ICS 91.120.40
CCS M 04

中华人民共和国国家标准

GB/T 21714.1—2026/IEC 62305-1:2024
代替 GB/T 21714.1—2015

雷电防护　第1部分:总则

Protection against lightning—Part 1:General principles

（IEC 62305-1:2024,IDT）

2026-07-30 发布　　2027-02-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会　发布

目　　次

前言 …… Ⅲ
引言 …… Ⅴ
1　范围 …… 1
2　规范性引用文件 …… 1
3　术语和定义 …… 1
4　雷电流参数 …… 7
5　雷电损害 …… 8
6　雷电防护的必要性 …… 10
7　防护措施 …… 11
8　建筑物雷电防护的基本准则 …… 13
附录 A（资料性）　雷电流参数 …… 19
附录 B（资料性）　用于分析的雷电流时间函数 …… 27
附录 C（资料性）　用于测试的雷电流模拟 …… 32
附录 D（资料性）　模拟雷电流对 LPS 部件影响的测试参数 …… 36
附录 E（资料性）　不同安装点的雷电电涌电流 …… 47
参考文献 …… 53

图 1　GB/T 21714(所有部分)之间的关系 …… Ⅴ
图 2　LPS 确定的 LPZ(GB/T 21714.3—2026) …… 16
图 3　LPS 和 SPM 确定的 LPZ(GB/T 21714.4—2026) …… 17
图 A.1　依据 IEC 62475 的冲击电流参数定义 …… 19
图 A.2　长时间雷击参数的定义 …… 20
图 A.3　下行地闪和多重雷击下行地闪(通常是对平地和低矮建筑物的雷击)的可能组成成分（未按比例） …… 20
图 A.4　上行地闪(通常为对暴露和/或较高建筑物的雷击)的可能组成成分(未按比例) …… 21
图 A.5　雷电流参数的累积概率分布(虚线为 50%概率值) …… 24
图 B.1　首次正极性短时间雷击电流的上升沿波形 …… 28
图 B.2　首次正极性短时间雷击电流的下降沿波形 …… 28
图 B.3　首次负极性短时间雷击电流的上升沿波形 …… 29
图 B.4　首次负极性短时间雷击电流的下降沿波形 …… 29
图 B.5　后续负极性短时间雷击电流的上升沿波形 …… 30
图 B.6　后续负极性短时间雷击电流的下降沿波形 …… 30
图 B.7　按 LPL Ⅰ参数得出的雷电流幅频密度曲线 …… 31

图 C.1　模拟首次正极性短时间雷击单位能量和长时间雷击电荷的试验发生器 …… 32
图 C.2　根据表 C.3 定义的雷电流陡度 …… 34
图 C.3　用于大试品的模拟首次正极性短时间雷击波头陡度的试验发生器 …… 34
图 C.4　用于大试品的模拟后续负极性短时间雷击波头陡度的试验发生器 …… 35
图 D.1　用于计算两导线电动力的示意图 …… 41
图 D.2　LPS 的导体典型布置图 …… 41
图 D.3　图 D.2 结构应力(F)示意图 …… 42
图 D.4　沿图 D.2 中水平导线单位长度上的力(F') …… 42

表 1　雷电对典型建筑物的影响 …… 8
表 2　不同雷击点的损害源、致损原因、损失类型 …… 10
表 3　各 LPL 对应的雷电流参数最大值 …… 14
表 4　各 LPL 对应的雷电流参数最小值及其滚球半径 …… 14
表 5　雷电流参数限值对应的概率 …… 14
表 A.1　雷电流参数值(摘自 CIGRE 报告) …… 22
表 A.2　雷电流参数的对数正态分布——根据 5%到 95%的概率值计算出的雷电流参数的均值(μ)及标准差(σ_{log})(摘自 CIGRE 报告) …… 23
表 A.3　累积概率(P)与雷电流峰值(I)的关系 …… 24
表 B.1　公式(B.1)的参数 …… 27
表 C.1　首次正极性短时间雷击的测试参数 …… 33
表 C.2　长时间雷击测试参数 …… 33
表 C.3　短时间雷击的测试参数 …… 33
表 D.1　在计算不同的 LPS 部件和不同的 LPL 下的测试值时采用的雷电威胁参数 …… 36
表 D.2　LPS 部件常用材料的物理特性 …… 38
表 D.3　不同截面积导体的温升与 W/R 的关系 …… 39
表 E.1　雷击导致的低压系统电涌电流典型值 …… 50
表 E.2　雷击导致的通信系统电涌电流典型值 …… 51

前　言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则　第1部分:标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是GB/T 21714《雷电防护》的第1部分。GB/T 21714已经发布了以下部分:

——第1部分:总则;

——第2部分:风险管理;

——第3部分:建筑物的物理损害和生命危险;

——第4部分:建筑物内电气和电子系统。

本文件代替GB/T 21714.1—2015《雷电防护　第1部分:总则》,与GB/T 21714.1—2015相比,除结构调整和编辑性改动外,主要技术变化如下:

a) 更改了适用范围(见第1章,2015年版的第1章);

b) 更改了部分术语和定义(见第3章,2015年版的第3章);

c) 增加了露天矿场、地下矿场两种典型建筑物(见表1);

d) 将建筑物的“损害类型”更改为“致损原因”及致损原因的类型(见5.1.3,2015年版的5.1.2);

e) 更改了损失类型(见5.2,2015年版的5.2);

f) 更改了雷电防护的必要性(见第6章,2015年版的第6章);

g) 更改了防护措施中的通则(见7.1,2015年版的7.1)。

本文件等同采用IEC 62305-1:2024《雷电防护　第1部分:总则》。

本文件做了下列最小限度的编辑性改动:

——在“范围”一章中增加了“注3”,3.11、3.12增加了“注2”,3.51、3.63增加了“注”,便于对文件的理解;

——增加了英文对应词(见3.1、3.60);

——将定义中资料性内容更改为示例(见3.33、3.55);

——增加了许用术语(见3.20);

——增加了示例(见3.24、3.25);

——表2中补充了致损原因D_3对应的损失类型L_3,更正了IEC 62305-1:2024中表2的编辑性错误。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国雷电防护标准化技术委员会(SAC/TC 258)提出并归口。

本文件起草单位:四川中光防雷科技股份有限公司、重庆市防雷中心、中国气象科学研究院、国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司、浙江省建筑设计研究院有限公司、中国汽车工业工程有限公司、中国电力科学研究院有限公司、维谛技术有限公司、中信建筑设计研究总院有限公司、上海市避雷装置检测站有限公司、中国标准化协会、贵州省气象服务中心、福建省气象灾害防御技术中心、青岛雷克石电力科技有限公司、河南扬博防雷科技有限公司、上海大学、广东粤电科试验检测技术有限公司、云南电网有限责任公司电力科学研究院、华南理工大学建筑设计研究院有限公司、广东华信智能交通科技有限公司 、上海电力大学、深圳抛物线科技有限公司、浙江华甸防雷科技股份有限公司、合隆新材料科技(江苏)有限公司、国网山东省电力公司无棣县供电公司、浙江泰科天唯电气有限公司、广东天文气象科技服务有限公司。

本文件主要起草人:杨国华、张红文、姚喜梅、许伟、姚雯、李健、程澍、孙文华、赵静、曾瑜、孟奇、

李蔚、杨震、丁旻、刘冰、周良军、宋利源、邓威、周歧斌、王科、莫理莉、罗志勇、边晓燕、雷全学、黄必臻、谢昊稼、牛金江、郑铁如、黄强、牛宜洁。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

——2008年首次发布为GB/T 21714.1—2008，2015年第一次修订；

——本次为第二次修订。

引　言

迄今尚无设备和方法能够改变自然界的天气现象以完全阻止雷电的发生。雷电击中建筑物或建筑物附近（或击中连接至建筑物的线路）对建筑物本身及其内部物体、设备以及线路、人员都是危险的，因此需采取雷电防护措施。GB/T 21714（所有部分）所考虑的防护措施已被证明能有效降低风险。所有的防护措施共同构成综合雷电防护。

GB/T 21714《雷电防护》旨在提出雷电防护（LP）措施以有效降低雷电风险，拟由4个部分构成。

——第1部分：总则。目的在于规定建筑物及其设施、内部物体以及人员雷电防护要遵循的一般原则。

——第2部分：风险管理。目的在于规定建筑物雷电风险管理的流程，包括计算建筑物的雷击风险值。选定风险容许上限值后，通过该流程选择合适的防护措施，将风险降低至容许限值或以下；还包括评估雷电电涌导致内部系统损害的频次。选定损害频次容许上限值后，通过该流程选择合适的防护措施，将损害频次降低至容许限值或以下。

——第3部分：建筑物的物理损害和生命危险。目的在于规定用于防护建筑物物理损害的雷电防护系统（LPS）的要求，以及防止在LPS附近因接触电压和跨步电压造成人员伤害的要求。

——第4部分：建筑物内电气和电子系统。目的在于规定建筑物内电气和电子系统电涌防护措施（SPM）的设计、安装、检验、维护和测试要求，以降低雷电电磁脉冲（LEMP）导致的永久性失效风险。

GB/T 21714（所有部分）之间的关系如图1所示。

注：在建筑物防护措施中采用符合IEC 62793的雷暴预警系统能有助于减小物理损害、生命危险以及电气和电子系统失效。

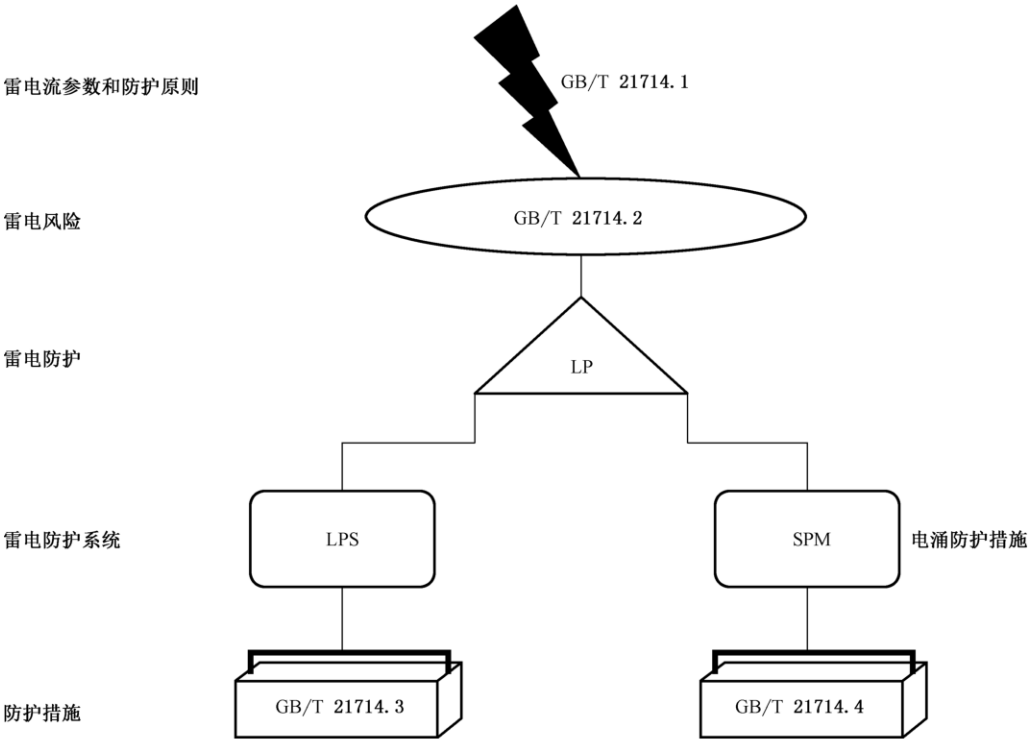


图1　GB/T 21714（所有部分）之间的关系

雷电防护　第1部分:总则

1　范围

本文件规定了建筑物及其设施、内部物体以及人员雷电防护要遵循的一般原则。

以下情况不属于本文件的适用范围:

——铁路系统;

——车辆、船舶、飞行器、离岸设施;

——地下高压管道;

——不与建筑物直接连接的管道、供电线路和通信线路;

——核电厂。

GB/T 21714(所有部分)规定了建筑物雷电防护的最低要求。

除非有国际大电网会议(CIGRE)提供的最新资料,本文件提供的雷电流参数也能用于离岸设施。

注1:上述情况下,通常建筑物适用各专业主管部门制定的专业规范。如附属或其他建筑物不属于上述专业规范适用范围,GB/T 21714(所有部分)仍适用。

注2:IEC 61400-24也适用于风力发电机组的雷电防护。

注3:本文件中的建筑物泛指建(构)筑物。

2　规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 21714.3—2026　雷电防护　第3部分:建筑物的物理损害和生命危险(IEC 62305-3:2024,IDT)

GB/T 21714.4—2026　雷电防护　第4部分:建筑物内电气和电子系统(IEC 62305-4:2024,IDT)

3　术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

ISO和IEC维护的用于标准化的术语数据库网址如下:

——ISO在线浏览平台:https://www.iso.org/obp;

