告（2026 年）[R / OL]．[2026 - 09 - 05]．http：// www. caict. ac. cn / kxyj / qwfb / ztbg / 202609 / P020260903665544062887. pdf.

[2] 经济日报．六部门发布《工业能效提升行动计划》—— 推进重点行业绿色低碳发展 [EB / OL]．（2022 - 07 - 04）[2026 - 09 - 05]．https：// www. gov. cn / zhengce / 202212 / content_6716073. htm.

[3] 国家发展改革委，工业和信息化部，国家能源局，等．国家发展改革委等部门关于印发《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》的通知 [EB / OL]．（2024 - 07 - 23）[2026 - 09 - 05]．https：// www. ndrc. gov. cn / xxgk / zcfb / tz / 202407 / t20240723_1391894. html.

[4] 国家发展改革委．固定资产投资项目节能审查和碳排放评价办法 [EB / OL]．[2026 - 09 - 20]．https：// www. gov. cn / gongbao / 2025 / issue_12246 / 202508 / content_7038015. html.

[5] GB 20052 — 2024 电力变压器能效限定值及能效等级 [S]．

[6] 刘文胜，马运柱，张佳佳，等．一种高 W 含量 Ni 基非晶合金及其制备方法：CN201410514123. 7 [P]. 2016 - 04 - 13.

[7] 工业和信息化部，质检总局，发展改革委．三部委关于印发《配电变压器能效提升计划（2015 - 2017 年）》的通知 [EB / OL]．[2025 - 09 - 23]．https：// www. cqn. com. cn / cj / content / 2015 - 08 / 14 / content_2537242. htm.

2025 - 09 - 26 来稿
2026 - 09 - 06 修回

中国知网 https://www.cnki.net

金属屋面防雷与防水规范间的冲突及应对策略探讨

黄志源[1]，朱光金[2]（1. 广东申睿工程技术咨询有限公司，广东省清远市 511500；
2. 广东建设职业技术学院，广东省清远市 511510）

Discussion on Conflicts and Response Strategies Between Lightning Protection and Waterproofing General Codes for Metal Roofs

HUANG Zhiyuan[1], ZHU Guangjin[2]
(1. Guangdong Shenrui Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Qingyuan 511500, Guangdong Province, China; 2. Guangdong Construction Polytechnic, Qingyuan 511510, Guangdong Province, China)

Abstract: Beginning with a quantitative analysis of conflicts between the provisions on lightning protection design for metal roofs in *General Code for Building Electricity and Intelligence* (GB 55024 — 2022) and *General Code for Waterproofing of Building and Municipal Engineering* (GB 55030 — 2022), the technical risks are analyzed in conjunction with engineering examples. Three response strategies are proposed, and key points for design coordination at different stages are presented.

Keywords: metal roof; air-terminal system; insulating covering layer; water proof layer; lightning protection design

摘 要： 从GB 55024 — 2022《建筑电气与智能化通用规范》与GB 55030 — 2022《建筑与市政工程防水通用规范》中关于金属屋面防雷设计条文冲突的量化解析入手，结合工程实例分析技术风险，提出3种应对策略，并给出各阶段的设计协同要点。

关键词： 金属屋面；接闪器；绝缘被覆层；防水层；防雷设计

DOI：10.3969/j.issn.1003 - 8493.2026.09.012

金属屋面直接作为防雷接闪器，曾是轻钢结构建筑设计的常规做法。其优势在于可避免接闪带机械固定对屋面的损伤、保障建筑外观完整性、降低工程造价。然而，2022年实施的GB 55024 — 2022《建筑电气与智能化通用规范》[1]与GB 55030 — 2022《建筑与市政工程防水通用规范》[2]两本强制性规范，分别对防雷电气通路与屋面防水构造提出了更高要求，二者在金属屋面构造层位的交叠，使传统做法面临设计合规性重构。本文聚焦于此规范交界面，探讨在双重强条约束下金属屋面防雷的技术决策突围路径。

1 规范冲突的量化解析

1.1 电气规范的“豁免红线”

GB 50057 — 2010《建筑物防雷设计规范》[3]第5.2.7条与GB 55024 — 2022第7.1.7条均明确规定：金属板作为防雷接闪器时，其表面不应有绝缘被覆层。两条条文同时以注释形式给出了量化界限：“薄的油漆保护层、1 mm厚沥青层或0.5 mm厚聚氯乙烯层或类似保护层，均不应属于绝缘被覆层。”

这一界限构成了电气专业判定金属屋面能否作为防雷接闪器的核心依据。凡绝缘被覆层厚度超过上述限值，即视为绝缘覆盖，不得用作防雷接闪器。

1.2 防水规范的构造要求

GB 55030 — 2022第4.4.1条对金属屋面防水等级与构造作出强制性规定：当在屋面金属板基层上采

作者信息
黄志源，男，广东申睿工程技术咨询有限公司，高级工程师，电气总工程师。
朱光金，男，广东建设职业技术学院，高级工程师。

中国知网 https://www.cnki.net

用聚氯乙烯（PVC）、热塑性聚烯烃（TPO）、三元乙丙（EPDM）等外露型防水卷材单层使用时，卷材厚度一级防水要求不应小于 1.8 mm，二级防水要求不应小于 1.5 mm。

1.3 规范冲突的不可调和性

两项强条在屋面构造层形成直接交叠：电气规范以金属板表面为判定界面，规定沥青层 ≤ 1.0 mm、聚氯乙烯层 ≤ 0.5 mm 可不视为绝缘被覆；防水规范则要求在金属板之上增设厚度 ≥ 1.5 mm 或 1.8 mm 的防水卷材。卷材材质以聚氯乙烯、热塑性聚烯烃等高分子材料为主，其厚度及绝缘性能均已实质突破电气规范的豁免限值。

由此产生的规范交叠问题可概括为：同一构造界面，两项强条分别对“露”与“覆”提出强制性要求，且防水要求的“覆”已完全覆盖电气豁免的“露”。

关于防水卷材厚度突破豁免限值后是否仍可凭借雷击穿能力维持接闪功能，现行规范体系已作出明确否定。GB 50057 — 2010 条文说明第 5.2.7 条指出，设置被覆层厚度限值的目的是“确保雷电流通过时接闪功能可靠”。该说明揭示了规范立场的本质：规范所依据的不是“物理可能性”，而是“设计可靠性”。物理上雷击可能击穿更厚覆盖层，但工程设计不允许将小概率事件作为合规依据。

防水规范要求的卷材厚度（一级要求 ≥ 1.8 mm、二级要求 ≥ 1.5 mm）与电气规范允许的豁免上限（沥青层 ≤ 1.0 mm，聚氯乙烯层 ≤ 0.5 mm）之间已无交集。这在防雷设计逻辑中并非厚度差异，而是“非绝缘被覆”与“绝缘屏障”之间的定性分界。

由此可作确定性结论：2022 年以后设计的项目，凡按 GB 55030 — 2022 设防等级要求增设防水卷材的金属屋面，均不得以金属屋面作为接闪器；凡以金属屋面作为接闪器的设计，均构成对 GB 55024 — 2022 第 7.1.7 条的违反。

2 金属屋面防雷风险分析

2.1 图集与规范的时效错配

目前，诸如 01J925－1《压型钢板、夹芯板屋面及墙体建筑构造》等国标图集在工程界仍被广泛援引。这些图集编制时间多早于 GB 55024 — 2022、GB 55030 — 2022 等全文强制性规范的发布，其中“金属屋面板兼作接闪器”的节点做法，并未考虑新通规实施后防水层对防雷电气通路的实际阻断[4－5]。

