

ICS 33.050

M 30

YD

中华人民共和国通信行业标准

YD/T 2059-2009

雷电在通信网络和信号网络上的预期浪涌

Expected surges on telecommunications and signalling networks
due to lightning

(ITU-T K.67:2006,MOD)

2009-12-11 发布

2010-01-01 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

目 次

前 言.....II

1 范围.....1

2 规范性引用文件.....1

3 术语、定义和缩略语.....1

4 参考配置.....3

5 防护措施.....4

6 雷电引起的预期浪涌（信号线路—信号线路）.....5

附录 A（资料性附录）雷击建筑物本身或附近引发的建筑物内部感应浪涌.....11

附录 B（资料性附录）线路附近的雷击对通信线路感应的浪涌：充分导电土壤.....17

附录 C（资料性附录）雷击建筑物本身或附近而在建筑物内部产生的浪涌：基于经验的方案和结果...20

前 言

本标准修改采用 ITU-T K.67:2006 进行制订。

本标准相对于 ITU-T K.67:2006 主要变化如下：

——规范性引用文件中删除了部分本标准中没有引用的标准；

——合并了名词术语和缩略语的章节；

——本标准的附录 A、附录 B 对应的 ITU-T K.67 的附录为规范性附录，本标准中为资料性附录。

本标准由中国通信标准化协会提出并归口。

本标准的附录 A、附录 B 和附录 C 为资料性附录。

本标准起草单位：工业和信息化部电信研究院。

本标准主要起草人：孙向前、陆冰松、夏丽娇。

雷电在通信网络和信号网络上的预期浪涌

1 范围

本标准规定了由于雷电在交换局、用户楼宇和远端节点等建筑物内外的通信接入网络和信号线路各过渡点造成的预期浪涌（过电压和过电流）。

本标准的目的在于研究雷电电流作为一种损伤源，其过电压和过电流对使用金属导体的通信和信号网络产生的影响，而这种影响又取决于作为研究对象的线路（见 3.1.6）遭受雷击的部位。

本标准的预期浪涌是按作为每类（ S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 ）损伤源（见 3.1.6）的浪涌保护水平函数（SPL，见 3.1.7）的峰值和波形确定的。预期浪涌的波形被假设为按其波前时间（ T_1 ）和半峰值时间（ T_2 ）描述的双指数。

本标准对旨在线路安装地点抗预期浪涌电流的保护措施（如浪涌保护器）的有效性进行评估。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准。然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 21714.1-2008	雷电防护 第1部分：总则
ITU-T雷电手册，第十章（1995）	在通信用户线缆上测得的过电压和过电流
ITU-T建议书 K.47（12/00）	金属导体通信线路对直击雷的防护

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1.1

雷电造成的危险浪涌电压 dangerous surge voltage due to lightning

浪涌电压峰值 U_p 大于或者等于设备或通信线路导线绝缘体所能承受的最大浪涌电压。

3.1.2

等效衰减半峰值时间（ T_2 ） equivalent decay time to half value（ T_2 ）

脉冲电压或电流的半峰值时间（ T_2 ）是该电压和电流自其有效起始点至降至半峰值的最初瞬间所用的时间段。脉冲电压或电流的有效起始点是该电压或电流达到峰值的 30% 或 10% 之前的瞬间（分别在 0.3 或 $0.1 \cdot T_1$ ）。

3.1.3

波前时间或上升时间（ T_1 ） front time or rise time（ T_1 ）

脉冲电压的波前时间或上升时间 T_{1v} 被定义为脉冲达到峰值的 30% 和 90% 的两个瞬间的间隔时间的 1.67 倍。

脉冲电流的波前时间 T_{11} 被定义为脉冲达到峰值的 10% 和 90% 的两个瞬间的间隔时间的 1.25 倍。

3.1.4

雷电防护水平 (LPL) lightning protection level (LPL)

一组雷电电流参数数值, 用于确定对表现为雷电电流的损伤源的保护水平。

注: 雷电防护水平被用于根据一组有关雷电电流的参数, 设计雷电保护组件 (如导线截面、金属片厚度、SPD 的电流容量和与危险放电的间距), 并确定模拟雷电对这些组件造成的影响的测试参数。GB/T 21714.1 标准采用了 4 种雷电防护水平 (I 至 IV), 并为每个 LPL 设定了一组最大雷电电流参数 (表 1)。

3.1.5

峰值 (x_p) peak value (x_p)

浪涌电压/电流峰值 (x_p) 被定义为在浪涌过程中观测到的最大值。

3.1.6

损伤源 source of damage

损伤源取决于对作为研究对象的线路的雷击部位:

损伤源 S_1 ——在通信或信号线路进入的建筑物 (交换局、用户楼宇和远端节点) 上的雷闪;

损伤源 S_2 ——在通信或信号线路进入的建筑物 (交换局、用户楼宇和远端节点) 附近的雷闪;

损伤源 S_3 ——在进入建筑物 (交换局、用户楼宇和远端节点) 的通信线路上的雷闪;

损伤源 S_4 ——在进入建筑物 (交换局、用户楼宇和远端节点) 的通信线路附近的雷闪。

3.1.7

浪涌保护水平 (SPL) surge protection level (SPL)

作为损伤源的雷电电流在通信网络各点引发的预期危险浪涌电压或电流的峰值和波形。

3.1.8

波前陡度, 或上升速度 (S) steepness of the front, or rate of rise (S)

波前陡度, 或上升速度 (S) 是电压或电流的平均导数, 可由峰值 x_p 和波前时间 T_1 的比率决定:

$$S = \frac{x_p}{T_1} \quad (1)$$

3.1.9

浪涌 surge

对电气或电子电路的瞬态电磁干扰。

3.1.10

雷电引起的浪涌 surge due to lightning

任何一种电磁 (阻性、感性和容性) 耦合引起的浪涌。

注: 它具有以下 5 个参数特征: 峰值、波前时间 (T_1)、半峰值时间 T_2 (或时间参数 T_1/T_2)、陡度和单位能量。

3.1.11

浪涌保护器 (SPD) surge protective device (SPD)

当浪涌使一个或多个特定端口的电压超出预定水平时, 对电压加以限制的设备。

注1: SPD是保护电路和支架的组合。
注2: 可以加入次级功能, 如限制终端电流的限流功能。
注3: 保护电路通常配备至少一个非线性限压浪涌保护组件。

3.2 缩略语

以下缩略语适用于本标准。

BN	Bonding Network	连接网络
CBN	Common Bonding Network	公共连接网络
E	Exchange	交换局
GDT	Gas Discharge Tube	气体放电管
LPL	Lightning Protection Level	雷电防护水平
MDF	Main Distribution Frame	总配线架
NT	Network Termination	网络终端
RBS	Radio Base Station	无线基站
S	Subscriber	用户
SPD	Surge Protective Device	浪涌保护器
SPL	Surge Protection Level	浪涌保护水平

4 参考配置

图1显示了配有金属对称导线的通信线路的参考配置, 从中可以看到参考节点以及它们之间的电缆段。对图1所示过渡点的说明如下:

- 过渡点 L: 交换局内设备接口与外部电缆之间的过渡点;
- 过渡点 E: 交换局的入口, 如总配线架 (MDF);
- 过渡点 P : 纸质绝缘和塑料绝缘埋地电缆之间的过渡点;
- 过渡点 C: 埋地电缆和架空电缆之间的过渡点;

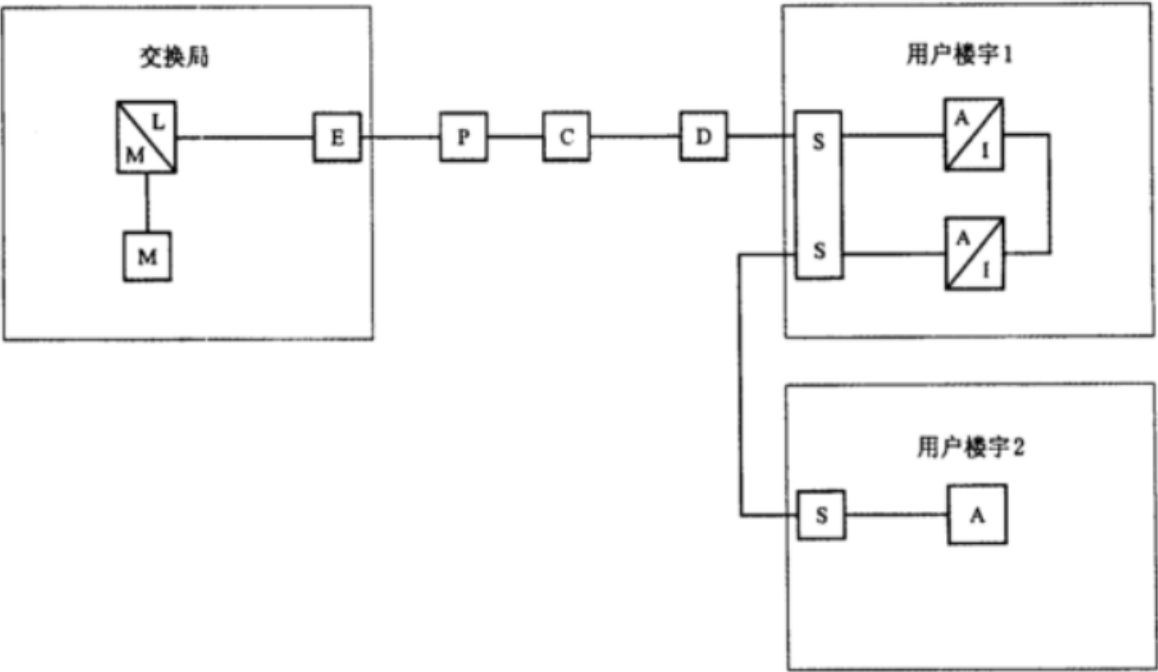


图1 参考配置

- 过渡点 D：屏蔽和非屏蔽架空电缆间的过渡点；
- 过渡点 S：用户楼宇的入口；
- 过渡点 A：用户楼宇内设备接口与外部电缆之间的过渡点；
- 过渡点 M：交换局内设备接口与内部电缆之间的过渡点；
- 过渡点 I：用户楼宇内设备接口与内部电缆之间的过渡点。