——IEC电工百科:https://www.electropedia.org/。

3.1

地闪　lightning flash to earth;cloud-to-ground lightning

云地间的大气放电现象,由一个或多个雷击组成。

3.2

下行地闪　downward flash

始于云对地向下先导的地闪。

注:下行地闪包含一个首次短时间雷击,其后可能跟随几个后续短时间雷击。一个或多个短时间雷击之后,还可能跟随一个长时间雷击。

3.3

上行地闪　upward flash

始于地面建筑物对云端向上先导的地闪。

注：上行地闪包含一个首次长时间雷击，叠加或不叠加多个短时间雷击。一个或多个短时间雷击之后还可能跟随一个长时间雷击。

3.4

雷击　lightning stroke

地闪中的一次对地放电。

3.5

短时间雷击　short stroke

对应一个冲击电流的地闪组成部分。

注：该冲击电流波尾半峰值时间(T_2)通常小于 2 ms(见附录 A 的图 A.1)。

3.6

长时间雷击　long stroke

对应一个连续电流的地闪组成部分。

注：该连续电流的持续时间(T_{LONG})(从波头 10%电流峰值处到波尾 10%电流峰值处的时间间隔)通常大于 2 ms 小于 1 s(见图 A.2)。

3.7

多重雷击地闪　multiple strokes lightning flash

平均由 3 个～4 个雷击组成的地闪，相邻雷击的时间间隔通常约为 50 ms。

注：已记录到时间间隔范围在 10 ms～250 ms 并包含几十个雷击的地闪。

3.8

雷击点　point of strike

地闪击中大地或建筑物的点(如房屋、LPS、线路、树等)。

注：一个地闪可能有不止一个雷击点。

3.9

雷电流　lightning current

i

流经雷击点的电流。

3.10

电流峰值　current peak value

I

雷电流的最大值。

3.11

冲击电流波头的平均陡度　average steepness of the current front

$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$

数值上等于冲击电流的峰值(I)除以冲击电流的波头时间(T_1)。

注 1：见 3.10、3.12 和图 A.1。

注 2：波头也称波前。

3.12

冲击电流的波头时间　front time of impulse current

T_1

雷电流波头达到 10%峰值和 90%峰值时间间隔的 1.25 倍。

注 1：见图 A.1。

注 2：波头也称波前。

3.13

冲击电流的视在原点　virtual origin of impulse current

O_1

连接雷电流波头10%峰值和90%峰值两参考点的直线与时间轴的交点。它位于雷电流达到10%峰值时刻之前$0.1T_1$处。

注：见图A.1。

3.14

冲击电流波尾半峰值时间　time to half value on the tail of impulse current

T_2

冲击电流的视在原点(O_1)到雷电流下降至峰值一半时的时间间隔。

注：见图A.1。

3.15

地闪持续时间　flash duration

T

雷电流流过雷击点的时间。

3.16

长时间雷击电流的持续时间　duration of long stroke current

T_{LONG}

长时间雷击连续电流在上升沿升到10%峰值时至下降沿降到10%峰值时的时间间隔。

注：见图A.2。

3.17

地闪电荷　flash charge

Q_{FLASH}

整个地闪持续期间雷电流对时间的积分。

3.18

短时间雷击电荷　short stroke charge

Q_{SHORT}

一次短时间雷击中雷电流对时间的积分。

3.19

长时间雷击电荷　long stroke charge

Q_{LONG}

一次长时间雷击中雷电流对时间的积分。

3.20

单位能量　specific energy

比能量

W/R

雷电流的平方在整个雷击持续期内对时间的积分。

注：单位能量表示雷电流在单位电阻上耗散的能量。

3.21

冲击电流的单位能量　specific energy of the impulse current

雷电流的平方在短时间雷击持续期内对时间的积分。

注：长时间雷击电流的单位能量能忽略。

3.22

被保护建筑物　structure to be protected

适合容纳人员、动物、材料或系统的任何场所、设施或房屋。

注：被保护建筑物有可能是较大建筑物的一部分。

3.23

线路　line

连接到被保护建筑物的供电或通信线路。

3.24

通信线路　telecommunication line

用于各建筑物中设备之间通信的线路。

示例：电话线路和数据线路。

3.25

供电线路　power line

为建筑物内的电气和电子设备供电的配电线路。

示例：低压(LV)或高压(HV)供电线路。

3.26

雷击建筑物　lightning flash to a structure

被保护建筑物遭受的雷击。

3.27

雷击建筑物附近　lightning flash near a structure

被保护建筑物附近遭受的雷击，可能产生危险过电压。

3.28

雷击线路　lightning flash to a line

连接到被保护建筑物的线路遭受的雷击。

3.29

雷击线路附近　lightning flash near a line

连接到被保护建筑物的线路附近遭受的雷击，可能产生危险过电压。

3.30

危险事件　dangerous event

雷击被保护建筑物或附近，以及雷击连接到被保护建筑物的线路或附近，且可能在建筑物内部导致损害的事件。

3.31

危险火花　dangerous sparking

由雷电引起的、可能会导致被保护建筑物物理损害的放电现象。

3.32

电气系统　electrical system

由低压供配电各部件构成的系统。

3.33

电子系统　electronic system

含有敏感电子部件的系统。

示例：通信设备、计算机、控制和仪表系统、无线电系统、电力电子装置。

3.34

内部系统　internal systems

建筑物内的电气和电子系统。

注：内部系统可以是位于建筑物屋顶上与建筑物内部有线路连接的电气和电子系统。

3.35

物理损害　physical damage

由于雷电的机械、热、化学或爆炸等效应对建筑物(或其内部物体)所造成的损害。

3.36

人员伤害　injury to human beings

雷电造成的人身伤害,包括死亡。

3.37

内部系统失效　failure of internal systems

雷电电磁脉冲(LEMP)导致的电气和电子系统损害。

3.38

雷电电磁脉冲　lightning electromagnetic impulse;LEMP

雷电产生的快时变电磁场,通过电阻性、电感性和电容性耦合在电路中产生电涌。

3.39

电涌　surge

LEMP 在线路和设备上引起的瞬态过电压和/或瞬态过电流。

3.40

雷电防护区　lightning protection zone;LPZ

规定雷电电磁环境的区域。

注：LPZ 的区域边界不一定是物理边界(如墙壁、地板和天花板等)。

3.41

损害频次　frequency of damage

F

被保护建筑物内部系统可能遭受的损害事件的年次数。

3.42

损害频次容许值　tolerable frequency of damage

F_T

被保护建筑物或分区内设备所能容许的最大损害频次值。

3.43

损失　loss

L

被保护建筑物防护区发生的危险事件导致的特定类型损失的平均值。

3.44

公众利益相关损失　loss of public relevance

所导致后果超出决策方范围的损失,例如外部后果、人员伤害、公众服务中断,也包括物理损害、环境损害以及其他需要公众承担成本的损失。

示例：为限制损害采取的应急措施的成本、建筑物和生产损失导致的成本、重建的成本。

3.45

服务　service

建筑物内部系统提供的满足特定需求的功能。

3.46

公共服务　service of public relevance

涉及公众利益或文化遗产的服务。

3.47

风险　risk

R

雷击造成的建筑物或建筑物分区内年均可能损失。

3.48

风险容许值　tolerable risk

R_T

被保护建筑物所能容许的最大风险值。

3.49

雷电防护等级　lightning protection level;LPL

与一组雷电流参数值有关的序数,该组参数值与在自然界发生雷电时最大和最小设计值不被超出的概率有关。

注:雷电防护等级用于根据雷电流的一组相关参数值设计防护措施。

3.50

防护措施　protection measures

为降低被保护建筑物雷电损害风险或损害频次而采取的措施。

3.51

雷电防护　lightning protection;LP

建筑物及其内部系统、物体以及人员防御雷电的措施,通常包括 LPS 和 SPM。

注:LP 也能采用雷暴预警系统(TWS)等辅助防护措施。

3.52

雷电防护系统　lightning protection system;LPS

用以减小雷击建筑物造成物理损害和人员伤害的整个系统。

注:LPS 由外部雷电防护系统和内部雷电防护系统两部分构成。

3.53

外部雷电防护系统　external lightning protection system

LPS 的组成部分,由接闪系统、引下系统和接地终端系统组成。

3.54

内部雷电防护系统　internal lightning protection system

LPS 的组成部分,由防雷等电位连接和/或外部 LPS 的电气分隔组成。

3.55

接闪系统　air-termination system

外部 LPS 的组成部分,用于拦截直击雷。

示例:接闪杆、网格形接闪线(带)或悬空接闪线。

3.56

引下系统　down-conductor system

外部 LPS 的组成部分,用于将雷电流从接闪系统引至接地终端系统。

3.57

接地终端系统　earth-termination system

外部 LPS 的组成部分,用于传导雷电流并泄放入大地。

3.58

外部导电部件　external conductive parts

进出被保护建筑物、可能传导部分雷电流的金属部件。

示例：管道、金属电缆桥架单元、金属通风管道。

3.59

防雷等电位连接　lightning equipotential bonding;EB

直接用导体或通过电涌保护器将分离的导电部件与 LPS 进行连接，以减少雷电流引起的电位差。

3.60

冲击接地阻抗　conventional earthing impedance;impulse earthing impedance

接地终端电压峰值与电流峰值之比，通常两者峰值不会同时发生。

3.61

电涌防护措施　surge protection measures;SPM

内部系统防御 LEMP 效应所采取的各种措施。

注：SPM 是综合雷电防护的一部分。

3.62

电磁屏蔽　electromagnetic shield

减小时变电磁场侵入被保护建筑物或其部分的导电材料屏蔽体，用于减少内部系统的失效。

3.63

电涌保护器　surge protective device;SPD

至少包含一个非线性的元件，用于限制瞬态过电压和泄放电涌电流的电器。

注：SPD 具有适当的连接方式，是一个装配完整的单元或电器。

3.64

协调配合 SPD 系统　coordinated SPD system

为减少电气和电子系统失效，通过合理选型、协调配合及规范安装组成的 SPD 系统。

3.65

隔离界面　isolating interfaces

能减少进入 LPZ 的线路上的传导电涌的装置。

注 1：隔离界面包括绕组间屏蔽层接地的隔离变压器、无金属光缆和光隔离器。

注 2：隔离界面的绝缘耐受特性由其产品本身或通过加装 SPD 实现。

3.66

间隔距离　separation distance

s

为避免产生危险火花，承载全部或部分雷电流的导体与其他导电部件间保持的必要距离。

3.67

安全距离　safety distance

d_s

内部系统和 LPZ 屏蔽体之间的必要距离，满足此距离要求时 LPZ 磁场屏蔽有效。

4　雷电流参数

GB/T 21714(所有部分)所采用的雷电流参数见附录 A。

用于分析的雷电流时间函数见附录 B。

用于测试的雷电流模拟见附录 C。

用于实验室模拟雷电流对 LPS 部件影响的测试参数见附录 D。

有关不同安装点雷电电涌电流的资料见附录 E。

5 雷电损害

5.1 对建筑物的损害

5.1.1 概述

对建筑物产生影响的雷电可能导致建筑物本身、其内部物体以及使用者受到损害，包括内部系统失效。这些损害和失效也可能蔓延至建筑物周围，甚至影响当地环境。其蔓延的规模取决于建筑物及雷电的特性。

5.1.2 雷电对建筑物的影响

与雷电效应有关的建筑物主要特性包括：

——结构（如木结构、砖结构、混凝土结构、钢筋混凝土结构、钢框架结构）；

——用途（住宅、办公室、农场、剧院、酒店、学校、医院、博物馆、教堂、监狱、商店、银行、制造厂、工业设施、运动场所）；

——使用者和内部物体（人员和动物、可燃或不燃材料、易爆或不易爆材料、放射性物质、危险生化材料、额定冲击耐受电压不同的电气和电子系统）；

——连接到建筑物的管道和线路（供电线路、通信线路）；

——光伏系统、汽车充电系统、基站设备；

——已有的防护措施（如减少物理损害和人员伤害的防护措施、减少内部系统失效的防护措施）；

——危害范围（疏散困难、可能引起恐慌、危及周围和环境的建筑物）。

雷电对典型建筑物的影响见表 1。

表 1 雷电对典型建筑物的影响

建筑物类型 （按用途及内部物体分类）	雷电的影响
住宅	电气装置击穿、火灾或材料损坏。 损害通常限于受雷击点或雷电流通道影响的建筑物。 装设的电气、电子设备和系统失效（如电视机、计算机、调制解调器、电话等）
农场建筑	首要的风险是火灾、危险的跨步电压以及材料损坏； 次要的风险是断电，以及通风系统、饲料供应系统电子控制失效等使动物受到伤害
剧院、酒店、学校、 商店、运动场所	电气装置损坏（如电灯照明）可能导致恐慌。 火警失效使消防延误
银行、保险公司、 商业公司等	包括上述所有影响，以及通信中断、计算机失效和数据丢失所产生的问题
医院、疗养院、监狱	包括上述所有影响，以及特护人员问题，行动不便人员的救援困难等
工厂	额外的影响取决于工厂的内部物体，影响范围从轻微的损害到不可接受的损害和停产
博物馆、古迹、教堂	不可替代的文化遗产的损失
通信设施、电厂	不可接受的公共服务损失

表 1　雷电对典型建筑物的影响（续）

建筑物类型 （按用途及内部物体分类）	雷电的影响
烟花厂、军火厂	火灾和爆炸危及工厂和四邻
露天矿场	危险跨步电压风险、厂房和移动机械的损害风险（包括轮胎爆炸）
地下矿场	危险跨步电压风险、停电风险、瓦斯和粉尘爆炸火灾风险
化工厂、冶炼厂、 生化实验室和工厂	工厂发生火灾和故障给当地和全球环境带来有害的后果

5.1.3　建筑物的损害源和致损原因

雷电流是损害源。按雷击点相对于所考虑的建筑物的位置，应包括以下情况：

——S1：雷击建筑物；

——S2：雷击建筑物附近；

——S3：雷击线路；

——S4：雷击线路附近。

a）　雷击建筑物可能导致：

——由于炽热的雷电等离子电弧本身或电流使导体阻性发热（导体过热）或电荷导致电弧烧蚀（金属熔化）引起的直接机械损坏、火灾和/或爆炸；

——由于电阻性耦合、电感性耦合或流过部分雷电流产生的过电压引起的火花触发火灾和/或爆炸；

——直接雷击或电阻性耦合、电感性耦合导致电击造成人员伤害；

——LEMP 导致内部系统失效或故障。

b）　雷击建筑物附近可能导致：LEMP 使内部系统失效或故障。

c）　雷击线路可能导致：

——通过连接到建筑物的线路传导的过电压和雷电流产生的火花触发火灾和/或爆炸；

——通过连接到建筑物的线路传导的雷电流在建筑物内产生接触电压导致电击造成人员伤害；

——在连接到建筑物的线路上出现并传导到建筑物的过电压使内部系统失效或故障。

d）　雷击线路附近可能导致在连接到建筑物的线路上感应并传导到建筑物内的过电压使内部系统失效或故障。

注 1：GB/T 21714（所有部分）不涉及内部系统暂时失效的问题。见 IEC 61000-4-5。

注 2：这里认为只有雷电流（全部或部分）产生的火花可能触发火灾。

注 3：如果入户金属管道与建筑物的等电位连接排连接，则雷击管道或其附近都不会使建筑物受到损害（见 GB/T 21714.3—2026）。

因此，致损原因可划分为以下 4 种类型：

——D_{1D}：人员遭受直接雷击导致的电击；

——D_{1T}：电阻性耦合和电感性耦合导致人员被电击；

——D_2：建筑物内产生的危险火花，能引发火灾或爆炸，或导致机械和化学效应，或两者皆有，还可能危及环境；

——D_3：所有导致内部系统失效的损害源引起的电涌。

5.2 损失类型

与被保护建筑物相关的每一种致损原因，单独或与其他致损原因结合，都可能产生不同类型的损失。可能出现的损失类型取决于被保护建筑物本身的特性。

GB/T 21714(所有部分)考虑地闪可能导致的以下损失类型：

——L_1：人员伤害的损失，致损原因是 D_{1D}、D_{1T}、D_2，在内部系统失效可能导致人员伤害的建筑物中，如具有爆炸风险的建筑物或医院，还可能是 D_3；

——L_2：建筑物及其内部物体的物理损害引起的损失，致损原因是 D_2，在具有爆炸风险的建筑物中，还可能是 D_3；

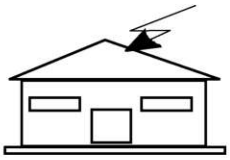
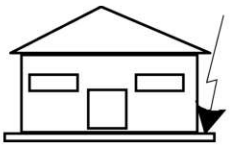
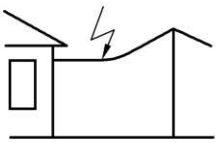
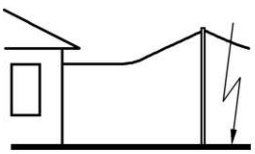
——L_3：内部系统失效导致的损失，致损原因是 D_3。

风险计算适用于损失类型为 L_1 和 L_2、具有公众利益相关性的所有建筑物。

损失类型 L_3 有可能对建筑物内部系统提供的服务造成不可接受的损害，因而也可能影响公共服务。

不同雷击点的损害源、致损原因和损失类型的对应关系见表 2。

表 2 不同雷击点的损害源、致损原因、损失类型

雷击点		损害源	致损原因	损失类型
建筑物		S1	D_{1T}	L_1
			D_{1D}	L_1
			D_2	L_1、L_2
			D_3	L_1[a]、L_2[b]、L_3
建筑物附近		S2	D_3	L_1[a]、L_2[b]、L_3
连接到建筑物的线路		S3	D_{1T}	L_1
			D_2	L_1、L_2
			D_3	L_1[a]、L_2[b]、L_3
连接到建筑物的线路附近		S4	D_3	L_1[a]、L_2[b]、L_3

[a] 仅对内部系统失效危及人员生命的建筑物，如医院和具有爆炸风险的建筑物。

[b] 仅对具有爆炸风险的建筑物。

6 雷电防护的必要性

6.1 风险和损害频次

应根据人身安全(损失类型 L_1)和建筑物及其内部物体的安全(损失类型 L_2)评估风险(R)。

风险(R)通过其风险分量之和进行评估,风险分量取决于损害源或损失类型;每一风险分量可按以下参数之积估算:

——年平均危险事件次数(N);

——损害概率(P);

——损害导致的损失(L)。

建筑物内部设备应按规定的服务可用性(损失类型 L_3)评估损害频次(F)。

损害频次(F)可通过其损害频次分量之和进行评估,损害频次分量取决于损害源;每一损害频次分量可按年平均危险事件次数(N)与其损害概率(P)之积估算。

注:风险、风险分量、损害频次、损害频次分量的详细内容见 GB/T 21714.2—2026。

6.2 采取防护措施降低风险(R)

如果风险(R)大于风险容许值(R_T),即:

$$R > R_T$$

则防护措施是必要的。

这种情况下,应采取防护措施,使风险(R)降低至不大于风险容许值(R_T),即:

$$R \leqslant R_T$$

风险容许值(R_T)的数值由相关主管部门负责确定。

注 1:相关主管部门可能为风险(R)评估是否也需符合国家法规提供指导。

注 2:相关主管部门可能不经风险评估就规定特定应用领域需采取雷电防护措施。在这种情况下,所需雷电防护等级由该部门确定。

注 3:风险评估和雷电防护措施选择程序的详细内容见 GB/T 21714.2—2026。

6.3 采取防护措施降低损害频次(F)

如果损害频次(F)大于损害频次容许值(F_T),即:

$$F > F_T$$

则防护措施是必要的。

这种情况下,应采取防护措施,使损害频次(F)降低至不大于损害频次容许值(F_T),即:

$$F \leqslant F_T$$

当所涉及的服务与公众利益相关时,损害频次容许值(F_T)由相关主管部门负责确定。

其他情况下,宜由建筑物业主或管理方决定是否需要降低损害频次(F)或确定损害频次容许值(F_T)。

注 1:相关主管部门可能为损害频次(F)评估是否也需符合国家法规提供指导。

注 2:相关主管部门可能不经损害频次评估就规定特定应用领域需采取雷电防护措施。在这种情况下,所需雷电防护等级由该部门确定。

注 3:损害频次评估和雷电防护措施选择程序的详细内容见 GB/T 21714.2—2026。

7 防护措施

7.1 通则

可采取防护措施降低风险(R)和损害频次(F)。

最常用的防护措施有:

——减少电击造成人员伤害的防护措施(见 7.2);

——减少物理损害的防护措施(见 7.3);

——减少内部系统失效的防护措施(见 7.4)。

此外,如果可根据雷暴预警系统发出的警报采取适当防护措施,符合 IEC 62793 的雷暴预警系统启动的应急预案能作为一种预防措施降低各种损失类型相关的风险(R)或损害频次(F)。

注 1:雷暴预警系统(TWS)提供大气电活动的实时信息。基于预警信息可通过减少暴露时间或断开雷电电涌进入建筑物的线路等一种或多种临时性预防措施降低风险(R)和损害频次(F)。在某些快速移动或局部形成的雷暴情况下,雷暴预警系统不一定总能提供及时的预警。

适当的预防措施举例如下:

a) 停止存在危险的活动;

b) 将人员转移到安全庇护所;

c) 断开外部线路,仅使用本地内部电源。

上述 c)中断开外部线路的断路器宜具备足够高的耐受电压,以避免在雷电电涌发生时发生闪络。

如果断路器的耐压过低,应在前端设置附加 SPD 保护。此外,所有线路都应断开 N 和 PEN 线,在某些接地型式下可能无法实现。在损害源 S1 和 S2 情况下,线路回路中的感应耦合不能通过断开线路来减少,这需要具体研究。在损害源 S3 和 S4 情况下,为保护电气和电子系统,TWS 的预警范围宜涵盖建筑物和与建筑物连接的线路。

注 2:防护措施的可行性取决于活动的特点、暴露区域人员情况以及根据 TWS 提供的信息采取预防措施的可能性。

注 3:采用雷暴预警系统降低风险(R)和损害频次(F),以及减小的程度由雷电防护设计师根据 TWS 启动的防护措施预案进行评估。

注 4:降低风险分量措施有关详细信息见 GB/T 21714.2—2026 的附录 B。

7.2 减少电击造成人员伤害的防护措施

可能的防护措施包括:

——雷电防护系统(LPS);

——外露导电部件的充分绝缘;

——等电位措施;

——限制活动范围和设置警示牌。

注:等电位措施和增加建筑物内外地表接触电阻可减小生命危险(见 GB/T 21714.3—2026 的第 8 章)。

7.3 减少物理损害的防护措施

采用符合 GB/T 21714.3—2026 的雷电防护系统(LPS)实现保护。

注 1:安装 LPS 时,等电位措施是减小火灾、爆炸和生命危险的一种措施。详见 GB/T 21714.3—2026。

注 2:限制火灾发生和蔓延的措施,如设防火分区、灭火器、消防栓、火警和灭火装置能减少物理损害。

7.4 减少内部系统失效的防护措施

符合 GB/T 21714.4—2026 的电涌防护措施(SPM)包括:

- 接地和等电位连接;
- 电磁屏蔽;
- 合理布线;
- 隔离界面;
- 协调配合 SPD 系统。

这些防护措施可单独使用,也可组合起来使用。

注 1:考虑损害源 S1 时,只有在采用 LPS 保护或具有连续金属或钢筋混凝土框架作为自然 LPS 的建筑物中这些防护措施才有效。

注 2:考虑损害源 S1 和 S3 时,隔离界面的耐受水平在某些情况下可能不足。

7.5 防护措施的选择

7.2～7.4 中列举的防护措施共同构成综合雷电防护。

最恰当的防护措施应由雷电防护设计师和建筑物业主根据每种损失的类型、各类损失的数量、不同防护措施的技术条件和经济合理性以及风险评估结果来选择。

风险(R)和损害频次(F)评估,以及最恰当防护措施选择的准则见 GB/T 21714.2—2026。

如果防护措施符合相关标准的要求并能承受安装点预期的应力,则该防护措施有效。

8 建筑物雷电防护的基本准则

8.1 概述

建筑物的理想雷电防护措施是将被保护建筑物置于接地良好、有足够厚度、电气贯通良好的屏蔽体内,并在连接到建筑物的线路进入屏蔽体的入口处做适当的等电位连接。

这种防护措施能防止雷电流及其电磁场侵入被保护建筑物,并避免雷电流引起危险的热效应和电动力效应,同时防止在内部系统产生危险的火花及过电压。

实际上,提供这种理想的防护措施通常既不可行,经济上也不合理。

如果屏蔽体电气贯通性不良和/或厚度不够,雷电流可能侵入屏蔽体,从而导致:

——物理损害和生命危险;

——内部系统失效。

8.2 雷电防护等级(LPL)