这就形成了一个现实困境，设计人员按现行图集出图，施工单位按图集做法施工，结果却可能触碰强制性条文。图集本身并未失效，但其构造假定（金属板上表面无绝缘覆盖）与当下工程常规做法（金属板上敷设防水层）之间已出现脱节。若设计人员直接套用图集而未对防水构造进行专项复核，极易在施工图审查或竣工验收环节暴露问题，且往往已难以返工。

2.2 专业分工形成的协同盲区

金属屋面防雷设计涉及建筑和电气专业，而规范之间的矛盾恰恰落在专业交界地带。

建筑专业依据 GB 55030 — 2022 进行防水设计，关注的是卷材材质、厚度、层数、搭接宽度等防水性能指标。电气专业关于“金属板作为接闪器时其上方覆盖层厚度限值”的要求，建筑专业并不知情。

电气专业在设计接闪器、引下线时，通常向建筑或结构专业索要的是屋面板厚度、材质、连接条件等常规信息，较少主动核查屋面防水构造的具体层次、卷材敷设在金属板的上方还是下方、厚度是多少，而这些恰恰是判断金属板能否作为接闪器的关键。

这种信息不对称会导致两个专业各自按规范出图，图纸会签时也未必发现问题，直到施工中或验收时，防水层已经做完才意识到金属板已被绝缘材料覆盖。此时再改，代价已大。

2.3 既有项目面临标准新老更替

2022 年之前设计建成的金属屋面工业厂房，大量采用了“金属板承重、板上敷设防水卷材、金属板兼作接闪器”的构造组合。这一做法在当时符合 GB 50057 等相关版本的规定。

但随着 GB 55024 — 2022 将“接闪导体不得被绝缘材料覆盖”明确为强制性条文，这些既有项目在标准适用性上出现了断裂。问题随之而来：已投入使用多年的厂房，其防雷系统在新规视角下是否应判定为存在隐患？若判定为隐患，依据什么技术标准进行诊断、改造、验收？目前各地审图机构、检测单位、设计院对此类问题的把握尺度并不一致，缺乏统一的技术口径。

这一问题已成为当前工业建筑防雷改造中的技术盲区 —— 有隐患的定性，但没有统一的整改路径；有改造的需求，但没有可操作的技术文件。

3 技术突围路径

面对 GB 55024 — 2022 与 GB 55030 — 2022 在金

中国知网 https://www.cnki.net

属屋面防雷设计中存在的现实矛盾，工程设计不宜抱有侥幸心理，诸如“审图未必看得出来”“防水层那么薄雷击应该能击穿”之类的想法，既无法通过施工图审查，也经不起竣工验收。从技术原理和工程经验出发，目前有3种路径可以同时满足两本规范的强制性要求，分别适用于新建项目的不同设计阶段以及既有项目的改造场景。

3.1 路径A：金属屋面不再充当接闪器

既然常规金属屋面的防水构造已经普遍突破了GB 55024—2022第7.1.7条“接闪导体不得被绝缘覆盖”的红线，一个直接的思路是放弃传统做法，不再让金属屋面板承担接闪功能，而是在屋面上方独立敷设接闪带或接闪网。

设计上需要注意几个要点：

a. 接闪带沿屋脊、檐口、屋面板波峰等部位敷设，网格尺寸按建筑物防雷类别确定。第二类防雷建筑物不大于10 m×10 m或12 m×8 m，第三类防雷建筑物不大于20 m×20 m或24 m×16 m。

b. 固定方式应采用与屋面板肋部配套的专用防风夹具——以直立锁边体系为例，可选用铝合金夹具夹在板肋上，严禁穿板固定，否则会破坏防水层的完整性。

c. 金属屋面板虽然不再作为接闪器使用，但仍需与防雷引下线系统做可靠电气连接。这样做不是为了接闪，而是为了泄放雷电感应电荷，保证整个防雷系统的电气连续性。

该路径的适用面很广，绝大多数工业厂房、体育场馆、交通站房等新建及改造项目都可以采用。技术经济性方面，增加少量明敷接闪带，对建筑外观影响有限，造价增量很低，施工工艺成熟，审查通过率高。从合规风险控制的角度看，是目前最稳妥的优选方案。

3.2 路径B：防水层挪到金属板下面

该路径将防水层从金属板上表面移到下表面，或者放到保温层下方，让金属板上表面裸露出来，恢复其作为接闪器的资格。

技术依据是GB 55030—2022第4.3.3条。该条只规定“金属屋面基层上应设置防水层”，并没有强制要求防水层必须设在金属板的上方。倒置式屋面、衬檩构造体系等做法，完全可以把防水层设在板下，同样能满足防水通规的要求。

当然，该路径只能用于还处在方案设计或初步设计阶段的新建项目，此时屋面构造层次还没有最终定型，有调整的空间。如果项目已经进入施工图阶段甚至已经开工，防水构造已经确定，这条路就走不通了。另外，把防水层下置之后，需要对屋面体系的保温、隔声、防结露等物理性能重新核算，有时候可能涉及构造体系的整体调整。

3.3 路径C：在防水层上方另设一套防雷接闪体系

对于已经建成且外观要求极高、明敷接闪带难以接受的重点工程（比如机场航站楼、高铁站房、大型会展中心），路径A和B都行不通。此时只能在既有屋面的防水层上方增设一套专用的接闪带或接闪网格，采用穿透防水层的专用夹具与下层金属屋面板实现电气贯通。这个方案不改变原有的防水构造，而是通过构造上的“补偿”来恢复防雷系统的完整性。

某高铁站雨棚的防雷整治工程采用的就是这个方案。原金属屋面板保留其结构支撑功能，在2.3 mm厚的丙烯酸防水涂料层上方新设接闪带，夹具穿透防水层后与屋面板紧固连接。现场检测显示，接地电阻均小于0.03 Ω，满足GB 50057—2010相关条文的要求。

该路径的关键在于穿透节点的防水密封处理。夹具穿透防水层的位置如果密封不好，就会有漏水的隐患。工程上比较成熟的做法是采用双道防水密封：根部填充遇水膨胀止水条，表层覆盖耐候密封胶，再用金属压环进行机械固定。这样做的目的是确保夹具穿透节点在屋面系统的全寿命周期内不渗不漏。

这条路径的技术经济性需要客观看待，其构造复杂，施工精度要求高，造价也明显高于前两条路径。

3.4 路径选择

3条路径在技术上都能够实现与GB 55024—2022、GB 55030—2022的同时兼容，不存在规范层面的障碍。工程实践中，应根据项目所处的阶段、对建筑外观的敏感程度、造价预算以及既有构造的实际情况选择：

a. 路径A（独立设接闪带）对防水层没有影响，外观上有少量明敷避雷带，造价低，适用新建及改造项目。

b. 路径B（防水层下置）防水安全性需要重新验证，外观上无影响，造价中等，适用于方案及初步设计阶段的新建项目。

c. 路径C（穿透式夹具）穿透节点存在防水风险，需要重点把控施工质量，外观上无影响，造价高，适用于已建成且对外观要求高的改造项目。

建议新建项目优先考虑路径A或路径B，把合规

中国知网 https://www.cnki.net

风险化解在设计前端。高要求改造项目则以路径 C 作为技术兜底方案，同时应当委托具备防水施工专项资质的单位来实施穿透节点作业，确保防水修复的质量。

无论选择哪条路径，都应当在图纸设计阶段完成跨专业的会签，并在设计说明中明确标注所依据的规范条款和具体的构造做法。

4 设计协同

金属屋面防雷设计暴露出的问题，本质上不是技术难题，而是协同机制问题。建筑、电气专业各自独立出图，往往到图纸会签阶段才发现矛盾，这时候再返工所需成本与工期代价均显著增大。要解决这个问题，需要在设计前端打通信息。

a. 在方案设计阶段，建议电气专业主动向建筑专业发一份书面资料确认单，确认以下内容：① 金属屋面的防水等级；② 防水构造的具体做法，尤其是金属板上方是否设置防水层及其材质；③ 防水卷材或防水涂层的厚度（精确到 0.1 mm）。