5 防护措施

5.1 固有保护

使用具有适合的介质强度、载流容量和阻抗的设备，以便它能经受住所应用的条件（即设备固有抗力特性），以保护设备并限制其受损的风险。

YD/T 950、K.45和YD/T 870为分别安装在交换局大楼、接入网和用户楼宇等不同地点的通信设备确定了抗力要求。从雷电保护的角度而言，这一抗力可使设备承受大多数邻近线路的雷电引发的浪涌（见 6.4）。由于这类浪涌最为常见，根据风险评估的结论，附加保护措施（初级保护）仅用于处于暴露环境中的设备。

5.2 初级保护

使用初级保护可防止过多能量进入通信和信号设备（如设备和导线绝缘体）的易损部分。因此，应配备充分的初级保护，并适当选取其特性。

初级保护的有效性取决于其（为限压设备、GDT）传导浪涌电流的能力，或（为限流设备、熔丝）承受浪涌电压的能力。表1给出了作为雷电防护水平（LPL）函数的、用此确定浪涌电压和电流最大值的雷电参数。浪涌电压和电流的最大值是与下述浪涌保护水平（SPL）相关的：SPL I = 0.01、SPL II = 0.02 和 SPL III = 0.05，以此给出了危险浪涌电压或电流高于或等于相关峰值的概率值。

表1 依照 LPL 确定的雷电参数的最大值

当前参数		符号	单位	LPL			
				I (99%)	II (98%)	III (95%)	IV
首次短时间雷击	峰值电流	I_p	kA	200	150	100	
	短时间雷击电荷	Q_{short}	C	100	75	50	
	单位能量	W/R	kJ/ Ω	10 000	5 625	2 500	
	时间参数	T_1/T_2	$\mu s/\mu s$	10/350			
后续短时间雷击	峰值电流	I_p	kA	50	37.5	25	
	平均陡度	d/d_1	kA/ μs	200	150	100	
	时间参数	T_1/T_2	$\mu s/\mu s$	0.25/100			
长时间雷击	长时间雷击电荷	Q_{long}	C	200	150	100	
	时间参数	T_{long}	s	0.5			
雷闪	雷闪电荷	Q_{flash}	C	300	225	150	

5.3 等电位连接、接地和屏蔽

使用可提供等电位连接、接地和屏蔽的安装技术，可减少雷电与通信线路之间的耦合。在线路受到直接雷击或邻近雷击时，建筑物的CBN和设备BN会分散雷电电流，为内部线路提供屏蔽。全环形屏蔽或导管可以起到减少电压和电流与通信线路耦合的作用。转换阻抗是电缆屏蔽效率的主要参数，对于雷电频率的固体屏蔽而言，它大约等于屏蔽体直流电阻。

初级保护与等电位连接以及接地措施相结合,可为设施形成一道电磁屏障,减少外部电磁干扰对设施的渗透。

6 雷电引起的预期浪涌(信号线路—信号线路)

6.1 对建筑物的直接雷击(损伤源 S_1): 雷电电流通过通信或信号线路进入建筑物(交换局、用户楼宇和远端节点)

直接击中建筑物的雷电电流既流入建筑物的接地系统,也流入建筑物的入局用户线之中。因此,部分雷电电流直接或通过浪涌保护器(SPD)进入与之相连的通信或信号线路的电缆护套或电缆导线,因为电缆也是进入建筑物的用户线之一。

表1给出了短雷击的作为入选LPL函数的雷电电流参数。所以,进入通信或信号线路的雷电电流,是以10/350 μ s波形和峰值 I_t 来描述的。可以大致假设,50%的雷电电流(I)流入接地端子系统,剩余的50%电流由 n 个进入建筑物的用户线分担。

如果进入建筑物的通信或信号线路未加屏蔽或没有通过金属管,线路的每根 m 导线都承载等量(I_t)的峰值雷电电流,并可以通过以下算式表示:

$$I_t = \frac{0.5 \times I_p}{n \times m} \quad \text{无屏蔽线缆} \quad (2)$$

对于在建筑物入口处进行等电位连接的屏蔽入局线路(或通过金属管的线路),进入各 m 导线的电流峰值(I_t)可表示为:

$$I_t = \frac{0.5 \times I_p \times R_s}{n \times (m \times R_s \times R_c)} \quad \text{有屏蔽线缆} \quad (3)$$

上式中:

R_s =屏蔽或者金属导管单位长度的欧姆电阻

R_c =导体单位长度的欧姆电阻

若电缆未加屏蔽,导线与主接地端子(MET)之间的开路电压大体与接地电阻和流向接地网络的雷电电流乘积成正比。如果电缆有屏蔽,导线与连接电缆屏蔽的MET之间的开路电压,大致与屏蔽电阻和流过屏蔽的雷电电流乘积成正比,且受到线芯至屏蔽(如5kV)的击穿电压的局限。在屏蔽间断接地的情况下,屏蔽电流会随自雷击点的向外传播而衰减。浪涌沿电缆的传播会导致散射和衰变期的延长。

即使考虑到电极附近地面可能出现的电离作用,在无保护的情况下,由此产生的电压有可能高到足以启动初级保护,或击穿导线的绝缘体。因此没有考虑计算峰值电压的详细程序。这对于无屏蔽和有屏蔽两种通信线路都适用。

6.2 对建筑物附近或建筑物本身的雷击(损伤源 S_1 或 S_2): 建筑物(交换局、用户楼宇和远端节点)内部通信或信号线路中的感应浪涌。

对建筑物附近或建筑物本身的雷击,会因为雷电电流(d_i/d_t)的时间导数,将共模浪涌电压感应到建筑物(交换局、用户楼宇和远端节点)内的通信或信号线路之中。以下公式给出了感应开路电压的峰值 V_{io} :

$$V_{io}=L_M\times\frac{di}{dt}=L_M\times\frac{I_p}{T_1}$$

(4)

上式中:

L_M = 感应回路与雷电电流之间的互导;

I_p = 雷电流峰值;

T_1 = 雷电电流的波前时间

雷电电流参数是图 1 给出的作为被选 LPL 函数的平均陡度 (di/dt), 该陡度是由峰值 (I_p) 和后续雷击 (最坏情况) 的波前时间 (T_1) (见 3.8) 的比率得出的。

预计感应开路电压波形的持续时间 (大体为几个 μs , 如 $2\mu s$ 至 $10\mu s$) 很短暂, 其波前时间也与后续雷击 (如 $0.25\mu s$) 的波前时间相似, 正如附录 C 介绍的采用触发雷电向回路感应电压的测量所示。

如果忽略了回路线的欧姆电阻 (最坏情况), 估计短路电流 (I_{sc}) 峰值会如下式所示:

$$I_{sc}=\frac{V_{oi}\times T_1}{L_s}$$

(5)

或

$$I_{sc}=\frac{L_M}{L_s}\times I_p$$

(6)

上式中:

L_s = 感应回路的自感

就短路电流 (I_{sc}) 而言, 雷电电流参数是表 1 中作为被选 LPL 函数的首次雷击 (最坏情况) 的峰值 (I_p)。其波形是雷电电流 (见附录 C) 的波形, 因此在最坏情况下, 它被描述为 10/350 μs 波形。

表 2 报告了针对不同 SPL 值的后续雷击引发的开路电压 (V_{oi}) 峰值, 以及首次雷击引发的短路电流 (I_{si})。如附录 A (A.2 和 A.3) 所示, 这些是为无屏蔽建筑物或楼内回路面积达 50 m^2 ($h=5\text{ m}$; $e=10\text{ m}$) 的未屏蔽回路算出的估计值。

