



中华人民共和国国家标准

GB/T 21714.1—2015/IEC 62305-1:2010
代替 GB/T 21714.1—2008

雷电防护 第1部分:总则

Protection against lightning—Part 1: General principles

(IEC 62305-1:2010, IDT)

2015-09-11 发布

2016-04-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
引言	IV
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	6
5 雷电损害	7
6 雷电防护的必要性和经济合理性	10
7 防护措施	11
8 建筑物雷电防护的基本准则	12
附录 A (资料性附录) 雷电流参数	18
附录 B (资料性附录) 用于分析的雷电流时间函数	26
附录 C (资料性附录) 用于测试的雷电流模拟	31
附录 D (资料性附录) 模拟雷电对 LPS 部件影响的测试参数	34
附录 E (资料性附录) 不同安装点的雷电浪涌	45
参考文献	49
图 1 GB/T 21714 各部分的关系	IV
图 2 不同损害类型产生的损失类型和风险	10
图 3 LPS 确定的 LPZ(GB/T 21714.3—2015)	15
图 4 SPM 确定的 LPZ(GB/T 21714.4—2015)	16
图 A.1 冲击电流参数的定义(典型值 $T_2 < 2 \text{ ms}$)	18
图 A.2 长时间雷击参数的定义(典型值 $2 \text{ ms} < T_{\text{LONG}} < 1 \text{ s}$)	19
图 A.3 下行雷闪的可能组成成分(通常是对平地和低矮建筑物的雷击)	19
图 A.4 上行雷闪的可能组成成分(通常为对暴露和/或较高建筑物的雷击)	20
图 A.5 雷电流参数的累积频率分布(曲线通过概率 95% 到 5% 的值)	23
图 B.1 首次正极性短时间雷击电流的上升沿波形	27
图 B.2 首次正极性短时间雷击电流的下降沿波形	27
图 B.3 首次负极性短时间雷击电流的上升沿波形	28
图 B.4 首次负极性短时间雷击电流的下降沿波形	28
图 B.5 后续负极性短时间雷击电流的上升沿波形	29
图 B.6 后续负极性短时间雷击电流的下降沿波形	29
图 B.7 按 LPL I 参数得出的雷电流幅频密度曲线	30
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	31
图 C.2 根据表 C.3 定义的雷电流陡度	33

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	33
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	33
图 D.1	用于计算两导线电动力的示意图	39
图 D.2	LPS 的导体典型布置图	39
图 D.3	图 D.2 结构应力 F 的应力图	40
图 D.4	沿图 D.2 中水平导线单位长度上的力 F'	40
表 1	雷电对典型建筑物的影响	7
表 2	不同雷击点导致建筑物的损害和损失	9
表 3	各 LPL 对应的雷电流参数最大值	13
表 4	各 LPL 雷电参数的最小值及其对应的滚球半径	14
表 5	雷电流参数上下限值对应的概率	14
表 A.1	摘自 CIGRE(Electra No 41 或 No 69) ^[3,4] 的雷电流参数值	21
表 A.2	雷电流参数的对数正态分布—摘自 CIGRE(Electra No 41 或 No 69) ^[3,4] 从概率 95% 到 5% 的数值计算得出的雷电流参数的均值 μ 以及标准差 σ_{lg}	22
表 A.3	概率 P 与雷电流 I 的关系	23
表 B.1	式(B.1)的参数	26
表 C.1	首次正极性短时间雷击的测试参数	32
表 C.2	长时间雷击测试参数	32
表 C.3	短时间雷击的测试参数	32
表 D.1	在计算不同的 LPS 部件和不同的 LPL 下的测试值时应考虑的雷电威胁参数	34
表 D.2	LPS 部件常用材料的物理特性	37
表 D.3	截面积不同的导体温升与 W/R 的关系	37
表 E.1	不同土壤电阻率下冲击接地阻抗 Z 和 Z_1 的值	46
表 E.2	雷击导致的低压系统浪涌过电流预期值	47
表 E.3	雷击导致的通信系统浪涌过电流预期值	47

前 言

GB/T 21714《雷电防护》由以下 4 部分组成：

- 第 1 部分：总则；
- 第 2 部分：风险管理；
- 第 3 部分：建筑物的物理损坏和生命危险；
- 第 4 部分：建筑物内电气和电子系统。

本部分为 GB/T 21714 的第 1 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分代替 GB/T 21714.1—2008《雷电防护 第 1 部分：总则》，与 GB/T 21714.1—2008 相比，主要技术变化如下：

- 删除了原标准中服务设施的有关部分(见 2008 版的 5.2、8.4)；
- 修改了低压系统和通信系统的雷电浪涌过电流预期值(见表 E.2、表 E.3)；
- 减少电气和电子系统失效的防护措施中增加了隔离界面(见 3.56、7.4)；
- 增加了首次负极性短时间雷击的雷电流参数(见表 3)；
- 修改统一了部分术语解释。

本部分使用翻译法等同采用 IEC 62305-1:2010《雷电防护 第 1 部分：总则》。

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这些专利的责任。

本部分由全国雷电防护标准化技术委员会(SAC/TC 258)提出并归口。

本部分负责起草单位：四川中光防雷科技股份有限公司。

本部分参加起草单位：上海市防雷中心、天津市中力防雷技术有限公司。

本部分主要起草人：王德言、张红文、黄晓虹、周歧斌、薛文安、高鑫。

本部分的历次版本发布情况为：

- GB/T 21714.1—2008。

引 言

迄今尚无设备和方法能够改变自然界的天气现象,以阻止雷电的发生。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)对人、建筑物本身、其内部物体、设备以及线路都是危险的,因此应考虑采取雷电防护措施。

是否需要采取雷电防护措施、安装雷电防护措施的经济效益和适当雷电防护措施的选用应由风险管理来确定。风险管理在 GB/T 21714.2 中介绍。

GB/T 21714 各部分中提出的防护措施可以有效降低风险。

所有雷电防护措施构成综合防雷体系。从实用性考虑,雷电防护设计、安装和维护的标准分为两部分:

减少建筑物内物理损害以及人和动物伤害的雷电防护措施在 GB/T 21714.3 中介绍。

减少建筑物内电气和电子系统失效的雷电防护措施在 GB/T 21714.4 中介绍。

GB/T 21714 各部分关系如图 1 所示。

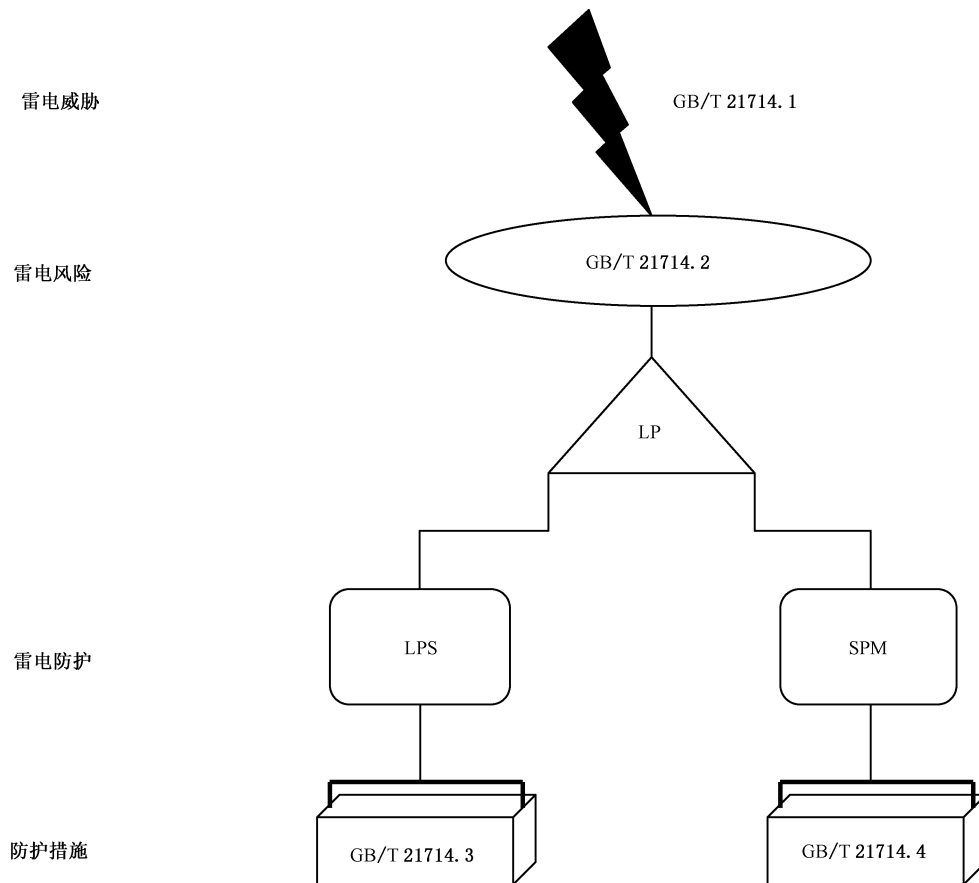


图 1 GB/T 21714 各部分的关系

雷电防护 第1部分:总则

1 范围

GB/T 21714 的本部分提供了建筑物(包括其设施、内部物体以及人员)雷电防护所应遵循的一般原则。

以下情况不属于本部分的范围:

- 铁路系统;
- 车辆、船舶、飞行器、离岸设施;
- 地下高压管道;
- 设置在建筑物外的管道、供电线路和通信线路。

注:通常这些系统由各专业权威部门制定的专业规范管辖。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 21714.2—2015 雷电防护 第2部分:风险管理(IEC 62305-2:2010, IDT)

GB/T 21714.3—2015 雷电防护 第3部分:建筑物的物理损坏和生命危险(IEC 62305-3:2010, IDT)

GB/T 21714.4—2015 雷电防护 第4部分:建筑物内电气和电子系统(IEC 62305-4:2010, IDT)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

对地雷闪 lightning flash to earth

云地间的大气放电,由一个或多个雷击组成。

3.2

下行雷闪 downward flash

始于云到地一个向下先导的雷闪。

注:下行雷闪由一个首次短时间雷击构成,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

上行雷闪 upward flash

始于地面建筑物到云端一个向上先导的雷闪。

注:上行雷闪由一个首次长时间雷击构成,其上会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

对地雷闪中的单次放电。

3.5

短时间雷击 short stroke

雷闪的组成部分,它对应于一个冲击电流。

注:该电流的半峰值时间 T_2 通常小于 2 ms(见图 A.1)。

3.6

长时间雷击 long stroke

雷闪的组成部分,它对应于一个连续电流。

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 multiple strokes

平均由 3~4 个雷击组成的雷闪,两个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雷闪。

3.8

雷击点 point of strike

雷电击中大地或突出物体(如建筑物、LPS、线路、树等)的点。

注:一个雷闪可以有不止一个雷击点。

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 front of impulse current

数值上等于在时间间隔 $\Delta t = t_2 - t_1$ 内雷电流的平均变化率。

注 1:它表示为该时间间隔的末端和始端的电流差 $\Delta i = i(t_2) - i(t_1)$ 除以 $\Delta t = t_2 - t_1$ (见图 A.1)。

注 2:波头也称波前。¹⁾

3.12

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

T_1

它是一个虚拟参数,定义为雷电流波头达到 10% 峰值到 90% 峰值时间间隔的 1.25 倍(见图 A.1)。

注:波头也称波前。²⁾

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% 和 90% 峰值两参考点的直线与时间轴的交点(见图 A.1)。它位于雷电流达

1) 编者注。

2) 编者注。

到 10% 峰值时刻之前 $0.1T_1$ 处。

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

它是一个虚拟参数,定义为视在原点 O_1 到雷电流下降至峰值一半时的时间间隔(见图 A.1)。

3.15

雷闪持续时间 **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}

长时间雷击电流的持续时间是连续电流在上升沿升到峰值的 10% 时至下降沿连续电流降到峰值 10% 时的时间间隔(见图 A.2)。

3.17

雷闪电荷 **flash charge**

Q_{FLASH}

整个雷闪持续期间雷电流对时间的积分。

3.18

短时间雷击电荷 **impulse 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**

W/R

雷电流的平方在整个雷闪持续期内对时间的积分。

注 1: 它表示雷电流在单位电阻上耗散的能量。

注 2: 单位能量也称比能量。³⁾

3.21

冲击电流的单位能量 **specific energy of 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可以忽略。