依据上述数据，电气专业方可判断金属板能否作为接闪器：如果金属板上方确实有防水层，而且厚度超过规范允许的限值，则应放弃利用金属板接闪的方案，及时调整设计。

b. 若项目采用金属屋面作为接闪器，设计说明应明确其前提条件，建议表述如下："本设计利用金属屋面作为接闪器，其前提是金属板上表面无防水卷材或防水涂料覆盖。如施工过程中在金属板上方增设任何防水层，则本设计自动失效，施工单位应另行设置明敷接闪带。"

该表述旨在划清设计责任边界：设计按"板上无防水"为前提，如果施工阶段增设防水层导致金属板被绝缘材料覆盖，需要补设接闪带。

c. 该问题属于新通规实施后出现的典型争议，各地审图机构的把握尺度不完全一致。有的审图机构对"接闪导体不得被绝缘覆盖"执行严格，只要金属板上方有防水层，就不认可金属板接闪的做法；有的审图机构可能会根据防水层的厚度、材质等情况做一些技术上的判断。建议在图纸送审之前与审图机构先行沟通，若审图机构执行严格，宜直接采用路径 A（独立设接闪带），以免因审图意见返工。

5 结语

金属屋面防雷与防水的规范冲突并非孤例。随着通用规范密集实施，专业标准之间的交叉已成常态。设计人员无法改变防水规范对卷材厚度的硬性要求，也无权调整建筑电气规范对绝缘覆盖层的红线，能改变的是设计思维与协同方式：通过前置沟通与主动协同，设计人员可在现行规范框架内获得合规可行的方案。

参考文献

[1] GB 55024 — 2022 建筑电气与智能化通用规范[S].

[2] GB 55030 — 2022 建筑与市政工程防水通用规范[S].

[3] GB 50057 — 2010 建筑物防雷设计规范[S].

[4] 贾计勋，王东，吴耀华．主题乐园建筑金属屋面的防雷设计与施工[J]．智能建筑电气技术，2021（3）：136 - 138.

[5] 朱奎荣，马金福．屋面防雷措施常见问题分析[J]．现代建筑电气，2023（11）：27 - 30.

2026 - 02 - 13 来稿

2026 - 08 - 27 修回

广告

建筑电气 BUILDING ELECTRICITY | ISSN 1003-8493 CN 51-1297/TU

《建筑电气》绚丽您的电气之路

欢迎订阅《建筑电气》

国内外公开发行，月刊，每期16元，全年192元

◆ 邮局订阅：全国各地邮局均可订阅，邮发代号：62-170

地址：中国四川省成都市天府大道北段866号C座 征订热线：028-61808673 E-mail：jzdq@jzdq.net.cn QQ：1043909791

中国知网 https://www.cnki.net

平均照度计算及其在 BIM 设计中的实践

马亚雄，陶星名，周马军，梁泰山（中国海诚工程科技股份有限公司，上海市 200031）

Average Illuminance Calculation and Its Application in BIM Design

MA Yaxiong, TAO Xingming, ZHOU Majun, LIANG Taishan
(China Haisum Engineering Co., Ltd., Shanghai 200031, China)

Abstract: Based on an in-depth understanding of the utilization factor method for calculating average illuminance and practical BIM applications, this paper verifies the functionality of calculating average illuminance in Revit software. The calculation results obtained using this function are accurate and close to those generated by professional software and observed in actual applications, meeting design requirements and enabling the generation of lighting design schedules.

Keywords: average illuminance; utilization factor; BIM design; IES file; Revit; data-driven; DIALux

摘 要： 在深入理解利用系数法计算平均照度和 BIM 实践的基础上，验证 Revit 软件中计算平均照度的功能，该功能计算结果精度较高，与专业软件实际效果接近，满足设计需求并可生成照明设计表。

关键词： 平均照度；利用系数；BIM 设计；IES 文件；Revit；数据驱动；DIALux

DOI：10.3969/j.issn.1003－8493.2026.09.013

0 引言

在建筑电气设计中，照明设计通常对节能、造价和碳排放都有较大影响。因此，科学合理的平均照度计算至关重要。当前，建筑电气设计中通常采用简单表格进行平均照度计算。对于其计算是否科学合理，尤其在利用系数的取值上，设计师往往没有深入研究。

计算机技术一直都深刻影响着建设工程行业，近年 Revit 等 BIM 软件的出现，以其独特的数据驱动、参数化建模以及可视化特点，使得 BIM 设计得到大范围推广，工程设计越来越精细，越来越多的问题得以解决，显著提升了工程设计质量。

1 平均照度的计算

照明设计中的平均照度，是指工作面上的维持平均照度（本文所提到的平均照度，均指维持平均照度），通常采用利用系数法[1]（也称 Zonal Cavity Method 或 Lumen Method）进行计算。

1.1 利用系数法

利用系数法计算公式如下[2－3]：

$$E_{av}=\sum_{i=1}^{n}\frac{\Phi_i U_i K}{A} \tag{1}$$

式中：E_{av} 为工作面上的平均照度，lx；Φ_i 为某个灯具的总光通量，lm；U_i 为某个灯具在房间内的利用系数；K 为灯具在房间内的维护系数；A 为工作面面积，m^2。

1.2 利用系数

利用系数作为灯具光强分布、房间形状以及室内表面反射比的函数，在文献［2］中给出了完整的计算步骤、公式及方法，通常会编制成利用系数表以供设计使用。在获取灯具利用系数表后，需依据房间的室

作者信息
马亚雄，男，中国海诚工程科技股份有限公司，高级工程师。
陶星名，男，中国海诚工程科技股份有限公司，工程师。
周马军，男，中国海诚工程科技股份有限公司，工程师。
梁泰山，男，中国海诚工程科技股份有限公司，工程师。

中国知网 https://www.cnki.net

空间比 RCR（国内采用室形系数 RI）以及房间各面的有效反射比，通过线性插值法查阅表格来获取利用系数。由此可知，利用系数表的编制与灯具的光强分布紧密相关。

若利用系数与灯具在房间内的高度存在关联，那么这意味着同一型号的灯具，在同一房间内处于不同安装高度时，其对应的利用系数应有所不同，这与式（1）中 U_i 相对应。灯具安装高度不同，对工作面平均照度的贡献也会不同，安装高度越低，对工作面的照度贡献越大。

IES 文件是一种用于描述灯具光照特性的文件（配光曲线文件），其格式由国际照明工程协会制定并推广，用于存储灯具的光照数据，如光线（光强）分布、色温、光通量等参数。在照明设计和模拟软件中，IES 文件具有重要作用。IES 文件并不直接存储对应的利用系数表，而是通过相应的计算步骤和方法，由光强分布数据得出利用系数表[3]。因此，利用系数本质上是 IES 文件数据的一种转换形式。可借助工具（如 Cooper Photometric Toolbox 等）打开 IES 文件，直接查看灯具相关数据及对应的利用系数表。