表2 直击建筑物 (S_1) 和通信线路 (S_3) 本身和建筑物 (S_2) 附近的雷电对通信信号线路不同节点
各条导线造成的预期开路电压和短路电流

SPL	直接雷击到建筑物, 损伤源 (S_1)			雷击到建筑物附近损伤源 (S_2)		雷击到通信线缆上损伤源 (S_3)	
	节点 E 和 S	节点 L、A、M 和 I (注 1) (仅限 1 条下导线)(见表 A.2)		节点 L、A、M 和 I (注 1) (见表 A.1)		节点 L、E、P	节点 C、D、S、A
	(部分直雷击 电流) 波形: 10/350 μs (kA)	(后续雷击 产生的感应 电压) 波形: 0.25/2 μs (kV)	(初次雷击 产生的感应 电流) 波形: 10/350 μs (kA)	(后续雷击 产生的感应 电压) 波形: 0.25/2 μs (kV)	(首次雷击 产生的感应 电流) 波形: 10/350 μs (kA)	(部分直雷击 电流) 波形: 10/350 μs (kA)	(部分直雷击 电流) 波形: 10/350 μs (kA)
I	公式 (2) 和 (3)	250	6	5	0.1	0.50 (注 2)	公式 (12) 和 (14)
II	公式 (2) 和 (3)	190	4.5	3.5	0.07	0.50 (注 2)	公式 (12) 和 (14)
III	公式 (2) 和 (3)	125	3	2.2	0.05	0.50 (注 2)	公式 (12) 和 (14)
注 1: 计算条件: 未屏蔽建筑物; 未屏蔽感应线路; 回路面积: 50 m^2 ($h=5\text{ m}$; $e=10\text{ m}$); 回路导线半径: 0.5mm.							
注 2: 公式 (12) 或 (14) 可用于特殊情况。设线路对地的击穿电压等于 100kV, 而且线路在兴趣点对地短路							

对于具有不同回路但相同回路长度 (e) 区域的感应线路, 表2所示的浪涌电压值必须乘以下述系数 (K_r):

$$K_r = A/50 \quad (A \text{ 是以 } m^2 \text{ 计算的回路面积}) \quad (7)$$

随后公式 (5) 对短路电流 (I_{sc}) 进行估算, 计算出新回路的自感 (L_s) 值。

以下公式给出的系数 K_{s3} 可以降低表2列出的屏蔽线路的浪涌电压值:

$$K_{s3} = K_r \times K_{ss} \quad (8)$$

其中:

$$K_{ss} = \frac{V_{cs}}{V_{io}} \quad (9)$$

上式中:

V_{cs} = 通过以下公式给出的导线和屏蔽之间的电压:

$$V_{cs} = R \times I_{sc} \quad (10)$$

分别把 V_{io} 和 I_{sc} 代入公式 (4) 和 (5) 中, 公式 (8) 变为:

$$K_{ss} = \frac{R \times T_1}{L_s} \quad (L_s/R) \gg T_1 \quad (11)$$

上式中:

K_{ss} = 与屏蔽相关的屏蔽系数值 (R 为以 Ω 计算的屏蔽电阻)

注: 公式 (10) 可用于管型护套。对于编织护套, 这是一个近似值。

鉴于感应浪涌电压和回路电感的值各不相同, 可以估算出用于不同回路面积的浪涌电流值 (见A.2和A.3)。

6.3 对通信或信号线路的直接雷击

可能出现以下两种情况:

- (a) 雷击点远离建筑物;
- (b) 雷击点邻近建筑物。

在这两种情况下, 进入通信或信号线路的雷击电流, 都可以用 $10/350 \mu s$ 波形和 I_f 峰值加以描述。如忽略传播效应, 可假设网络不同地点的预期电流同为 $10/350 \mu s$ 波形 (交换局、用户楼宇或远端节点)。

在情况a中, 可用两倍的线路接地击穿电压除以线路浪涌阻抗 (如 $2 \times 100kV/400 \Omega = 500A$), 得出最坏情况下的线路总峰值电流; 这种最坏情况与LPL I至IV无关。然而, 如果线路得到屏蔽而且屏蔽间接接地, 便可适用情况b的分析。

在情况b中, 必须考虑到通信网络的雷电电流双向分流和对地绝缘击穿的情况。大致可以假设, 50%雷电电流 (I_p) 接地, 其余50%的电流在密集的 n 个引入线之间双向传播。

如果通信或信号线路未屏蔽或未通过金属管敷设, 线路的 m 根导体中的任何一个导体将承载等量 (I_f) 雷电电流峰值, 可估算为:

$$I_f = \frac{0.25 \times I_p}{n \times m} \quad \text{未屏蔽线路} \quad (12)$$

当 $n = 1$ 或 2 ; 后一种情况可能适用于通信和电力线路同杆密集部署的情况。

公式 (12) 给出的值等于或低于下述值:

$$I_t \leq 8 \times S \text{ (kA)} \quad (13)$$

上式中 S 是通信和信号导体的横截面积 (以 mm^2 为单位)。

对于在建筑物入口处进行等电位连接的屏蔽 (或通过金属管敷设) 入局线路, 进入各 m 导体的电流峰值 (I_t) 可表示为:

$$I_t = \frac{0.25 \times I_p \times R_s}{n(m \times R_s + R_c)} \quad \text{屏蔽线路} \quad (14)$$

上式中:

R_s = 屏蔽或者金属管道的单位长度的欧姆电阻

R_c = 导体单位长度的欧姆电阻

导体和屏蔽之间的开路电压大体与屏蔽电阻产品和流经屏蔽的雷电电流部分成正比, 但受到连接屏蔽的线芯导体击穿电压 (如 5kV) 的局限。当屏蔽间接接地时, 屏蔽电流会随自雷击点向外传播而衰减。浪涌沿电缆的传播会导致散射和衰变时间的延长。

就交换局大楼而言, 雷电通常击中远离建筑物的架空线路 (少量线对)。表2所列的数值可用于这种情况。上述公式 (12)、(13) 和 (14) 可用于特殊情况。

对于用户楼宇而言, 最坏情况通常在雷击点接近建筑物时出现。出现这种情况时, 可以使用通过上述公式 (12)、(13) 和 (14) 估算出的值。

6.4 邻近通信线路的雷闪

6.4.1 概述

不同国家开展的几项调查, 研究了通信网络某些过渡点的预期雷电浪涌电压和电流的峰值, 并在《雷电手册》第10章中报告了这些调查的结果。

附加防护措施 (初级保护) 的使用, 仅限于 “处于暴露环境中的” 设施, 并且是通过风险评估估算得出的。

图2显示了本标准假设的最坏感应情况, 图中雷闪的位置与线路终端呈等距离, 在通信线路的 “x” 点上, 即 6m ($h=6$) 高架空线路的所在地。

在中间点和线路端点对预期危险浪涌电压和电流进行了估算。

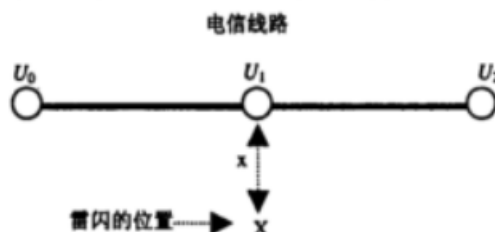


图2 对线路附近的雷电引发的浪涌进行评估的参考配置 (最坏情况)

SPL 定义为:

$$SPL = \frac{N_r(U_{SPL})}{N_r(U_R)} \quad (15)$$

上式中:

U_{SPL} = 根据 SPL 选择的相应电压;

U_R =为连接线路的设备或线路导体绝缘确定最低抗雷击电压电平的参考电压（低于 U_{SPL} ）。

$N_T(U)$ =可感应等于或高于电压 U 的雷击的总数。

附录B报告了位于充分导电土壤上方的未屏蔽和屏蔽架空线路的 N_T 和 U_{SPL} 计算结果。

附录 B 还提出了与危险浪涌电压相关的短路电流的估算方式。

6.4.2 计算值（充分导电土壤）

表5针对不同 SPL ，报告了未屏蔽架空线路过渡点P、C和D（接近中间点）的预期危险浪涌开路电压和短路电流的峰值。浪涌电压和电流的波形会根据雷电电流的特性（波形、峰值和速度）、雷击和线路之间的距离以及线路特性（接地连接、屏蔽等）的不同，而显现巨大差异。在雷电电流固定不变和线路无屏蔽的条件下，延长雷击和线路之间的距离，会降低感应电压和电流并延长波形。此外，对线路加装屏蔽也会降低感应电压和电流并延长波形。

对于表1研究的雷电电流而言，回击速度等于130m/μs，而感应电压与备选的 SPL 范围（如0.01至0.05）相当，未屏蔽线路上的感应电压和电流波形，可表示为一个8/20μs的双指数波。由于屏蔽线路的峰值较低且波形较长，10/700μs双指数波则更具代表性。

注：未屏蔽架空线路的8/20μs波形是利用GB/T 21741.1:2008计算出来的，并假设回击速度为130 m/μs。屏蔽线路的波形被假设为与测量结果相吻合。