3.22

需保护建筑物 **structure to be protected**

需按 GB/T 21714 进行雷电保护的建筑物。

注: 需保护建筑物可以是较大建筑物的一部分。

3.23

线路 **line**

连接到需保护建筑物的供电或通信线路。

3) 编者注。

3.24

通信线路 telecommunication lines

用于各建筑物中设备间通信的线路,如电话线路和数据线路。

3.25

供电线路 power lines

为建筑物内的电气或电子设备供电的配电线路,如低压(LV)电源线和高压(HV)电源线。

3.26

雷击建筑物 lightning flash to a structure

雷闪击中需保护建筑物。

3.27

雷击建筑物附近 lightning flash near a structure

雷闪击中需保护建筑物附近且可能产生危险过电压。

3.28

电气系统 electrical system

低压配电各部件构成的系统。

3.29

电子系统 electronic system

含有敏感的电子部件,如通信设备、计算机、控制和仪表系统、无线电系统、电力电子装置的系统。

3.30

内部系统 internal system

建筑物内的电气和电子系统。

3.31

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(或其内物体)所造成的损害。

3.32

人和动物伤害 injuries of living beings

雷电引起的接触电压和跨步电压通过电击造成的人和动物永久性伤害,包括死亡。

注:尽管人和动物还可能因其他原因受到伤害,本部分中术语“人和动物伤害”仅限于电击威胁(损害类型 D1)。

3.33

电气和电子系统失效 failure of electrical and electronic system

由于雷电电磁脉冲(LEMP)导致电气和电子系统的永久性损害。

3.34

雷电电磁脉冲 lightning electromagnetic impulse; LEMP

雷电流通过电阻性、电感性和电容性耦合产生的各种电磁效应,包括浪涌和辐射电磁场。

3.35

浪涌 surge

LEMP引起的以过电压或过电流形式出现的瞬变现象。

注:浪涌也称电涌。⁴⁾

3.36

雷电防护区 lightning protection zone; LPZ

规定雷电电磁环境的区域。

4) 编者注。

注：雷电防护区(LPZ)的区域边界不一定是物理边界(如墙壁、地板和天花板等)。

3.37

风险 risk

R

雷电造成的年均可能损失(人和物)与需保护建筑物的总价值(人和物)之比。

3.38

风险容许值 tolerable risk

R_T

需保护建筑物所能容许的最大风险值。

3.39

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雷电防护措施。

3.40

防护措施 protection measures

为减小需保护建筑物雷电损害风险而采取的措施。

3.41

雷电防护 lightning protection; LP

用于建筑物(包括其内部系统、物体以及人员)防雷的整个系统,通常包括 LPS 和 SPM。

3.42

雷电防护装置 lightning protection system; LPS

用来减小雷击建筑物造成物理损害的整个系统。

注：LPS 由外部和内部雷电防护装置两部分构成。

3.43

外部雷电防护装置 external lightning protection system

LPS 的一部分,由接闪器、引下线和接地装置组成。

3.44

内部雷电防护装置 internal lightning protection system

LPS 的一部分,由等电位连接和/或外部 LPS 的电气绝缘组成。

3.45

接闪器 air-termination system

外部 LPS 组成部分,用于截获雷击的金属部件,如接闪针、接闪网或接闪线。

3.46

引下线 down-conductor system

外部 LPS 组成部分,用于将雷电流从接闪器传导至接地装置。

3.47

接地装置 earth-termination system

外部 LPS 的组成部分,用于将雷电流传导并散入大地。

3.48

外部导电部件 external conductive parts

进出需保护建筑物的金属延伸部件,如管道、电缆金属部件、金属线槽等,它们可以流过部分雷电流。

3.49

雷电等电位连接 lightning equipotential bonding

EB

为减少雷电流引起的电位差,直接用导体或通过浪涌保护器把分离的金属部件与 LPS 进行连接。

3.50

冲击接地阻抗 impulse earthing impedance

接地体电压峰值与接地体电流峰值之比,通常两者峰值不会同时发生。

3.51

LEMP 防护措施 LEMP protection measures

SPM

内部系统防御 LEMP 效应的措施。

注 1: SPM 是综合防雷的一部分。

注 2: IEC 62305.1 第 3 版草案中该术语修改为 Surge Protection Measures。⁵⁾

3.52

磁屏蔽 magnetic shield

将需保护建筑物或其一部分包围起来的闭金属格栅或连续型屏蔽体,用于减少电气和电子系统的失效。

3.53

浪涌保护器 surge protective device; SPD

用于限制瞬态过电压和对浪涌电流进行分流的器件。它至少含有一个非线性元件。

注: 浪涌保护器又称电涌保护器、防雷器等。⁶⁾

3.54

协调配合的 SPD 系统 coordinated SPD system

为了减少电气和电子系统失效而适当选择、配合并安装组成系统的一组 SPD。

3.55

耐冲击电压额定值 rated impulse withstand voltage

U_w

由厂家给设备或其部件指定的冲击耐受电压,用以表征其绝缘对过电压的规定耐受能力。

注: 本标准只考虑带电导体和地之间的耐受电压(见 GB/T 16935.1—2008,定义 3.9.2)^[17]。

3.56

隔离界面 isolating interfaces

能够减少或隔离进入 LPZ 的线路上的传导浪涌的装置。

注 1: 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: 这些设备本身的绝缘耐受特性或通过加装 SPD 适合于此类应用。

4 雷电流参数

GB/T 21714 所采用的雷电流参数参见本部分附录 A。

用于分析的雷电流时间函数参见附录 B。

用于测试的雷电流模拟参见附录 C。

5) 编者注。

6) 编者注。

7) 方括号内引用的文件见参考文献。

用于实验室模拟雷电对 LPS 部件影响的基本参数参见附录 D。

有关不同安装点雷电浪涌的资料参见附录 E。

5 雷电损害

5.1 对建筑物的损害

对建筑物产生影响的雷电可能导致建筑物本身、内部物体以及人和动物受到损害,包括内部系统的失效。这些损害和失效也可能蔓延至四邻,甚至影响局部环境。其蔓延的规模取决于建筑物及雷电的特征。

5.1.1 雷电对建筑物的影响

与雷电效应有关的建筑物主要特征有:

- 结构(如木、砖、混凝土、钢筋混凝土、钢框架结构);
- 用途(民宅、办公室、农舍、戏院、宾馆、学校、医院、博物馆、教堂、监狱、商店、银行、制造厂、工厂、运动场);
- 使用者和内部物体(人和动物、易燃或不易燃材料、易爆或不易爆材料、低或高耐压的电气和电子系统);
- 连接到建筑物的管道和线路(供电线路、通信线路、管道);
- 已有的防护措施(如减少物理损害和人和动物伤害的防护措施、减少内部系统失效的防护措施);
- 危险蔓延的规模(撤离困难、可能引起恐慌、危及四邻和环境的建筑物)。

表 1 给出雷电对各类建筑物的影响。

表 1 雷电对典型建筑物的影响

建筑物类型 (按功用及内部物体分类)	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)
农舍	火灾、危险的跨步电压以及材料损坏是首要的风险。 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、宾馆、学校、 商店、运动场	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	同上,还有通信不畅、计算机失效和数据丢失所产生的问题
医院、疗养院、监狱	同上,还有特护人员问题,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

表 1 (续)

建筑物类型 (按功用及内部物体分类)	雷电的影响
电信中心、电厂	不可接受的公共服务损失
烟花厂、军火厂	火灾和爆炸危及工厂和四邻
化工厂、冶炼厂、核工厂、 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

5.1.2 建筑物的损害源和损害类型

雷电流是损害源。按雷击点相对于所考察的建筑物的位置,应考虑以下情况:

- 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。

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、电感性耦合或部分雷电流通过产生的过电压引起的火花触发火灾和/或爆炸;
- 电阻性耦合、电感性耦合引起的接触电压和跨步电压通过电击对人和动物造成伤害;
- LEMP 导致内部系统失效或故障。

雷击建筑物附近可能导致:

- LEMP 使内部系统失效或故障。

雷击连接到建筑物的线路可能导致:

- 通过连接到建筑物的线路传输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输的雷电流在建筑物内产生接触电压使人和动物受到电击伤害;
- 在连接到建筑物的线路上出现并传输到建筑物的过电压使内部系统失效或故障。

雷击连接到建筑物的线路附近可能导致:

- 在连接到建筑物的线路上感应并传输到建筑物内的过电压使内部系统失效或故障。

注 1: GB/T 21714 不涉及内部系统暂时失效的问题。参见 GB/T 17626.5^[2]。

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,则雷电直击管道或其附近都不会使建筑物受到损害。

因此,雷电可能产生三种基本损害类型:

- D1:电击使人和动物受到伤害;
- D2:包括有火花的雷电流效应引起的物理损害(火灾、爆炸、机械损坏、化学品泄漏等);
- D3:LEMP 导致内部系统失效。

5.2 损失类型

每一种损害类型,单独或与其他损害类型联合可能使需保护建筑物产生不同的损失。可能出现的

损失类型取决于需保护建筑物本身的特性。

本部分考虑以下损失类型：

- L1:人身生命损失(包括永久性伤残)；
- L2:公共服务的损失；
- L3:文化遗产损失；
- L4:经济损失(建筑物、其内部物体、以及业务损失)。

注：GB/T 21714 中,公共服务仅指煤气、水、电视、电信以及供电。

可以认为损失类型 L1、L2 和 L3 是社会价值损失,而损失类型 L4 是纯经济损失。

表 2 给出损害源、损害类型和损失类型的对应关系。

表 2 不同雷击点导致建筑物的损害和损失

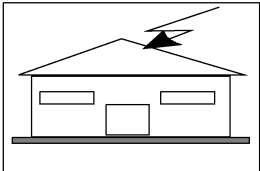
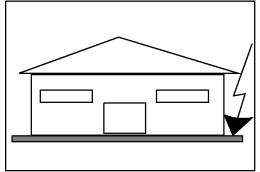
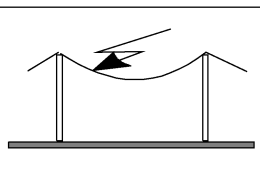
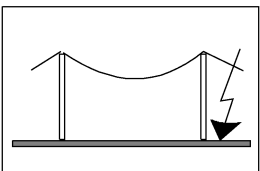
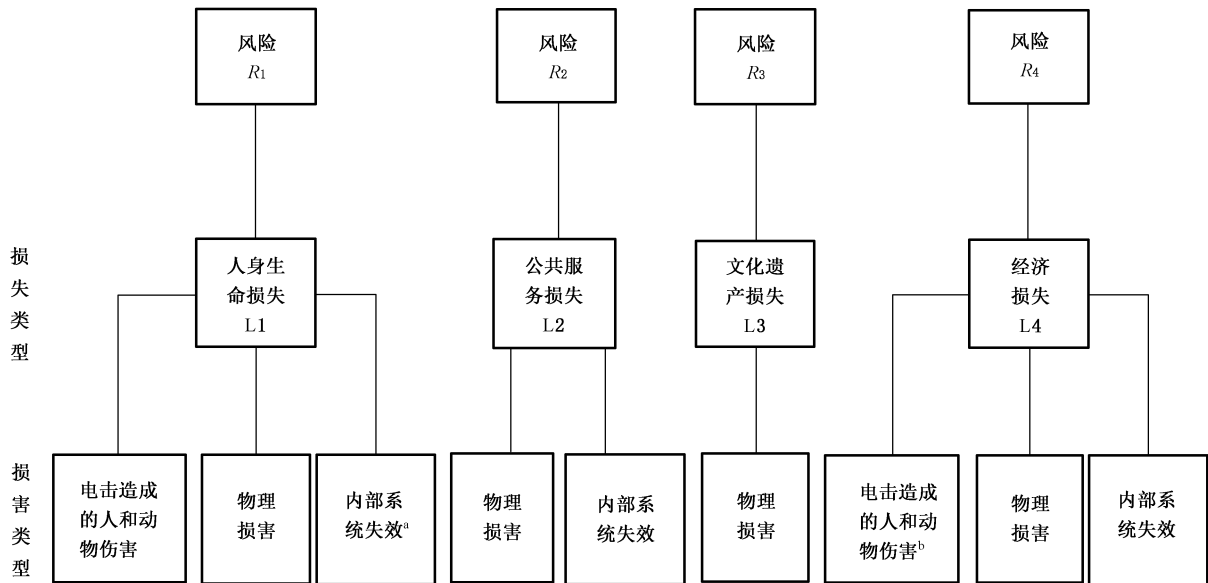
雷击点	图例	损害源	损害类型	损失类型
建筑物		S1	D1 D2 D3	L1、L4 ^a L1、L2、L3、L4 L1 ^b 、L2、L4
建筑物附近		S2	D3	L1 ^b 、L2、L4
连接到建筑物的线路		S3	D1 D2 D3	L1、L4 ^a L1、L2、L3、L4 L1 ^b 、L2、L4
连接到建筑物的线路附近		S4	D3	L1 ^b 、L2、L4
^a 仅对可能有动物损失的地方。 ^b 仅对有爆炸危险的建筑物和那些因内部系统失效立即危及人身生命的医院或其他建筑物。				

图 2 给出由损害类型产生的损失类型和相应风险。



^a 仅对那些因内部系统失效立即危及人身生命的医院或其他建筑物。

^b 仅对可能有动物伤害的地方。

图 2 不同损害类型产生的损失类型和风险

6 雷电防护的必要性和经济合理性

6.1 雷电防护的必要性

为了减少社会价值损失 L₁、L₂ 和 L₃，应对需保护建筑物雷电防护的必要性进行评估。

为了评估雷电防护是否必要，应按照 GB/T 21714.2—2015 介绍的步骤进行风险评估。对应 5.2 介绍的损失类型，应考虑以下风险：

——R₁：人身生命损失或永久性伤残的风险；

——R₂：公共服务损失的风险；

——R₃：文化遗产损失的风险。

注 1：经济损失的风险 R₄ 应在考虑雷电防护经济合理性时评估(见 6.2)。

如果风险 R(R₁ 至 R₃) 大于风险容许值 R_T，即

$$R > R_T$$

则雷电防护措施是必要的。这种情况下，应采取雷电防护措施，使风险 R(R₁ 至 R₃) 减少至不大于风险容许值 R_T，即

$$R \leq R_T$$

如果需保护建筑物上可能出现一种以上损失类型，则对每一种损失类型(L₁、L₂ 和 L₃) 都应满足条件 $R \leq R_T$ 。

雷电可能导致社会价值损失时，有关风险容许值 R_T 值宜由有关部门考虑。

注 2：有管辖权的部门可以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规定。在某些情况下，可以通过风险评估判断是否可以免除这些防护要求。

注 3：风险评估和雷电防护措施选择的详细内容见 GB/T 21714.2—2015。

6.2 雷电防护的经济合理性

除了需保护建筑物雷电防护的必要性外,还可评估为减少经济损失 L_4 而提供防护措施的经济效益。

这种情况下,宜对经济损失的风险 R_4 进行评估。评估时可分别计算采取防护措施前后的经济损失。

如果采取防护措施后的损失价值 C_{RL} 与防护措施费用 C_{PM} 之和低于未采取防护措施时的总损失价值 C_L , 即:

$$C_{RL} + C_{PM} < C_L$$

则采取防护措施经济上是合理的。

注: 雷电防护经济合理性估算的详细内容见 GB/T 21714.2—2015。

7 防护措施

7.1 一般要求

为了减少风险,可以根据损害类型采取防护措施。

7.2 减少电击造成人和动物伤害的防护措施

可能的防护措施包括:

- 外露导电部件的适当绝缘;
- 利用网格状接地装置形成等电位连接;
- 限制活动范围和设置警示牌;
- 雷电等电位连接(EB)。

注 1: 采取等电位措施并增加建筑物内外地表接触电阻可以减少人和动物伤害(见 GB/T 21714.3—2015 第 8 章)。

注 2: 只有在采用 LPS 保护的建筑物中这些保护措施才有效。

注 3: 采用雷电监测装置等有关措施可以减少人和动物伤害。

7.3 减少物理损害的防护措施

采用雷电防护装置(LPS)来实现保护,包括:

- 接闪器;
- 引下线;
- 接地装置;
- 雷电等电位连接(EB);
- 与外部 LPS 的电气绝缘(及相应的间隔距离)。

注 1: 安装 LPS 时,等电位连接是减少火灾、爆炸和人和动物伤害的重要措施。详见 GB/T 21714.3—2015。

注 2: 限制火灾发生和蔓延的措施,如设防火隔间、灭火器、消防栓、火警设施和灭火装置可以减少物理损害。

注 3: 受保护的逃逸通路为人员提供保护。

7.4 减少电气和电子系统失效的防护措施

可能的防护措施(SPM)包括:

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

这些防护措施可以单独使用,也可以组合起来使用。

注 1: 考虑损害源 S1 时,只有在采用 LPS 保护的建筑物中这些保护措施才有效。

注 2: 采用雷电监测装置等有关措施可以减少电气和电子系统失效。

7.5 防护措施的选择

7.2、7.3、7.4 中列举的全部保护措施构成综合防雷。

最恰当的防护措施应由设计者和业主根据每种损害的类型和数量,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。

GB/T 21714.2—2015 给出风险评估和最恰当的防护措施选择准则。

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,则该防护措施是有效的。

8 建筑物雷电防护的基本准则

8.1 一般要求

理想的建筑物雷电防护措施应该是把需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作适当的等电位连接。

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

实际上提供这种最佳防护措施通常既不可能而且经济上也不合理。

如果屏蔽体电气贯通性不良和/或厚度不够,雷电流可能穿透屏蔽体,从而导致:

- 物理损害或人和动物伤害；
- 内部系统失效；

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

8.2 雷电防护等级(LPL)

GB/T 21714 划分了四类雷电防护等级(I至IV)。对每类 LPL 规定了一组雷电流参数的最大值和最小值。

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特殊情况选择和安装更有效的防护措施。

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%。

不超出 LPL I 雷电流参数最大值的雷电发生概率为 99%。按假定的极性比例(见 A.2),该最大值取自正极性雷闪的概率低于 10%,而取自负极性雷闪的概率低于 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 di/dt 是线性的关系, W/R 是平方的关系)。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,允许考虑损害概率大于 GB/T 21714.2—2015 中附

录 B 给出的值,但这类值未量化,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,这些最大值用来设计雷电防护部件(如导体截面积、金属板厚度、SPD 的通流容量、防止危险火花的最小间隔距离等)和确定模拟雷电流对这些部件影响的测试参数(见附录 D)。

不同 LPL 对应的雷电流最小幅值用来推导滚球半径(见 A.4),以便确定防直接雷击的雷电防护区 LPZ 0_B(见 7.3 和图 3、图 4)。表 4 给出雷电流最小参数值及其对应的滚球半径。滚球半径用于接闪器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

首次正极性短时间雷击			LPL			
电流参数	符号	单位	I	II	III	IV
电流峰值	<i>I</i>	kA	200	150	100	
短时间雷击电荷	<i>Q_{SHORT}</i>	C	100	75	50	
单位能量	<i>W/R</i>	MJ/Ω	10	5.6	2.5	
时间参数	<i>T₁/T₂</i>	μs/μs	10/350			
首次负极性短时间雷击 ^a			LPL			
电流参数	符号	单位	I	II	III	
电流峰值	<i>I</i>	kA	100	75	50	
平均陡度	<i>di/dt</i>	kA/μs	100	75	50	
时间参数	<i>T₁/T₂</i>	μs/μs	1/200			
后续短时间雷击			LPL			
电流参数	符号	单位	I	II	III	IV
电流峰值	<i>I</i>	kA	50	37.5	25	
平均陡度	<i>di/dt</i>	kA/μs	200	150	100	
时间参数	<i>T₁/T₂</i>	μs/μs	0.25/100			
长时间雷击			LPL			
电流参数	符号	单位	I	II	III	IV
长时间雷击电荷	<i>Q_{LONG}</i>	C	200	150	100	
时间参数	<i>T_{LONG}</i>	s	0.5			
雷闪			LPL			
电流参数	符号	单位	I	II	III	IV
雷闪电荷	<i>Q_{FLASH}</i>	C	300	225	150	

^a 该电流波形仅应用于计算,与试验无关。

表 4 各 LPL 雷电参数的最小值及其对应的滚球半径

参数	符号	单位	LPL			
			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,可以确定加权概率,即雷电流参数分别小于每一防护等级所规定的最大参数值和大于每一防护等级所规定的最小参数值的概率(见表 5)。

表 5 雷电流参数上下限值对应的概率

雷电流参数在下列范围内的概率	LPL			
	I	II	III	IV
小于表 3 确定的最大值	0.99	0.98	0.95	0.95
大于表 4 确定的最小值	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 GB/T 21714.3—2015 和 GB/T 21714.4—2015 中所指定的雷电防护措施是有效的。所以,可假定雷电防护措施的效率等于雷电流参数在这个范围内的概率。超出此范围则存在残余损害风险。

8.3 雷电防护区(LPZ)

雷电防护措施(如 LPS、屏蔽线、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 比较,其下游 LPZ 的特征是 LEMP 明显减小。

根据雷电威胁的不同,定义以下的 LPZ(见图 3 和图 4):

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浪涌电流的影响。

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浪涌电流的影响。

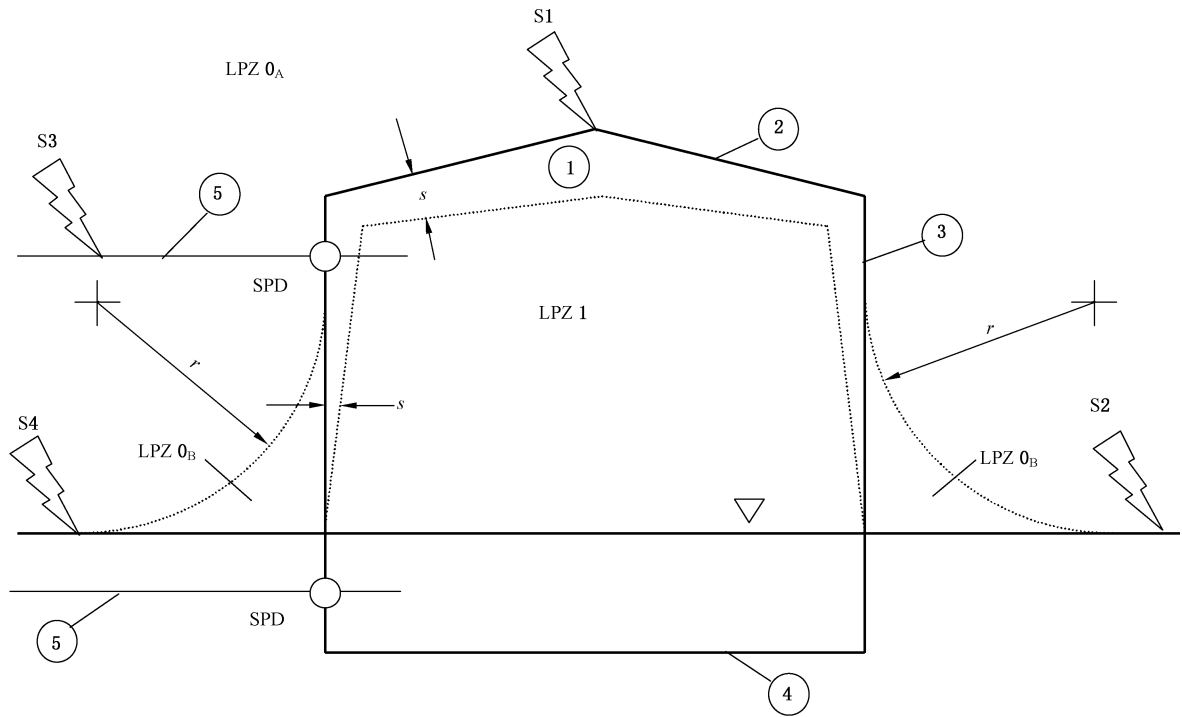
LPZ 1 由于分流和边界处设置隔离界面和/或 SPD 使浪涌电流受到限制的区域。该区域的空间屏蔽可能衰减雷电电磁场。

LPZ 2~ n 由于分流和边界处设置隔离界面和/或 SPD 使浪涌电流受到进一步限制的区域。该区域的附加空间屏蔽可能进一步衰减雷电电磁场。

注 1: 通常,雷电防护区域的序数愈大,电磁环境参数愈低。

作为防雷的一般规则,需保护的物体应置于电磁特性与该物体耐受能力相兼容的 LPZ 内,使损害(物理损害、过电压使电气和电子系统失效)减小。

注 2: 大多数电气、电子系统和设备耐压水平的资料由制造商提供。

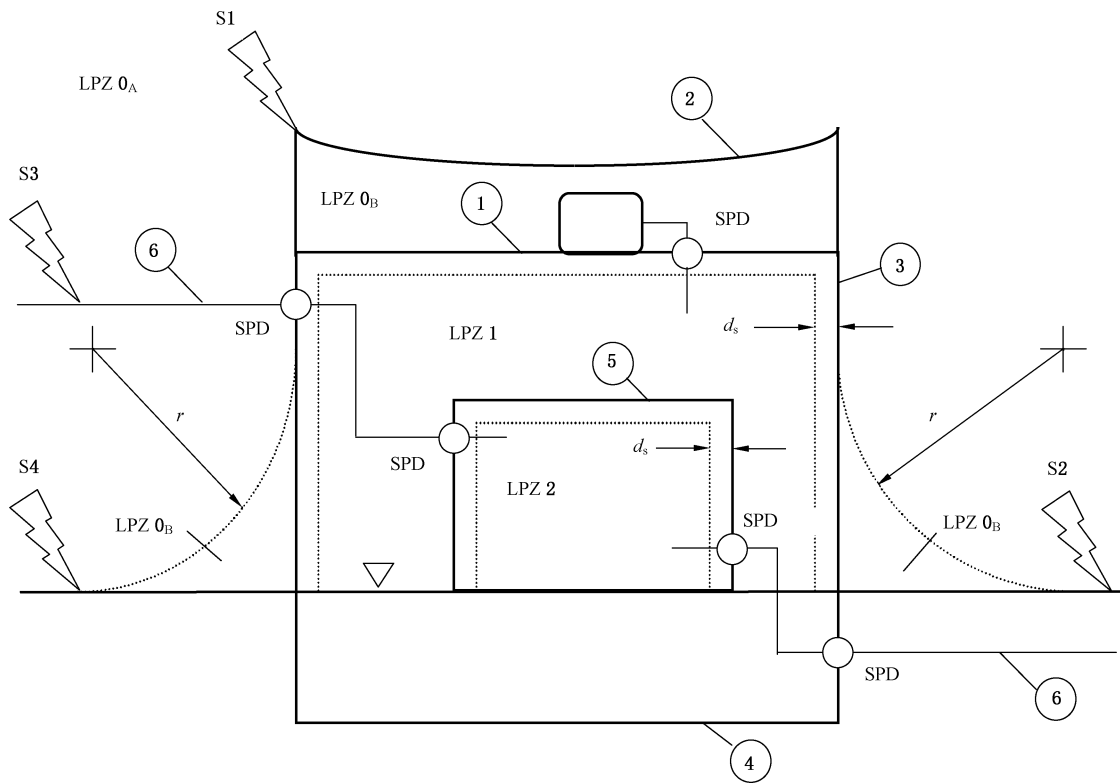


说明：

- 1 —— 建筑物；
- 2 —— 接闪器；
- 3 —— 引下线；
- 4 —— 接地体；
- 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；
- ▽ —— 地面；
- —— 采用 SPD 的雷电等电位连接；
- 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；
- LPZ1 中被保护空间应考虑间隔距离 s 。

图 3 LPS 确定的 LPZ(GB/T 21714.3—2015)



说明：

- | | | | |
|-------|-------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | ——建筑物(LPZ1 的屏蔽体)； | ▽ | ——地面； |
| 2 | ——接闪器； | ○ | ——采用 SPD 的雷电等电位连接； |
| 3 | ——引下线； | LPZ 0 _A | ——直接雷击区,包含全部雷电流,全部磁场； |
| 4 | ——接地体； | 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磁场； |
| 5 | ——房间(LPZ2 的屏蔽体)； | 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磁场； |
| 6 | ——连接到建筑物的线路； | LPZ 2 | ——非直接雷击区,包含感应电流和进一步衰减的磁场； |
| S1 | ——雷击建筑物； | LPZ1、LPZ2 内的保护空间应考虑安全距离 d_s 。 | |
| 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； | | |

图 4 SPM 确定的 LPZ(GB/T 21714.4—2015)

8.4 建筑物的防护

8.4.1 减少物理损害和人和动物伤害的防护措施

需保护建筑物应处在 LPZ 0_B 或序数更高的雷电防护区内。为此,可采用雷电防护装置(LPS)。

LPS 由外部 LPS 和内部 LPS 两部分构成。

外部 LPS 的功能是：

- 拦截直击建筑物的雷电(利用接闪器)；
- 安全引导雷电流入地(利用引下线)；
- 使雷电流入地消散(利用接地装置)。

内部 LPS 的功能是在建筑物内利用等电位连接或 LPS 部件与建筑物内导电部件之间的间隔距离 s (从而达到电气绝缘) 来避免危险火花。

基于对应的 LPL, 施工规程规定有四类 LPS (I、II、III、IV)。每类 LPS 的施工规程包含与防护等级有关(如滚球半径、网格宽度等)的和与防护等级无关(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板电阻率较小时, 减少接触电压和跨步电压对人和动物伤害的措施有:

- 在建筑物外部, 把外露导电部件绝缘, 利用网状接地装置进行等电位处理, 设置警示牌和限制人和动物活动范围;
- 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—2015 的要求。

8.4.2 减少内部系统失效的防护措施

为减小内部系统失效风险, 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浪涌;
- 雷击建筑物附近, 因电感性耦合引起的浪涌;
- 雷击连接到建筑物的线路或其附近而传入的浪涌;
- 与设备直接耦合的磁场。

注: 如果设备符合相关的 EMC 产品标准(见 GB/T 21714.2—2015 和 GB/T 21714.4—2015)规定的射频(RF)辐射和抗扰性试验要求, 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以忽略。