1.3 IES 文件

IES 文件作为灯具主要光照参数的制式表征文件，由灯具厂家提供，是合格照明产品检测的必备资料，一般是由配光曲线仪（分布光度计）或积分球设备测得。如图 1 所示是某灯具 IES 文件数据及解释。

1.4 总结

a. 实际照明效果均匀度越高，运用利用系数法计算平均照度结果的准确性越高，与实际情况的契合度也越高。

b. 利用系数法的本质是房间内所有灯具最终到达工作面的光通量（包含直射光通量与反射光通量）总和除以工作面面积。

c. 各灯具需依据自身型号以及在房间内的安装高度，确定各自的利用系数，而非采用统一的利用系数。

d. 灯具的利用系数表是依据公式对其 IES 文件内的数据（主要指光强分布）进行转换后获得的，并非通用表格。

e. 准确可靠的平均照度计算，应以灯具 IES 文件为基础，获取准确的利用系数。若脱离灯具 IES 文件，

```
1  IESNA:LM-63-2002 ----------------------------------------> IES文件格式执行的标准
2  [TEST] LVC2140723 ---------------------------------------> 检测报告编号
3  [TESTLAB]
4  [MANUFAC] PHILIPS ----------------------------------------> 灯具厂家
5  [LUMCAT]
6  [LUMINAIRE] BN108C LED36 NW L1200  /4142K ----------------> 照明灯具型号
7  [LAMP] LED Ra87.2/4142K ----------------------------------> LED光源、显色指数、色温
8  [BALLAST]
9  [ISSUEDATE] 2014-05-09
10 [OTHER] B-Angle = 0.00 B-Tilt = 0.00 2014-08-08
11 TILT=NONE
12 1 3492.20 1 37 7 1 2 0.045 1.125 0.025 1.0 1.0 41.92
13 ---> 从前往后：第1个数字"1"表示1个光源；第2个数字"3492.20"表示1个光源的光通量，单位lm；
14 ---> 第4个数字"37"表示光强数据垂直角数量为37个；第5个数字"7"表示光强数据水平角数量为7个；
15 ---> 第7个数字"2"表示尺寸单位为米；
16 ---> 第8、9、10个数字"0.045 1.125 0.025"表示灯具尺寸为宽0.045米，长1.125米，高0.025米；
17 ---> 第13个数字"41.92"表示灯具电功率为41.92W。
18    0.00   5.00  10.00  15.00  20.00  25.00  30.00  35.00  40.00  45.00
19   50.00  55.00  60.00  65.00  70.00  75.00  80.00  85.00  90.00  95.00
20  100.00 105.00 110.00 115.00 120.00 125.00 130.00 135.00 140.00 145.00
21  150.00 155.00 160.00 165.00 170.00 175.00 180.00
22 ---> 数据分为单行或多行，由空格分开，表示灯具光强分布中的37个垂直角分别是多少，单位为°（角度）
23    0.00  15.00  30.00  45.00  60.00  75.00  90.00
24 ---> 数据分为单行或多行，由空格分开，表示灯具光强分布中的7个水平角分别是多少，单位为°（角度）
25 ---> 表示灯具各水平角和垂直角对应光强数据，数据分为多行多组，由空格分开，单位为cd（坎德拉），共7组，
26 ---> 每组37个，每组对应一个水平角及所有垂直角，对应三维空间内的光强值。
27      968.74     970.83     953.72     926.13     888.07     840.92     785.74
28      724.28     657.58     586.69     513.00     437.92     362.14     285.66
29      210.23     138.29      73.34      22.70       0.70       0.35       0.35
30        1.05       0.70       1.05       0.70       1.05       1.40       1.75
31        2.79       3.49       4.89       5.59       8.73      18.16      13.62
32       11.87      11.52
```

图 1 某灯具 IES 文件数据及解释

中国知网 https://www.cnki.net

仅使用简单表格进行平均照度计算，计算结果将不准确，进而导致工程造价和节能计算出现偏差。

2 BIM 设计中平均照度计算的实践

在深入理解利用系数法和逐点法的基础上，笔者结合 Revit 照度计算功能和 Revit 二次开发技术，开发了照明设计工具，实现了平均照度计算（明细表功能，同步形成照明设计表）、点照度计算模拟（能出具计算书）、设备批量布置等功能。

2.1 Revit 平均照度估算

Revit 作为当前建筑行业的主流 BIM 软件，自 2019 版起，其原生功能可在空间中识别灯具（在 Revit 中为“照明设备”类别的可载入族）的 IES 文件及相关参数，自动获取对应的利用系数，并计算出相应空间内的平均照度值（估算）[4]。经核实，Revit 中的照明计算理论与公式（1）一致，可保障计算结果具有可比性。

以一个长 12 m、宽 10 m、高 2.5 m 的房间，假设屋顶反射系数为 70 %，地面反射系数为 20 %，墙面反射系数为 50 %；灯具设计照度为 200 lx，灯具数量为 9 套（3 × 3 均匀布置，吸顶安装），设计 LPD 值为 6 W / m^2，安装高度为 2.4 m，计算平面高度为 0.75 m；灯具功率为 40 W，总光通量为 4 000 lm，光效为 100 lm / W，维护系数为 0.8，IES 文件为 CR500C LED40 840 W60L60 PSU.ies。如表 1 所示是采用不同计算工具计算结果对比。经测试，与 DIALux 灯光精灵（DIALux 4.8 Light）和 DIALux evo 专业照明软件相比，Revit 空间平均照度计算结果兼顾了计算效率和误差精度的平衡，可应用于照明设计，有效提升设计效率和设计质量。

依据表 1 与式（1）能够反向推导出灯具利用系数约为 0.93（此系数亦可在 Revit 灯具属性栏中查询），该数值远高于简单表格计算中常用的 0.7 ~ 0.8 经验值，对照明设计、工程造价以及节能均具有显著影响。

在 Revit 软件中，平均照度估算的主要步骤如下[5]：

a. 创建并设定空间：依据链接的建筑模型房间进行批量空间创建，确保其主要参数与建筑房间保持一致，例如房间名称、编号以及房间高度等。

b. 设定空间参数：在空间属性中设定与平均照度相关的参数，如计算平面高度（通常为工作面高度，如 0.75 m）、顶棚 / 墙面 / 地面反射系数等，这些参数会直接影响利用系数的计算结果。

表 1 不同计算工具平均照度计算结果对比

计算工具	平均照度 / lx	LPD 值 /（W / m^2）
Revit	223.69	3
DIALux 灯光精灵（DIALux 4.8 Light）	224.00	3
DIALux evo 5.13.1.2	206.70	3

c. 设定灯具参数：在照明设备属性里设定与照度计算相关的参数，如光域网文件（即 IES 文件）、光通量、光损失系数（即维护系数）。在制作照明设备族时，需启用“光源”功能，才能够设定上述参数。照明设备还需正确设置电气连接件，并准确设定其负荷和负荷分类，以确保空间能够将其正确统计为照明负荷，从而自动汇总出空间内的照明负荷总量。

d. 在空间内安置灯具：将已完成参数设置的灯具放置于空间内的合适高度，Revit 会自动识别并开展平均照度估算。可通过查看设备属性中“使用系数”（即利用系数）参数是否有数值来判断灯具是否被空间正确识别并进行照度计算。当在空间内进行照明设备的增加、删除或修改操作时，可观察到空间计算的平均估算照度值和照明负荷值会发生变化。也就是说，Revit 会自动识别空间内的照明设备及其参数，自动计算平均估算照度和照明负荷。当空间无法正确统计照明负荷时，需检查电气设置中“运行空间负荷计算”功能是否已启用。

e. 查看计算结果：完成上述步骤后，可在空间属性内查看平均估算照度和实际照明负荷等关键信息。

可通过 Revit 的添加共享参数功能，为空间添加共享的项目参数（如照度设计值、LPD 限定值等），并手动填写相关属性。可通过制作空间标记将空间内照明负荷除以面积得到实际 LPD，并将这些信息展示于平面上，显示的信息会随着空间属性自动更新计算结果。

f. 生成照明设计表：利用 Revit 的明细表功能，通过参数合并、参数计算和参数条件判断等功能，制作出符合出图要求的照明设计表，该表可展示每个空间的照明计算结果，并实时校验计算值是否满足设计要求（超出范围时自动标红提示）。效果如图 2 所示。