6.4.3 测量值（非充分导电土壤）

多个国家已对接入网络中出现的浪涌电压和电流进行了测量，并通过《雷电手册》第10章报告了测量数据。表3对这些数据做了归纳。

实地采集的这些数据，来自自由埋地和架空混合屏蔽线路段以及靠近客户的小段未屏蔽线路段（客户引入线）构成的线路。大多数数据是在交换局和用户端测出的。表3中的电压 U_e 是交换局端测出的线对与屏蔽之间的电压， i_{sce} 是相关的短路电流， U_s 是线对和客户端接近之间的开路电压，而 i_{scs} 则是相关的短路电流。

表3 在交换局和用户端测量的开路浪涌电压和短路浪涌电流

概率	交换局端		用户端	
	U_e (V)	i_{sce} (A)	U_s (V)	i_{scs} (A)
0.01	860	17	2300	23
0.02	680	13	1640	16
0.05	480	8	1020	10

假设屏蔽电阻 $R_s=5\Omega$ ，邻近客户的接地屏蔽的接地电阻 $R_t=40\Omega$ ，埋地部分的浪涌阻抗 $Z=100\Omega$ ，而架空部分 $Z=400\Omega$ ，便可估算出以下 $\eta_{ss}=0.05$ 和 $\eta_{se}=0.1$ 的数值。

鉴于已有了这些屏蔽系数值，就可以从测量数据中估算出交换局端（ $U_R=50V$ ）和用户端（ $U_R=150V$ ）的截断分布。表4报告了作为 SPL 函数的浪涌电压和电流的危险峰值。

表4 在交换局和用户端测量的开路危险浪涌电压和短路浪涌电流

SPL	交换局端		用户端	
	U_e (V)	i_{sce} (A)	U_s (V)	I_{scs} (A)
I	1000	20	3500	35
II	750	15	2500	25
III	500	10	1500	15

表5也列出了这些数值。

表5 线路附近雷闪（ S_4 ）对通信或信号线路不同节点的各项导线造成的预期开路电压和短路电流

SPL	邻近通信或信号线路的雷击（最坏情况）损伤源 S_4									
	节点L、E、P和C		节点D、S和A		节点L、E、P和C （算出的 $\eta_s = 0.05$ ）	节点L、E、P和C （测出的）		节点D、S和A （算出的 $\eta_s = 0.1$ ）	节点D、S和A （测出的）	
	未屏蔽线路（注）				线路构成：埋地屏蔽（E-C节点）、架空屏蔽（C-D节点）和架空未屏蔽（C-S节点）线段					
	感应电压 8/20 μ s (kV)	感应电流 8/20 μ s (A)	感应电压 8/20 μ s (kV)	感应电流 8/20 μ s (A)	感应电压 10/700 μ s (kV)	感应电压 10/700 μ s (kV)	感应电流 10/350 μ s (A)	感应电压 10/700 μ s (kV)	感应电压 10/700 μ s (kV)	感应电流 10/350 μ s (A)
	I	44	110	64	160	1	1	20	6.4	3.5
II	23	60	34	85	0.75	0.8	15	3.4	2.5	25
III	10	25	14	35	0.5	0.6	10	1.4	1.5	15
注：计算条件：架空线路和充分导电土壤										

附录 A
(资料性附录)

雷击建筑物本身或附近引发的建筑物内部感应浪涌

A.1 概述

雷电浪涌是以其波形和峰值为特征的。
附录C显示了根据一实验设施中的测量结果得出的这些感应浪涌电压的波形。
A.2和A.3分别对雷电击中建筑物附近或建筑物本身的情况，分别估算出在回路中感应的开路电压 (V_{io}) 和短路电流 (I_{io})。

A.2 雷击在建筑物附近

公式 (4) 可用于计算邻近建筑物的雷击在回路中感应的开路电压 (V_{io}) 峰值，其互感系数 (L_M) 可用以下近似公式表示 (假设入射磁场是平面波)：

$$L_M = 0.2 \times \eta \times K_s \times h \times \ln \left(\frac{f + d + e}{f + d} \right) \quad (\mu H) \tag{A.1}$$

上式中 (图示见图 A.1)：

h = 回路的宽度和高度 (m)；

e = 回路的长度 (m)；

f = 雷电通道至建筑物墙体的距离 (m)；

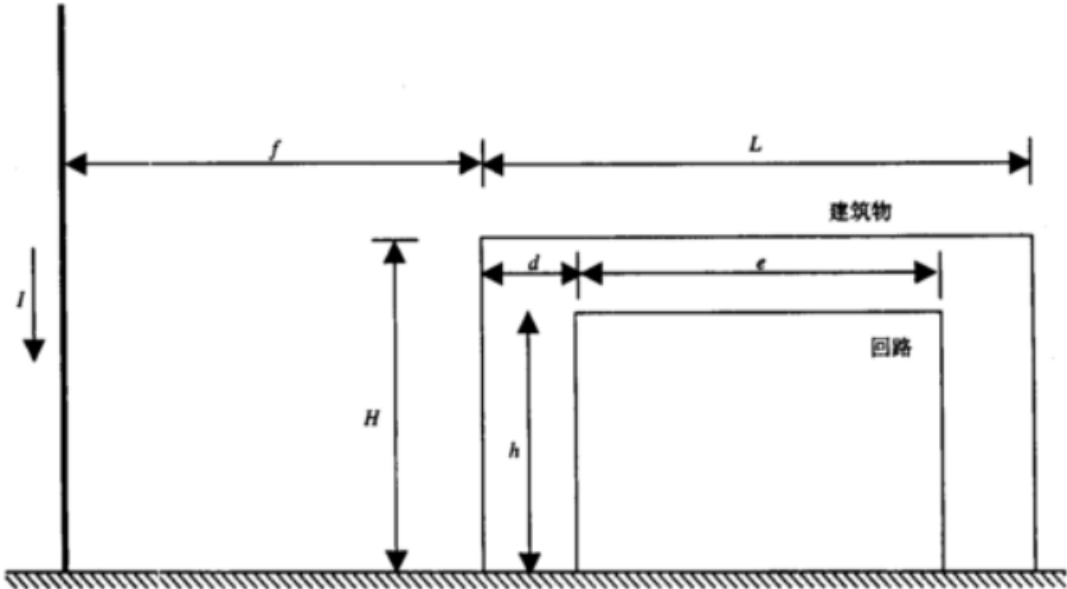
d = 回路距离建筑物墙体的距离 (m)；

$\eta = 0.12 \times w$ = 建筑物屏蔽 (LPZ 1 的屏蔽) 的屏蔽系数，其中 $w \leq 5$ m 是格栅形空间屏蔽的网带宽度；

K_s = 屏蔽系数，其中考虑到电缆屏蔽效应；

I_{ps} = 后续雷击峰值 (表1) (kA)；

$T_1 = 0.25$ = 后续雷击的波前时间 (表1) (μs)。



图A.1 雷电击中建筑物附近

如果对线路的欧姆电阻忽略不计（最坏情况），可用公式（5）或（6）估算短路电流（ I_{sc} ），其中以 μH 为单位的回路自感（ L_S ），可用下列公式的计算：

$$L_S = 0.8 \times \sqrt{e^2 + h^2} - 0.8 \times (e + h) + 0.4 \times e \times \ln \left[\frac{\frac{2 \times h}{r}}{e + \sqrt{e + \left(\frac{h}{e}\right)^2}} \right] + 0.4 \times h \times \ln \left[\frac{\frac{2 \times e}{r}}{e + \sqrt{e + \left(\frac{e}{h}\right)^2}} \right] \quad (A.2)$$

上式中：

r = 回路线路的半径（m）。

在回路内部感应的预期危险浪涌电压可由公式（4）估算出，根据 SPL 的定义：

$$SPL = \frac{N_T(U_{SPL})}{N_T(U_R)} \quad (A.3)$$

上式中：

U_{SPL} = 和已选定的 SPL 相对应的电压；

U_R = 参考电压（低于 U_{SPL} ），用于为与线路连接的设备及线路导体绝缘的最低限抗雷击电压电平；

$N_T(U)$ = 可感应产生等于或高于 U 的电压的雷击总数。

雷击总数 $N_T(U)$ 可表示为（图示见图 A.2）。

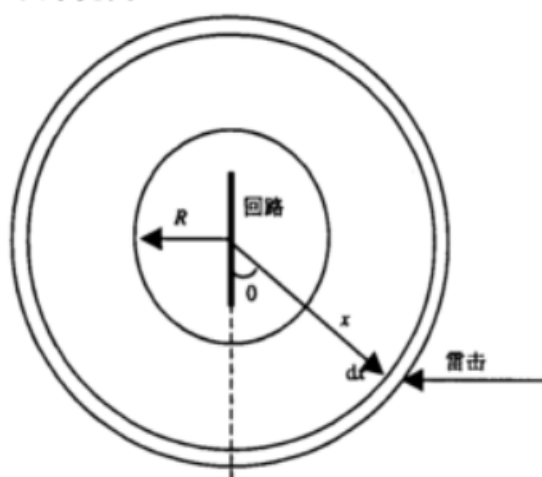


图 A.2 对邻近建筑物的雷击在回路内感应的浪涌进行估算的参考图形

$$N_T = 4 \times N_g \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} p(i) di \times \cos \theta \times d\theta \times x \times dx \quad (A.4)$$