需保护系统应置于 LPZ 1 或序数更高的雷电防护区内。为此, 可采用电气和电子系统防护措施 (SPM), 包括衰减感应磁场的磁屏蔽和/或减小感应回路的合理布线。穿过 LPZ 边界的金属部件和系统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 来实现。

LPZ 的防护措施应符合 GB/T 21714.4—2015 的要求。

亦可采用隔离界面和/或协调配合的 SPD 系统限制导致内部系统失效的过电压使之低于被保护系统的耐冲击电压额定值来实现对过电压的有效防护。

应根据 GB/T 21714.4—2015 的要求选择与安装隔离界面和 SPD。

附录 A
(资料性附录)
雷电流参数

A.1 对地雷闪

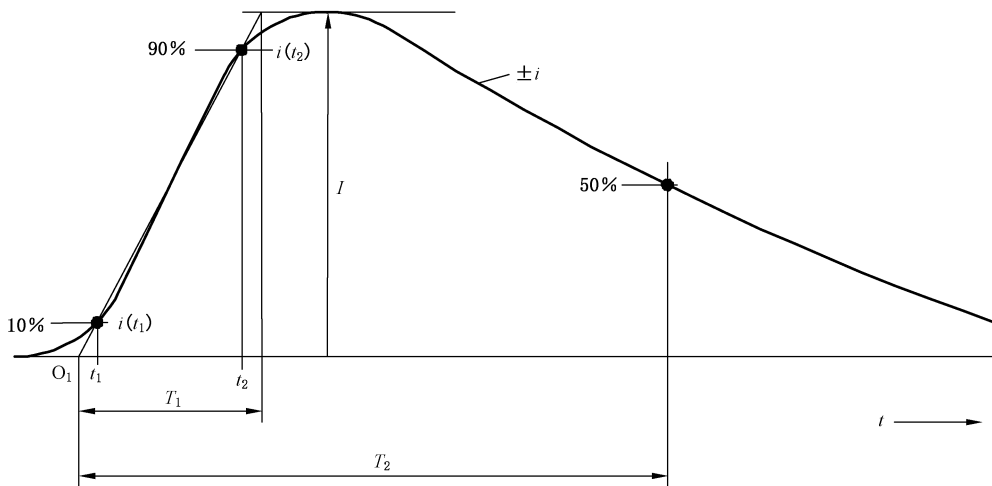
对地雷闪有两种基本类型：

- 始于云对地的一个向下先导的下行雷闪。
- 始于地面建筑物对云的一个向上先导的上行雷闪。

在平地和低矮建筑物上出现的大多是下行雷闪，而在暴露的和/或高耸的建筑上出现的主要是上行雷闪。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—2015, 附录 A)且物理状态发生变化。

雷电流由一个或多个不同的雷击组成：

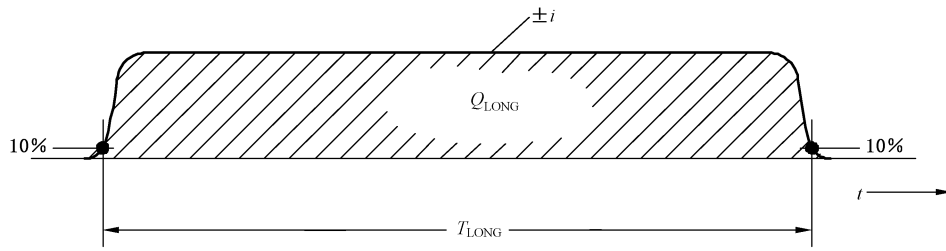
- 持续时间小于 2 ms 的短时间雷击(图 A.1)；
- 持续时间大于 2 ms 的长时间雷击(图 A.2)。



说明：

- O_1 —— 视在起点；
- I —— 电流峰值；
- i —— 电流；
- t —— 时间；
- T_1 —— 波头时间；
- T_2 —— 半峰值时间。

图 A.1 冲击电流参数的定义(典型值 $T_2 < 2 \text{ ms}$)



说明：

T_{LONG} ——持续时间；

Q_{LONG} ——长时间雷击电荷。

图 A.2 长时间雷击参数的定义(典型值 $2\text{ ms} < T_{LONG} < 1\text{ s}$)

雷击按其极性(正极性或负极性)和在雷闪中所处的位置(首次、后续雷击、叠加)进一步区分。图 A.3 和图 A.4 所示分别是下行雷闪和上行雷闪的可能组成成分。

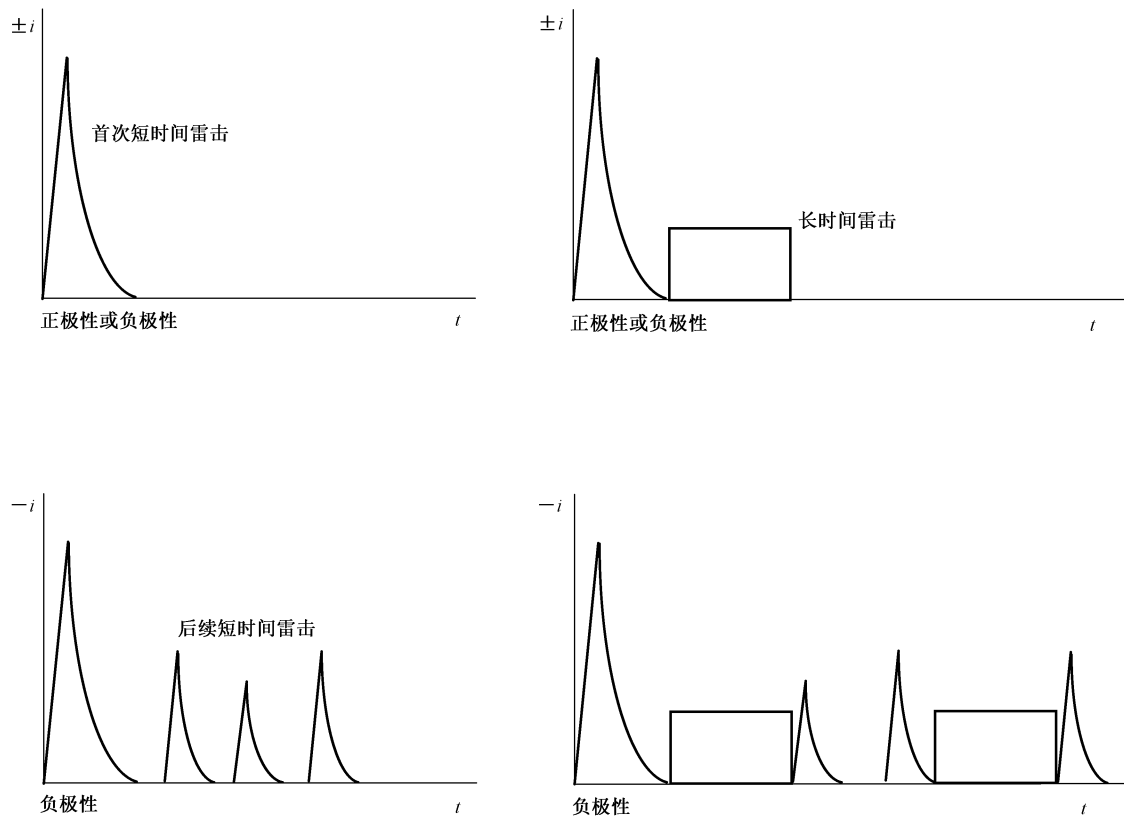


图 A.3 下行雷闪的可能组成成分(通常是对平地 and 低矮建筑物的雷击)

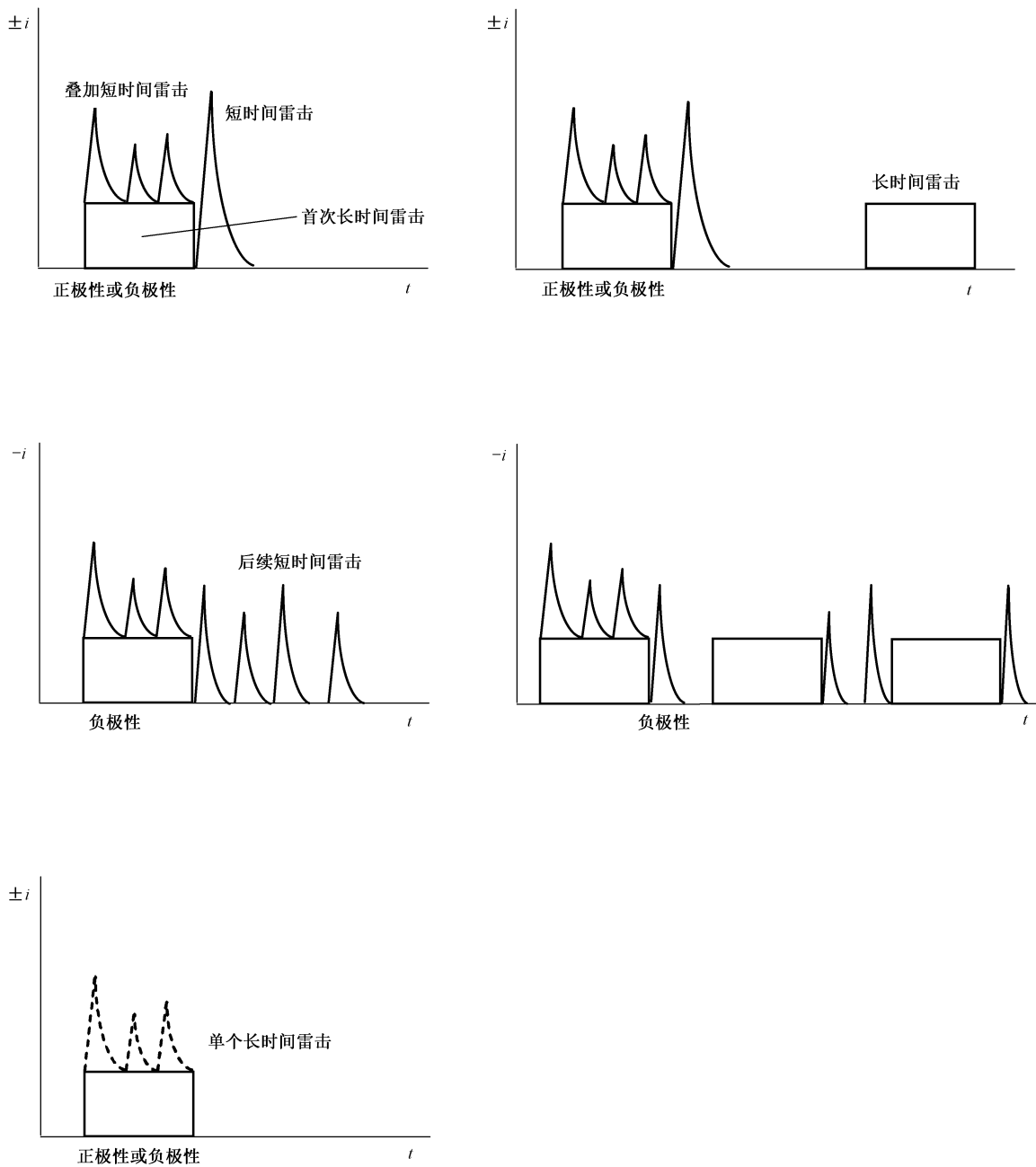


图 A.4 上行雷闪的可能组成成分(通常为对暴露和/或较高建筑物的雷击)

上行雷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。不过上行雷闪的所有冲击电流参数都比下行雷闪的小。具有较大电荷量的长时间上行雷闪尚未获得证实。所以,可以认为下行雷闪的冲击电流参数最大值涵盖了上行雷闪的冲击电流参数。下行雷闪和上行雷闪的更精确雷电流参数以及它们与海拔高度的关系正在考虑中。

A.2 雷电流参数

本部分雷电流参数依据国际大电网会议(CIGRE)报告获得,见表 A.1。其统计分布可以假定为对数正态分布。相应的均值 μ 和标准差 σ_{lg} 在表 A.2 中给出,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。

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

雷电流峰值超出前述考虑范围的概率值在表 A.3 中给出。

表 A.1 摘自 CIGRE(Electra No 41 或 No 69)^[3,4] 的雷电流参数值

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	负极性雷闪	4
	300	20	80	350	正极性雷闪	5
Q _{SHORT} /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} /C	200				长时间雷击	
T _{LONG} /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)	
时间间隔/ms		7	33	150	多重负极性雷击	
总雷闪持续 时间/ms		0.15	13	1 100	负极性雷闪(全部)	
		31	180	900	负极性雷闪(无单个)	
		14	85	500	正极性雷闪	

^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 Electra No.69。

表 A.2 雷电流参数的对数正态分布—摘自 CIGRE(Electra No 41 或 No 69)^[3,4] 从概率 95%到 5%的数值计算得出的雷电流参数的均值 μ 以及标准差 σ_{lg}