中国知网 https://www.cnki.net

利用系数法-平均照度计算-照明设计表

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
空间信息			照明设备信息							照明计算及校验					
名称	面积	光源高度	参考型号	功率	光通量	能效	数量	维护系数	利用系数	照度标准值	照度设计值	窒形系数RI	LPD计算值	LPD限定值	LPD折算值
打印室	4.8 m²	2.9 m	Philips_RC420V G4 LED15 840 W30L30 PSD	19 W	1800 lm	95 lm/W	1	0.85	0.35	100 lx	111.56 lx	0.51	3.96 W/m²	3.50 W/m²	4.20 W/m²
共享办公室	17.48 m²	2.9 m	Philips_CR500C LED25 840 W60L60 PSU	25 W	2500 lm	100 lm/W	4	0.85	0.65	300 lx	316.08 lx	0.97	5.72 W/m²	8.00 W/m²	9.60 W/m²
共享办公室	20.01 m²	2.9 m	Philips_CR500C LED25 840 W60L60 PSU	25 W	2500 lm	100 lm/W	4	0.85	0.621	300 lx	263.71 lx	1.04	5.00 W/m²	8.00 W/m²	8.00 W/m²
经理办公室	5.956 m²	2.9 m	Philips_CR500C LED40 840 W60L60 PSU	40 W	4000 lm	100 lm/W	1	0.85	0.55	300 lx	313.94 lx	0.57	6.72 W/m²	8.00 W/m²	9.60 W/m²
乙烯基树脂QC测试室	39.4 m²	2.3 m	Philips_WT168C LED40 CW L1200 PSU	34 W	4000 lm	117 lm/W	8	0.85	0.733	500 lx	506.03 lx	1.63	6.96 W/m²	13.50	13.50 W/m²
烘箱测试室	34.144 m²	2.3 m	Philips_WT168C LED40 CW L1200 PSU	34 W	4000 lm	117 lm/W	5	0.85	0.712	300 lx	354.45 lx	1.51	5.02 W/m²	8.00 W/m²	8.00 W/m²
质监室	22.08 m²	2.9 m	Philips_CR500C LED40 840 W60L60 PSU	40 W	4000 lm	100 lm/W	3	0.85	0.615	200 lx	284.61 lx	1.02	5.43 W/m²	6.00 W/m²	6.00 W/m²
过道	58.39 m²	2.9 m	Philips_RC420V G4 LED15 840 W30L30 PSD	19 W	1800 lm	95 lm/W	7	0.85	0.598	100 lx	109.72 lx	0.95	2.28 W/m²	3.50 W/m²	4.20 W/m²

图 2　Revit 明细表形成的照明设计表效果

结合 Revit 二次开发技术和开源光线追踪工具，在完成灯具布置后，可实现点照度计算模拟，用于校验照明设计效果（如照度平均值、最大值、最小值、均匀度等），示例截图如图 3 所示。

笔者通过多个项目的实际验证，在 Revit 软件中开展平均照度估算呈现出以下显著成效：

a.　计算精度契合工程要求：与 DIALux 等专业照明软件的计算结果对比（详见表 1），Revit 空间平均照度的计算能够满足常规建筑电气照明设计的需求。

b.　数据实时联动更新：鉴于 Revit 的参数化特性，当对灯具数量进行调整、更换灯具型号（IES 文件）或修改房间参数时，空间平均照度和照明功率密度会自动重新计算并实时显示，无需人工手动重新计算。

c.　同步生成设计成果：照明设计表（明细表）能够随设备模型同步生成，模型修改后明细表内容也会自动更新。该明细表可直接用于图纸输出，满足图审环节对照明设计表的要求。同时，可借助定制公式实现自动校验功能，当计算照度或 LPD 超出规范限值[6]时，系统会自动标红提示。

d.　提高设计效率与质量：在熟练掌握 Revit 参数化功能并完善企业标准化样板文件后，照明设计效率不低于传统设计方法。并且，由于基于真实 IES 数据进行计算，设计质量得到显著提升，避免了因经验取值导致的工程造价浪费和能源消耗问题。

e.　便于多方案比选：可在同一模型中快速布置不同数量的灯具或选用不同型号的灯具，实时对比各方案的平均照度和 LPD，为设计决策提供辅助，优化照明设计方案。

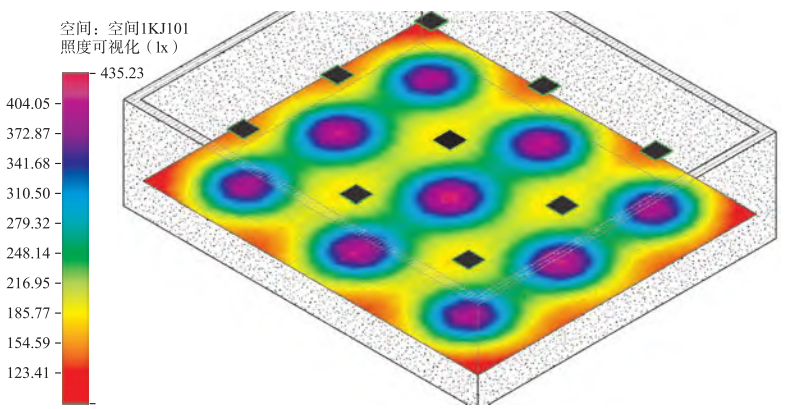


图 3　Revit 形成点照度计算模拟示例

2.2　对比分析

针对与表 1 计算对比中相同的房间、灯具及设计要求，运用常规简单表格，采用 0.75（经验值）的利用系数进行计算。计算结果显示，灯具数量为 12 套，计算照度值为 216.00 lx，计算得到的照明功率密度（LPD）为 4 W / m²。

假设一栋建筑面积约 6 000 m² 的办公楼，其中包含 50 个如表 1 计算采用的房间（为便于对比，采用相同的灯具和设计要求）。常规表格使用利用系数经验值，由此造成的平均照度误差，在工程造价、节能以及用能等方面产生的影响分析如下：

a.　灯具数量多出 50 ×（12 − 9）= 150 套，每套灯具价值约 800 元人民币，工程造价增加 12 万元。若考虑施工成本、线缆成本等因素，整体工程造价增加幅度将大于 12 万元。

b.　单位照明用电功率从 3 W / m² 增加至 4 W / m²，这对节能评价（如绿色建筑、LEED 等级等）产生不利影响。

c.　按照每日 6 h 的亮灯时间，150 套多出的灯具以 0.85 的同时使用率计算，每年用电量约增加 7 650 kWh，费用增加约 3 825 元。

在实际设计过程中，基于表 1 的计算情形，对不同计算方式的优缺点进行对比，具体如表 2 所示。

中国知网　https://www.cnki.net

表 2　不同计算方式优缺点对比

计算方式	简单表格 经验利用系数	Revit 空间平均照度功能	DIALux 灯光精灵 （DIALux 4. 8 Light）	DIALux evo5. 13. 1. 2
结果精度	最低	较高	高	最高
整体耗时	短（需输入信息，整体耗时约 30 s）	最短（已有模型和信息，整体耗时约 0 s）	长（需建模和输入信息，整体耗时约 60 s）	最长（需手动建模和输入信息，整体耗时约 10 min）
适用范围	较小（仅适用于房间内有一种型号灯具且安装高度相同）	大（适用于同一房间内不同类型的灯具，以及不同形状的房间）	最小（仅适用于矩形、L 形房间，要求房间内仅有一种型号灯具且安装高度相同）	最大（适用于同一房间不同高度灯具、不同类型的灯具、不同形状的房间）