为了减少这些损害及相关损失,所采取的防护措施应按确定需防护的一组雷电流参数值(雷电防护等级)进行设计。

本文件划分了 4 级雷电防护等级(Ⅰ～Ⅳ)。对每一级 LPL 规定了一组雷电流参数的最大值和最小值。

LPL 通常按风险评估结果选定。

注 1:超出 LPL Ⅰ所规定雷电流参数最大值和最小值范围外的雷电防护需要根据其具体情况选择和设置符合本文件要求的更有效的防护措施。

注 2:超出 LPL Ⅰ所规定雷电流参数最大值和最小值范围的雷电发生概率小于 2%。

预期超出 LPL Ⅰ规定的雷电流参数最大值的概率不超过 1%。预期有不超过 10%的正极性地闪和不超过 1%的负极性地闪超过规定的最大值。假设正极性地闪比例不超过 10%(见 A.2),正极性地闪和负极性地闪总计超过规定雷电流参数最大值的概率不超过 1%(见 A.3)。LPL Ⅱ最大雷电流参数为 LPL Ⅰ的 75%,而 LPL Ⅲ和 LPL Ⅳ为 LPL Ⅰ的 50%(I、Q、和 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 遵循线性回归关系,W/R 遵循平方的关系)。时间参数不变。

注 3:雷电防护等级的雷电流参数最大值小于 LPL Ⅳ对应值时,考虑损害概率大于 GB/T 21714.2—2026 中附录 B 给出的值,以便为经济合理性采取差异化防护措施。

表 3 给出不同雷电防护等级的雷电流参数最大值,用于设计雷电防护部件(如导体截面积、金属板厚度、SPD 的通流容量、防止危险火花的间隔距离等)和确定模拟雷电流对这些部件影响的测试参数(见附录 D)。

注 4:为方便应用,各 LPL 都设定了对应的概率值。需要更详细分析时,采用图 A.2 中源自 CIGRE 的数据。

不同 LPL 对应的雷电流峰值最小值用于推导滚球半径(见 A.4),以便确定防直接雷击的雷电防护区 LPZ 0_B(见 8.3 和图 2、图 3)。表 4 给出雷电流参数最小值及其对应的滚球半径。滚球半径用于接闪系统的布置和确定雷电防护区 LPZ 0_B(见 8.3)。

表 3　各 LPL 对应的雷电流参数最大值

电流参数		符号	单位	LPL			
				Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
首次正极性短时间雷击	电流峰值	I	kA	200	150	100	
	电荷	Q_{SHORT}	C	100	75	50	
	单位能量	W/R	MJ/Ω	10	5.6	2.5	
	时间参数	T_1/T_2	μs /μs	10/350			
首次负极性短时间雷击[a]	电流峰值	I	kA	100	75	50	
	冲击电流波头的平均陡度	di/dt	kA/μs	100	75	50	
	时间参数	T_1/T_2	μs /μs	1/200			
后续短时间雷击	电流峰值	I	kA	50	37.5	25	
	冲击电流波头的平均陡度	di/dt	kA/μs	200	150	100	
	时间参数	T_1/T_2	μs /μs	0.25/100			
长时间雷击	电荷	Q_{LONG}	C	200	150	100	
	时间参数	T_{LONG}	s	0.5			
地闪	电荷	Q_{FLASH}	C	300	225	150	
[a] 首次负极性雷击仅应用于计算，与试验无关。							

表 4　各 LPL 对应的雷电流参数最小值及其滚球半径

拦截判据			LPL			
参数	符号	单位	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
最小电流峰值	I	kA	3	5	10	16
滚球半径	r	m	20	30	45	60

从图 A.5 给出的统计分布，分别确定雷电流参数小于各防护等级所规定的最大值并大于各防护等级所规定的最小值的加权概率(见表 5)。

表 5　雷电流参数限值对应的概率

雷电流参数在下列范围内的概率	LPL			
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
小于表 3 规定的最大值	0.99	0.98	0.95	0.95
大于表 4 规定的最小值	0.99	0.97	0.91	0.84

假如雷电流处在设计所取 LPL 规定的参数范围内，则按照 GB/T 21714.3—2026 和 GB/T 21714.4—2026 中所指定的雷电防护措施是有效的。因此，可认为雷电防护措施的效率等同于雷电流参数在此范围内的概率。超出此范围则存在剩余损害风险。

注 5：表 5 给出的是保守数值。根据本文件给出的准则和参数，同时考虑特定参数(如建筑物实际尺寸、接闪系统位置和高度、雷电流分流等)的专项研究能得出更高的效率值。

8.3 雷电防护区(LPZ)

雷电防护措施(如 LPS、屏蔽线、电磁屏蔽和 SPD 等)决定了雷电防护区(LPZ)。

与雷电防护措施上游的 LPZ 相比,其下游 LPZ 的特征是 LEMP 显著减弱。

根据雷电威胁的不同,定义以下 LPZ(见图 2 和图 3):

——LPZ 0_A:受直接雷击和全部雷电电磁场威胁的区域,该区域的内部系统可能受到全部或部分雷电电涌电流的影响;

——LPZ 0_B:直接雷击的防护区域,但该区域的威胁仍是全部雷电电磁场,该区域的内部系统可能受到部分雷电电涌电流的影响;

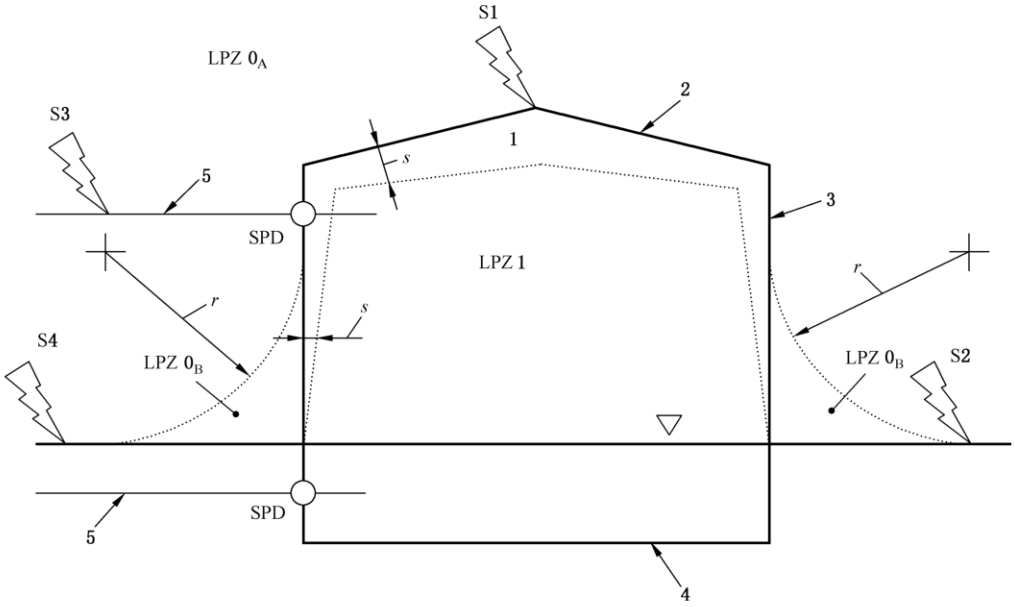
——LPZ 1:由于分流和 LPZ 边界处设置隔离界面和/或 SPD 使电涌电流受到限制的区域,该区域的空间屏蔽能衰减雷电电磁场;

——LPZ 2～n:由于分流和 LPZ 边界处设置隔离界面和/或附加 SPD 使电涌电流受到进一步限制的区域,该区域的附加空间屏蔽可进一步衰减雷电电磁场。

注 1:通常,雷电防护区域的序数越大,电磁环境参数越低。

作为雷电防护的一般规则,被保护建筑物应置于电磁特性与该建筑物耐受能力相兼容的 LPZ 内,从而减小损害(物理损害、过电压导致电气和电子系统失效)。

注 2:大多数电气、电子系统和设备耐受水平的资料由制造商提供。



标引序(符)号说明：

1　　——建筑物；

2　　——接闪系统；

3　　——引下系统；

4　　——接地终端系统；

5　　——入户线路；

S1　　——雷击建筑物；

S2　　——雷击建筑物附近；

S3　　——雷击连接到建筑物的线路；

S4　　——雷击连接到建筑物的线路附近；

r　　——滚球半径；

s　　——防危险火花的间隔距离(见 GB/T 21714.3—2026 的 6.3 和附录 B)；

▽　　——地面；

○　　——采用 SPD 的防雷等电位连接；

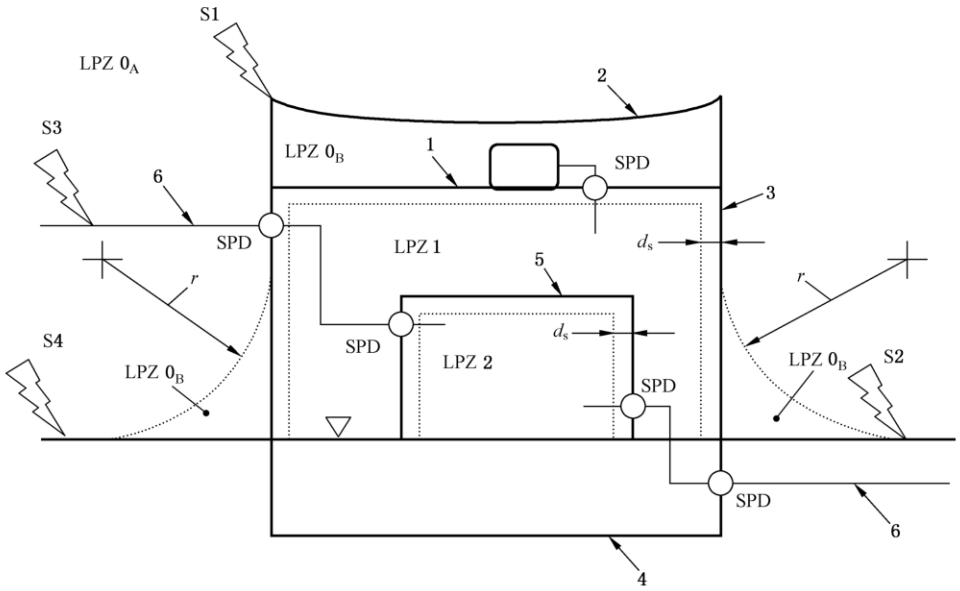
LPZ 0_A——直接雷击区，包含全部雷电流；

LPZ 0_B——非直接雷击区，包含部分雷电流或感应电流；

LPZ 1 ——非直接雷击区，包含已受限制的雷电流或感应电流。

LPZ 1 中被保护空间应符合间隔距离(s)的要求。

图 2　LPS 确定的 LPZ(GB/T 21714.3—2026)



标引序(符)号说明：

1　　——建筑物(LPZ 1 的屏蔽体)；

2　　——接闪系统；

3　　——引下系统；

4　　——接地终端系统；

5　　——房间(LPZ 2 的屏蔽体)；

6　　——连接到建筑物的线路；

S1　　——雷击建筑物；

S2　　——雷击建筑物附近；

S3　　——雷击连接到建筑物的线路；

S4　　——雷击连接到建筑物的线路附近；

r　　——滚球半径；

d_s　　——防过高磁场的安全距离(见 GB/T 21714.4—2026 的附录 A)；

▽　　——地面；

○　　——采用 SPD 的防雷等电位连接；

LPZ 0_A——直接雷击区，包含全部雷电流以及全部雷电电磁场；

LPZ 0_B——非直接雷击区，包含部分雷电流或感应电流以及全部雷电电磁场；

LPZ 1　——非直接雷击区，包含已受限制的雷电流或感应电流以及衰减了的雷电电磁场；

LPZ 2　——非直接雷击区，包含感应电流和进一步衰减的雷电电磁场。

LPZ 1、LPZ 2 内的保护空间应符合安全距离(d_s)的要求。

图 3　LPS 和 SPM 确定的 LPZ(GB/T 21714.4—2026)

8.4　建筑物防护

8.4.1　减小物理损害和生命危险的防护措施

被保护建筑物应处在 LPZ 0_B 或序数更大的雷电防护区内。通过雷电防护系统(LPS)实现防护。

LPS 由外部 LPS 和内部 LPS 两部分构成。

外部 LPS 有以下功能：

——拦截直击建筑物的地闪(利用接闪系统)；

——安全引导雷电流入大地(利用引下系统);

——使雷电流泄放入大地(利用接地终端系统)。

注:研究表明,在某些情况下(多重雷击地闪、强风等)后续雷击的雷电流通道接闪点距离首次雷击接闪点能达几米远。然而,雷电防护系统安装符合 GB/T 21714.3—2026 的规定时,建筑物因这种情况受损害的概率较低。首次雷击后雷电流通道保持需要有大持续电流流过。基于对风向和雷击点的专项研究,这种现象可能需要考虑。可能的解决方案包括增加接闪器数量、采用隔离 LPS 或增加接闪器长度。

内部 LPS 的功能是利用等电位连接或 LPS 部件与建筑物内导电部件之间的间隔距离(s)(从而达到电气隔离)避免建筑物内产生危险火花。

基于对应的 LPL,规定有 4 类 LPS(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ)。每类 LPS 包含与雷电防护等级有关(如滚球半径、网格宽度等)和与雷电防护等级无关(如截面积、材料等)的两类施工要求。

当建筑物外部地面电阻率和建筑物内楼面电阻率较小时,以下措施可减小因接触电压和跨步电压导致的生命危险:

——在建筑物外部,将外露导电部件绝缘,利用网格形接地终端系统进行等电位处理,设置警示牌和限制活动范围;

——在建筑物内部,在线路入户处进行等电位连接。

LPS 应符合 GB/T 21714.3—2026 的规定。

8.4.2 减少内部系统失效的防护措施

为降低内部系统失效风险,对 LEMP 采取的防护措施应限制:

——雷击建筑物,因电阻性或电感性耦合引起的电涌;

——雷击建筑物附近,因电感性耦合引起的电涌;

——雷击线路或线路附近而在与建筑物连接的线路上引起的电涌;

——与设备直接耦合的电磁场。

注:如果设备符合相关的 EMC 产品标准(见 GB/T 21714.2—2026 和 GB/T 21714.4—2026)规定的射频(RF)辐射和抗扰度试验要求,则由于雷电电磁场直接辐射进入设备而导致失效的情况可忽略。

被保护系统应置于 LPZ 1 或序数更大的雷电防护区内。这可采用电气和电子系统电涌防护措施(SPM)实现,包括衰减感应磁场的电磁屏蔽和/或减小感应回路的合理布线。穿过 LPZ 边界的金属部件和线路应在边界处进行等电位连接。这种等电位连接可采用等电位连接导体或必要时采用 SPD 实现。

LPZ 的防护措施应符合 GB/T 21714.4—2026 的规定。

还可采用隔离界面和/或协调配合 SPD 系统限制过电压,使其低于被保护系统的额定冲击耐受电压,以实现对导致内部系统失效的过电压的有效防护。

应根据 GB/T 21714.4—2026 的规定选择与安装隔离界面和 SPD。

附 录 A
（资料性）
雷电流参数

A.1 地闪

地闪有两种基本类型：

——始于云对地的一个向下先导的下行地闪；

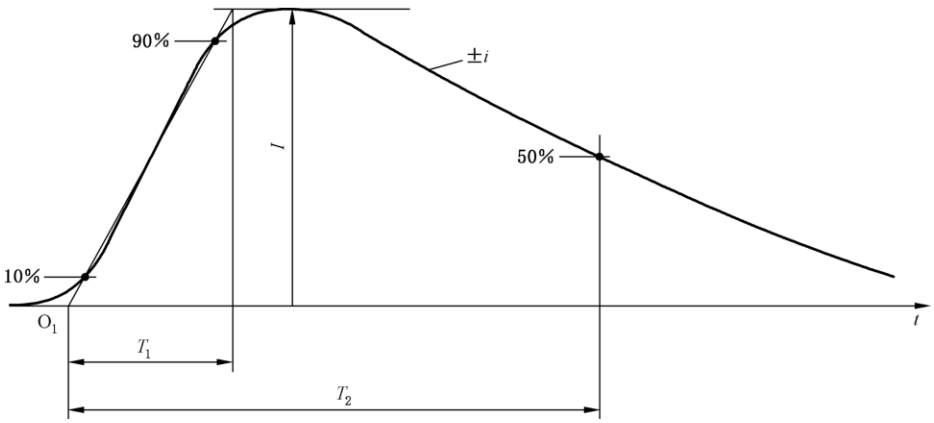
——始于地面建筑物对云的一个向上先导的上行地闪。

在平地和低矮建筑物上出现的大多是下行地闪，而在暴露的和/或高耸的建筑上出现的主要是上行地闪。随着建筑物有效高度的增加，建筑物上遭受直接雷击的概率增加（见 GB/T 21714.2—2026 的附录 A）且物理状态发生变化。

地闪可能由一个或多个不同的雷击组成：

——持续时间小于 2 ms 的短时间雷击（见图 A.1）；

——持续时间大于 2 ms 的长时间雷击（见图 A.2）。



标引符号说明：

O_1——冲击电流的视在原点（连接雷电流波头 10%峰值和 90%峰值两参考点的直线与时间轴的交点，它位于雷电流达到 10%峰值时刻之前 $0.1T_1$ 处）；

I ——电流峰值；

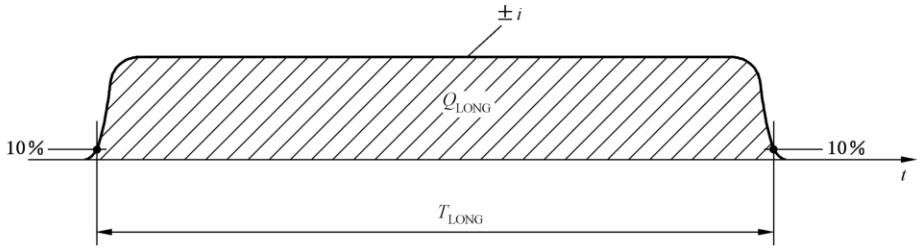
i ——电流；

t ——时间；

T_1——冲击电流的波头时间；

T_2——冲击电流波尾半峰值时间（典型值 $T_2<2$ ms）。

图 A.1 依据 IEC 62475 的冲击电流参数定义



标引符号说明：

T_{LONG}——长时间雷击电流的持续时间(典型值 2 ms$<T_{LONG}<$1 s)；

Q_{LONG}——长时间雷击电荷。

图 A.2　长时间雷击参数的定义

雷击按其极性(正极性或负极性)和在地闪中所处的位置(首次、后续、叠加)进一步区分。图 A.3 所示是下行地闪和多重雷击下行地闪的可能组成成分，图 A.4 所示是上行地闪的可能组成成分。