上式中：

N_g = 地面落雷密度（雷击/ $\text{km}^2 \cdot \text{年}$ ）；

R = 自回路算起雷电不致直击建筑物的最小距离（ $R \cong 3H + L/2$ ）（见图 A.1）；

$p(i)$ = 雷击电流的概率函数；

注1：正如 ITU-T K.47 中所示， $p(i) = 10^{-2} e^{-(a \cdot i)^b}$ ，其中 $i \geq 0$ ， i 是雷击电流峰值，当 $i \leq 20 \text{ kA}$ ， $a = 4.605$ 和 $b = 0.0117$ ，当 $i > 20 \text{ kA}$ ， $a = 5.063$ 和 $b = 0.0346$ 。

θ =回路与连接雷击与回路的直线之间的角度;

x =雷击与回路中心点之间的距离;

I_p =公式(4)给出的可在回路中感应电压 U 的峰值雷击电流。

鉴于多数雷击都会距建筑物有一段距离, 因此 $f+d \gg e$, 因此在 $[(f+d+e)/(f+d)] \cong e/(f+d)$ 中, 公式(A.1)可以被写为:

$$L_M = 0.2 \times \eta \times K_s \times h \times \frac{e}{(f+d)} \cong \frac{W}{x} \quad (A.5)$$

若 $x \cong f+d$, 并且 W 是如下常数:

$$W = 0.2 \times \eta \times K_s \times h \times e \quad (A.6)$$

将公式(A.4)积分的结果插入公式(A.3), 再进行代数操作, 就得出如下公式:

$$SPL = \left(\frac{U_R}{U_{SPL}} \right)^2 \frac{[(C_1 \times U_{SPL} + 1) \exp(a_1 - C_1 \times U_{SPL}) - D]}{[(C_1 \times U_R + 1) \exp(a_1 - C_1 \times U_R) - D]} \quad U_R \text{ 和 } U_{SPL} \leq U_{LIM} \quad (A.7)$$

$$SPL = \left(\frac{b_1 \times U_R}{b_2 \times U_{SPL}} \right)^2 \frac{[(C_2 \times U_{SPL} + 1) \exp(a_2 - C_2 \times U_{SPL})]}{[(C_1 \times U_R + 1) \exp(a_1 - C_1 \times U_R) - D]} \quad U_R \leq U_{LIM} \text{ 和 } U_{SPL} > U_{LIM} \quad (A.8)$$

$$SPL = \left(\frac{U_R}{U_{SPL}} \right)^2 \frac{[(C_2 \times U_{SPL} + 1) \exp(a_2 - C_2 \times U_{SPL})]}{[(C_2 \times U_R + 1) \exp(a_2 - C_2 \times U_R)]} \quad U_R \text{ 和 } U_{SPL} > U_{LIM} \quad (A.9)$$

注2: 这里有三个公式, 即(A.7)、(A.8)和(A.9), 而不是一个公式, 其原因是 $i = 20 \text{ kA}$ 的函数 $p(i)$ 有一个断点(见注1):

上式中:

$$U_{LIM} = \frac{20W}{R \times T_1} \quad (A.10)$$

$$C_1 = \frac{b_1 \times R \times T_1}{W} \quad (A.11)$$

$$C_2 = \frac{b_2 \times R \times T_1}{W} \quad (A.12)$$

$$D = \left(1 + 20b_1 - 20 \frac{b_1^2}{b_2} - \frac{b_1^2}{b_2^2} \right) \exp(a_1 - 20b_1) = 82.33 \quad (A.13)$$

$a_1 = 4.605$; $b_1 = 0.0117$; $a_2 = 5.063$ 和 $b_2 = 0.0346$ 均为 $p(i)$ 参数。

在(A.7)至(A.9)的公式中, U_{SPL} 和 U_R 都是以kV计算的。

在 $R \rightarrow 0$ 时, 达到了 SPL 的极限条件。此时, (A.7)至(A.9)的公式简化成公式(A.14)所示的简单形式, 其中 U_{SPL} 独立于回路规模和 $p(i)$ 参数。

$$SPL = \left(\frac{U_R}{U_{SPL}} \right)^2 \quad (A.14)$$

表A.1和A.2显示的是在基于方程式(A.7)到(A.9)时, 不同的 SPL 值、 U_R 、回路和建筑物规模的不同数值设定的 U_{SPL} 值。

同样的原理也适用在回路中感应短路电流。由此生成的公式与 (A.7) 至 (A.9) 的公式相似, 但其中电压 U_R 、 U_{SPL} 和 U_{LIM} 应换成电流 I_R 、 I_{SPL} 和 I_{LIM} , 并对 (A.10) 至 (A.12) 的公式做如下修改:

$$I_{LIM}=\frac{20 \times W}{R \times L_s}$$

(A.15)

$$C_1=\frac{b_1 \times R \times L_s}{W}$$

(A.16)

$$C_2=\frac{b_2 \times R \times L_s}{W}$$

(A.17)

在计算表A.1和A.2的值时, 曾认为函数 $p(i)$ 适用于首次雷击。正如表1所示, 后续雷击与首次雷击的分布相同, 但电流要除以因数4 (如首次雷击的200kA相当于后续雷击的50kA等等)。所以, 由于函数 $p(i)$ 被用于计算 (A.7) 至 (A.9) 的公式, 计算 U_{SPL} 所用的后续雷击的波前时间则乘以4, 如 $T_1=1 \mu s$, 以补偿电流大小之差。 U_{SPL} 和 I_{SPL} 的值是为后续和首次雷击分别计算出来的。

表 A.1 邻近建筑物的雷击在建筑物内 25 m²回路中感应的浪涌电压和浪涌电流的峰值

SPL	建筑物规模 (m)					
	$L=25-H=50$ (大型建筑物)		$L=15-H=5$ (小型建筑物)		$L=0-H=0$ (无建筑物)	
	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)
I	2520	61	4630	112	5000	121
II	2100	51	3390	82	3540	86
III/IV	1610	39	2200	53	2240	54

注: 计算条件: $h=2.5 \text{ m}$; $e=10 \text{ m}$; $r=0.5 \text{ mm}$ ($L_s=41.2 \mu\text{H}$); $\eta=1$; $K_s=1$

表 A.2 邻近建筑物的雷击在建筑物内 50 m²回路中感应的浪涌电压和浪涌电流的峰值

SPL	建筑物直径 (m)					
	$L=25-H=50$ (大型建筑物)		$L=15-H=5$ (小型建筑物)		$L=0-H=0$ (无建筑物)	
	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)
I	3370	64	4890	93	5000	95
II	2690	51	3500	67	3540	68
III/IV	1920	37	2230	43	2240	43

注: 计算条件: $h=5 \text{ m}$; $e=10 \text{ m}$; $r=0.5 \text{ mm}$ ($L_s=52.4 \mu\text{H}$); $\eta=1$; $K_s=1$

可利用公式 (A.2) 算出用于不同回路规模的以 μH 计算的电感值 (L_s)。表A.3显示了利用公式 (A.2) 算出的用于不同回路规模的部分结果。

表 A.3 用于不同回路规模的以 μH 计算的电感值 (L_s)

h (m)	$e=20 \text{ m}$		$e=10 \text{ m}$	
	$r=0.5 \text{ mm}$	$r=5 \text{ mm}$	$r=0.5 \text{ mm}$	$r=5 \text{ mm}$
2.5	75.3	54.6	41.2	29.7
0.5	56.4	37.5	28.7	19.1
0.05	36.9	18.4	18.5	9.2
0.025	31.3	12.9	15.7	6.4

A.3 对建筑物的雷击

假设雷电直接袭击到建筑物，可以考虑下面三种情况：

- (1) 受到装有独立避雷针的LPS防护的建筑物（例如天线保护附近的无线基站（RBS））；
- (2) 受到四周布设引下线的网状LPS防护的建筑物；
- (3) 受到网带宽度 $w \leq 5$ m的格栅形空间屏蔽（LPS）防护的建筑物。

在前两种情况下，在内部结构回路中的开路感应电压（ V_{io} ）可以由方程（4）进行计算，互感系数 L_M 由以下公式给出：

$$L_M = 0.2 \times K_c \times K_s \times h \times \ln \left(\frac{d+e}{d} \right) [\mu H] \quad (A.18)$$