2. 3　局限性分析

a.　当房间内灯具安装高度存在差异时，Revit 软件在计算空间的室空间比（RCR）时，会以最低灯具为依据。在此情形下，高处安装灯具所选取的利用系数偏大，从而致使整体计算结果偏大。因此，当房间内存在不同安装高度的灯具时，可先获取每个灯具的利用系数，手动赋予相应系数后再进行汇总，以此实现平均照度的计算。

b.　Revit 软件自身的空间构件未设置设计照度、设计照明功率密度（LPD）等参数，可通过在企业标准样板文件中添加相关参数来解决此问题。

c.　Revit 软件统计房间内总照明负荷的单位为伏安（VA），需添加参数将其转换为瓦（W），再除以房间面积，以获得计算的房间照明用电功率密度，单位为瓦每平方米（W / m^2）。可通过在企业标准样板文件中添加相关参数（如灯具功率因数）、制作空间标记来解决该问题，同时可实时呈现实际计算的照度和照明功率密度。

3　结论

相较于专业照明设计软件，在 Revit 软件中开展常规房间平均照度计算时，可依据灯具的照明工程文件交换标准（IES）数据实现自动识别与自动计算，并且能够随着房间内灯具数量的变动，实时更新平均照度和照明功率密度的计算结果。经比较，其计算结果能够满足常规建筑电气照明设计的要求。结合 Revit 软件的参数化表达以及图模联动功能，能够同步生成照明设计表（Revit 明细表），以满足图纸审查需求，还可定制公式实时检测照度和照明功率密度（LPD）的计算结果是否超出规范要求（自动标红提示）。在熟练掌握 Revit 参数化等功能并做好标准化工作后，运用 Revit 进行房间照度计算，不仅不会降低设计效率，反而能显著提升设计质量。

在建筑信息模型（BIM）设计广泛普及的当下，建议运用 Revit 软件开展平均照度计算。依据灯具的照明工程文件（IES）数据，结合房间相关信息，可精确获取利用系数，进而进行平均照度计算，为照明设计提供科学依据。设计师应正确理解并合理运用利用系数法，在设计过程中严禁随意设定利用系数，以免对工程造价、节能以及能源利用等方面造成严重浪费。

参考文献

[1]　Holophane.　Zonal Cavity Method for Indoor Calculations [EB / OL].　(2025 - 07 - 10).　https: // www. scribd. com / doc / 184907014 / Zonal - Cavity - Method - for - Indoor - Calculations.

[2]　北京照明学会设计专业委员会．照明设计手册 [M]．3 版．北京：中国电力出版社，2016.

[3]　Illuminating Engineering Society of North America.　The lighting handbook: Reference and application [M].　10 ed.　New York: IESNA, 2011.

[4]　Dan Stine.　Lighting design — Coefficient of utilization calculation in Revit [EB / OL].　(2026 - 06 - 03).　https: // bimchapters. blogspot. com / 2023 / 10 / coefficient-of-utilization-calculation. html.

[5]　Autodesk.　Revit 2026 帮助：照明计算 [EB / OL].　(2026 - 06 - 03).　https: // help. autodesk. com / view / RVT / 2026 / CHS / ? guid = GUID - 60EC93DB - 5194 - 4334 - 9D61 - B17850CE3BC1.

[6]　GB / T 50034 — 2024　建筑照明设计标准 [S].

2026 - 03 - 10 来稿
2026 - 09 - 02 修回

中国知网 https://www.cnki.net

无人机吊装的山地光伏工程施工技术与效率研究

杨　静（中国水利水电第十六工程局有限公司，福州市　350003）

Study on Construction Technology and Efficiency of Drone-based Hoisting for Mountainous Photovoltaic Projects

YANG Jing（Sinohydro Bureau 16 Co., Ltd., Fuzhou 350003, China）

Abstract: Taking the 60 MW mountainous photovoltaic support project in Shijiazhuang, Hebei Province, as an example, the key technical aspects, construction challenges, and technical requirements of drone-based hoisting technology in the hoisting of photovoltaic modules are analyzed. The feasibility of applying drone-based hoisting technology under complex mountainous terrain conditions is demonstrated, and the construction efficiency of drone-based hoisting is briefly analyzed.

Keywords: drone-based hoisting; mountainous photovoltaic; construction management

摘　要：以河北石家庄60MW山地光伏支架项目为例，分析无人机吊装技术在光伏组件吊装过程中的技术要点、施工难点与技术要求，论证无人机吊装技术在山地复杂地形条件下应用的可行性，并对无人机吊装的施工功效进行简要分析。

关键词：无人机吊装；山地光伏；施工管理

DOI：10.3969/j.issn.1003－8493.2026.09.014

0　引言

随着我国能源结构与产业结构的持续转型升级，传统火电正逐步被核电、水电、光伏等新型清洁能源所替代。光伏发电作为重要的新能源利用形式，以太阳能电池板为能量转换载体，将太阳能直接转化为电能，具备清洁、可持续等突出优势[1]。截至2025年10月底，我国光伏发电装机容量已达到11.4亿kW，同比增长43.8%，发电规模持续快速扩大[2]。

然而，在光伏发电容量迅猛增长的同时，日益严格的生态环保要求与土地资源紧张之间的矛盾愈发突出，在一定程度上限制了光伏发电项目的规模化布局与发展。为应对上述问题，海拔较高、地形复杂的山地地区逐渐成为大规模建设光伏电站的重要选择[3]。

但山地现场施工条件普遍较差：盘山公路坡度大、弯道急、路面狭窄，对常规施工极为不利。尤其在吊装作业环节，施工道路宽度由常规的12 m缩减至5～6 m，局部区域坡度甚至达到30%以上，大型履带吊等传统吊装设备难以正常作业，往往需要反复拆装转运，大幅增加了施工成本与工期压力。

无人机技术应用领域逐步拓展后，为高海拔、复杂山地条件下光伏组件的运输、吊装与安装提供了全新的技术路径。该施工方式具有作业效率高、机动灵活、部署便捷等特点，能够有效适配山地光伏工程的建设需求。

本文立足山地光伏工程吊装施工特点，结合项目工程案例，对山地光伏无人机吊装施工技术与实施要点展开研究，以期进一步完善无人机吊装施工管理体系，推动相关技术在山地光伏建设中的规范化应用。