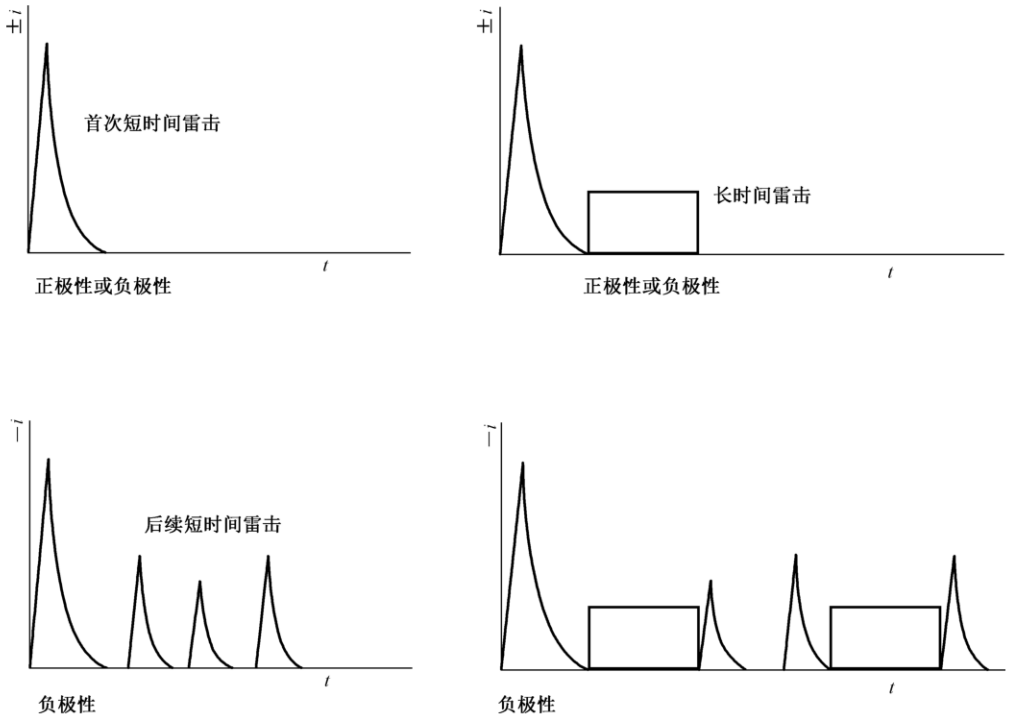


图 A.3　下行地闪和多重雷击下行地闪(通常是对平地和低矮建筑物的雷击)的可能组成成分(未按比例)

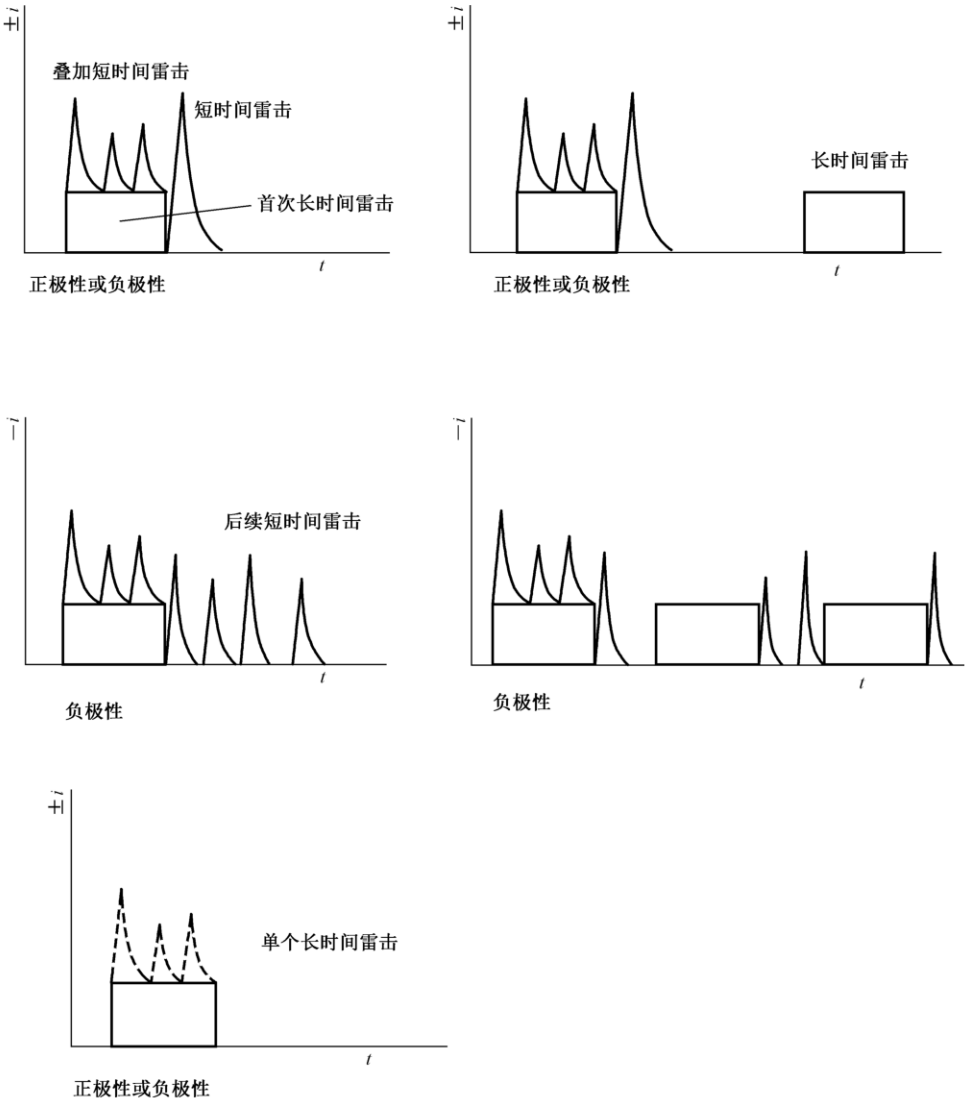


图 A.4　上行地闪(通常为对暴露和/或较高建筑物的雷击)的可能组成成分(未按比例)

上行地闪的附加成分是首次长时间雷击上可能叠加高达几十个短时间雷击。不过上行地闪的所有冲击电流参数都比下行地闪的小。具有较大长时间雷击电荷量的上行地闪尚未获得证实。所以,可认为下行地闪的冲击电流参数最大值涵盖了上行地闪的冲击电流参数。

注：IEC 61400-24 提供了具有较大长时间雷击电荷量的上行地闪的有关资料,特别是在冬季雷电高发地区。该标准还提供了评估风机年平均雷击次数和上行地闪活动的方法。

A.2　雷电流参数

本文件雷电流参数依据 CIGRE 报告获得,见表 A.1。其统计分布可假定为对数正态分布。相应的均值(μ)和标准差(σ_{log})见表 A.2,图 A.5 表示其分布函数。据此可确定每一参数任何值出现的概率。

注 1：有关雷电流参数详细资料见 Heidler 等所著 ICLP 2008 文章。

假设 10%的地闪为正极性,90%的地闪为负极性。实际极性比与地域有关。如果没有当地的资料可利用,宜采用这里给出的地闪极性比。

首次正极性短时间雷击和首次负极性短时间雷击雷电流峰值超出前述考虑范围的概率值见表 A.3。

表 A.1　雷电流参数值(摘自 CIGRE 报告)

参数	LPL Ⅰ的确定值	数值			雷击类型	图 A.5 中的曲线
		95%	50%	5%		
I kA		4[a]	20[a]	90	首次负极性短时间雷击[b]	1A+1B
	50	4.9	11.8	28.6	后续负极性短时间雷击[b]	2
	200	4.6	35	250	首次正极性短时间雷击(单个)	3
Q_{FLASH} C		1.3	7.5	40	负极性地闪	4
	300	20	80	350	正极性地闪	5
$Q_{SHORT\ STROKE}$ C		1.1	4.5	20	首次负极性短时间雷击	6
		0.22	0.95	4	后续负极性短时间雷击	7
	100	2	16	150	首次正极性短时间雷击(单个)	8
W/R kJ/Ω		6	55	550	首次负极性短时间雷击	9
		0.55	6	52	后续负极性短时间雷击	10
	10 000	25	650	15 000	首次正极性短时间雷击	11
di/dt_{max} kA/μs		9.1	24.3	65	首次负极性短时间雷击[b]	12
		9.9	39.9	161.5	后续负极性短时间雷击[b]	13
	20	0.2	2.4	32	首次正极性短时间雷击	14
$di/dt_{30\%/90\%}$ kA/μs	200	4.1	20.1	98.5	后续负极性短时间雷击[b]	15
$Q_{LONG\ STROKE}$ C	200				长时间雷击	
$T_{LONG\ STROKE}$ s	0.5				长时间雷击	
波头持续时间 μs		1.8	5.5	18	首次负极性短时间雷击	
		0.22	1.1	4.5	后续负极性短时间雷击	
		3.5	22	200	首次正极性短时间雷击(单个)	
雷击持续时间 μs		30	75	200	首次负极性短时间雷击	
		6.5	32	140	后续负极性短时间雷击	
		25	230	2 000	首次正极性短时间雷击(单个)	
雷击时间间隔 ms		7	33	150	多重负极性雷击	
总地闪持续时间 ms		0.15	13	1 100	负极性地闪(全部)	
		31	180	900	负极性地闪(无单个)	
		14	85	500	正极性地闪	

注：$Q_{LONG\ STROKE}$和$T_{LONG\ STROKE}$仅与下行地闪有关。$Q_{LONG\ STROKE}=Q_{FLASH}-Q_{SHORT\ STROKE}$，因此表中没有统计值。

[a] I=4 kA 和 I=20 kA 的概率分别等于 98%和 80%。

[b] 参数和相关值见参考文献[15]。

表 A.2　雷电流参数的对数正态分布——根据5%到95%的概率值计算出的雷电流参数的均值(μ)及标准差(σ_{log})(摘自 CIGRE 报告)

参数	均值 μ	标准差[a] σ_{log}	雷击类型	图 A.5 中的曲线
I kA	(61.1)	0.576	首次负极性短时间雷击(80%)[b]	1A
	33.3	0.263	首次负极性短时间雷击(80%)[b]	1B
	11.8	0.233	后续负极性短时间雷击[b]	2
	33.9	0.527	首次正极性短时间雷击(单个)	3
Q_{FLASH} C	7.21	0.452	负极性地闪	4
	83.7	0.378	正极性地闪	5
$Q_{SHORT\ STROKE}$ C	4.69	0.383	首次负极性短时间雷击	6
	0.938	0.383	后续负极性短时间雷击	7
	17.3	0.570	首次正极性短时间雷击(单个)	8
W/R kJ/Ω	57.4	0.596	首次负极性短时间雷击	9
	5.35	0.600	后续负极性短时间雷击	10
	612	0.844	首次正极性短时间雷击	11
di/dt_{max} kA/μs	24.3	0.260	首次负极性短时间雷击[b]	12
	40.0	0.369	后续负极性短时间雷击[b]	13
	2.53	0.670	首次正极性短时间雷击	14
$di/dt_{30\%/90\%}$ kA/μs	20.1	0.420	后续负极性短时间雷击[b]	15
$Q_{LONG\ STROKE}$[c] C			长时间雷击	
$T_{LONG\ STROKE}$[c] s			长时间雷击	
波头持续时间 μs	5.69	0.304	首次负极性短时间雷击	
	0.995	0.398	后续负极性短时间雷击	
	26.5	0.534	首次正极性短时间雷击(单个)	
雷击持续时间 μs	77.5	0.250	首次负极性短时间雷击	
	30.2	0.405	后续负极性短时间雷击	
	224	0.578	首次正极性短时间雷击(单个)	
雷击时间间隔 ms	32.4	0.405	多重负极性雷击	
总地闪持续时间 ms	12.8	1.175	负极性地闪(全部)	
	167	0.445	负极性地闪(无单个)	
	83.7	0.472	正极性地闪	

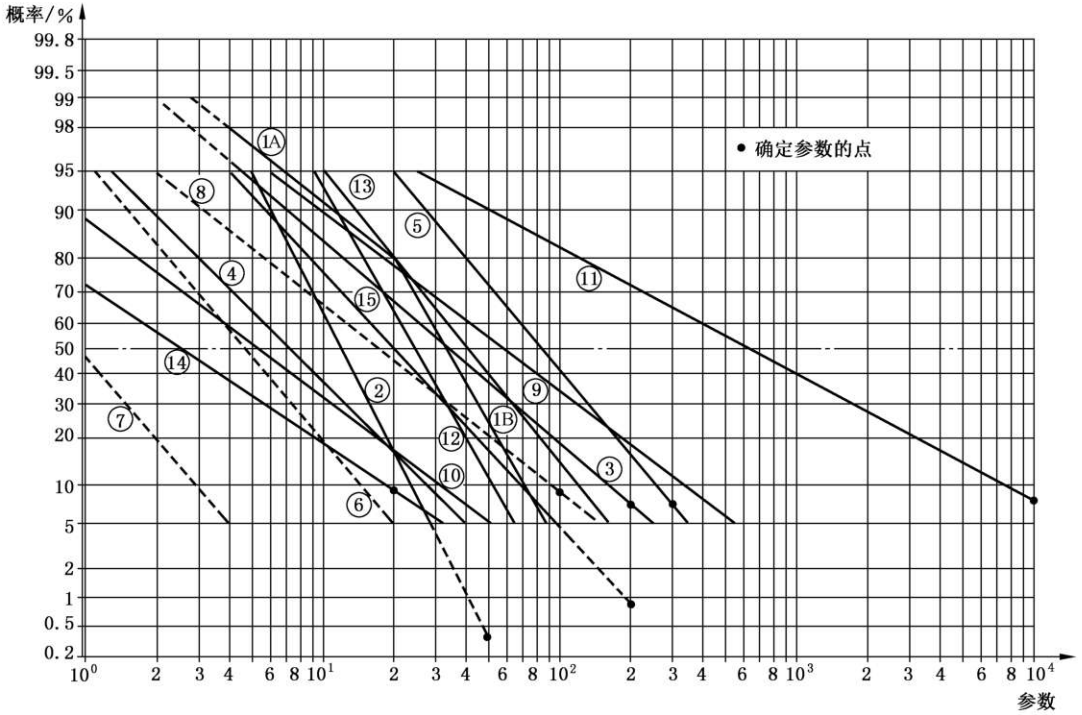
[a] σ_{log}是表征参数对数正态分布点偏离均值程度的值,对数正态分布区间($-\sigma_{log}$,$+\sigma_{log}$)的积分为68.2%。

[b] 参数和相关值见参考文献[15]。

[c] 参数值见参考文献[17]。

表 A.3　累积概率(P)与雷电流峰值(I)的关系

I/kA	P
0	1
3	0.99
5	0.95
10	0.91
20	0.8
30	0.6
35	0.5
40	0.4
50	0.3
60	0.2
80	0.1
100	0.05
150	0.02
200	0.01



注：曲线的编号见表 A.1 和表 A.2。

图 A.5　雷电流参数的累积概率分布(虚线为 50%概率值)

本文件给出的所有与 LPL 相关的数值与下行地闪和上行地闪都有关。

注 2：雷电参数值通常是在高耸物体上测得的。不考虑高耸物体影响的雷电流参数峰值的统计分布也能利用雷电定位系统获得。

A.3 LPL Ⅰ最大雷电流参数值的确定

A.3.1 概述

雷电的机械效应与雷电流的峰值(I)和单位能量(W/R)有关。电阻性耦合时其热效应与雷电流的单位能量(W/R)有关,而当装置发生电弧时其热效应与电荷量(Q)有关。感应耦合引起的过电压和危险火花与雷电冲击电流波头的平均陡度($\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$)有关。

某个参数(I、Q、W/R、$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$)往往会在一种失效机理中起主要作用。在确立试验步骤时应注意这种情况。

A.3.2 首次正极性短时间雷击和长时间雷击

与机械效应和热效应有关的 I、Q(地闪电荷和短时间雷击电荷)、W/R 值由正极性地闪决定(因为正极性地闪累积概率 10%的参数值远大于负极性地闪累积概率 1%的参数值)。由图 A.5(曲线 3、5、8、11 和 14),可取概率低于 10%的下列值:

$$I = 200\ \mathrm{kA}$$

$$Q_{\mathrm{FLASH}} = 300\ \mathrm{C}$$

$$Q_{\mathrm{SHORT}} = 100\ \mathrm{C}$$

$$W/R = 10\ \mathrm{MJ/\Omega}$$

$$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t = 20\ \mathrm{kA/\mu s}$$

根据图 A.1,对于首次正极性短时间雷击,上述数值给出波头时间的一级近似值为:

$$T_1 = I/(\mathrm{d}i/\mathrm{d}t) = 10\ \mu\mathrm{s}(T_1\ \text{意义不大})$$

对指数衰减的雷击,计算电荷和能量的近似值按以下公式($T_1 << T_2$):

$$Q_{\mathrm{SHORT}} = (1/0.7) \cdot I \cdot T_2$$

$$W/R = (1/2) \cdot (1/0.7) \cdot I^2 \cdot T_2$$

利用这些公式与上面给出的数值,得出冲击电流波尾半峰值时间的一级近似值为:

$$T_2 = 350\ \mu\mathrm{s}$$

对于长时间雷击,其电荷从下式近似计算:

$$Q_{\mathrm{LONG}} = Q_{\mathrm{FLASH}} - Q_{\mathrm{SHORT}} = 200\ \mathrm{C}$$

根据图 A.2,其持续时间可由表 A.1 中的数值估算为:

$$T_{\mathrm{LONG}} = 0.5\ \mathrm{s}$$

A.3.3 首次负极性短时间雷击

某些电感性耦合效应中,由于首次负极性短时间雷击电流的幅值很高持续时间很长,产生的感应电压最高,比如在钢筋混凝土电缆管道中敷设的电缆中。根据图 A.5(曲线 1 和 12),可取概率低于 1%的下列数值:

$$I = 100\ \mathrm{kA}$$

$$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t = 100\ \mathrm{kA/\mu s}$$

对于图 A.1 的首次负极性短时间雷击,利用上面给出的数值可得出其波头时间的一级近似值为:

$$T_1 = I/(\mathrm{d}i/\mathrm{d}t) = 1\ \mu\mathrm{s}$$

其冲击电流波尾半峰值时间可从首次负极性短时间雷击持续时间估算:

$$T_2 = 200\ \mu\mathrm{s}(T_2\ \text{意义不大})$$

A.3.4 后续短时间雷击

与电感性耦合产生危险火花有关的冲击电流波头的平均陡度($\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$)最大值由负极性地闪的后续

短时间雷击决定(因为其累积概率1%的值稍大于首次负极性短时间雷击累积概率1%的值或正极性地闪累积概率10%的值)。根据图A.5(曲线2和15)可取概率低于1%的下列值:

$$I=50\ \text{kA}$$

$$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t=200\ \text{kA}/\mu\text{s}$$

对于图A.1的后续短时间雷击,利用上面给出的数值可得出波头时间的一级近似值:

$$T_1=I/(\mathrm{d}i/\mathrm{d}t)=0.25\ \mu\text{s}$$

其冲击电流波尾半峰值时间可从后续负极性短时间雷击持续时间估算:

$$T_2=100\ \mu\text{s}(T_2\ \text{意义不大})$$

A.4 最小雷电流参数值的确定

接闪系统的截收效率取决于雷电流最小参数和相关的滚球半径。直接雷击防御区域的几何边界可用滚球法确定。

根据电气-几何模型,滚球半径(r)(最后击距)与首次雷击电流的峰值有关。根据IEEE的一个工作小组报告,其关系式见公式(A.1):

$$r=10\times I^{0.65} \qquad \cdots\cdots(\text{A.1})$$

式中:

r ——滚球半径,单位为米(m);