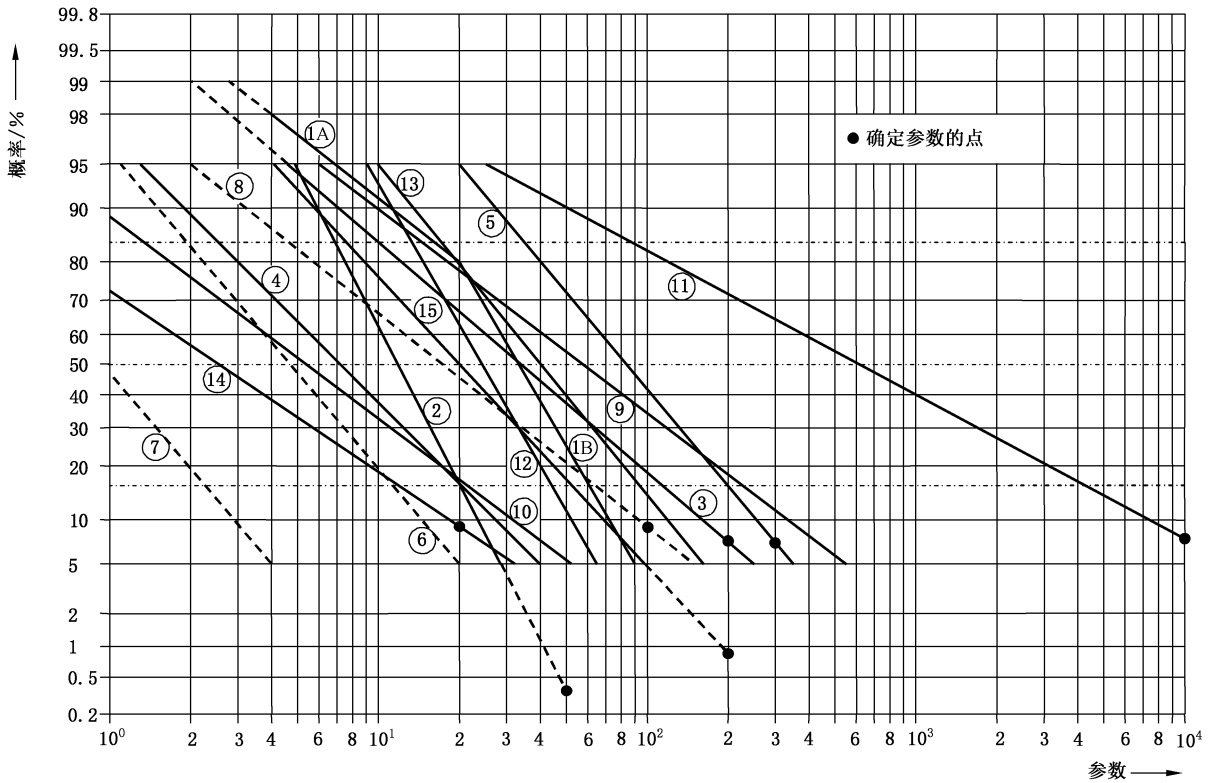
参数	均值 μ	标准差 ^a σ_{lg}	雷击类型	图 A.5 中的曲线
I/kA	(61.1)	0.576	首次负极性短时间雷击(80%) ^b	1A
	33.3	0.263	首次负极性短时间雷击(80%) ^b	1B
	11.8	0.233	后续负极性短时间雷击 ^b	2
	33.9	0.527	首次正极性短时间雷击(单个)	3
Q _{FLASH} /C	7.21	0.452	负极性雷闪	4
	83.7	0.378	正极性雷闪	5
Q _{SHORT} /C	4.69	0.383	首次负极性短时间雷击	6
	0.938	0.383	后续负极性短时间雷击	7
	17.3	0.570	首次正极性短时间雷击(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} /C	200		长时间雷击	
T _{LONG} /s	0.5		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)	
时间间隔/ms	32.4	0.405	多个负极性雷击	
总雷闪 持续时间/ ms	12.8	1.175	负极性雷闪(全部)	
	167	0.445	负极性雷闪(无单个)	
	83.7	0.472	正极性雷闪	

^a $\sigma_{lg} = \lg(X_{16\%}) - \lg(X_{50\%})$, 式中 X 是参数值。

^b 参数和相关值见 Electra No.69。

表 A.3 概率 P 与雷电流 I 的关系

I/kA	P
0	1
3	0.99
5	0.95
10	0.9
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
300	0.005
400	0.002
600	0.001



注：曲线的编号见表 A.1 和表 A.2。

图 A.5 雷电流参数的累积频率分布(曲线通过概率 95%到 5%的值)

本部分给出的所有与 LPL 相关的数值与下行雷闪和上行雷闪都有关。

注：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可利用雷电定位系统获得。

A.3 确定 LPL I 的雷电流最大参数值

A.3.1 正极性短时间雷击

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流波头的平均陡度(di/dt)有关。

某个参数(I 、 Q 、 W/R 、 di/dt)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考虑这种情况。

A.3.2 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 、 W/R 值由正雷闪决定(因为正雷闪累积概率 10% 的参数值远大于负雷闪累积概率 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:

$$\begin{aligned} I &= 200 \text{ kA} \\ Q_{\text{FLASH}} &= 300 \text{ C} \\ Q_{\text{SHORT}} &= 100 \text{ C} \\ W/R &= 10 \text{ MJ}/\Omega \\ di/dt &= 20 \text{ kA}/\mu\text{s} \end{aligned}$$

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:

$$T_1 = I/(di/dt) = 10 \mu\text{s} (T_1 \text{ 意义不大})$$

对指数衰减的雷击,计算电荷和能量的近似值可用以下公式($T_1 \ll T_2$):

$$\begin{aligned} Q_{\text{SHORT}} &= (1/0.7) \cdot I \cdot T_2 \\ W/R &= (1/2) \cdot (1/0.7) \cdot I^2 \cdot T_2 \end{aligned}$$

利用这些公式与上面给出的数值,得出半峰值时间的一级近似值为:

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

对于长时间雷击,其电荷可从下式近似计算:

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

按图 A.2,其持续时间可由表 A.1 中的数值估算为:

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

A.3.3 首次负极性短时间雷击

某些电感性耦合效应中,首次负极性短时间雷击可产生最高感应电压,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:

$$\begin{aligned} I &= 100 \text{ kA} \\ di/dt &= 100 \text{ kA}/\mu\text{s} \end{aligned}$$

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以得出其波头时间的一级近似值为:

$$T_1 = I/(di/dt) = 1 \mu\text{s}$$

其半峰值时间可从首次负极性短时间雷击持续时间估算:

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

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平均陡度 di/dt 最大值由负雷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雷击累积概率 1% 的值或正雷闪累积概率 10% 的值)。根据图 A.5(曲线 2 和 15)可取概率低于 1% 的下列值:

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

$$di/dt = 200 \text{ kA}/\mu\text{s}$$

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

$$T_1 = I/(di/dt) = 0.25 \mu\text{s}$$

其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 确定雷电流最小参数值

接闪器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)与首次短时间雷击电流的峰值有关。据 IEEE 的一个工作小组报告^[5],其关系式为:

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

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 ,可以假定,峰值大于对应的最小电流峰值 I 的所有雷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。考虑到雷闪极性比为 10% 正极性和 90% 负极性,可以计算总的截收概率(见表 5)。

附录 B
(资料性附录)

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:

$$i = \frac{I}{k} \times \frac{(t/T_1)^{10}}{1 + (t/T_1)^{10}} \times \exp(-t/T_2) \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

I —— 电流峰值;

k —— 电流峰值的校正系数;

t —— 时间;

*T*₁ —— 波头时间;

*T*₂ —— 半峰值时间。

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。

表 B.1 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>I</i> /kA	200	150	100	100	75	50	50	37.5	25
<i>k</i>	0.93	0.93	0.93	0.986	0.986	0.986	0.993	0.993	0.993
<i>T</i> ₁ /μs	19	19	19	1.82	1.82	1.82	0.454	0.454	0.454
<i>T</i> ₂ /μs	485	485	485	285	285	285	143	143	143