1　工程概况

1.1　工程简介

本项目位于河北省石家庄市，由中国水利水电第十六工程局有限公司总承包建设。项目以山地光伏电站建设为核心，建设规模为60 MW，占地面积约1.136 km^2。

项目光伏场区分布较为分散，涉及多个乡镇，通

作者信息

杨　静，男，中国水利水电第十六工程局有限公司，工程师，项目执行经理。

中国知网　https://www.cnki.net

过 35 kV 集电线路及约 33 个基站接入升压站，完成电力汇集与送出。

1.2 工程条件

本工程地处低山丘陵区，地形起伏较大，地面坡度介于 5°～25°之间，部分区域分布有沟壑、林木等障碍物。

项目区域气象条件为：年平均风速约 2.5 m/s，夏季极端风速可达 12.5 m/s（6 级风）；年降水量约 500 mm，降水主要集中在 7、8 月份。

光伏场区周边无重要建（构）筑物，集电线路建设需占用部分农田及乡村道路，场区邻近一条 10 kV 架空线路，施工时需保证与该线路安全距离不小于 10 m。

对外交通条件较好，主干道路可通行大型运输车辆；场内临时道路需进行拓宽改造，拓宽至 4 m 以上，以满足施工运输要求。

2 无人机运输

本工程场地最大坡度达 25°，采用无人机吊装运输方式，可有效解决因大型机械设备爬坡能力不足导致的运输效率低下、运输受阻等问题。无人机吊装能够显著降低施工成本，提升山地光伏组件的运输与安装效率。

2.1 无人机参数

结合项目实际工况、施工成本及山地地形分布特点，本项目选用 3WWDZ - U75A 型重型无人机作为核心吊装设备。该型无人机具备高精度的垂直与水平控制模式，最大起飞质量 150 kg，在较高风速环境下仍可保持稳定的飞行状态，基本满足本项目光伏组件的运输吊装要求，其具体性能参数如表 1 所示。

2.2 可行性分析

山地光伏项目施工中，基础设施、光伏组件及各类构件能否实现高效、高质量的运输与吊装，是决定项目能否顺利推进的核心，材料运输效率与施工质量直接影响项目总体进度计划、关键节点控制及各项工序的有序开展。本项目物资运输与吊装内容主要涵盖光伏区桩基础钢筋笼吊装、基础混凝土浇筑吊装、光伏支架立柱吊装、横梁与斜撑吊装、光伏组件吊装及集电线路塔架构件吊装等关键工序。

表 1 3 WWDZ-U75A 重型无人机核心参数

最大起飞质量	150 kg
最大有效载重	75 kg（含吊具）
续航时间	12～15 min（满载）
飞行半径	≤ 500 m
定位精度	水平 ± 2 cm，垂直 ± 3 cm
最大飞行速度	12 m/s（空载），8 m/s（满载）
抗风等级	≤ 6 级（12.5 m/s）
动力系统	6 旋翼电动

项目各类吊装材料与构件物理特性差异显著，针对不同构件特点，吊装前均需开展针对性的准备工作，为各工序安全、高效吊装提供前提条件。在吊装全过程中，需严格控制构件损耗，实现无损、安全作业，坚持稳妥、平稳、精准的作业原则，全面保障施工安全与安装质量，为山地复杂环境下光伏工程建设的顺利实施提供可靠保障。

与传统人工搬运、常规机械运输方式相比，无人机吊装技术可有效规避山地地形陡峭、施工场地狭小、大型设备进场困难等不利条件，从根本上解决传统运输方式效率低下、工期延误风险高、施工成本增加等突出问题。本项目以光伏基础设施及组件运输吊装为实践载体，通过现场施工验证，充分证明无人机吊装技术在山地光伏工程中具备良好的适用性、安全性与经济性，实现了该技术在山地复杂工况下的可靠应用，为同类山地光伏项目施工提供了可行的技术路径与实践参考。

3 无人机施工技术

本项目采用无人机对光伏板基础和光伏组件进行分别逐件吊装作业。吊装过程需严格遵循规范要求，依次完成吊装前准备、组件绑扎、空中吊运及就位安装等工序。整个作业过程须坚持“慢起、稳吊、轻放”的原则，确保吊装施工安全可靠。

3.1 光伏区桩基础钢筋吊装

在利用无人机开展桩基础钢筋吊装作业前，施工人员需先对桩孔内部浮土及碎石进行彻底清理，确保孔内无松散杂物，孔壁坚实、无空洞。为保证孔内干燥无积水，采用高压吹风机或鼓风机进行吹扫处理，同时使用测孔仪对桩孔进行检测，检测时沿孔周均匀选取 3 点或 3 点以上进行测量，并取平均值作为最终结果，同时检查孔壁垂直度，确保孔径不小于设计要求。

无人机正式吊装前，需保证绑扎点牢固无松动，在吊带与钢筋接触位置增设垫片进行防护，避免构件磨损。吊装前必须进行试吊，将钢筋笼吊起至地面 0.2～0.5 m 高度后悬停 30 s，检查钢筋与吊带连接是否可靠、有无位移，确认钢筋笼无倾斜、无松动后方可正式起吊。

中国知网 https://www.cnki.net

无人机飞至桩孔位置上方后缓慢下降，由现场操作人员精准控制，使钢筋笼平稳就位，确保其水平位置与垂直度均满足设计要求。就位完成后，按顺序解除绑扎点，无人机沿预设路线返航，完成本次吊装作业。

3.2 基础混凝土吊装

在开展基础混凝土无人机吊装作业前，钢筋笼及预埋构件须经监理单位验收合格，确保钢筋笼安装牢固、定位精准，预埋构件位置符合设计要求。混凝土浇筑前，振捣棒等浇筑振捣设备须提前就位，保证现场供电稳定，并配备足量备用设备，确保混凝土浇捣作业连续、稳定进行。

本工程采用圆柱形铁桶或其他高强度专用吊桶进行混凝土吊运，吊桶顶部需设置牢固吊环，严禁采用单面焊接方式直接起吊，确保吊环、吊带与无人机连接可靠。吊装前将商品混凝土缓慢注入吊桶，混凝土装填量不宜过满，防止运输过程中因晃动发生溢撒。吊桶装载重量须严格控制在无人机额定载重范围内，装载完成后进行试吊，将吊桶提升至地面 0.2 ~ 0.5 m 高度处悬停 30 s，检查吊桶垂直度、稳定性及晃动情况，确认安全无误后，无人机沿预设航线平稳飞抵浇筑点位。

到达浇筑点位后，无人机缓慢下降，由地面操作人员配合，将混凝土平稳、精准地注入浇筑口。浇筑完成后，无人机携带空吊桶按既定路线返航至混凝土上料点，完成单次混凝土吊装作业。混凝土吊装全过程须由专职指挥人员统一调度，实时监控吊桶稳定状态，全程保障吊装施工安全。

3.3 光伏支架立柱吊装

在开展光伏支架立柱吊装作业前，需先对场内场地进行清理，清除石块、杂物，并按规格分类堆放立柱构件。所有构件不得直接与地面接触，底部应铺设方木进行支垫防护。全部构件须经监理单位验收合格，同时确保预埋件表面洁净、无混凝土浮渣及杂物。

吊装前，在吊带与立柱的接触位置设置柔性垫片，保证吊装过程中构件受力均匀，绑扎点须牢固可靠，确保立柱在吊装过程中保持垂直状态。吊装前需进行试吊，将立柱提升至地面 0.2 ~ 0.5 m 高度后悬停 30 s，检查绑扎是否牢固、构件是否稳定，确认无误后方可正式起吊。

无人机将立柱吊运至预埋件上方后缓慢下降，由地面操作人员辅助完成立柱与预埋件的对中连接，并对立柱垂直度进行检测。若偏差较大，可通过无人机配合进行微调，待立柱垂直度与标高满足设计要求后，拧紧固定螺母，随后无人机解除绑扎并按预设路线返航。