上式中（图示见图 A.3）：

h = 回路高度（m）；

e = 回路长度（m）；

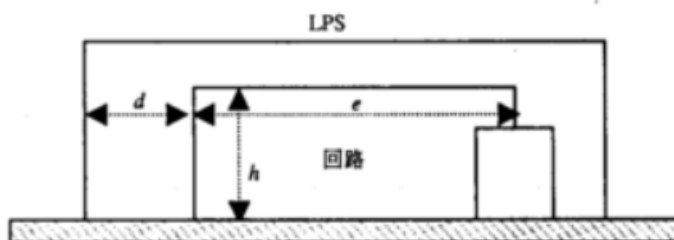
d = 引下线和电流回路间的距离（m）；

K_c = 考虑引下线分担电流的因素；

K_s = 考虑电缆屏蔽的屏蔽效应的屏蔽因素；

I_{ps} = 后续雷击的峰值（表1）（kA）；

$T_1 = 0.25$ = 后续雷击的波前时间（表1）（ μs ）。



图A.3 对建筑物的直接雷击：配备一条或多条引下线的LPS

对于 LPS 有一条引下线的情况，假定 $K_c = 1$ ；对于 LPS 有多条引下线情况[6]。

$$K_c = \frac{1}{2 \times n} + 0.3 \quad (A.19)$$

上式中：

n = 四周等距离设置的引下线数量。

第三种情况是由格栅型空间屏蔽 LPS 保护建筑物，在回路中感应开路电压峰值可以由公式（4）计算，互感系数 L_M 用下列公式计算：

$$L_M = 0.4 \times \pi \times K_s \times h \times \ln \left(\frac{d_w + e}{d_w} \right) \times K_h \times \frac{w}{\sqrt{d_r}} (\mu H) \quad (A.20)$$

上式中（图示见图 A.4）：

d_w = 回路和墙面间的距离（m）；

d_r = 回路和顶部的距离（m）；

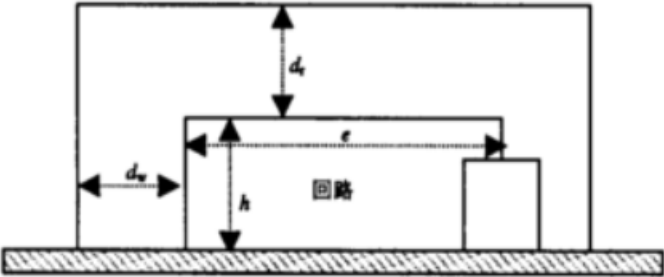
K_h = 等于0.01的配置因数（ $1/m^{0.5}$ ）；

K_s = 考虑到电缆屏蔽的屏蔽效应的屏蔽因数。

并且：

I_{ps} = 后续雷击的峰值（表1）（kA）；

$T_1 = 0.25$ = 后续雷击的波前时间（表1）（ μs ）。



图A.4 对建筑物的雷击：格栅形空间屏蔽 LPS

如果线路的电阻被忽略（最坏情况），由公式（5）或（6）计算出短路电流（ I_{sc} ），而其中以亨利计算的回路自感（ L_S ）可由公式（A.2）计算出来。

表A.4报告了作为LPL函数的首次和后续雷击引发的 V_{oi} 和 I_{sc} 值，并假设建筑物受到有独立避雷针的LPS的防护，内部布线无屏蔽，而且感应回路的面积为 50 m^2 （ $h = 5\text{ m}$ ； $e = 10\text{ m}$ ）。

表A.4 对建筑物的直接雷击在建筑物内 50 m^2 回路中感应浪涌电压和浪涌电流的峰值

LPL	首次雷击		后续雷击	
	V_{oi} (kV)	I_{sc} (kA)	V_{oi} (kV)	I_{sc} (kA)
I	25	6	250	1.5
II	19	4.5	190	1.2
III/IV	12.5	3	125	0.8

注：计算条件： $L_S = 42\text{ }\mu\text{H}$ ； $L_M = 0.792\text{ }\mu\text{H}$ ；回路面积 50 m^2 （ $h = 5\text{ m}$ ； $e = 10\text{ m}$ ）； $K_e = 1$ ； $K_r = 1$ ； $d = 4\text{ m}$ ； $r = 0.5\text{ m}$

附录 B

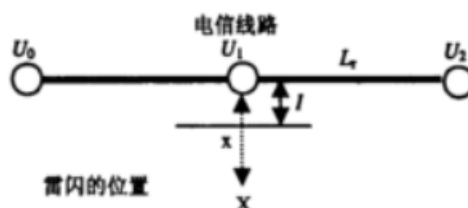
(资料性附录)

线路附近的雷击对通信线路感应的浪涌：充分导电土壤

在初始阶段“ $L_r \times dx$ ”对通信线路感应等于或高于 U 的电压的雷击数量可表示为：

$$N=2 \times L_r \times N_g \times dx \int_I^{\infty} p(i) \times di \quad (\text{B.1})$$

上式中， N_g 是地面落雷密度， L_r 是线路长度， $p(i)$ 是由ITU-T K.25, K.47 和 IEC 61663-1 给出的雷击电流概率函数，并且 I 是可在线路一特定点感应电压 U 的峰值雷击电流。



图B.1 对邻近线路的雷电感应的浪涌作出估算的参考配置

可感应等于或者大于 U 的电压的雷击总数由下面公式给出：

$$N_T=2 \times L_r \times N_g \int_I^{\infty} \int_d^{\infty} p(i) \times di \times dx \quad (\text{B.2})$$

上式中 d 是不导致直接雷击的最小距离。假定近似关系 $d=3h$ 。（图示见图B.1）

线路中间点的电压 U_1 的峰值以及线路两端的 U_0 或 U_2 ，可在假设土壤充分导电的情况下，用下述公式做出估算：

$$U_1=\frac{30 \times I_p \times h}{d} \left(1 + \frac{v}{\sqrt{2-v^2}} \right) \quad (\text{B.3})$$

$$U_0=U_2=\frac{30 \times I_p \times h}{d} \quad (\text{B.4})$$

其中：

I_p =雷电电流峰值 (kA)

v =回击速度（设 $v=1.3 \times 10^8$ m/s）和光速（ $c=3 \times 10^8$ m/s）之比率；

$v=0.43$

$$\left(1 + \frac{v}{\sqrt{2-v^2}} \right) = 1.3$$

将公式 (B.4) 中的 I_p 代入公式 (B.2) 中，求积分并将结果代入公式 (15)，经过代数运算得到以下公式：

$$SPL=\frac{U_R [\exp(a_1 - A_1 U_0) - B]}{U_{SPL} [\exp(a_1 - A_1 U_R) - B]} \quad U_R \text{ 和 } U_0 \leq U_{LIM} \quad (\text{B.5})$$

$$SPL = \frac{b_1 U_R [\exp(a_2 - A_2 U_0)]}{b_2 U_{SPL} [\exp(a_1 - A_1 U_R) - B]} \quad U_0 > U_{LIM} \text{ 和 } U_R \leq U_{LIM} \quad (B.6)$$

$$SPL = \frac{U_R [\exp(a_2 - A_2 U_0)]}{U_{SPL} [\exp(a_2 - A_2 U_R)]} \quad U_0 > U_{LIM} \text{ 和 } U_R > U_{LIM} \quad (B.7)$$

注1：出现三个公式（B.5）、（B.6）和（B.7）而不是仅一个公式的原因在于，函数 $p(i)$ 在 $i = 20 \text{ kA}$ 处出现了断点。
上式中：

$$\eta = \text{线路的屏蔽因数（当线路无屏蔽时 } \eta = 1 \text{）}$$

$$U_{LIM} = 600 \text{ h } \eta / d \quad (B.8)$$

$$A_1 = \frac{b_1}{10\eta} = \frac{0.00117}{\eta} \quad (B.9)$$

$$A_2 = \frac{b_2}{10\eta} = \frac{0.00346}{\eta} \quad (B.10)$$

$$B = \left(1 - \frac{b_1}{b_2}\right) \exp(a_1 - 20b_1) = 52.37 \quad (B.11)$$

$a_1 = 4.605$ ； $b_1 = 0.0117$ ； $a_2 = 5.063$ ；及 $b_2 = 0.0346$ 均为 $p(i)$ 的参数。

在（B.5）至（B.7）的公式中， U_{SPL} 和 U_R 是以kV计算的。

当 $d \rightarrow 0$ 时， SPL 达到其极限条件。此时，公式（B.5）至（B.7）被转化为公式（B.12）所示的简单形式，其中 U_{SPL} 独立于线路特性和 $p(i)$ 参数。

$$SPL = \left(\frac{U_R}{U_{SPL}} \right) \quad (B.12)$$

表B.1显示了以关于无屏蔽架空线路（ $\eta = 1$ ）的公式（B.5）为依据，当 SPL 和 U_R 取不同值时计算出的 U_{SPL} 值。

表B.1 不同参考电压 U_R 、 SPL 时，位于无屏蔽架空线路两端的危险浪涌电压（ U_{SPL} ）开路值

$U_R \text{ (kV)}$	危险浪涌电压, $U_{SPL} \text{ (kV)}$		
	SPL		
	0.01	0.02	0.05
1.5	111	64	28
1.0	81	44	19
0.75	64	34	14
0.5	44	23	10
0.25	23	12	5