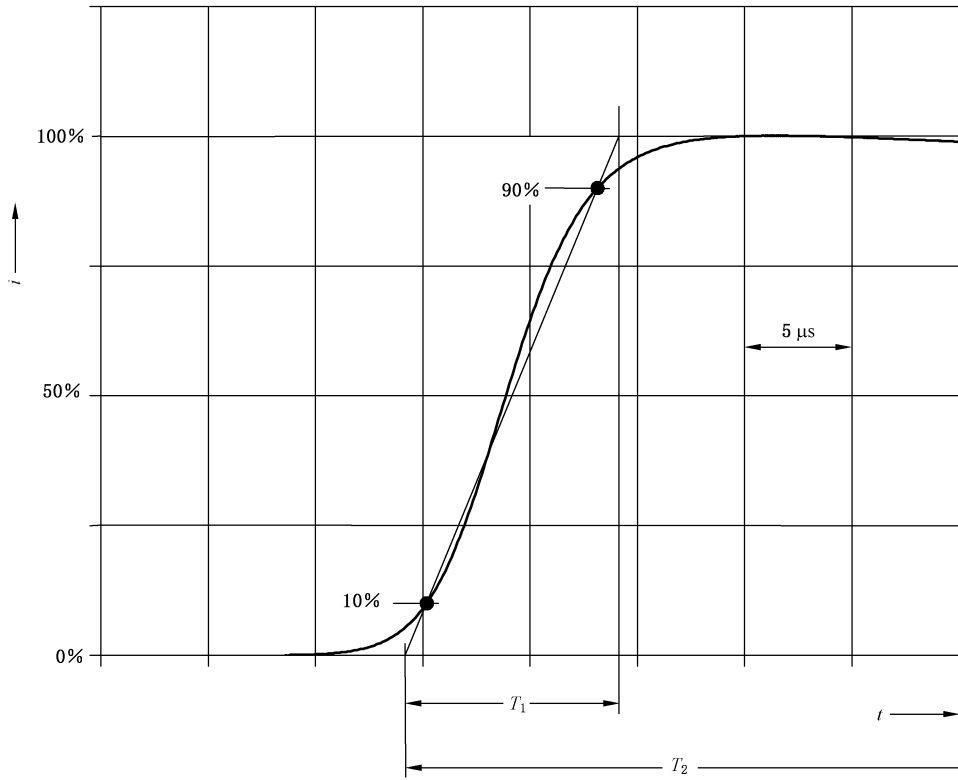


图 B.1 首次正极性短时间雷击电流的上升沿波形

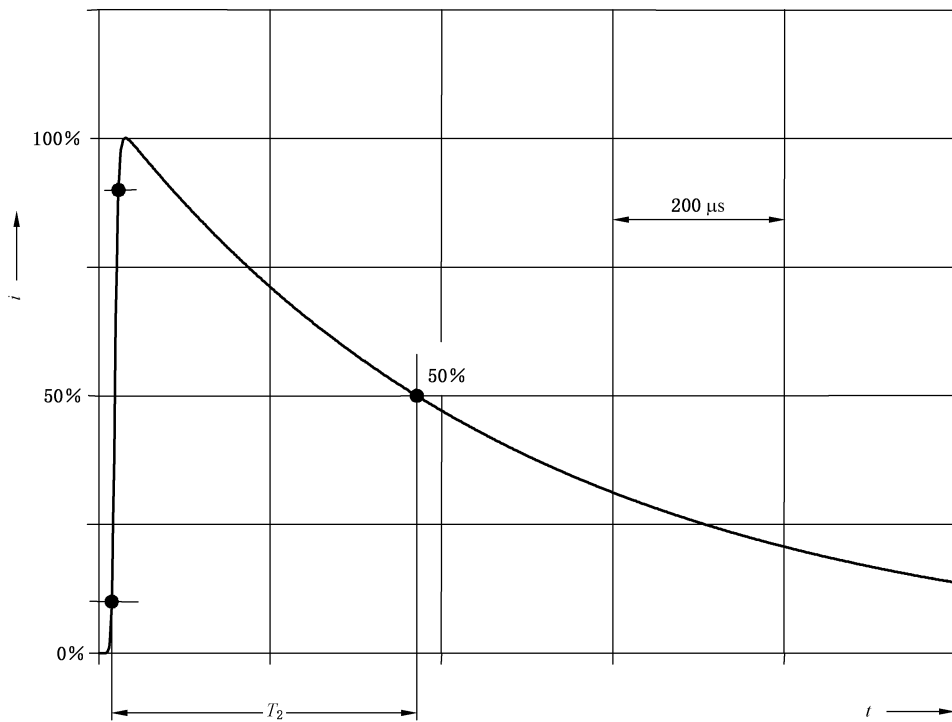


图 B.2 首次正极性短时间雷击电流的下降沿波形

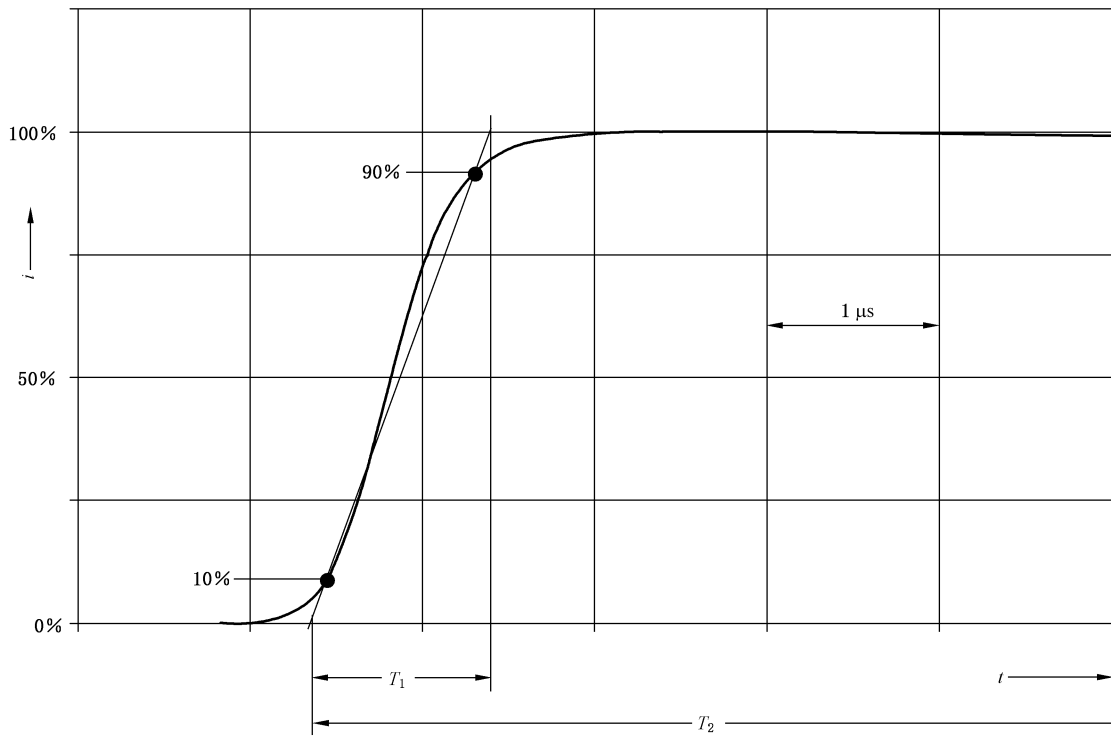


图 B.3 首次负极性短时间雷击电流的上升沿波形

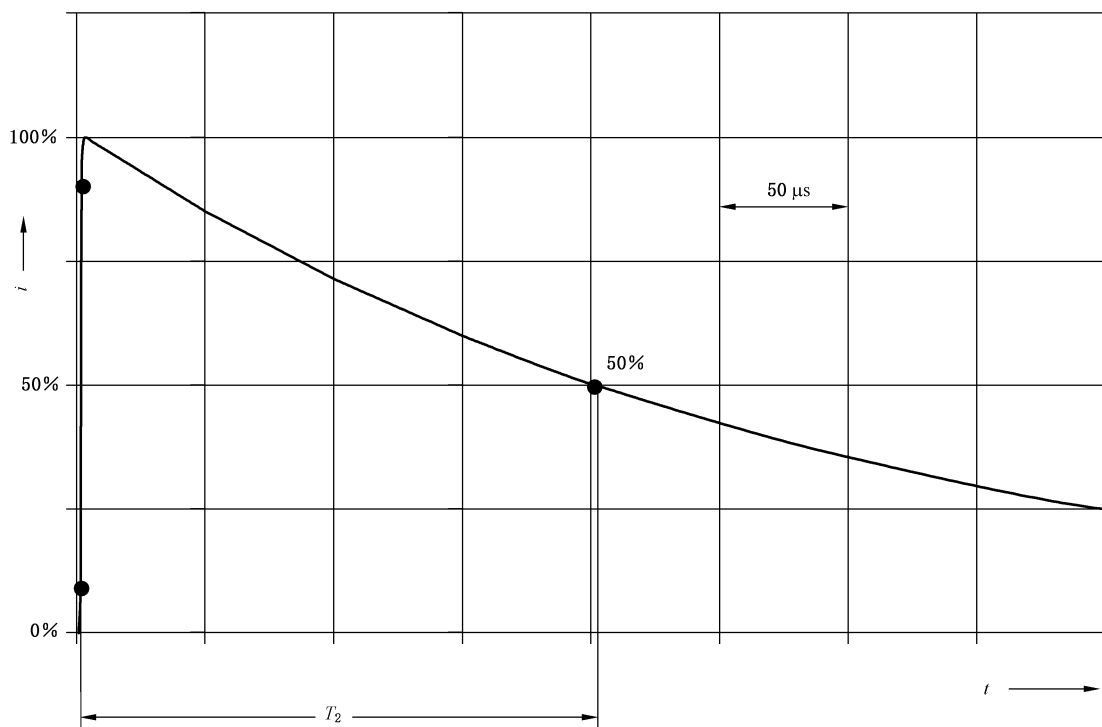


图 B.4 首次负极性短时间雷击电流的下降沿波形

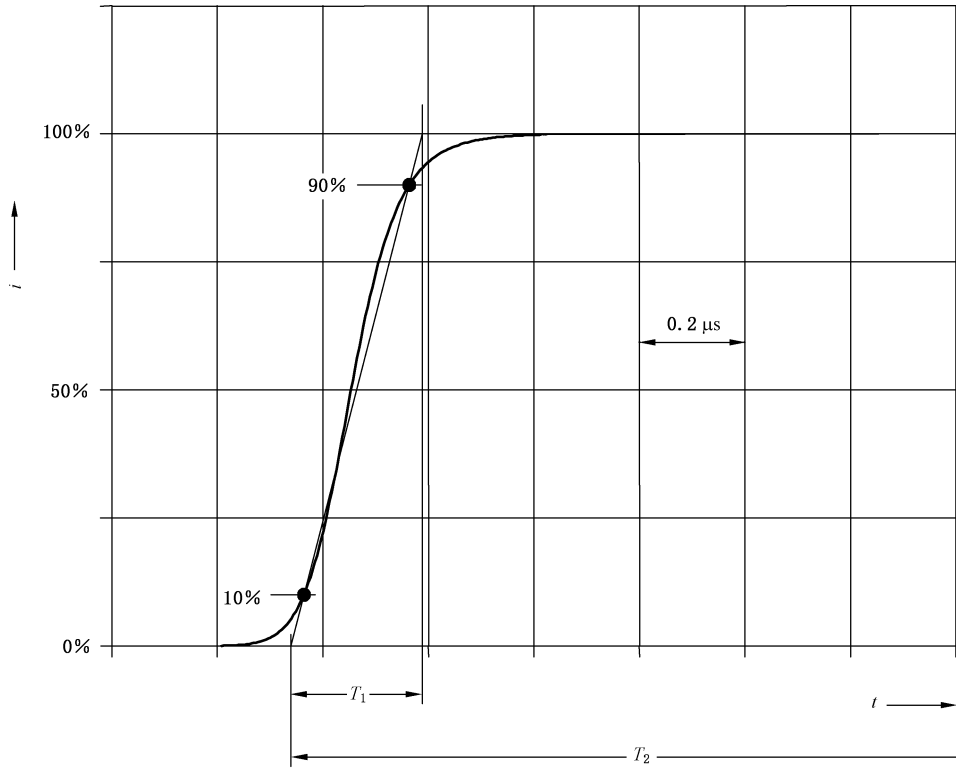


图 B.5 后续负极性短时间雷击电流的上升沿波形

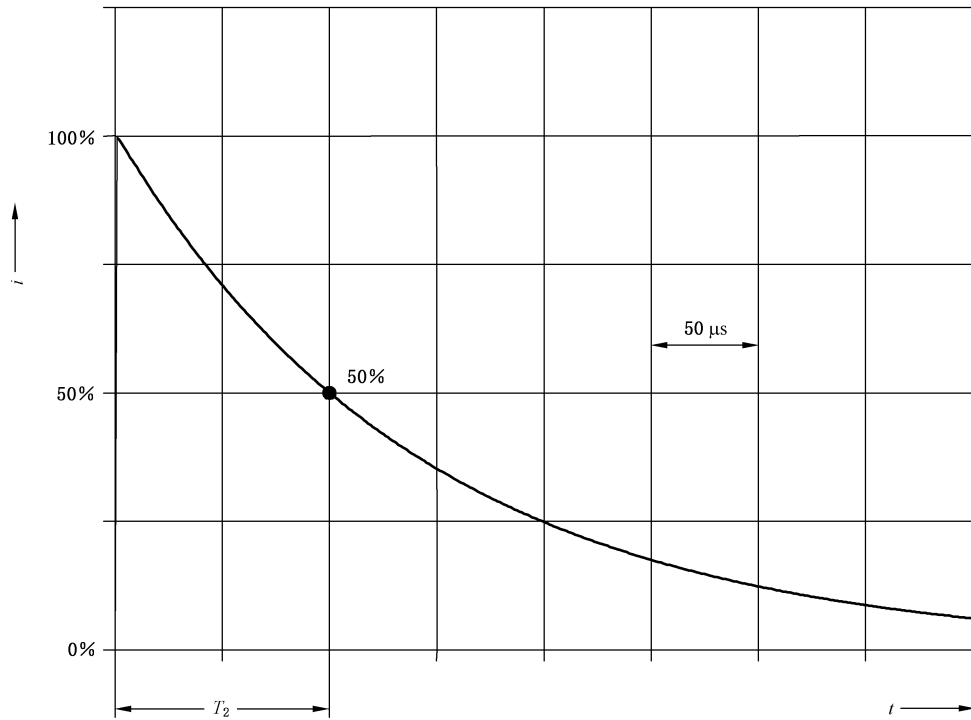


图 B.6 后续负极性短时间雷击电流的下降沿波形

长时间雷击可以用表 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,可以推出雷电流的幅频密度(图 B.7)。

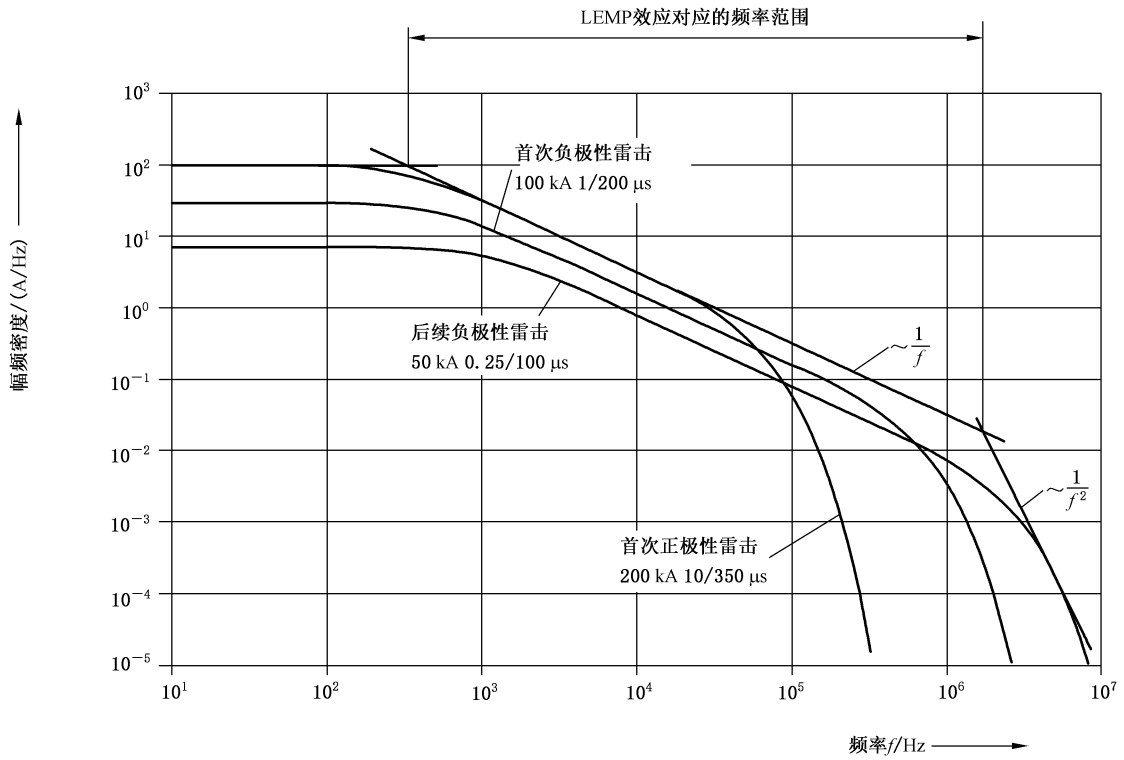


图 B.7 按 LPL I 参数得出的雷电流幅频密度曲线

附录 C
(资料性附录)
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模拟

表 C.1 和表 C.2 中规定了测试参数,图 C.1 给出一种测试发生器的原理图,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。

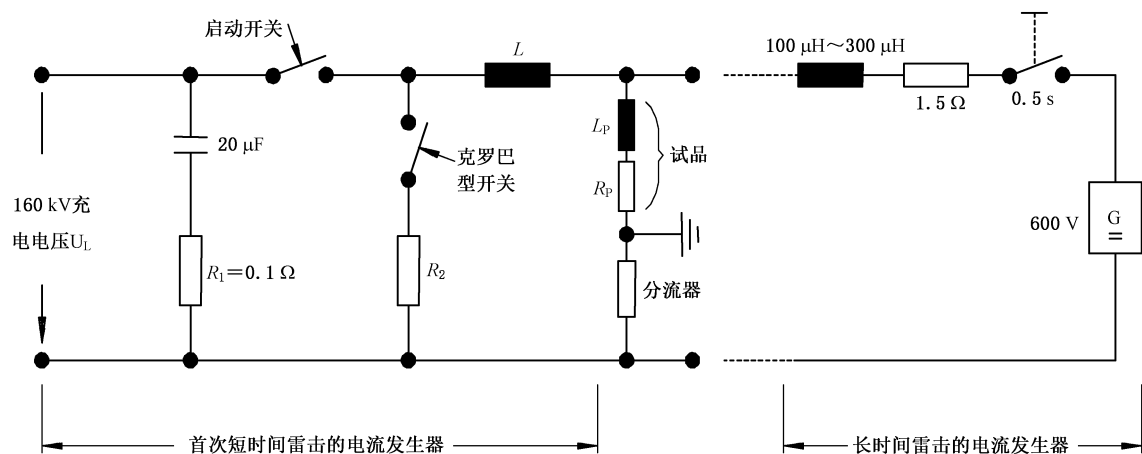
这些测试可用于评估机械完好性,免除发热和熔化的有害影响。

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})。这些参数应在同一短时间雷击下获得。利用 T_2 在 $350 \mu\text{s}$ 范围内的近似指数衰减电流可以满足此要求。

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。

注:首次负极性短时间雷击不用于试验目的。



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			容差 %
	I	II	III-IV	
电流峰值 I/kA	200	150	100	±10
电荷 Q_{SHORT}/C	100	75	50	±20
单位能量 $W/R/(MJ/\Omega)$	10	5.6	2.5	±35

表 C.2 长时间雷击测试参数

测试参数	LPL			容差 %
	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以进行模拟。

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			容差 %
	I	II	III-IV	
首次正极性短时间雷击				
$\Delta i/kA$	200	150	100	±10
$\Delta t/\mu s$	10	10	10	±20
后续负极性短时间雷击				
$\Delta i/kA$	50	37.5	25	±10
$\Delta t/\mu s$	0.25	0.25	0.25	±20