3.4 横梁、斜撑吊装

横梁与斜撑构件进场前须经监理单位验收合格，构件长度偏差不得大于 2 mm，连接孔位偏差不得大于 1 mm。构件应按规范要求分类堆放，底部设置方木支垫，以防止构件产生变形、锈蚀等问题。吊装前，需对立柱顶端连接部位进行清理，去除表面浮灰及杂物，保证连接面洁净。

吊装作业时，横梁与斜撑均采用两点绑扎方式，绑扎点设置在构件两端各 200 mm 位置处。吊带与构件接触区域应设置柔性垫片，避免吊装过程中构件表面受损，并确保构件在吊装过程中保持水平稳定。

正式吊装前必须进行试吊。将构件提升至距地面 0.2 ~ 0.5 m 高度后悬停 30 s，检查绑扎是否牢固、构件是否保持水平、吊具与无人机连接是否可靠，确认各项条件满足安全要求后方可正式起吊。起吊后无人机缓慢、匀速上升，飞行过程中尽量保持平稳，减小构件晃动。飞至安装位置上方后，无人机缓慢下降，避免与立柱发生刚性冲撞。

当现场风力达到 6 级及以上，或出现雷雨、大雾等恶劣天气时，严禁进行横梁与斜撑吊装作业。吊装全过程中，在无人机及构件未稳定下降至指定位置前，作业区域下方严禁站人，严格落实安全防护措施，确保施工安全。

3.5 光伏组件吊装

光伏组件吊装前，应对作业区域场地进行平整，并在底部铺设方木，将光伏组件按规格、型号分类堆放。组件堆放倾角不大于 20°，玻璃面朝上，严禁直接与地面接触，防止受潮及表面损伤，堆放高度不宜超过 3 层。

本工程光伏组件吊装采用真空吸盘吊具，在组件背面四角距边缘 100 ~ 200 mm 处进行吸附固定，确保吊装过程受力均匀、稳定可靠。

吊装作业前需进行试吊，将组件提升至距地面 0.2 ~ 0.5 m 高度后悬停 30 s，检查真空吸盘吸附牢固性及组件稳定性。确认安全无误后，无人机匀速飞至指定安装位置上方并缓慢下降，由地面施工人员配合调整组件姿态，避免安装过程中出现偏移与错位。

3.6 集电线路构件吊装

无人机在山地光伏项目集电线路构件吊装中应用广泛。与光伏场区其他构件吊装作业相比，集电线路构件吊装对无人机稳定性、通信可靠性及施工安全性要求更高。

中国知网 https://www.cnki.net

吊装作业前，需重点检查无人机电池电量、通信信号强度等关键指标，确保作业过程中信号稳定、指令传输准确。当现场风速达到 6 级及以上，或遇雷雨、大雾等恶劣天气时，严禁开展吊装作业。吊装前应在施工区域设置警戒区，在山体主要出入口及塔基周边布设明显的警戒标志，禁止无关人员进入作业范围。

吊装时应严格按照设计要求绑扎，确保构件受力均匀；吊带与构件接触部位设置柔性垫片，避免构件表面划伤或损伤。起吊过程中应保持塔件垂直，防止倾斜、晃动。正式吊装前必须进行试吊，将构件提升至距地面 0.2 ~ 0.5 m 高度后悬停 30 s，检查构件稳定性、受力均衡性及垂直度，确认无倾斜、无松动、连接牢固且满足安全要求后，方可匀速、缓慢提升。

无人机飞行过程中，操作人员需实时监控信号强弱变化，确保飞行状态稳定。构件吊运至设计安装位置上方后，无人机缓慢下降，避免与已安装完成的铁塔结构发生刚性碰撞。作业全过程由地面指挥人员统一调度监控，无人机操作人员根据现场指令及时进行位置微调，确保吊装与安装精准、安全完成。

4 无人机吊装的工作效率分析

以混凝土浇筑吊装作业为例，对无人机吊装施工功效进行定量分析与计算。受山地地形条件限制，本项目无人机吊装以垂直运输为主，构件与材料的水平运输距离为 100 ~ 250 m。混凝土吊装作业采用直径 32 cm、筒深 50 cm 的专用吊桶，共开展 10 次作业，无人机每 10 min 吊装次数统计结果如图 1 所示。

根据现场实测数据统计，无人机在 100 min 内累计完成吊装作业约 47 次，平均每 10 min 吊装次数为 4.7 次。在此基础上，对无人机混凝土吊装功效进行计算。

单次吊装有效运载量计算公式为：

$$V = \frac{1}{4}\pi d^2 h \times 0.8$$

式中：d 为吊桶直径；h 为吊桶深度；0.8 为混凝土装填系数（防止运输过程中溢撒）。

代入参数计算可得：单次吊装有效运载量 $V = 0.25 \times 3.14 \times 0.32^2 \times 0.5 \times 0.8 \approx 0.032\ m^3$。结合作业频次，无人机每小时混凝土运载量为：$0.032 \times 4.7 \times 6 \approx 0.9\ m^3/h$。按每日有效作业时间 8 h 计算，单台无人机每日混凝土吊装总运载量为：$0.9 \times 8 = 7.2\ m^3/d$。

通过上述计算可知，无人机吊装在山地复杂地形条件下可保持稳定的作业效率，能够满足项目基础混凝土连续浇筑的施工需求。

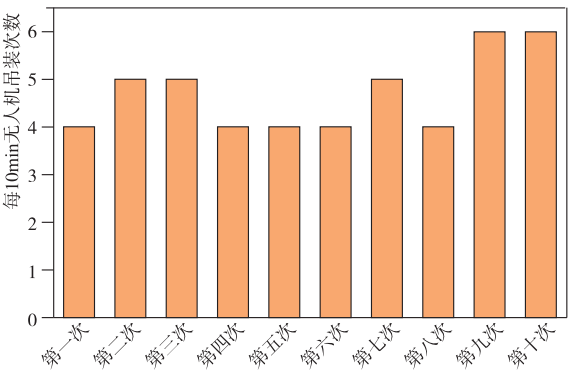


图 1 无人机吊装次数统计数

5 结语

本文以河北石家庄 60 MW 山地光伏支架项目为研究实例，系统论述了无人机吊装技术在山地光伏工程中的实际应用。结合项目工程条件与地形特点，本研究选用 3WWDZ - U75A 型重型无人机作为核心吊装设备，完成光伏基础、支架结构及光伏组件等关键构件的吊装运输作业，并对施工前期准备、吊装工艺流程及作业技术要点进行了全面分析与论证。同时，以混凝土浇筑吊装为典型工况，开展了施工功效的定量分析与计算。结果表明，无人机吊装技术在山地复杂环境下具备更高的运输效率与施工稳定性，充分验证了该技术在山地光伏项目中应用的可行性与优越性。本研究提出的无人机吊装施工方案，可为山地、高海拔等复杂地形条件下的光伏工程建设提供技术参考与实践依据，具有较高的研究价值与推广意义。

参考文献

[1] 周靖雯，明小燕，姜生斌，等．复杂山地光伏电站设计建设的关键技术研究 [J]．云南水力发电，2016，32（6）：57 - 60.

[2] 国家能源局．国家能源局发布 2025 年 1 - 10 月份全国电力工业统计数据 [EB/OL]．(2025 - 11 - 25). https://www.nea.gov.cn/20251125/c08a5f9b4a54481696a432ecd6c70dd3/c.html.

[3] 廖重阳，令狐克阳，胡广会．无人机吊装运输在高海拔地区山地光伏施工中的运用 [J]．科技与创新，2025（20）：226 - 229.

2026 - 03 - 09 来稿
2026 - 08 - 24 修回

中国知网 https://www.cnki.net