在表B.1中，将参考电压值的两倍定为“危险”电压的较低开路限值，目的是考虑到线路终端的反射。例如，假如 $U_R = 0.75 \text{ kV}$ 和 $SP = 0.01$ 的考虑，意味着超出 1.5 kV 的开路感应电压的1%等于或者高于 64 kV 。

短路电流峰值（ I_{sc} ）可估算如下：

$$I_{sc}=\frac{U_{SPL}}{Z}$$

(B.13)

上式中:

$Z=400\ \Omega$ 是架空线路的浪涌阻抗

在估算出与屏蔽相关的屏蔽因数并将它用于公式 (B.9) 和 (B.10) 后,可采用与上述相同的程序,计算屏蔽架空线路的 U_{SPL} 值。然而,由此得出的 U_{SPL} 所具有的绝对发生概率(每年浪涌数量),大大低于相应的未屏蔽线路的 U_{SPL} 。因此,用屏蔽系数乘以未屏蔽线路的 U_{SPL} 方式求得屏蔽线路的 U_{SPL} ,则更具代表性。

注2:例如,考虑 SPL II 意味着在某位时间段,在未屏蔽线路上测到的所有高于 0.75kV 电压当中,有 2%等于或高于 3.4kV,而这 2%与 N_T 浪涌相当。因此对于屏蔽线路 ($\eta_e=0.1$) 和同一个 SPL II 而言, N_T 浪涌在同一时间段将等于或高于 3.4kV。然而应当看到,在这一时间段从这一屏蔽线路上观察到的所有高于 0.75kV 的电压当中,等于或高于 3.4kV 的超过 2%。

由此得出的具体屏蔽系数的值被插入表 5,这些具体的屏蔽系数涉及节点 L、E、P 和 C 的屏蔽($\eta_e=0.05$),也涉及节点 D、S 和 I 的接地 ($\eta_e=0.1$)。

注3:在设屏蔽电阻 (N_T) 等于 5 Ω 时估算出与屏蔽相关的屏蔽系数,此时 $\eta_s=R_s/Z=5/100=0.05$ 。在设屏蔽 R_e 的接地电阻等于 40 Ω 时估算出与接地相关的屏蔽系数,此时 $\eta_s=(R_s+R_e)/(Z+R_e)=45/440=0.1$ 。

表 B.2 显示出不同 SPL 值的 U_{SPL} 值和架空屏蔽线路的 U_R 值 ($\eta_s=0.1$), 以及上述依据。

表B.2 作为不同参考电压值 U_R 的SPL函数的架空屏蔽线路两端的危险浪涌电压 (U_{SPL}) 的开路值

U_R (kV)	危险浪涌电压 U_{SPL} (kV)		
	SPL		
	0.01	0.02	0.05
1.5	11	6.4	2.8
1.0	8.1	4.4	1.9
0.75	6.4	3.4	1.4
0.5	4.4	2.3	1.0
0.25	2.3	1.2	0.5

短路电流峰值 (I_{sc}) 可用公式 (B.13) 估算,其中 $Z=50\ \Omega$ 或 $100\ \Omega$, 分别是导体屏蔽电路或导体接地电路的浪涌阻抗,两者都是凭经验从测量结果中提取的。

附录 C

(资料性附录)

雷击建筑物本身或附近而在建筑物内部产生的浪涌：基于经验的方案和结果

C.1 引言

本附录的目的在于支持这样一种假设：在非闭合回路感应电压的雷击的波形，具有极短的波前时间和持续时间，而且在非闭合回路感应电压的雷击的波形与雷击电流本身的波形相同。这是借助来自巴西 Cachoeira Paulista 触发雷电测试场的试验数据得出的结果。

C.2 理论模式

正在对以下假设进行研究：

- 回路离雷电通道较近，因此可以认为电流沿雷电通道均匀运行（这一假设对雷电电流沿雷电通道运行的传播效应忽略不计）。
- 地面被认为是充分导体，因此镜像原理可适用于地表以下的雷电通道。
- 对可能承载部分雷电电流的金属导体（如供电线路）的作用忽略不计。这意味着假设地表呈对称的电流分布，从而能够使用镜像原理。
- 与回路在与雷击电流相关的频率上的感抗相比，回路的电阻被认为是很低的（这适用于多数实际情况）。
- 所有回路周围的屏蔽效应都忽略不计。
- 雷击通道的所有纵向弯曲都忽略不计。
- 回路和雷击通道都处于同一平面（这是对电流规模的保守假设，但并不影响波形）。

因此，施感雷击电流 (I_a) 沿纵向直线均匀流动（见图C.1）。该电流产生的磁感应场表示为：

$$B = \frac{\mu_0 \times I_a}{2 \times \pi \times x} \quad (C.1)$$

式中：

x 是与雷电通道之间的距离。

将整个回路的磁场合为一体，就能很容易地发现磁通量：

$$\phi_B = \frac{I_a \times h \times \mu_0}{2 \times \pi} \int_f^{f+e} \frac{dx}{x} \quad (C.2)$$

所以：

$$\phi_B = \frac{I_a \times h \times \mu_0 \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right)}{2 \times \pi} \quad (C.3)$$

回路感应电压由磁通量的时间导数给出

$$V = \frac{\left(\frac{dI_a}{dt} \right) \times h \times \mu_0 \times \ln \left(\frac{f+e}{f} \right)}{2 \times \pi} \quad (\text{C.4})$$

公式 (C.4) 可写成:

$$V = L_M \times \left(\frac{dI_a}{dt} \right) \quad (\text{C.5})$$

式中:

L_M 是雷电通道和回路等之间的互感:

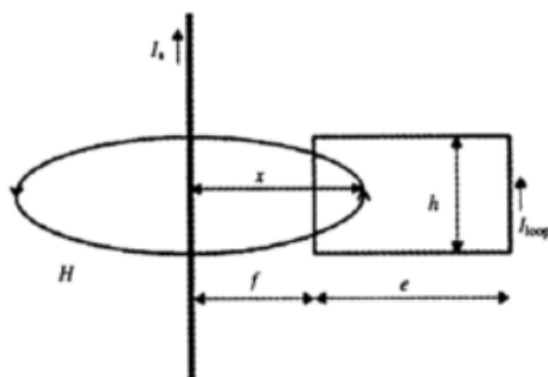
$$L_M = \frac{h \times \mu_0 \times \ln \left(\frac{f+e}{f} \right)}{2 \times \pi} = 0.2 \times h \times \ln \left(\frac{f+e}{f} \right) \quad \text{单位: } \mu\text{H} \quad (\text{C.6})$$

感应电流 I_{loop} 为:

$$I_{\text{loop}} = \left(\frac{1}{L_s} \right) \int V dt = \left(\frac{L_M}{L_s} \right) \times I_a \quad (\text{C.7})$$

上式中:

L_s 是回路的自感。

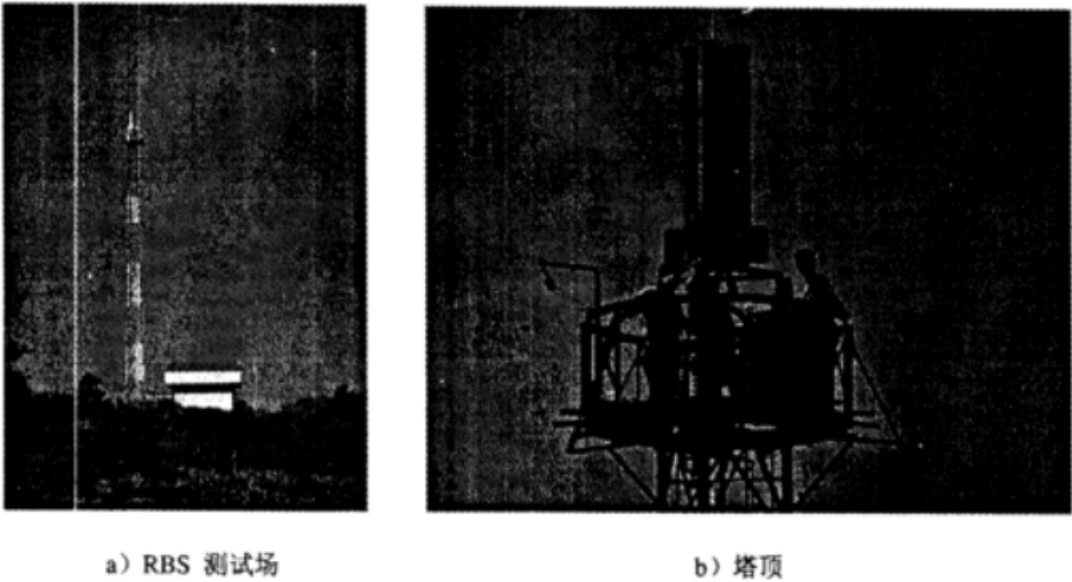


图C.1 进入回路的感应

C.3 试验测试场地和测试方案

C.3.1 试验测试场地

图C.2a展示了测试场的RBS, 图中的塔顶有一个火箭发射台, 用于触发雷击放电。图C.2b是塔顶的近景。发射台装有绝缘体, 并经一通过Pearson电流监视器(1330型)的独立导体与建筑物相连, 置于附近金属箱内的示波器接受来自监视器的信号。示波器由基于光纤连接的RS232接口遥控, 从而对雷电电流进行直接测量。