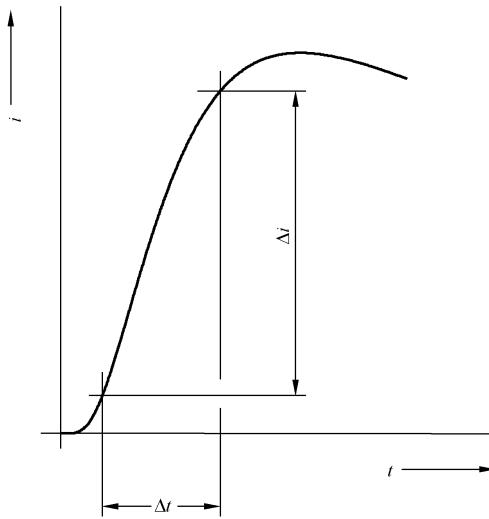
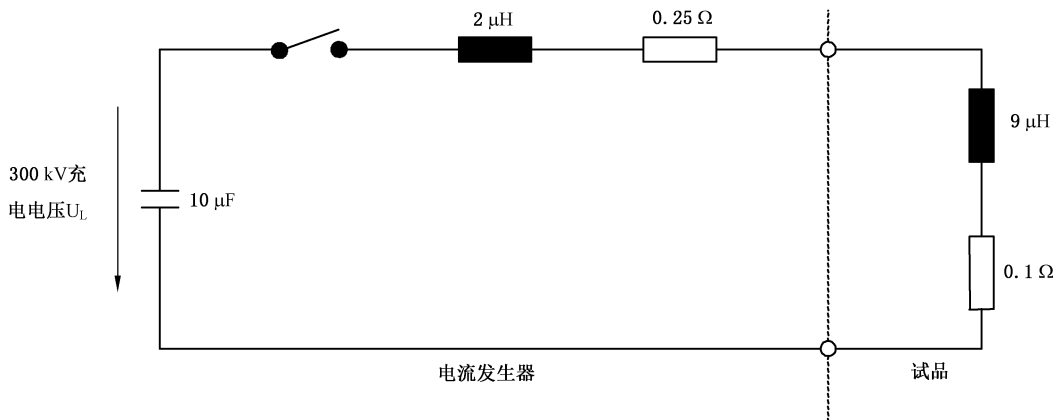
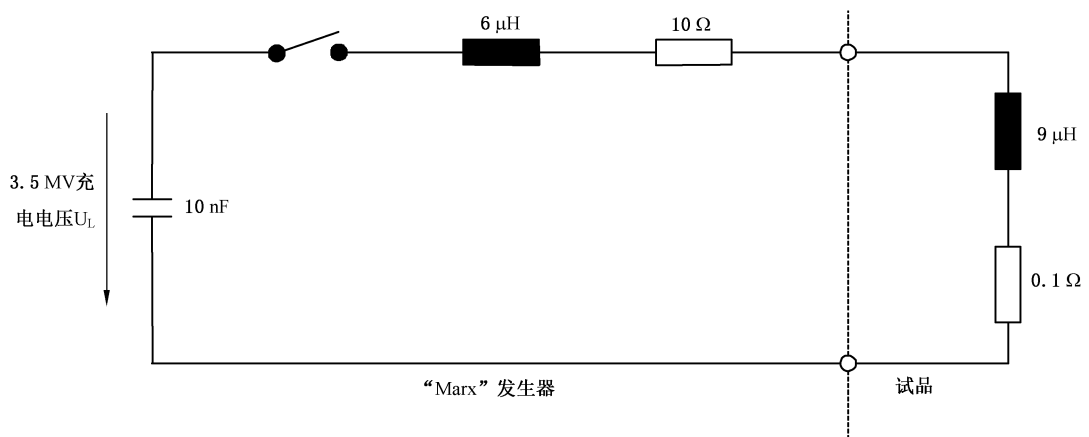


图 C.2 根据表 C.3 定义的雷电流陡度



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
(资料性附录)

模拟雷电对 LPS 部件影响的测试参数

D.1 概述

附录 D 给出用于试验室中模拟雷电影响的基本参数。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。本附录应与规定每一具体部件的要求和测试方法的标准共同使用。

注：本附录不考虑有关系统方面(如浪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 和电流的平均陡度 di/dt 。正如下面要详细分析的那样，上述每一参数往往会决定一种不同的失效机理。测试时要考虑的电流参数是这些数值的组合，试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 列出测试时应考虑的 I 、 Q 、 W/R 和 di/dt 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 下的测试值时应考虑的雷电威胁参数

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	200	<1 s (单次冲击中施加 Q_{LONG})			
		II	150				
	III-IV	100					
接闪器和引下线	阻性发热	LPL	$W/R/(kJ/\Omega)$	T		按 GB/T 21714.3—2015 要求确定尺寸，则不必进行测试	
		I	10 000	在绝热状态下施加 W/R			
		II	5 600				
		III-IV	2 500				
	机械效应	LPL	I/kA	$W/R/(kJ/\Omega)$			
		I	200	10 000			
II		150	5 600				
	III-IV	100	2 500				
连接件	综合效应(热、机械和电弧)	LPL	I/kA	$W/R/(kJ/\Omega)$	T		
		I	200	10 000	<2 ms (单次冲击中施加 I 和 W/R)		
		II	150	5 600			
	III-IV	100	2 500				

表 D.1 (续)

部件	主要问题	雷电威胁参数					备注
		LPL	Q_{LONG}/C	T			
接地体	雷电流流经处的腐蚀	I	200	<1 s (单次冲击中施加 Q_{LONG})			一般从机械、化学方面(腐蚀等)确定尺寸
		II	150				
		III-IV	100				
含有火花间隙的 SPD	综合效应(热、机械和电弧)	LPL	I/kA	Q_{SHORT}/C	$W/R/(kJ/\Omega)$	$di/dt/(kA/\mu s)$	
		I	200	100	10 000	200	在单次冲击中施加 I 、 Q_{SHORT} 和 W/R (持续时间 $T < 2$ ms); 在另一个单独的冲击中施加 $\Delta i/\Delta t$
		II	150	75	5 600	150	
		III-IV	100	50	2 500	100	
含有金属氧化物压敏电阻模块的 SPD	能量效应(过载)	LPL	Q_{LONG}/C				两个方面都需要检查
		I	100				
		II	75				
	电介质效应(闪络/开裂)	LPL	I/kA	T			可考虑分开测试
		I	200	<2 ms (单次冲击中施加 I)			
		II	150				
III-IV	100						

D.3 分流

表 D.1 给出的参数与雷击点雷电流有关。事实上,雷电流不只通过一条路径入地,外部 LPS 中一般有几条引下线和自然导体。此外,还有进入需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,应考虑雷电流的分流。最好计算出通过 LPS 具体位置某一部件的电流峰值和波形。在电流参数不能单独算出的场合,可以借助下列步骤估算。

为了计算外部 LPS 内的分流,可采用结构系数 k_c (见 GB/T 21714.3—2015 的附录 C)。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。

需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_c 和 k_c' 的近似值。

上述方法可用于计算流经某一具体入地路径的电流峰值。电流的其他参数可按以下公式计算:

$$I_p = kI \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

$$Q_p = kQ \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

$$(W/R)_p = k^2(W/R) \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

$$(di/dt)_p = k(di/dt) \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

式中：

X_p ——与某特定入地路径“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 $(di/dt)_p$];

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 (di/dt)];

k ——分流系数： k_c ，外部 LPS 的分流系数(见 GB/T 21714.3—2015 的附录 C)； k_e 、 k_e' ，有外部导电部件、供电线路和通信线路进入需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

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，也与雷电流流经处电弧底部和发生电弧的全部 LPS 隔离部件(如火花间隙)中产生的热量有关。

D.4.1.1 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，还应考虑暴露于大气环境和/或腐蚀环境中部件的机械承受力和耐久性。当存在人员伤害和火灾或爆炸损害的风险时，有时需要对雷电流引起的导体受热进行计算。

下面给出雷电流通过时导体温升的计算方法。

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为：

$$P(t) = i^2 R \quad \dots\dots\dots (D.5)$$

所以，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，单位为焦耳(J)或瓦特秒(W·s)。

$$W = R \int i^2 dt \quad \dots\dots\dots (D.6)$$

在一次雷电放电中，雷闪单位能量处于高水平的持续时间极短，以致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 导体的温度可计算如下：

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

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(m²)；

γ ——材料密度，单位为千克每立方米(kg/m³)；

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式(D.7)中物理参数的特征值。其中 C_s 是溶化潜热，单位为焦耳每千克(J/kg)； θ_s 是熔点，单位为摄氏度(°C)。

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*
$\rho_0/(\Omega \cdot m)$	29×10^{-9}	120×10^{-9}	17.8×10^{-9}	700×10^{-9}
α/K^{-1}	4.0×10^{-3}	6.5×10^{-3}	3.92×10^{-3}	0.8×10^{-3}
$\gamma/(kg/m^3)$	2 700	7 700	8 920	8 000
$\theta_s/^\circ C$	658	1 530	1 080	1 500
$C_s/(J/kg)$	397×10^3	272×10^3	209×10^3	—
$C_w/[J/(kg \cdot K)]$	908	469	385	500

* 奥氏体不锈钢无磁性。

作为该式应用的一个例子,表 D.3 给出由不同材料导体的温升,它们是 W/R 和导体截面积的函数。

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,也应该考虑趋肤效应。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以忽略不计。

与发热机理关系最大的雷闪组成部分是首次回击。

表 D.3 截面积不同的导体温升与 W/R 的关系

截面积 mm ²	温升/K											
	铝			低碳钢			铜			不锈钢*		
	$W/R/(MJ/\Omega)$			$W/R/(MJ/\Omega)$			$W/R/(MJ/\Omega)$			$W/R/(MJ/\Omega)$		
	2.5	5.6	10	2.5	5.6	10	2.5	5.6	10	2.5	5.6	10
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	564	—	—	—	—	—	169	542	—	—	—	—
16	146	454	—	1 120	—	—	56	143	309	—	—	—
25	52	132	283	211	913	—	22	51	98	940	—	—
50	12	28	52	37	96	211	5	12	22	190	460	940
100	3	7	12	9	20	37	1	3	5	45	100	190

* 奥氏体不锈钢无磁性。

D.4.1.2 雷电流流经处的热损害

在所有发生电弧的 LPS 部件上(即接闪器、火花间隙等)都可以观察到雷电流流经处热损害。

雷电流流经处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。

D.4.1.2.1 概述

已提出几种雷电通道中雷电流流经处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。因为该模型假定雷电注入雷击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。其他的模型介绍雷电流流经处的损害与冲击电流持续时间的依赖关系。

D.4.1.2.2 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 :

$$W = \int_0^{\infty} u_{a,c}(t) i(t) dt = u_{a,c} \int_0^{\infty} |i(t)| dt \dots\dots\dots (D.8)$$

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。式(D.9)利用了这种假设,但导致熔化体积的估计过大。

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

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,单位为库仑(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/($kg \cdot K$)];
- θ_s ——熔点,单位为摄氏度($^{\circ}C$);
- θ_u ——环境温度,单位为摄氏度($^{\circ}C$);
- c_s ——熔化潜热,单位为焦耳每千克(J/kg)。

式中物理参数的特征值按不同的 LPS 材料在表 D.2 给出。

要考虑的电荷主要是回击电荷和连续雷电流电荷之和。实验表明,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

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作用的机械构件的弹性。机械效应还与彼此接触的 LPS 部件间的摩擦力有关。

D.4.2.1 磁的相互作用

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.4.2.1.1 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)所产生的电动力可

以用式(D.10)近似计算：

$$F(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} i^2(t) \frac{l}{d} = 2 \cdot 10^{-7} i^2(t) \cdot \frac{l}{d} \dots\dots\dots (D.10)$$

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, $4\pi \cdot 10^{-7}$ 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)。

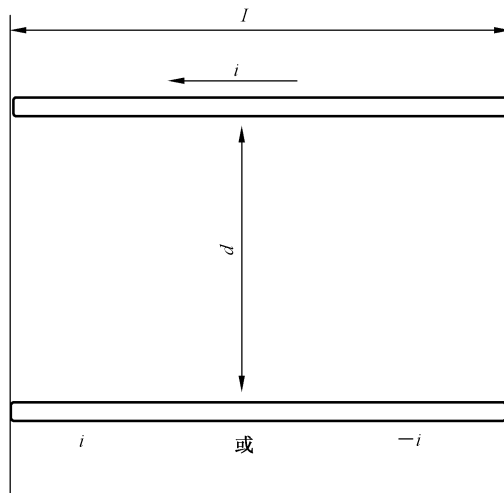


图 D.1 用于计算两导线电动力的示意图

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。

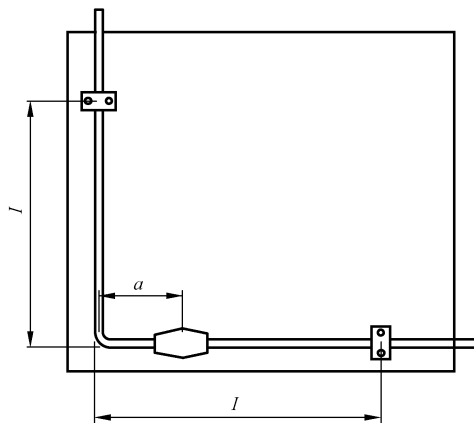


图 D.2 LPS 的导体典型布置图

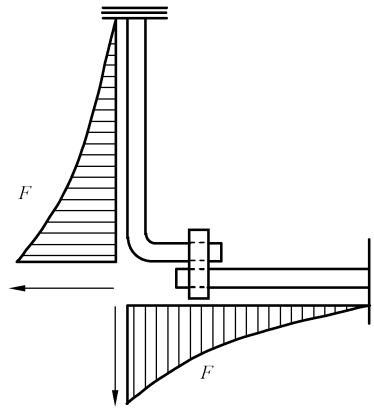
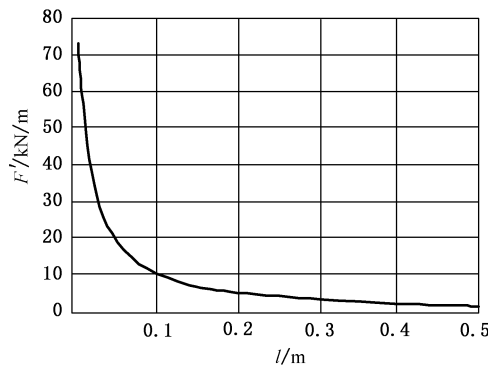


图 D.3 图 D.2 结构应力 F 的应力图



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.4.2.1.2 电动力的影响

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 LPS 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，最大机械应力可以忽略。

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，如铝和淬火铜，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考虑到。

D.4.2.2 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。
声冲击波一般对 LPS 金属部件的损害是无紧要的,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(接闪针、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

一般只有在可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。大多数实际情况下,火花的发生对于 LPS 部件来说并不重要。

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。

D.5 LPS 部件、相关问题和测试参数

D.5.1 概述

雷电防护装置由不同的部件构成,每一部件有特定的作用。当通过试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

接闪器所受的影响是由机械和热两种效应共同引起的(见下面 D.5.3,但应注意的是当接闪器被雷击时,大部分雷电流将流过它)。在某些情况下,特别是有自然 LPS 部件,如薄的金属屋顶(这些地方可能发生穿孔或其背面温升过高)和吊挂的导体时,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,而短时雷击的影响可以忽略不计。

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应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

雷电对引下线的影晌主要可以分为两类:

——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,在试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,都可以采用这种方法。

D.5.3.1 阻性发热

有几位作者发表了关于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.4.1.1 以图表和公式总结其主要结果。因此,一般在试验室中,从温升角度检查导体性能的测试是不必要的。