I ——电流峰值,单位为千安(kA)。

对于已知的滚球半径(r),可假定,峰值大于对应的最小电流峰值(I)的所有地闪都会被自然或专设接闪器所截收。因此,图A.5(曲线1A和3)中负极性和正极性首次雷击峰值的概率可假定为截收概率。考虑地闪极性比为10%正极性和90%负极性,可计算总的截收概率(见表5)。

附 录 B
（资料性）
用于分析的雷电流时间函数

首次正极性短时间雷击(10/350 μs)、首次负极性短时间雷击(1/200 μs)、后续负极性短时间雷击(0.25/100 μs)的电流波形可定义为公式(B.1)：

$$i=\frac{I}{k}\times\frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}}{1+\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}}\times\exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \qquad \cdots\cdots(\text{B.1})$$

式中：

I ——电流峰值；

k ——电流峰值的校正系数；

t ——时间；

τ_1 ——波头时间常数；

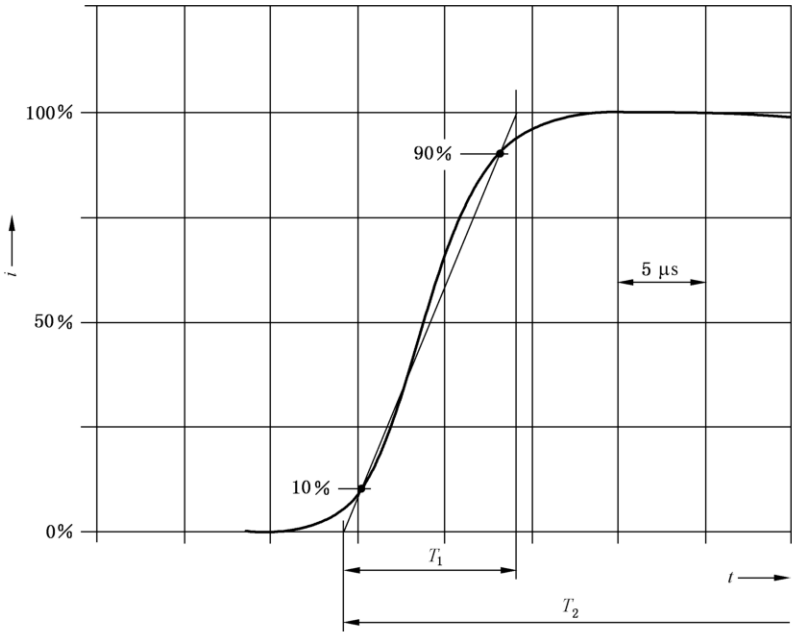
τ_2 ——半峰值时间常数。

对不同的 LPL，首次正极性短时间雷击、首次负极性短时间雷击和后续负极性短时间雷击的电流波形可采用表 B.1 给出的参数。其时间函数分析曲线见图 B.1～图 B.6。

注：时间函数($\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$)的最大值大于 A.3 规定的标准值(见图 B.1、图 B.3 和图 B.5)。

表 B.1 公式(B.1)的参数

参数	首次正极性短时间雷击			首次负极性短时间雷击			后续负极性短时间雷击		
	LPL			LPL			LPL		
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ～Ⅳ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ～Ⅳ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ～Ⅳ
I/kA	200	150	100	100	75	50	50	37.5	25
k	0.93	0.93	0.93	0.986	0.986	0.986	0.993	0.993	0.993
τ_1/μs	19	19	19	1.82	1.82	1.82	0.454	0.454	0.454
τ_2/ μs	485	485	485	285	285	285	143	143	143



标引符号说明：

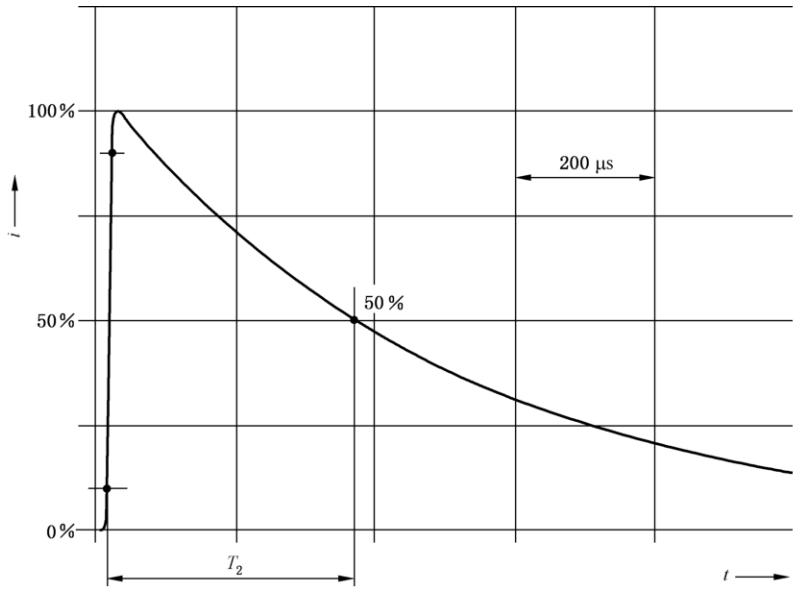
T_1——冲击电流的波头时间；

T_2——冲击电流波尾半峰值时间；

t ——时间；

i ——电流。

图 B.1 首次正极性短时间雷击电流的上升沿波形



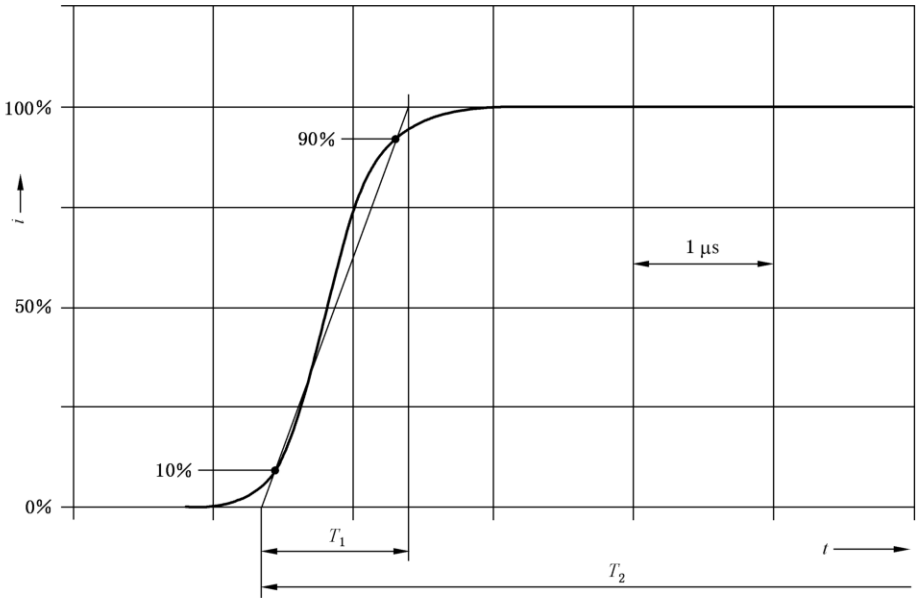
标引符号说明：

T_2——冲击电流波尾半峰值时间；

t ——时间；

i ——电流。

图 B.2 首次正极性短时间雷击电流的下降沿波形



标引符号说明：

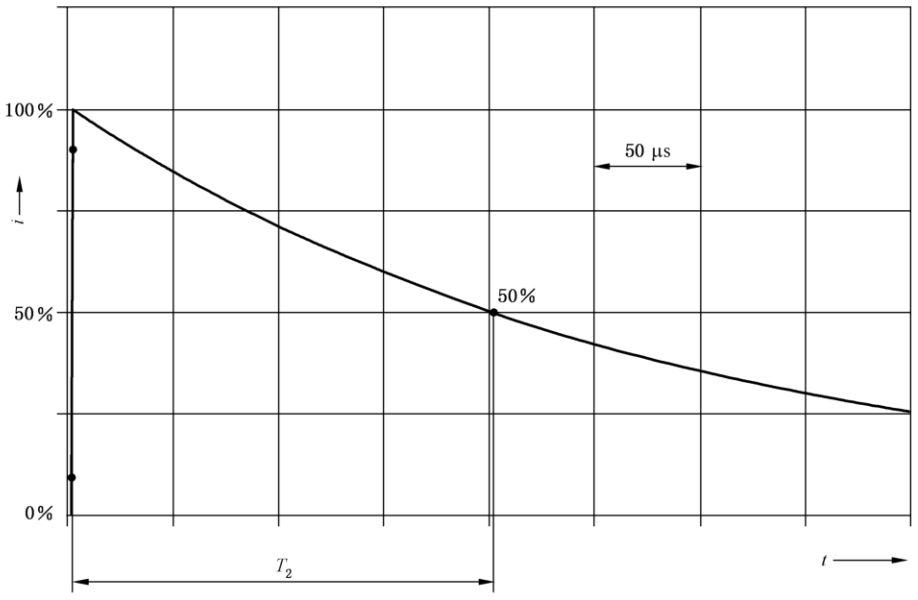
T_1——冲击电流的波头时间；

T_2——冲击电流波尾半峰值时间；

t ——时间；

i ——电流。

图 B.3 首次负极性短时间雷击电流的上升沿波形



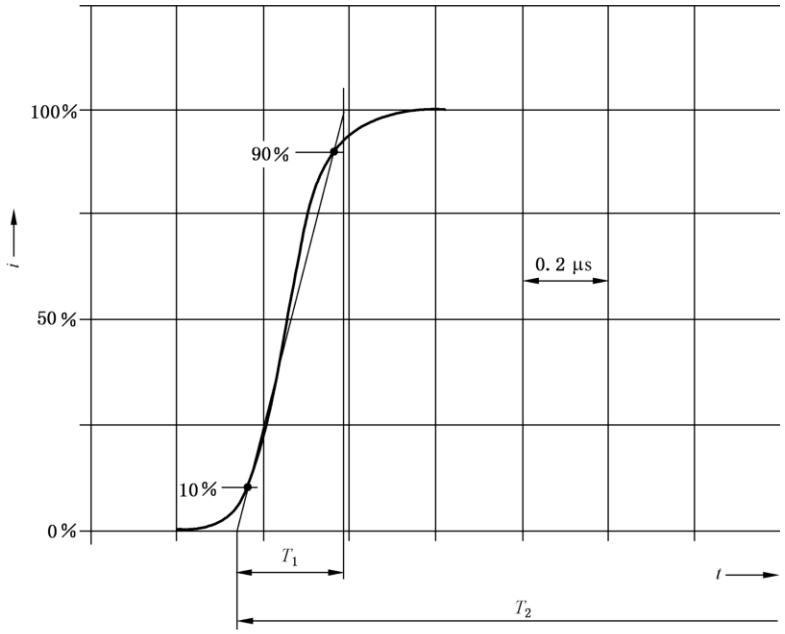
标引符号说明：

T_2——冲击电流波尾半峰值时间；

t ——时间；

i ——电流。

图 B.4 首次负极性短时间雷击电流的下降沿波形



标引符号说明：

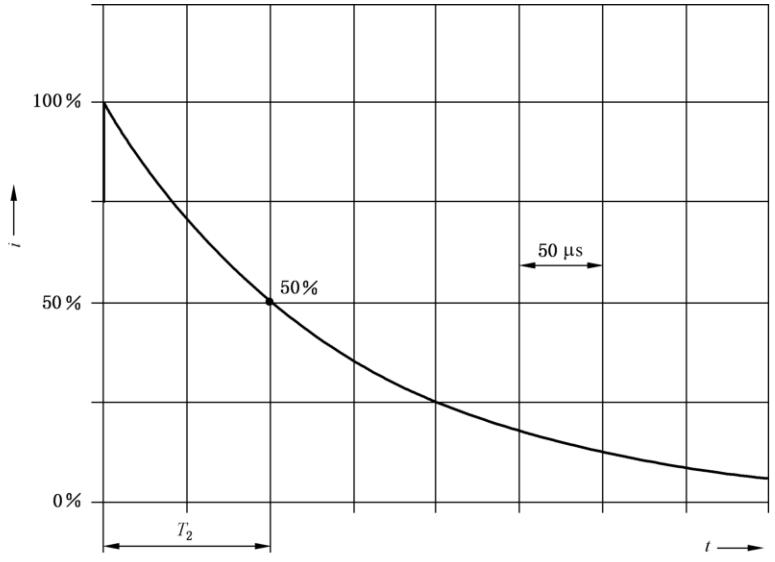
T_1——冲击电流的波头时间；

T_2——冲击电流波尾半峰值时间；

t ——时间；

i ——电流。

图 B.5 后续负极性短时间雷击电流的上升沿波形



标引符号说明：

T_2——冲击电流波尾半峰值时间；

t ——时间；

i ——电流。

图 B.6 后续负极性短时间雷击电流的下降沿波形

长时间雷击可用表 3 给出的平均电流(I)和持续时间(T_{LONG})构成的矩形波来描述。从时间函数分析曲线,可推出雷电流的幅频密度(见图 B.7)。

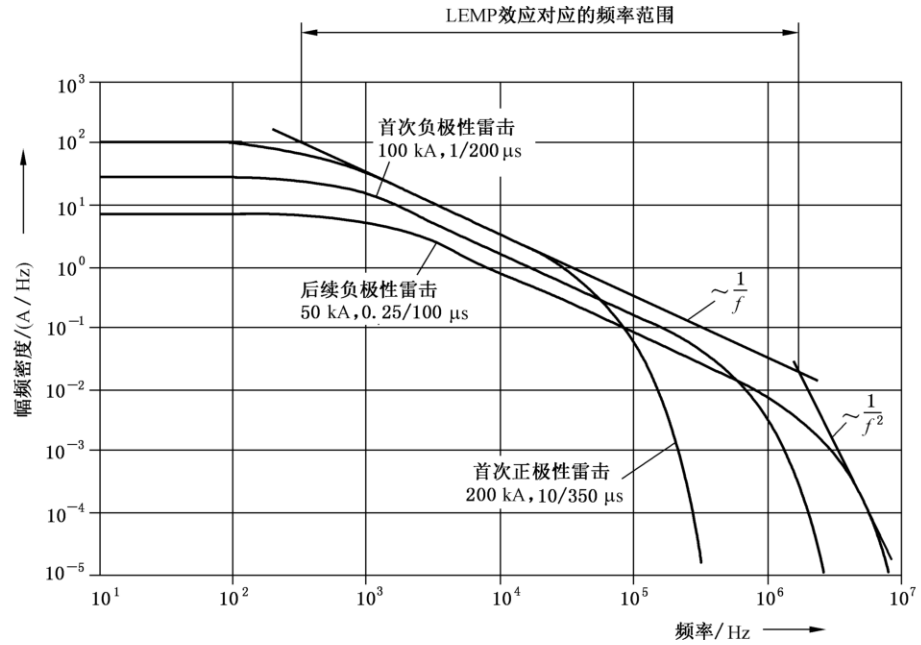


图 B.7　按 LPL Ⅰ参数得出的雷电流幅频密度曲线

附 录 C
（资料性）
用于测试的雷电流模拟

C.1 概述

如果建筑物被雷击，雷电流将在该建筑物内分流。测试单个防护部件时，应通过适当选择每一部件的测试参数考虑这种情况。为此，应进行系统分析。

C.2 首次正极性短时间雷击的单位能量和长时间雷击的电荷量模拟

表 C.1 和表 C.2 中规定了测试参数，图 C.1 给出一种试验发生器的示例，该发生器可用于模拟首次正极性短时间雷击的单位能量与长时间雷击电荷的组合效应。

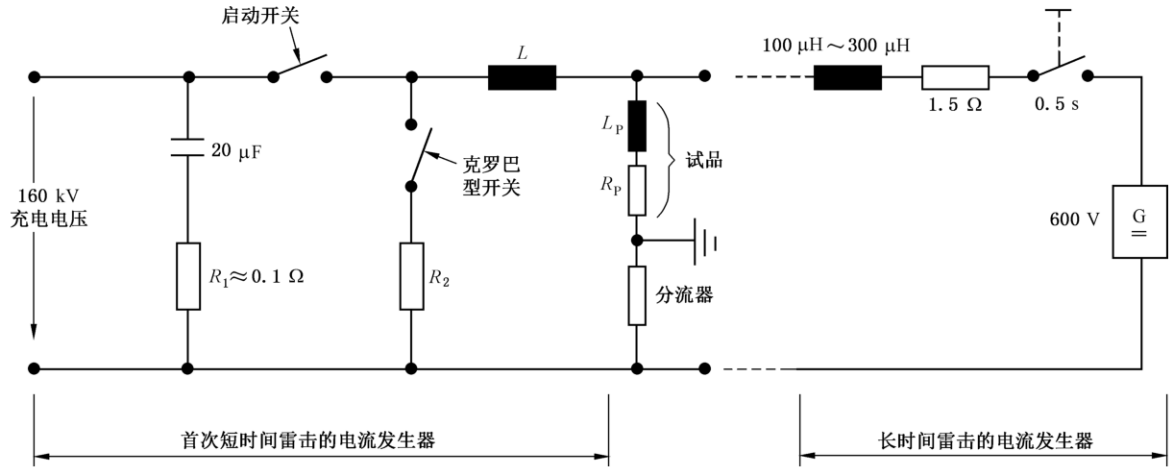
这些测试可用于评估机械完好性，避免发热和熔化的不利影响。

表 C.1 给出模拟首次正极性短时间雷击的相关测试参数[电流峰值(I)、单位能量(W/R)和电荷(Q_{SHORT})]。这些参数宜在同一短时间雷击下获得。T_2 在 350 μs 范围内且 T_1 小于 50 μs 的近似指数衰减电流可满足这些参数要求。

表 C.2 给出模拟长时间雷击的相关测试参数[电荷(Q_{LONG})和持续时间(T_{LONG})]。

根据试品情况和预期的损害机理，首次正极性短时间雷击或长时间雷击可单个测试或组合测试，组合测试时，长时间雷击紧跟在首次短时间雷击之后。电弧熔化的测试宜采用正负两种极性进行。

首次负极性短时间雷击不宜用于试验目的。



标引符号说明：

R ——电阻；

L ——电感；

G ——电流发生器。

注：图中元件数值用于 LPL Ⅰ。

图 C.1 模拟首次正极性短时间雷击单位能量和长时间雷击电荷的试验发生器

表 C.1　首次正极性短时间雷击的测试参数

测试参数	LPL			容许误差
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ～Ⅳ	%
电流峰值(I)/kA	200	150	100	±10
电荷(Q_{SHORT})/C	100	75	50	−10～+20
单位能量(W/R)/(MJ/Ω)	10	5.6	2.5	−10～+45

表 C.2　长时间雷击测试参数

测试参数	LPL			容许误差
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ～Ⅳ	%
电荷(Q_{LONG})/C	200	150	100	±20
持续时间(T_{LONG})/s	0.5	0.5	0.5	±10