在要求试验室测试的所有情况下,应作以下考虑:

- 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。要考虑的是与首次雷击有关的数值。考虑正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.5.3.2 机械效应

正如 D.4.2.1 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现行标准的要求,则没有必要进行试验室测试来检查弯成直角的导体的性能。

在要求作试验室测试的所有情况下(特别是对于软材料),应作以下考虑。需要考虑首次回击的三个参数:冲击电流的持续时间、单位能量和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),系统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 结构的固有振荡周期可比拟或更高,则系统的位移对所施应力的波形更为敏感。这种情况下,测试时需要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有关的值。

刚性系统固有振荡频率较高的情况下,冲击电流的最大值决定 LPS 结构的最大位移。要考虑的数值是首次雷击的相关值。

D.5.4 连接部件

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,从而拉开连接件。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。

试验测试表明,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。连接部件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,试验室测试宜尽可能与最严酷条件下雷电流的适当参数接近:即应通过单次电气测试施加适当参数的雷电流。

这种情况下应考虑三个参数: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。应考虑数值是与首次雷击相关的值。考虑正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。应考虑数值是与首次雷击相关的值。考虑正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 接地体

接地极的真正问题与化学腐蚀和非电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。应该考虑到,与接闪器不同,一般的 LPS 有几个接地极。因此,雷电流会在几个接地极之间分流,这样在弧底造成的影响显得较为次要了。这种情况下,要考虑两个主要测试参数:

- 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以忽略;
- 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应与长时间雷击的持续时间(0.5 s~1 s)可比拟。

D.6 浪涌保护器(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。

D.6.2 有火花间隙的 SPD

雷电对火花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。

对于火花间隙,试验室测试时应尽可能模拟最恶劣情况下雷电流的适当参数,即通过单次电应力施加雷电流的全部适当参数。

这种情况下要考虑五个参数:冲击电流的峰值、电荷、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。需考虑是与首次雷击有关的那些数值。考虑正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。应考虑的是与整个雷闪有关的那些数值。然而,在很多情况下,长时间雷击电流的电荷可以忽略,这取决于供电系统的制式(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)。应考虑的是那些与首次雷击有关的数值。考虑正雷击会得出保守的结果。

注:对用于供电系统的火花间隙,工频续流的幅值构成重要的电应力因素,需加以考虑。

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电应力可以分为两大类:过载和闪络。每类电应力由不同现象

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,容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考虑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。应考虑的是那些与雷闪有关的数值。

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。这种失效模式可以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要考虑两个主要参数: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。需考虑的是与首次雷击有关的那些数值。考虑正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,并给出试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,测试值的计算应考虑到分流,分流可通过分流系数计算。

所以,测试时采用的参数值可以根据表 D.1 给出的数据,并利用与分流有关的缩减系数(如 D.3 的公式所示)进行计算。

附 录 E
(资料性附录)
不同安装点的雷电浪涌

E.1 概述

为了决定导体、SPD 和装置的大小,宜确定这些部件在特定的安装点雷电浪涌带来的威胁值。浪涌可能由(部分)雷电流和安装环路的感应引起。这些浪涌引起的威胁值应小于所用部件的耐受能力(必要时通过适当的测试来确定)。

E.2 雷击建筑物引起的浪涌(损害源 S1)

E.2.1 流过连接到建筑物的外部导电部件和线路的浪涌

当流入大地时,雷电流直接或通过与之相连接的 SPD 在接地装置、外部导电部件和线路间分流。如果

$$I_F = k_e I \quad \dots\dots\dots (E.1)$$

是与每一外部导体部件或线路有关的部分雷电流,则 k_e 取决于:

- 并联通道的数目;
- 埋地部分的冲击接地阻抗,或与埋地部分连接处的架空部分的接地电阻;
- 接地装置的冲击接地阻抗。

对于埋地安装,

$$k_e = \frac{Z}{Z_1 + Z \left(n_1 + n_2 \frac{Z_1}{Z_2} \right)} \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

对于架空安装,

$$k_e = \frac{Z}{Z_2 + Z \left(n_2 + n_1 \frac{Z_2}{Z_1} \right)} \quad \dots\dots\dots (E.3)$$

式中:

Z ——接地装置的冲击接地阻抗;

Z_1 ——埋地外部部件或线路(表 E.1)的冲击接地阻抗;

Z_2 ——连接架空线到地的接地装置的接地电阻。如果接地点的接地电阻未知,可以采用表 E.1 中的 Z_1 的值(此处的电阻率与接地点有关);

注:上述公式中,对每一接地点假定数值都相同。否则,需要采用更复杂的公式。

n_1 ——埋地外部部件或线路的总数目;

n_2 ——架空外部部件或线路的总数目;

I ——与所讨论的雷电防护等级(LPL)有关的雷电流。

作为一级近似,假设一半的雷电流流入接地装置,且 $Z_2 = Z_1$,则对于外导电部件或线路, k_e 可以通过式(E.4)估算:

$$k_e = 0.5 / (n_1 + n_2) \quad \dots\dots\dots (E.4)$$

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 n 条导线中的每一条流过相同的部分雷电流。

$$k'_e = k_e / n' \quad \dots\dots\dots (E.5)$$

式中:

n' ——导线的总数目。

对在入户处等电位连接的屏蔽线路,对于屏蔽线路中 n' 条导线的每一条,其电流分流系数 k'_e 值由式(E.6)给出:

$$k'_e = k_e R_s / (n' R_s + R_c) \dots\dots\dots (E.6)$$

式中:

R_s ——单位长度屏蔽线的电阻,单位为欧姆(Ω);

R_c ——每一内部导体单位长度的电阻,单位为欧姆(Ω)。

注: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。

表 E.1 不同土壤电阻率下冲击接地阻抗 Z 和 Z_1 的值

$\rho/(\Omega \cdot m)$	Z_1^a/Ω	与 LPS 类型有关的冲击接地阻抗 ^b		
		Z/Ω		
		I	II	III-IV
≤ 100	8	4	4	4
200	11	6	6	6
500	16	10	10	10
1 000	22	10	15	20
2 000	28	10	15	40
3 000	35	10	15	60

注:此表中的数值指埋地导体在波形 10/350 μs 冲击下的冲击接地阻抗。

^a 数值适用于长度大于 100 m 的外部导体。对于位于高土壤电阻率(大于 500 $\Omega \cdot m$)地区的长度小于 100 m 的外部导体,其值可能加倍。

^b 接地装置符合 GB/T 21714.3—2015 中 5.4 要求。

E.2.2 影响供电线路中雷电流分流的因素

详细计算时,有几个因素可能会影响浪涌幅值和波形:

——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分流;

注 1:例如,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 50% 的电流流过 N 线,而余下的 50% 电流由其他三条相线平分(每条各分 17%)。如果 N,L1,L2,L3 有同样的阻抗,则每一条导线将流过约 25% 的电流。

——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,这种分流影响可以忽略)。

——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,流进低压系统的浪涌电流越大)。

——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—2015 附录 D。

E.3 与连接到建筑物的线路有关的浪涌

E.3.1 雷击线路引起的浪涌(损害源 S3)

雷击连接到建筑物的线路时,应考虑雷电流在两个方向上的分配以及绝缘击穿。

低压系统 I_{imp} 值的选择可以基于表 E.2 给出的值,通信系统 I_{imp} 值的选择可以基于表 E.3 给出的值,此处 I_{imp} 的优选值与雷电防护等级(LPL)有关。

表 E.2 雷击导致的低压系统浪涌过电流预期值

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 ^a
	损害源 S3 (直接雷击) ^b 电流波形: 10/350 μs kA	损害源 S4 (间接雷击) ^c 电流波形: 8/20 μs kA	损害源 S2 (感应电流) ^d 电流波形: 8/20 μs kA	损害源 S1 (感应电流) ^d 电流波形: 8/20 μs kA
Ⅲ-Ⅳ	5	2.5	0.1	5
Ⅱ	7.5	3.75	0.15	7.5
Ⅰ	10	5	0.2	10

注：所有数值均为每一导线中的浪涌值。

^a 环路导体敷设方式以及与感应电流的距离影响预期雷电流数值大小。表 E.2 中的数值指以不同方式敷设在大型建筑物中的短路无屏蔽环路导体(环路面积数量级 50 m², 宽度 5 m), 距离建筑物墙 1 m, 建筑物无屏蔽或装设有 LPS($k_c = 0.5$)。对其他类型的环路或建筑物特性, 所取数值宜乘以系数 K_{S1} 、 K_{S2} 、 K_{S3} (见 GB/T 21714.2—2015 B.5)。

^b 数值与雷击靠近用户的最后一根线杆的情况相关, 考虑的线路为多导体(三相和中性)线路。

^c 数值适用于架空线, 埋地线路数值可减半。

^d 环路电感和电阻影响感应电流波形。环路电阻可忽略时, 宜假设为 10/350 μs 波形。这就是感应环路中装设开关型 SPD 的情况。

表 E.3 雷击导致的通信系统浪涌过电流预期值

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 ^b
	损害源 S3 (直接雷击) ^c 电流波形: 10/350 μs kA	损害源 S4 (间接雷击) ^d 电流波形: 8/20 μs kA	损害源 S2 (感应电流) 电流波形: 8/20 μs kA	损害源 S1 (感应电流) 电流波形: 8/20 μs kA
Ⅲ-Ⅳ	1	0.035	0.1	5
Ⅱ	1.5	0.085	0.15	7.5
Ⅰ	2	0.160	0.2	10

注：所有数值均为每一导线中的浪涌值。

^a 详细资料见 ITU-T 建议 K.67^[6]。

^b 环路导体敷设方式以及与感应电流的距离影响预期雷电流数值大小。表 E.3 中的数值指以不同方式敷设在大型建筑物中的短路无屏蔽环路导体(环路面积数量级 50 m², 宽度 5 m), 距离建筑物墙 1 m, 建筑物无屏蔽或装设有 LPS($k_c = 0.5$)。对其他类型的环路或建筑物特性, 所取数值宜乘以系数 K_{S1} 、 K_{S2} 、 K_{S3} (见 GB/T 21714.2—2015 B.4)。

^c 数值适用于多对线非屏蔽线缆。对非屏蔽终端连接线, 数值可能大 5 倍以上。

^d 数值适用于架空非屏蔽线。埋地线路数值可减半。

对于屏蔽线,表 E.2 给出的过电流数值可减小一半。

注:假定屏蔽层的电阻近似等于所有并联线路导体的电阻。

E.3.2 雷击线路附近引起的浪涌(损害源 S4)

雷击线路附近比雷击线路本身(损害源 S3)所产生的浪涌能量小得多。

表 E.2 和表 E.3 给出与特定雷电防护等级(LPL)相关的预期过电流数值。

对于屏蔽线,表 E.2 和表 E.3 给出的过电流数值可以减小一半。

E.4 感应效应引起的浪涌(损害源 S1 或 S2)

E.4.1 概述

磁场感应效应引起的浪涌,不管是来自于附近的雷击(损害源 S2),或是来自流过外部 LPS 或 LPZ1 空间屏蔽层内的雷电流(损害源 S1),都具有 $8/20 \mu\text{s}$ 的典型波形。可以认为这些浪涌会出现在 LPZ1 内的装置的端口处或靠近端口处,以及在 LPZ1/2 的边界处。

E.4.2 未屏蔽的 LPZ1 内的浪涌

在未屏蔽的区域 LPZ1 内(例如,只根据 GB/T 21714.3—2015 要求采用宽度大于 5 m 网格的外部 LPS 防护),由于未被衰减磁场的感应,预期的浪涌比较高。

表 E.2 和表 E.3 给出与特定雷电防护等级(LPL)相关的预期过电流数值。

E.4.3 已屏蔽的 LPZ 内的浪涌

在具有有效空间屏蔽(按照 GB/T 21714.4—2015 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浪涌明显降低。这些情况下,浪涌比 E.4.2 给出的要低得多。

由于空间屏蔽的衰减作用,雷电防护区 LPZ1 内的感应效应较低。

由于 LPZ1 和 LPZ2 两级空间屏蔽的共同作用,雷电防护区 LPZ2 内的浪涌进一步降低。

E.5 涉及 SPD 的一般知识

SPD 的使用取决于它们的耐受能力,GB 18802.1^[7] 中对电源 SPD、GB/T 18802.21^[8] 对通信系统 SPD 的耐受能力进行分类。

根据其不同安装位置,采用的 SPD 要求如下:

- a) 线路进入建筑物处(在 LPZ1 边界,例如在主配电盘处):
 - 用 I_{imp} 测试的 SPD(典型的波形为 $10/350 \mu\text{s}$),例如 I 类试验的 SPD;
 - 用 I_n 测试 SPD(典型的波形为 $8/20 \mu\text{s}$),例如 II 类试验的 SPD。
- b) 靠近被保护的装置(在 LPZ2 或更高的雷电防护区边界处,例如在第二级配电盘,或者在电器插座处):
 - 用 I_{imp} 测试的 SPD(典型的波形为 $10/350 \mu\text{s}$),例如 I 类试验的 SPD;
 - 用 I_n 测试的 SPD(典型的波形为 $8/20 \mu\text{s}$),例如 II 类试验的 SPD;
 - 用组合波测试的 SPD(典型的电流波形为 $8/20 \mu\text{s}$),如 III 类试验的 SPD。

参 考 文 献

- [1] GB/T 16935.1—2008 低压系统内设备的绝缘配合 第1部分:原理、要求和试验
 - [2] GB/T 17626.5 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验
 - [3] Berger K., Anderson R.B., Kroninger H., Parameters of lightning flashes, CIGRE Electra No 41(1975), P.23-37.
 - [4] Anderson R.B., Eriksson A.J., Lightning parameters for engineering application, CIGRE Electra No 69 (1980), P.65-102.
 - [5] IEEE working group report, Estimating lightning performance of transmission lines-Analytical models. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 8, n.3, July 1993.
 - [6] ITU-T Recommendation K.67, Expected surges on telecommunications and signalling networks due to lightning.
 - [7] GB 18802.1 低压电涌保护器(SPD) 第1部分:低压配电系统的电涌保护器 性能要求和试验方法
 - [8] GB/T 18802.21 低压电涌保护器(SPD) 第21部分:电信和信号网络的电涌保护器 性能要求和试验方法
-