C.3　短时间雷击波头陡度的模拟

电流的陡度决定了安装在雷电流通过的导体附近回路中磁感应电压的大小。

冲击电流的陡度定义为雷电流上升期间(Δt)雷电流(Δi)的上升率(即 $\Delta i/\Delta t$,见图 C.2)。表 C.3 给出了模拟此电流陡度的相关测试参数。图 C.3、图 C.4 为试验发生器的例图(它们可用于模拟直接雷击雷电流波头的陡度)。单个首次正极性短时间雷击和单个后续负极性短时间雷击都可进行模拟。

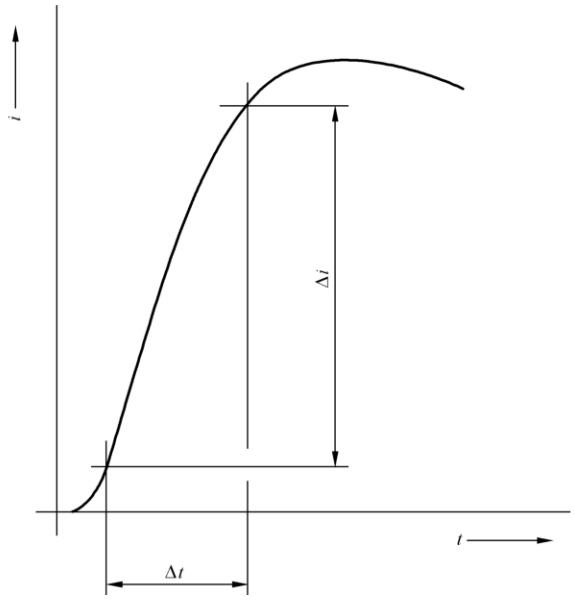
注：此模拟涉及冲击电流的波头陡度。波尾对这类模拟没有影响。

C.3 的模拟可单独进行或与 C.2 的模拟联合进行。

模拟雷电对 LPS 部件影响的有关测试参数的更详细资料见附录 D。

表 C.3　短时间雷击的测试参数

测试参数		LPL			容许误差
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ～Ⅳ	%
首次正极性短时间雷击	$\Delta i/\Delta t$ kA/μs	20	15	10	±30
后续负极性短时间雷击	$\Delta i/\Delta t$ kA/μs	200	150	100	±30



标引符号说明：

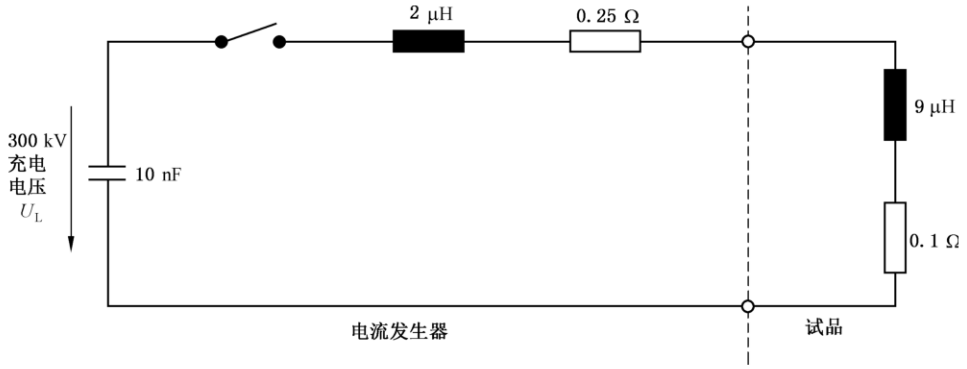
Δt ——电流上升时间；

Δi ——电流上升时间对应的电流上升；

t ——时间；

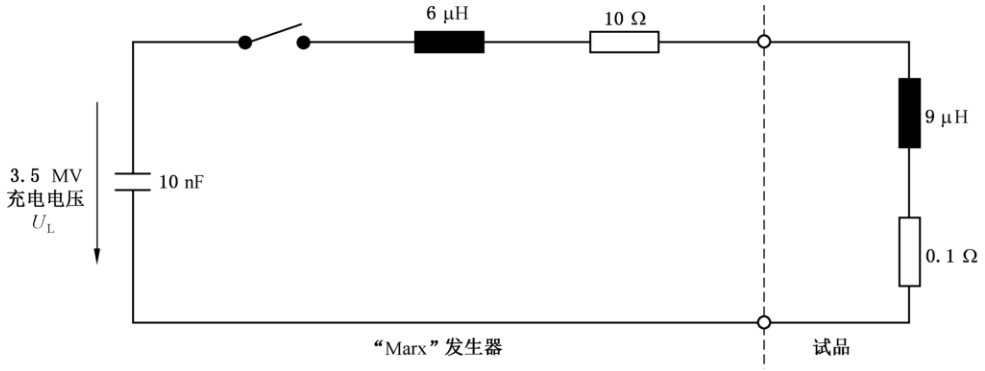
i ——电流。

图 C.2　根据表 C.3 定义的雷电流陡度



注：元件数值对应于 LPL Ⅰ。

图 C.3　用于大试品的模拟首次正极性短时间雷击波头陡度的试验发生器



注：所有数值对应于 LPL Ⅰ。

图 C.4　用于大试品的模拟后续负极性短时间雷击波头陡度的试验发生器

附 录 D
（资料性）
模拟雷电流对 LPS 部件影响的测试参数

D.1 概述

附录 D 给出用于实验室中模拟雷电流对 LPS 部件影响的基本雷电流参数。本附录涉及可能遭受全部雷电流或大部分雷电流影响的 LPS 所有部件，可与规定每一具体部件的要求和测试方法的标准结合使用[见 IEC 62561(所有部分)]。

注：本附录不考虑有关系统方面(如电涌保护器的协调配合)的参数。

D.2 与雷击点相关的电流参数

影响 LPS 的物理完好性的雷电流参数通常有电流峰值(I)、电荷(Q)、单位能量(W/R)、持续时间(T)和冲击电流波头的平均陡度($\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$)。正如下面要详细分析的那样，上述每一个参数往往会决定一种不同的失效机理。测试时采用的电流参数是这些数值的组合，实验室中选择这些电流参数值来描述受测 LPS 部件的实际失效机理。D.5 中介绍这些重要参量的选择准则。

表 D.1 列出测试时采用的 I、Q、W/R 和 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 的最大值，它们是所需防护等级的函数。

表 D.1 在计算不同的 LPS 部件和不同的 LPL 下的测试值时采用的雷电威胁参数

部件	主要问题	雷电威胁参数					备注
接闪器	接闪点的腐蚀(如薄金属片)	LPL	Q_{LONG}/C	T			
		Ⅰ Ⅱ Ⅲ～Ⅳ	200 150 100	<1 s(单次冲击中施加 Q_{LONG})			
接闪器和引下线	阻性发热	LPL	W/R kJ/Ω	T			按 GB/T 21714.3—2026 的规定确定尺寸，则不必进行测试
		Ⅰ Ⅱ Ⅲ～Ⅳ	10 000 5 600 2 500	在绝热状态下施加 W/R			
	机械效应	LPL	I/kA	W/R kJ/Ω			
		Ⅰ Ⅱ Ⅲ～Ⅳ	200 150 100	10 000 5 600 2 500			
连接件	综合效应(热、机械和电弧)	LPL	I/kA	W/R kJ/Ω	T		
		Ⅰ Ⅱ Ⅲ～Ⅳ	200 150 100	10 000 5 600 2 500	<2 ms(单次冲击中施加 I 和 W/R)		

表 D.1　在计算不同的 LPS 部件和不同的 LPL 下的测试值时采用的雷电威胁参数（续）

部件	主要问题	雷电威胁参数					备注
接地终端	雷击附着点的腐蚀	LPL	Q_{LONG}/C	T			一般从机械、化学方面（腐蚀等）确定尺寸
		Ⅰ Ⅱ Ⅲ～Ⅳ	200 150 100	<1 s(单次冲击中施加 Q_{LONG})			
用于设备等电位连接的隔离放电间隙	见 IEC 62561-3						
SPD	见 IEC 61643(所有部分)						

D.3　分流

表 D.1 给出的参数与雷击点雷电流有关。事实上，雷电流不止通过一条路径入大地，外部 LPS 中一般有几条引下线和自然导体。此外，还有进入被保护建筑物的管道和线路（供水、供气管道、供电和通信线路等）。因此，为了确定流过 LPS 具体部件的实际电流参数，应注意雷电流的分流。宜评估通过 LPS 具体位置某一部件的电流峰值和波形。在电流参数不能个别评估的场合，可借助下列步骤估算。

为了计算外部 LPS 内的分流，可采用分流系数（k_c）（见 GB/T 21714.3—2026 的 6.3）。该系数给出最不利情况下雷电流在外部 LPS 引下线中分流的估算方法。

被保护建筑物有入户的外部导电部件、供电线路和通信线路时，为了估算其分流值，可采用附录 E 介绍的 k_e 和 k'_e 的近似值。

上述方法按公式（D.1）用于计算流经某一具体入大地路径的电流峰值。

$$I_P = kI \qquad \text{……（D.1）}$$

电流的其他参数按公式（D.2）～公式（D.4）计算：

$$Q_p = kQ \qquad \text{……（D.2）}$$

$$(W/R)_p = k^2(W/R) \qquad \text{……（D.3）}$$

$$(\mathrm{d}i/\mathrm{d}t)_p = k(\mathrm{d}i/\mathrm{d}t) \qquad \text{……（D.4）}$$

式中：

x_p ——与某特定入大地路径“p”有关的参数值[电流峰值（I_P）、电荷（Q_p）、单位能量$(W/R)_p$、电流陡度$(\mathrm{d}i/\mathrm{d}t)_p$]；

x ——与总雷电流有关的参数值[电流峰值（I）、电荷（Q）、单位能量（W/R）、电流陡度（$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$）]；

k ——分流系数：k_c，外部 LPS 的分流系数（见 GB/T 21714.3—2026 的 6.3）；k_e、k'_e，有外部导电部件、供电线路和通信线路进入被保护建筑物时的分流系数（见附录 E）。

D.4　可能导致损害的雷电流效应

D.4.1　热效应

D.4.1.1　概述

涉及雷电流的热效应与电流流过导体电阻或流入 LPS 而产生的阻性发热有关，也与雷击附着点电弧底部和发生电弧的全部 LPS 隔离部件（如放电间隙）中产生的热量有关。

D.4.1.2 阻性发热

任何明显流过雷电流的 LPS 部件上都发生阻性发热。导体的最小截面积应足够大，以免导体过热导致周围发生火灾危险。除了 D.4.1 讨论的热效应外，还应注意暴露于大气环境和/或腐蚀环境中部件的机械承受力和耐久性准则。当存在人员伤害和火灾或爆炸损害的风险时，有时应对雷电流引起的导体发热进行评估。

下面给出雷电流通过时导体温升的评估方法。

一种分析方法如下：

电流在导体中以热形式耗散的瞬时功率按公式(D.5)计算：

$$P(t)=i^2(t)R \qquad \cdots\cdots(\text{D.5})$$

因此，一个完整的雷电流脉冲产生的热能是雷电流通过所讨论的 LPS 部件通路的电阻乘以脉冲的单位能量，即按公式(D.6)计算，单位为焦耳(J)或瓦特秒(W·s)。

$$W=R\int i^2(t)\,\mathrm{d}t \qquad \cdots\cdots(\text{D.6})$$

在一次雷电放电中，地闪单位能量处于高水平的持续时间极短，以至于建筑物中产生的任何热量不会有明显的耗散，因此这种现象可认为是绝热过程。

LPS 导体的温度按公式(D.7)计算：

$$\theta-\theta_0=\frac{1}{\alpha}\left[\exp\left(\frac{\frac{W}{R}\times\alpha\times\rho_0}{q^2\times\gamma\times C_w}\right)-1\right] \qquad \cdots\cdots(\text{D.7})$$

式中：

$\theta-\theta_0$——导体的温升，单位为开(K)；

α ——电阻的温度系数，单位为每开(K^{-1})；

W/R ——冲击电流的单位能量，单位为焦耳每欧姆(J/Ω)；

ρ_0 ——环境温度下导体的电阻率，单位为欧姆米(Ω·m)；

q ——导体的截面积，单位为平方米(m^2)；

γ ——材料密度，单位为千克每立方米(kg/ m^3)；

C_w ——热容量，单位为焦耳每千克开[J/(kg·K)]。

表 D.2 按 LPS 所用的不同材料给出公式(D.7)中物理参数的特征值。

表 D.2 LPS 部件常用材料的物理特性

参数	材料			
	铝	低碳钢	铜	不锈钢[a]
ρ_0/(Ω·m)	29×10^{-9}	120×10^{-9}	17.8×10^{-9}	700×10^{-9}
α/(1/K)	4.0×10^{-3}	6.5×10^{-3}	3.92×10^{-3}	0.8×10^{-3}
γ/(kg/m^3)	2 700	7 700	8 920	8 000
C_w/[J/(kg·K)]	908	469	385	500
[a] 奥氏体不锈钢无磁性。				

作为该式应用的一个例子，表 D.3 给出不同材料的导体温升，它们是 W/R 和导体截面积的函数。

表 D.3　不同截面积导体的温升与 W/R 的关系

截面积 mm^2	温升/K											
	铝			低碳钢			铜			不锈钢[a]		
	W/R MJ/Ω			W/R MJ/Ω			W/R MJ/Ω			W/R MJ/Ω		
	2.5	5.6	10	2.5	5.6	10	2.5	5.6	10	2.5	5.6	10
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	566	—	—	—	—	—	169	541	—	—	—	—
16	147	454	—	1 114	—	—	56	143	309	—	—	—
25	52	132	283	211	912	—	22	51	98	938	—	—
50	12	28	52	37	96	211	5	12	22	188	460	938
100	3	7	12	9	20	37	1	3	5	45	102	188
[a] 奥氏体不锈钢无磁性。												

典型雷击的特征是持续时间短(半峰值时间为几百微秒)和电流峰值高。在这些情况下,宜也考虑趋肤效应。但是,在大多数与 LPS 部件有关的实际情况中,材料特性(LPS 导体的动态磁导率)和几何结构(LPS 导体的截面积)使趋肤效应对导体温升的贡献减少到可忽略不计。

与发热机理关系最大的地闪组成部分是首次正极性雷击。

D.4.1.3　雷击附着点的热损害

D.4.1.3.1　概述

在所有发生电弧的 LPS 部件上(即接闪系统、放电间隙等)能观察到雷击附着点热损害。

雷击附着点可能发生材料的熔化和腐蚀。事实上,弧底本身以及高电流密度导致的集中阻性发热在电弧底部产生大量的热量输入。热能大多产生于金属表面或很靠近金属表面。紧邻的弧底部分产生的热超过金属传导所能吸收的热量,过量的热被辐射或散失在金属的熔化、汽化过程中。此过程的严重程度与电流幅值和持续时间有关。

已提出几种雷击附着点金属表面热效应计算的理论模型。为了简便,本附录仅介绍阳极或阴极压降模型。这种模型应用于薄的金属外层特别有效。因为该模型假定注入雷击附着点的所有能量用于导体材料的熔化和汽化,而忽略了金属内的热扩散,因而在所有情况下给出保守的结果。其他的模型介绍雷击附着点的损害与冲击电流持续时间的依赖关系。

D.4.1.3.2　阳极或阴极压降模型

假设电弧底部的能量输入(W)等于阳/阴极压降($u_{a,c}$)乘以雷电流的电荷(Q),即按公式(D.8)计算:

$$W=\int_0^{\infty}u_{a,c}(t)i(t)\mathrm{d}t=u_{a,c}\int_0^{\infty}\left|i(t)\right|\mathrm{d}t \quad \cdots\cdots(\mathrm{D.8})$$

由于在这里所考虑的电流范围内 $u_{a,c}$ 基本上为常数,因而电弧底部的能量转换主要与雷电流电荷(Q)有关。

阳极或阴极压降 $u_{a,c}$ 有几十伏。

一种简化方法假定弧底产生的所有能量只用于金属的熔化。公式(D.9)利用了这种假设,但导致熔化体积的估计过大。

$$V=\frac{u_{a,c}Q}{\gamma}\cdot\frac{1}{C_w(\theta_s-\theta_u)+c_s} \qquad \cdots\cdots(D.9)$$

式中:

V ——金属的熔化体积,单位为立方米(m^3);

$u_{a,c}$ ——阳极或阴极压降(假设为常数),单位为伏(V);

Q ——雷电流电荷,单位为库伦(C);

γ ——材料密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

C_w ——热容量,单位为焦耳每千克开[J/(kg·K)];

θ_s ——熔点,单位为摄氏度(℃);

θ_u ——环境温度,单位为摄氏度(℃);

c_s ——熔化潜热,单位为焦耳每千克(J/kg)。

表 D.2 按不同的 LPS 材料给出式中物理参数的特征值。

要考虑的电荷主要是回击电荷和连续雷电流电荷之和。试验表明,与连续雷电流相比较回击电荷的影响是次要的。

D.4.2 机械效应

D.4.2.1 通则

雷电流产生的机械效应取决于雷电流的幅值和持续时间以及受影响的机械构件的弹性。机械效应还与彼此接触的 LPS 部件间的摩擦力有关。

磁力发生于两载流导体之间,或产生于只有一载流导体且该导体弯成一个角或一个环时。

当电流流过电路时,电路不同位置上受到的电动力的大小与雷电流的幅值和电路的几何形状都有关系。但是,这些力的机械作用,不仅与电流幅值有关,也与电流的波形、持续时间以及设施的几何形状有关。

D.4.2.2 电动力

如图 D.1 所示,电流 i 流过长度为 l 距离为 d 的平行导线段(长而狭小的环路)所产生的电动力按公式(D.10)近似计算:

$$F(t)=\frac{\mu_0}{2\pi}\times i^2(t)\times\frac{l}{d}=2\times10^{-7}\times i^2(t)\times\frac{l}{d} \qquad \cdots\cdots(D.10)$$

式中:

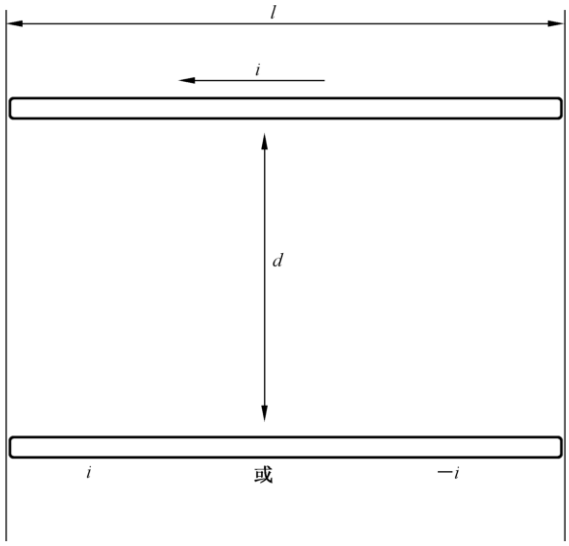
$F(t)$——电动力,单位为牛顿(N);

i ——电流,单位为安(A);

μ_0 ——自由空间(真空)的导磁率,$4\pi\cdot10^{-7}$ H/m;

l ——导体长度,单位为米(m);

d ——平行直导线段间的距离,单位为米(m)。



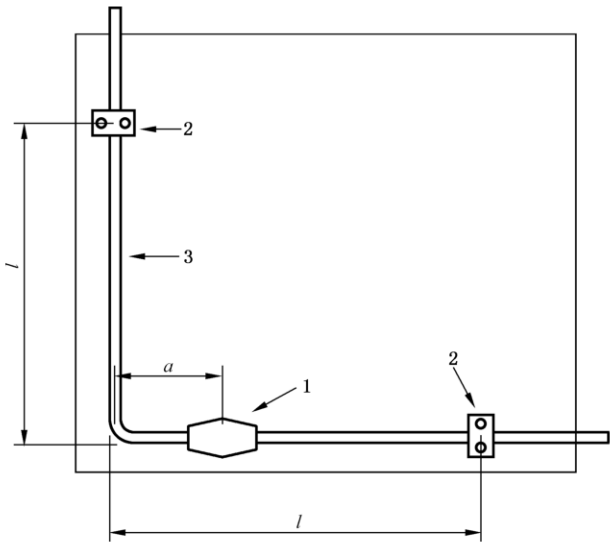
标引符号说明：

d ——平行直导体间的距离，单位为米(m)；

l ——导体长度，单位为米(m)。

图 D.1　用于计算两导线电动力的示意图

如图 D.2 所示是 LPS 的一个典型例子，其导体对称布设，构成 90°拐角，紧固夹具位于拐角的附近。这种构形的应力图见图 D.3。水平导体上的轴向力有把导体拉出紧固夹具的趋势。假设电流峰值为 100 kA，垂直导体长 0.5 m，沿水平导体的力的数值如图 D.4 所示。



标引序(符)号说明：

a ——导线与卡夹器之间的距离，单位为米(m)；

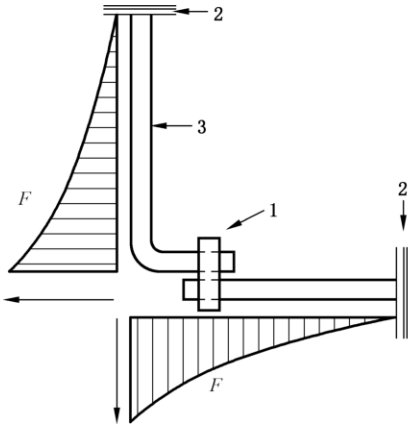
l ——导体与紧固件之间的距离，单位为米(m)；

1 ——连接件(卡夹器)；

2 ——刚性紧固件；

3 ——导体。

图 D.2　LPS 的导体典型布置图



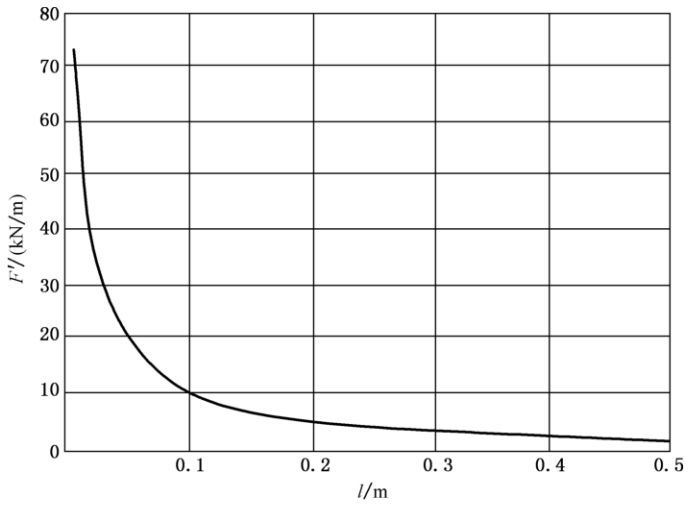
标引序号说明：

1——连接件(卡夹器)；

2——刚性紧固件；

3——导体。

图 D.3　图 D.2 结构应力(F)示意图



注：电流峰值 100 kA，垂直导体长度 0.5 m。

图 D.4　沿图 D.2 中水平导线单位长度上的力(F')

D.4.2.3　电动力的效应

就作用力的幅值而言，电动力的瞬时值 $F(t)$ 正比于瞬时电流的平方 $i^2(t)$。而就 LPS 机械结构内部产生的应力[用 LSP 结构的弹性形变 $\delta(t)$ 和弹性常数 k 的乘积表示]而言，宜考虑两种影响：与 LPS 结构的弹性有关的机械振动固有频率和与 LPS 塑性有关的永久性形变。而且在许多情况下，结构内摩擦力的影响也相当重要。

雷电流产生的电动力引起的 LPS 弹性结构的振动幅度可用二阶微分方程计算。这里的关键因素是冲击电流持续时间和 LPS 结构机械振动固有周期之比。在 LPS 的应用中，通常遇到的情况是结构的固有振动周期比力的作用时间(即雷电流冲击持续时间)长得多。这种情况下，最大机械应力在冲击电流停止之后发生，其峰值低于作用应力的峰值。大多数情况下，最大机械应力可忽略。

当拉伸应力超过材料的弹性限度时，发生塑性形变。如果构成LPS结构的是软材料，如铝和焯火铜，电动力可能使有拐角和环形的导体变形。因此，LPS部件的设计宜使之能承受这些力且具有必要的弹性。

施加在LPS结构上的总机械应力取决于作用力对时间的积分，因而也取决于冲击电流的单位能量，还与冲击电流波形和持续时间（与结构的固有振荡周期比较）有关。因此，测试时所有这些有影响的参数都应注意到。

D.4.2.4 液电效应

液电效应指雷击液体时电弧通道膨胀产生高压的现象。雷击表面有水的建筑物时该效应可能导致建筑物严重损害。

D.4.2.5 声冲击波的损害

雷电流在电弧中流动时产生冲击波。冲击波的猛烈程度取决于电流峰值及其上升率。

声冲击波对LPS金属部件的损害一般不明显，但它可能使周围的物品遭受损害。

D.4.3 综合效应

实际上，热效应和机械效应是同时发生的。如果部件材料（接闪杆、紧固夹具等）发热足以使之软化，就会发生比其他情况下大得多的损害；极端情况下，该导体可能出现爆炸性的熔断，从而对周围结构造成相当大的损害。如果金属的截面积足以安全地经受全部作用，则只应检查机械完好性。

D.4.4 发生火花

一般只有在易燃性环境中或存在可燃材料的情况下，火花的发生才显得重要。

可能发生两种不同类型的火花，即“热火花”和“电压火花”。当很大的电流流过两导电材料的接合处时，发生热火花。如果界面的压力过低，大多数热火花发生在接合处内靠近边沿处；主要原因是高电流密度和界面的压力不足。热火花的强度与单位能量有关，所以雷电流的最危险阶段是首次回击。在电流取盘旋状路径处，如连接件内部，当回路中感应电压超过金属部件间的击穿电压时，会发生电压火花。感应电压大小正比于自感乘以雷电流的陡度。因此，对于电压火花而言，最危险的雷电组成部分是后续负雷击。

注：在连接、夹接、跨接处也可能出现火花。

D.4.5 土壤电离

注入电流峰值很高时，土壤中电场强度可能大于土壤的电离电场强度，导致接地极周边的土壤被电离。此时，接地极有效截面积明显增大，使接地阻抗减小。该接地阻抗可按IEC 60071-2:2023中E.3.3计算。

D.5 LPS部件、相关问题和测试参数

D.5.1 通则

雷电防护系统由不同的部件构成，每一部件有特定的作用。当通过实验室测试来检查这些部件的性能时，这些部件的性质和所承受的特定应力应加以特别考虑。

D.5.2 接闪器

接闪系统所受的影响是由机械效应和热效应共同引起的[见D.5.3，但需注意的是当接闪线（带）被雷击时，大部分雷电流将流过它]。在某些情况下，特别是采用薄的金属屋顶或金属墙面（例如厚度只有

几分之一毫米到几毫米，见 GB/T 21714.3—2026 的表 3，可能发生穿孔或背面温升过高）以及架空导体等自然 LPS 部件时，接闪器也受电弧烧蚀效应的影响。

对电弧烧蚀效应，宜考虑两个主要的测试参数：即长时间电流的电荷及其持续时间。

电荷决定了电弧底部的能量输入。特别是长时间雷击对其影响最为严重，而短时间雷击的影响可忽略不计。

电流的持续时间在热量向材料转移过程中起重要作用。测试时所施加电流的持续时间宜与长时间雷击的持续时间（0.5 s～1 s）可比拟。

D.5.3 引下线

D.5.3.1 概述

雷电对引下线的影响主要可分为两类：

——由于阻性发热产生的热效应；

——毗邻导体对雷电流进行分流或雷电流改变方向（导体弯曲或以某角度互相连接时）处磁场相互作用引起的机械效应。

大多数情况下，这两种效应的作用是彼此独立的，在实验室中可用单独的测试来检测每一效应。在雷电流产生的热没有明显地改变导体机械特性的所有情况下，都可采用这种方法。

D.5.3.2 阻性发热

有几位研究者发表了雷电流沿不同截面积和不同材料导体流动时，导体发热的计算和测量方法。D.4.1.2 以图表和公式总结其主要结果。因此，一般不必进行实验室测试检验导体在温升方面的性能。

在要求进行实验室测试的所有情况下，应注意以下几点。

——要考虑的主要测试参数是单位能量和冲击电流的持续时间。

——单位能量决定了雷电流流动产生焦耳热引起的温升。需考虑的数值是与首次雷击相关的值。考虑正极性雷击的情况会得出保守的结果。

——冲击电流的持续时间对所讨论导体与其周围的热交换过程有决定性的影响。在大多数情况下，冲击电流的持续时间很短以致于可把这种发热过程当作绝热过程。

D.5.3.3 机械效应

正如 D.4.2.2 所讨论的，机械力相互作用是在流过雷电流的导体之间发生的。机械力与流过两导体中电流的乘积（或者，如果讨论的是单个弯曲导体，与电流的平方）成正比，与导体间的距离成反比。

通常可见的机械效应是在导体形成环路或弯曲时发生的。当这种形状的导体通过雷电流时，受到的机械力试图扩张环路并把拐角拉直，致使导体向外弯曲。该机械力的大小与电流幅值的平方成正比。然而，宜把正比于电流幅值平方的电动力和取决于 LPS 机械结构弹性的应力明确区分开。对于固有频率相对低的 LPS 结构，其中产生的应力远小于电动力。这种情况下，只要导体的截面积满足本文件的要求，则不必进行实验室测试来检查弯成直角的导体的性能。

在要求进行实验室测试的所有情况下（特别是对于软材料），宜考虑以下因素。首次回击的 3 个参数应予以考虑：冲击电流的持续时间、单位能量以及在刚性系统情况下的电流幅值。

把冲击电流的持续时间与 LPS 结构固有振动周期比较，就可确定系统机械响应（用位移表示）的类型。

——如果冲击的持续时间比 LPS 结构的固有振动周期短得多（通常 LPS 承受雷电冲击应力时就属于这种情况），装置的质量和弹性使它不产生明显的位移，相应的机械应力本质上与冲击电流的单位能量有关。冲击电流峰值的影响有限。

——如果冲击的持续时间与 LPS 结构的固有振动周期可比拟或更长，则装置的位移对所施应力的波形更为敏感。这种情况下，测试时应模拟冲击电流的峰值及其单位能量。

冲击电流的单位能量决定了使 LPS 结构产生弹性和塑性形变的应力。需考虑的数值是与首次雷击相关的值。

刚性系统固有振动频率较高的情况下，冲击电流的最大值决定 LPS 结构的最大位移。需考虑的数值是与首次雷击相关的值。

D.5.4 连接件

LPS 中相邻导体间的连接件可能是发生强应力时机械和热的薄弱点。

当连接件使导体成直角时，应力的主要影响与机械力有关，该机械力试图使导体组件拉直并克服连接件和导体之间的摩擦阻力，从而拉开连接部位。不同部件的连接点处还可能产生电弧。而且，电流集中在小接触面上而产生的热效应有显著的影响。

实验室测试表明，当发生复杂的协同作用时，很难把各种效应彼此分开。接触面局部熔化影响机械强度。连接件之间的相对位移促使电弧发生并随后产生高热。

在没有合适的模型情况下，实验室测试宜尽可能模拟最严酷条件下雷电流的适当参数：即应通过单次电气测试施加适当参数的雷电流。

这种情况下宜考虑 3 个参数：冲击电流的峰值、单位能量和持续时间。

冲击电流的最大值决定了最大的力，或在电动拉力超过摩擦力之后，决定 LPS 结构的最大位移。需考虑的数值是与首次雷击相关的值。考虑正极性雷击会得出保守的数据。

冲击电流的单位能量决定了电流集中在小面积上的接触面的发热。需考虑的数值是与首次雷击相关的值。考虑正极性雷击可得出保守的数据。

在摩擦力被超过后，冲击电流的持续时间决定了结构的最大位移，并对热量向材料内的转移起重要作用。

D.5.5 接地终端

接地极的真正问题与化学腐蚀和非电动力产生的机械损害有关。在实际情况中，处于电弧底部的接地极的腐蚀并不重要。应注意到，与接闪器不同，典型的 LPS 有几个接地终端。因此，雷电流会在几个接地极之间分流，这样在电弧底部造成的影响显得较为次要。这种情况下，宜考虑以下两个主要测试参数。

——电荷决定了注入电弧底部的能量。特别是，由于长时间雷击对此部件的影响最为严重，因而首次雷击的影响可忽略。

——冲击电流的持续时间在热量向材料内部转移现象中起重要作用。测试期间，施加冲击电流的持续时间宜与长时间雷击的持续时间(0.5 s～1 s)可比拟。

D.6 电涌保护器(SPD)

D.6.1 概述

雷电对 SPD 的应力作用与所考虑的 SPD 类型有关，特别是与间隙的存在与否有关。SPD 相关测试见 IEC 61643-11、IEC 61643-21 以及 IEC 61643-31。

很多 SPD 是由间隙、压敏电阻以及其他元件的组合而成的。D.6.2 和 D.6.3 介绍雷电流对两种典型元件的影响。

D.6.2 含有放电间隙的 SPD

雷电对放电间隙的影响可分为两大类：

——材料的受热、熔化和蒸发使间隙的电极腐蚀；

——放电冲击波产生的机械应力。

把这两种影响分开研究是极其困难的。因为两者都与雷电流的主要参数有复杂的关系。

对于放电间隙，实验室测试时需尽可能模拟最恶劣情况下雷电流的适当参数，即应通过单次电应力施加雷电流的全部适当参数。

这种情况下应注意5个参数：冲击电流的峰值、电荷量、持续时间、单位能量和上升率。

电流峰值决定了冲击波的严重程度。需考虑的数值是与首次雷击相关的值。考虑正极性雷击会得出保守的结果。

电荷决定了输入电弧的能量。该能量将使电弧发生处电极的部分材料发热、熔化，甚至可能蒸发。需考虑的数值是与整个地闪相关的值。然而，在多数情况下，长时间雷击电流的电荷可忽略，这取决于供电系统的型式(TN、TT或IT)。

冲击电流的持续时间决定了向电极的热转移现象和随后熔区前沿的扩散情况。

冲击电流的单位能量决定了电弧的自磁压缩和电极表面和电弧之间界面上产生的电极等离子流的物理过程(此过程会喷射出大量的熔化材料)。需考虑的数值是与首次雷击相关的值。考虑正极性雷击会得出保守的结果。

对用于供电系统的放电间隙，工频续流的幅值构成重要的电应力因素，宜加以考虑。

D.6.3 含有金属氧化物压敏电阻的SPD

雷电对金属氧化物压敏电阻产生的冲击效应可分为两大类：过载和闪络。每类效应由不同现象产生的失效模式来表征，并由不同的参数决定。金属氧化物SPD的失效与其最薄弱的特性有关，因此，不太可能发生各种严重致损电应力之间的协同作用。所以，准许分别进行测试来验证每一失效模式条件下的性能。

过载是由于器件所吸收的能量超过其容量引起的。这里讨论的超出能量只与雷电应力本身有关。然而，对于安装在供电系统的SPD，雷电流停止之后随即从供电系统注入器件的续流也能在SPD的致命损害过程中起重要作用。最后，对具有负温度系数伏安特性的压敏电阻施加电压引起热不稳定性也可能对SPD造成致命的损害。对金属氧化物压敏电阻的过载模拟应注意的一个主要参数是电荷。

把金属氧化物压敏电阻组件的残压当作常数，则电荷就决定了输入金属氧化物压敏电阻组件的能量。需考虑的数值是与地闪相关的值。

闪络和爆裂是由于冲击电流的幅值超过压敏电阻通流容量而引起的。这种失效模式可表现为沿绝缘层的外闪络现象，有时还会穿透压敏电阻组件致使爆裂或形成一个垂直于绝缘环的洞。这种失效主要与压敏电阻组件上的绝缘层电介质击穿有关。

这种雷电现象的模拟宜考虑两个主要参数：冲击电流的最大值及其持续时间。

冲击电流的最大值，通过其相应的残压水平，决定了压敏电阻绝缘层的最大介电强度是否被超过。需考虑的数值是与首次雷击相关的值。考虑正极性雷击会得出保守的结果。

冲击电流的持续时间决定了压敏电阻绝缘层受电介质应力作用的时间。

D.7 LPS部件测试所采用参数的总结

表D.1总结了每一LPS部件在实现其功能时最恶劣的情况，并给出实验室测试中需模拟的雷电流参数。

表D.1给出的数值是关于雷击点的雷电流重要参数。

如D.3所讨论的，测试值的计算宜考虑到分流，分流可通过分流系数计算。

因此，测试时采用的参数值可根据表D.1给出的数据，并利用与分流有关的折减系数(见D.3的公式)进行计算。

附 录 E
（资料性）
不同安装点的雷电电涌电流

E.1 概述

为决定导体、SPD 和装置的规格，宜确定这些部件在特定的安装点雷电电涌引起的威胁。电涌可能由（部分）雷电流和安装环路的感应效应引起。这些电涌引起的威胁应小于所用部件的耐受水平（必要时通过适当的测试来确定）。

雷电电涌值可采用下述简化方法获取。

E.2 雷击建筑物引起的电涌电流（损害源 S1）

E.2.1 连接到建筑物的外部导电部件和线路中流过的电涌电流

雷击建筑物时，宜考虑雷电流在建筑物的外部导电部件、连接到建筑物的线路和建筑物的接地终端系统间分流。

当雷电流流入大地时，直接或通过连接的 SPD 在接地终端系统和 n 个外部导电部件及线路间分流，流过每个外部导电部件或线路的雷电流峰值按公式（E.1）估算：

$$I_F = k_e I / n \qquad \cdots\cdots (E.1)$$

式中：

k_e ——分流系数；

n ——连接到建筑物的架空和埋地外部导电部件及线路的总数目；

I ——与所考虑的雷电防护等级（LPL）有关的雷电流峰值；

I_F ——流过每个外部导电部件或线路的雷电流峰值。

分流系数（k_e）取决于：

——连接到建筑物的架空、埋地外部导电部件或线路的冲击接地阻抗；

——建筑物接地终端系统的冲击接地阻抗。

对接地系统符合 GB/T 21714.3—2026 中 5.4 规定的建筑物，分流系数（k_e）近似值可假定为 0.5。

注：考虑线路特性、建筑物和连接部件的冲击接地阻抗实际值能得出更准确的分流系数。

E.2.2 影响供电线路中雷电流分流和相应电荷分配的因素

与建筑物连接的每一条线路中的 n' 个导体中流过相等的部分雷电流 I'_F。

I'_F 数值取决于以下因素：

——线路敷设方式：架空或埋地；

——线路特性：屏蔽或非屏蔽；

——线路绝缘水平；

——线路中导体的数量；

——与架空线杆相关的冲击接地阻抗；

——与埋地线路相关的土壤电阻率。

当架空非屏蔽线路只有两根导体，架空线杆相关的冲击接地阻抗较小，线路绝缘水平较低时，I'_F 数值最大。

详细计算中，电涌幅值和波形受以下因素影响：

- 因比值 L/R 的关系，电缆的长度可能会影响电流的分流和波形特征；
- 中性线和相线的阻抗差异可能会影响导线间的电流和电荷分配；

注 1：TN 系统中，如果中性线(N)多点接地，则与相线 L1、L2 和 L3 相比其阻抗较低，可能会使更多电流流过 N 线，每一导线流过的电流取决于导线的阻抗。

- 不同的变压器阻抗可能会影响分流(如果变压器用与其阻抗并联的 SPD 保护，这种分流影响可忽略)；
- 变压器与负载侧装置冲击接地电阻之间的关系可能会影响分流(变压器的阻抗越低，流进低压系统的电涌电流越大)；
- 并联用户使低压系统的等效阻抗降低，可能会增加流入该系统的部分雷电流。

注 2：详细资料见 GB/T 21714.4—2026 的附录 D。

与建筑物连接的线路导体中流过的部分雷电流 I'_F 近似值可按 E.2.3 进行估算。

E.2.3 与建筑物连接的线路导体中流过的电涌电流

如果入户线路(例如供电线路或通信线路)不是屏蔽线或不采用金属管道布线，则假定线路中 n' 条导体流过相等的部分雷电流 I'_F，按公式(E.2)估算：

$$I'_F = k'_e I \qquad \cdots\cdots (E.2)$$

式中：

I'_F ——流过线路每一导体的雷电流峰值；

k'_e ——分流系数，按公式(E.3)估算；

I ——与所考虑的雷电防护等级(LPL)有关的雷电流峰值。

$$k'_e = k_e / n' \qquad \cdots\cdots (E.3)$$

式中：

n'——线路中导体的总数。

对在入户处等电位连接的屏蔽线路，对于有 n' 条导体的屏蔽线路中每一条导体，其电流分流系数 k'_e 值由公式(E.4)给出：

$$k'_e = k_e R_e / (n' R_s + R_c) \qquad \cdots\cdots (E.4)$$

式中：

R_s ——屏蔽层单位长度的电阻，单位为欧姆(Ω)；

R_c ——内部导体单位长度的电阻，单位为欧姆(Ω)。

注 1：由于芯线和屏蔽层间的互感，该公式可能会低估屏蔽层的分流作用。

注 2：公式(E.3)和公式(E.4)可能会高估流过通信线路的电流。

E.2.4 与 LPS 连接的建筑物内部的导电部件和线路中流过的电涌电流

如果内部线路(如供电和通信线路)既在建筑物屋顶与 LPS 等电位连接(即间隔距离无法满足要求时)，又在地面层与等电位连接排连接，线路中 n' 条导体流过相等的部分雷电流 I'_F 按公式(E.5)估算：

$$I'_F = k'_c I \qquad \cdots\cdots (E.5)$$

式中：

I'_F ——流过线路每一导体的雷电流峰值；

k'_c ——分流系数，按公式(E.6)估算；

I ——与所考虑的雷电防护等级(LPL)有关的雷电流峰值。

$$k'_c = k_c / 2n' \quad \text{……(E.6)}$$

式中：

k_c ——按 GB/T 21714.3—2026 中 6.3 估算的分流系数；

n' ——线路中导体的总数。

对屏蔽线路，有 n' 条导体的屏蔽线路中每一条导体的分流系数 k'_c 值由公式(E.7)给出：

$$k'_c = k_c R_s / 2(n' R_s + R_c) \quad \text{……(E.7)}$$

式中：

R_s ——屏蔽层单位长度的电阻，单位为欧姆(Ω)；

R_c ——内部导体单位长度的电阻，单位为欧姆(Ω)。

注 1：由于芯线和屏蔽层间的互感，该公式可能会低估屏蔽层的分流作用。

注 2：特定情况下公式(E.5)和公式(E.6)可能会低估流过屋顶 SPD 的部分雷电流。例如受连接到同一低压配电系统的相邻建筑物接地系统的影响，流过屋顶 SPD 的部分雷电流可能更大。对类似情况进行数值模拟可得出更准确结果(见 GB/T 21714.4—2026 中 E.4.1 和 E.4.2)。

注 3：公式(E.6)和公式(E.7)可能会高估流过通信线路的电流。

E.2.5 同一接地终端系统中与接地终端系统不同点等电位连接的线路中流过的电涌电流

如果线路在符合 GB/T 21714.3—2026 中 5.4 规定的接地终端系统的不同点进行等电位连接，线路中 n' 条导体流过相等的部分雷电流(I'_F)按公式(E.8)和公式(E.9)估算。

——非屏蔽线路：

$$I'_F = 0.1 I n' / (2n' - 1) \quad \text{……(E.8)}$$

——屏蔽线路：

$$I'_F = 0.1 I R_s / (n' R_s + R_c) \quad \text{……(E.9)}$$

式中：

n' ——线路中导体的总数；

R_s ——屏蔽层单位长度的电阻，单位为欧姆(Ω)；

R_c ——内部导体单位长度的电阻，单位为欧姆(Ω)；

I ——与所考虑的雷电防护等级(LPL)有关的雷电流峰值。

注 1：由于芯线和屏蔽层间的互感，该公式可能会低估屏蔽层的分流作用。

注 2：考虑线路和接地方式的特性能得出更准确的 I'_F 评估结果。

对于符合 GB/T 21714.3—2026 规定的密集网格形(1 m×1 m 数量级)基础接地极，不同等电位连接点之间的线路中的电流可忽略不计。大型建筑物中这类线路中的电流有可能不能忽略不计，宜进行计算确定。

E.3 雷击线路引起的电涌电流(损害源 S3)

雷击连接到建筑物的线路时，宜考虑雷电流在线路两个方向上的分配以及绝缘击穿。

进入建筑物的线路中的 n' 个导体中流过相等的部分雷电流 I'_F。

I'_F 数值取决于以下因素：

——线路敷设方式：架空或埋地；

——线路特性：屏蔽或非屏蔽；

——线路绝缘水平；

——线路中导体的数量；

——与架空线杆相关的冲击接地阻抗；

——与埋地线路相关的土壤电阻率。

当雷击距建筑物最近的架空线杆，且架空线为双导线非屏蔽线路，线路绝缘水平和线杆冲击接地阻抗较高时，I'_F 数值最大。

然而，仿真计算表明，流经进线入户处 SPD 的电流的电荷量不随雷击点位置变化。

与雷电防护等级(LPL)有关的低压系统 I'_F 近似值在表 E.1 给出，通信系统 I'_F 近似值在表 E.2 给出。

注 1：除电涌电流峰值 I'_F 外，SPD 选择还与其他很多相互关联的因素有关。在缺乏这些因素的准确评估的情况下，表 E.1 和表 E.2 的电流数值可用作按给定概率 P_{SPD} 选择 SPD 时的预期电流值。

注 2：高压系统中 SPD 称为避雷器。

表 E.1　雷击导致的低压系统电涌电流典型值

雷电防护等级(LPL)	低压系统				
	雷击线路或线路附近		雷击建筑物附近[a]	雷击建筑物[b]	雷击建筑物
	损害源 S3[c] 10/350 μs kA	损害源 S4[d] 8/20 μs kA	损害源 S2 8/20 μs kA	损害源 S1 (感性耦合) 8/20 μs kA	损害源 S1[e] (阻性耦合) 10/350 μs kA
Ⅲ～Ⅳ	5	2.5[g]	0.1[f]	5	12.5
Ⅱ	7.5	3.75[g]	0.15[f]	7.5	18.75
Ⅰ	10	5[g]	0.2[f]	10	25

注：所有数值均为每一导线中的电涌值。

[a] 环路导体敷设方式以及与产生感应的电流的距离影响预期电涌电流数值大小。表 E.1 中的数值考虑正极性和负极性首次短时间雷击，以不同方式敷设的短路无屏蔽环路导体(环路面积数量级 50 m^2，宽度 0.5 m)，距离雷击点 350 m，建筑物无屏蔽。对其他类型的线路或建筑物特性，所取数值宜乘以系数 K_{S1}、K_{S2}、K_{S3}(见 GB/T 21714.2—2026 的 B.6)。

[b] 环路导体敷设方式以及与产生感应的电流的距离影响预期电涌电流数值大小。表 E.1 中的数值考虑正极性和负极性首次短时间雷击，大型建筑物中以不同方式敷设的短路无屏蔽环路导体(环路面积数量级 50 m^2，宽度 0.5 m)，距离建筑物外墙 1 m，建筑物无屏蔽($K_C=1$)。对其他类型的线路或建筑物特性，所取数值宜乘以系数 K_{S1}、K_{S2}、K_{S3}(见 GB/T 21714.2—2026 中 B.6)。

[c] 表中的数值考虑正极性和负极性首次短时间雷击，雷击靠近用户架空线，三相加中性导体，线杆接地阻抗 50 Ω。两导体线路的数值可加倍。埋地线路数值可减半。

[d] 表中的数值考虑正极性和负极性首次短时间雷击以及高土壤电阻率地区($\rho \geqslant 3\,000\ \Omega \cdot m$)架空线。埋地线路和低土壤电阻率地区的架空线路数值可大大减小。

[e] 表中的数值考虑正极性和负极性首次短时间雷击，一回线路($n=1$)，三相加中性导体($n'=4$)，分流系数 K_c 取 0.5。详细信息见 E.2。

[f] 通常按 S1(感应耦合)选择的 SPD 可满足 S2 和 S4 情况下的要求。

[g] 此栏数值根据 IEC 60364-5-53 规定确定，其相关概率比其他栏数值更低，仅在未进行专门的风险评估时采用。相关概率见 GB/T 21714.2—2026。

表 E.2　雷击导致的通信系统电涌电流典型值

雷电防护等级（LPL）	通信系统[a]				
	雷击线路或线路附近		雷击建筑物附近[b]	雷击建筑物[c]	雷击建筑物
	损害源 S3[d] 10/350 μs kA	损害源 S4[e] 8/20 μs kA	损害源 S2 8/20 μs kA	损害源 S1 （感性耦合） 8/20 μs kA	损害源 S1[d] （阻性耦合） 10/350 μs kA
Ⅲ～Ⅳ	1	0.3	0.1	5	1.25
Ⅱ	1.5	0.45	0.15	7.5	1.875
Ⅰ	2	0.6	0.2	10	2.5

注：所有数值均为每一导线中的电涌值。

[a] 详细资料见 ITU-T 建议 K.67。

[b] 环路导体敷设方式以及与产生感应的电流的距离影响预期电涌电流数值大小。表 E.2 中的数值考虑负极性后续雷击，以不同方式敷设的短路无屏蔽环路导体（环路面积数量级 50 m^2，宽度 0.5 m），距离雷击点 350 m，建筑物无屏蔽。对其他类型的线路或建筑物特性，所取数值宜乘以系数 K_{S1}、K_{S2}、K_{S3}（见 GB/T 21714.2—2026 中 B.6）。

[c] 环路导体敷设方式以及与产生感应的电流的距离影响预期电涌电流数值大小。表 E.2 中的数值考虑负极性后续雷击，大型建筑物中以不同方式敷设的短路无屏蔽环路导体（环路面积数量级 50 m^2，宽度 0.5 m），距离建筑物外墙 1m，且建筑物无屏蔽（$K_C=1$）。对其他类型的线路或建筑物特性，所取数值宜乘以系数 K_{S1}、K_{S2}、K_{S3}（见 GB/T 21714.2—2026 中 B.6）。

[d] 表中的数值考虑正极性和负极性首次短时间雷击，多对线架空非屏蔽线缆或传统的一对线两对线非屏蔽金属线缆。埋地线路的数值可减半。

[e] 表中的数值考虑负极性首次短时间雷击，架空非屏蔽线缆。埋地线路数值可减半。

E.4　雷击线路附近引起的电涌电流（损害源 S4）

雷击线路附近比雷击线路本身（损害源 S3）所产生的电涌能量小得多。

假定进入建筑物的线路中的 n' 个导体中流过相同的部分雷电流 I'_F。

I'_F 数值取决于以下因素：

——线路类型：架空或埋地；

——线路特性：屏蔽或非屏蔽；

——线路绝缘水平；

——架空线路导体的高度；

——与埋地线路相关的土壤电阻率。

当雷击线路附近的地面，线路为架空非屏蔽线路，线路绝缘水平和土壤电阻率较高情况下，I'_F 有最大值。

对屏蔽线路，通常认为表 E.1 和表 E.2 给出的电流值可减小一半。

与雷电防护等级（LPL）有关的低压系统 I'_F 近似值在表 E.1 给出，通信系统 I'_F 近似值在表 E.2 给出。

对损害源 S4 进行防护时，通常采用 I_n 值不小于 5 kA 的 SPD（见 IEC 60364-5-53）。

注：除电涌电流峰值 I'_F 外，SPD 选择还与其他很多相互关联的因素有关。在缺乏这些因素的准确评估的情况下，表 E.1 和表 E.2 的电流数值可用作按给定概率 P_{SPD} 选择 SPD 时的预期电流值。

E.5 感应效应引起的电涌电流(损害源 S1 或 S2)

E.5.1 概述

磁场感应效应引起的电涌电流可来源于附近的雷击(损害源 S2),也可来源于流过外部 LPS 或 LPZ 1 空间屏蔽体的雷电流(损害源 S1)。

磁场感应效应引起的电涌电流还可来源于用于自然 LPS 的建筑物连续金属或钢筋混凝土框架结构中流过的雷电流。

感应电流 I_F' 幅值及波形取决于感应环路的电感和电阻。

应注意 LPZ 1 内或 LPZ 1/2 边界处的设备端口或靠近端口处的电涌电流。

E.5.2 无屏蔽的 LPZ 1 内的电涌电流

在无屏蔽的 LPZ 1 区域内(例如,仅由符合 GB/T 21714.3—2026 规定的网格宽度大于 5 m 的外部 LPS 进行防护),由于感应磁场未被衰减,预期的电涌电流较大。

对损害源 S1,当感应环路与 LPS 引下线平行的线路段较长,两者距离较短,分流系数较大时,I'_F 数值最大。

对损害源 S2,当感应环路较大时,I'_F 数值最大。

与雷电防护等级(LPL)有关的低压系统 I'_F 近似值在表 E.1 给出,通信系统 I'_F 近似值在表 E.2 给出。

注:除电涌电流峰值 I'_F 外,SPD 选择还与其他很多因素有关。在缺乏相关因素评估的情况下,表 E.1 和表 E.2 的电流数值能用作按给定概率 P_{SPD} 选择 SPD 时的预期电流值。

E.5.3 屏蔽的 LPZ 内的电涌电流

在具有有效空间屏蔽(按 GB/T 21714.4—2026 的附录 A,要求网格宽度在 5 m 以下)的 LPZ 内,磁场感应效应引起的电涌电流明显降低。这些情况下,电涌电流比 E.5.2 给出的值低得多。

由于空间屏蔽的衰减作用,雷电防护区 LPZ 1 内的感应效应较弱。

由于 LPZ 1 和 LPZ 2 空间屏蔽的共同作用,雷电防护区 LPZ 2 内的电涌电流进一步降低。

E.6 电涌电流典型值

采用表 E.1 和表 E.2 中给出的典型电流参数值可确定各损害源 S1、S2、S3、S4 所产生的过电压效应。

注 1:采用计算方法确定分流,无法计算时采用表 E.1 和表 E.2 给出的电流值。

对屏蔽线路,表 E.1 和表 E.2 给出的电流值假定可减小一半。

注 2:假定屏蔽层电阻近似等于所有芯线导体的并联电阻。

注 3:根据 IEC 61643-11,10/350 μs 和 8/20 μs 波形冲击电流分别用于Ⅰ类试验 SPD 和Ⅱ类试验 SPD 的测试。

参 考 文 献

[1] GB/T 21714.2—2026 雷电防护 第2部分:风险管理

[2] IEC 60071-2:2023 Insulation co-ordination—Part 2:Application guidelines

[3] IEC 60364-5-53 Low-voltage electrical installations—Part 5-53:Selection and erection of electrical equipment—Devices for protection for safety,isolation,switching,control and monitoring

[4] IEC 61000-4-5 Electromagnetic compatibility(EMC)—Part 4-5:Testing and measurement techniques—Surge immunity test

[5] IEC 61400-24 Wind energy generation systems—Part 24:Lightning protection

[6] IEC 61643-21 Low voltage surge protective devices—Part 21:Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks—Requirements and test methods

[7] IEC 61643-31 Low-voltage surge protective devices—Part 31:Requirements and test methods for SPDs for photovoltaic installations

[8] IEC 61643(all parts) Low-voltage surge protective devices

[9] IEC 62475 High-current test techniques—Definitions and requirements for test currents and measuring systems

[10] IEC 62561(all parts) Lightning protection system components (LPSC)

[11] IEC 62793 Thunderstorm warning systems—Protection against lightning

[12] ITU-T Recommendation K.67 Expected surges on telecommunications and signalling networks due to lightning

[13] Heidler F.,Flisowski Z.,Zischank W.,et al.Parameters of Lightning Current given in IEC 62305—Background,Experience and Outlook,Invited Paper at 29th International Conference on Lightning Protection,23rd-26th June 2008-Uppsala,Sweden.

[14] Berger K.,Anderson R.B.,Kröninger H..Parameters of lightning flashes.CIGRE Electra No 41(1975),23-37.

[15] Anderson R.B.,Eriksson A.J..Lightning parameters for engineering application.CIGRE Electra No 69(1980),65-102.

[16] CIGRE Workgroup C4.407.Lightning Parameters for Engineering Applications,Technical Brochure 549,August 2013.

[17] Cianos N.,Pierce E.T..A Ground-Lightning Environment for Engineering Usage,SRI Project 1834Technical Report 1,Stanford Research Institute,Menlo Park,CA,USA,August 1972.

[18] IEEE working group report.Estimating lightning performance of transmission lines-Updates to analytical models.IEEE Transactions on Power Delivery,Volume 8,n.3,July 1993.

[19] Meppelink,J..The impact of a lightning stroke on a flat roof when the building is filled with water.24th International Conference on Lightning Protection,1998,Birmingham,UK.