图C.2 RBS测试场地

C.3.2 进入非闭合回路的感应电压的测试方案

图C.3显示了试验方案，其中雷电是由通信塔的顶端触发和记录的，而感应电压是在离塔身 f 距离的回路内测量的。设置数据为：

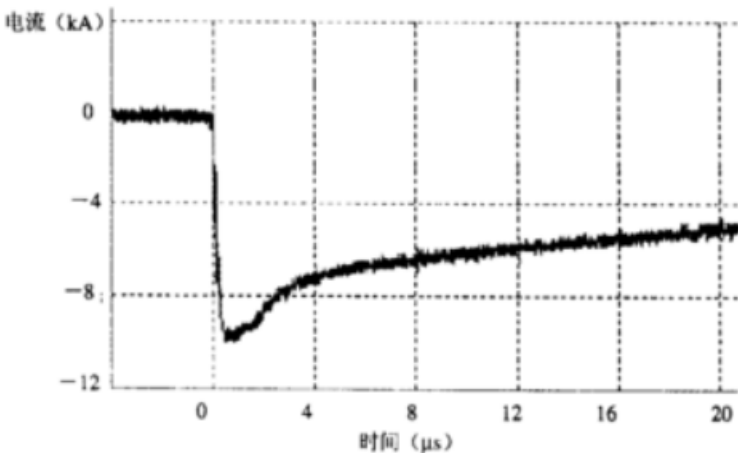
- 回路尺寸: $e = 1.5\text{m}$ 和 $h = 2.0\text{m}$ (回路面积 $= 3\text{ m}^2$);
- 回路和雷电间的距离, $f = 100\text{ m}$ 。



图C.3 进入非闭合回路的感应电压的测试方案

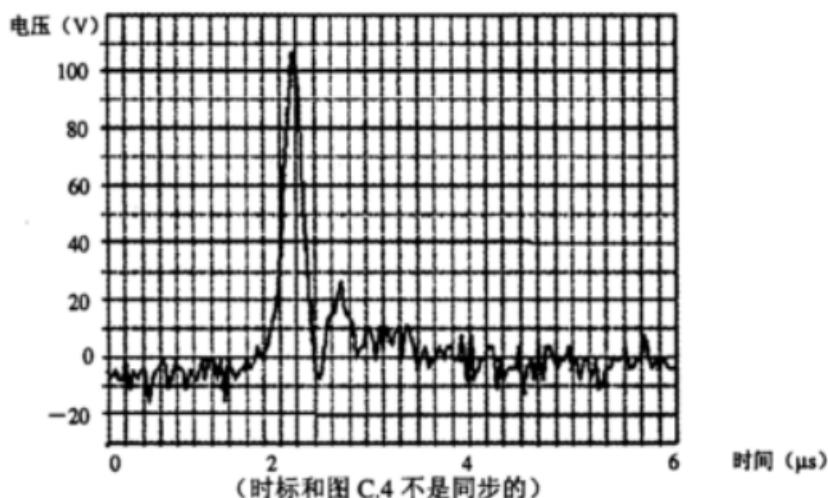
图C.4展示了测出的雷击电流，并将其主要参数归纳如下：

- 电流: 波前时间 (T) $\approx 0.375\text{ }\mu\text{s}$;
- 峰值 (I_g) $= 9.8\text{ kA}$ 。



图C.4 触发雷电电流

图C.5介绍了测出的回路内感应电压，可以从中看出，感应开路电压的波前时间类似于感应电流（例如0.35 μs）的波前时间，而且其波形的持续时间很短，通常以几个μs计算。



图C.5 测出的回路内感应电压

将数值代入公式 (C.4) 中，并认定当前的电流波形为梯形，我们便得到一个持续时间是 0.375 μs 峰值是 157 V 的直角波形。将此值与图 C.5 相比，可以看出它比实测值略高 (110 V)。

可采用一种更为完善的方法。这一模型考虑到了电流沿雷电通道的传播。考虑到用于距雷击有一定距离的磁感应场 (B) 的公式并对其时间导数进行计算后，可以得出：

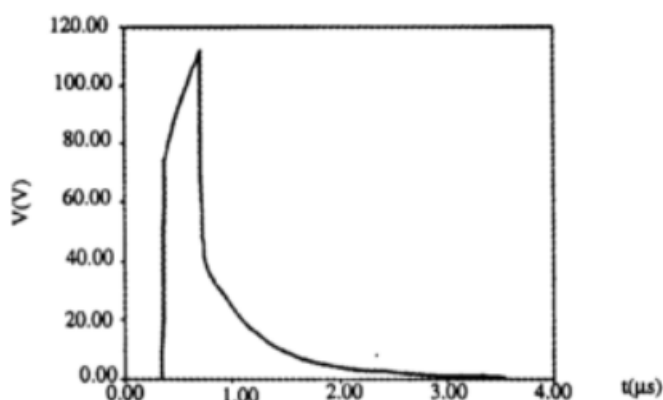
$$\frac{dB}{dt} = 0 \quad \text{其中 } t \leq r_0/v_0 \quad (\text{C.8})$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{60I_0v}{r_0^2Tv_0} \left\{ \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \left[\left(\frac{v_0 t}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} t \right\} \quad \text{其中 } r_0/v_0 \leq t \leq r_0/v_0 + T \quad (\text{C.9})$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{60I_0v}{r_0^2Tv_0} \left\{ \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \left[\left(\frac{v_0 t}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} t - \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \left[\left(\frac{v_0(t-T)}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} (t-T) \right\} \quad (\text{C.10})$$

其中 $t \geq r_0/v_0 + T$

公式 (C.9) 和 (C.10) 中的 v_0 是光在自由空间的速度 (3×10^8 m/s)， v 是雷电电流的传播速度，并假定它等于 1.3×10^8 m/s。将这些数字值插入这些公式，就可得出图 C.6 所示波形。这一波形具有 112V 的峰值，与测出的电压完全吻合。

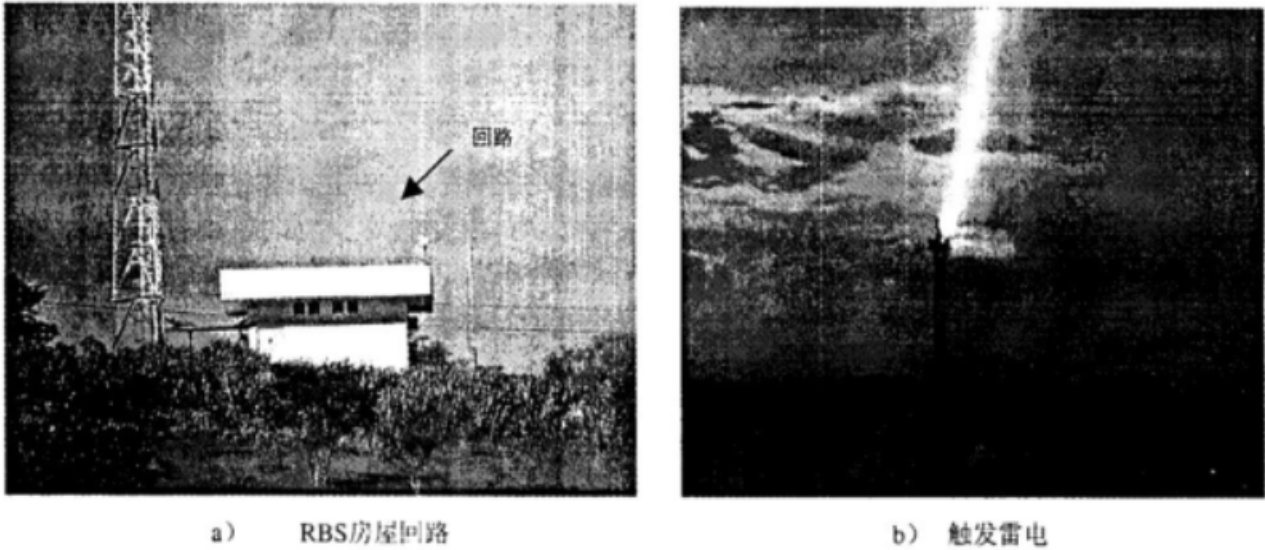


图C.6 由Rusck's模型计算出的电压波形

根据公式 (C.9) 和 (C.10) 可以得出结论, 对于距离雷击点 ($f < Tv_0$) 较近的回路, 可以通过按公式 (C.4) 假设雷电电流沿雷电通道均匀运行, 合理地计算出感应电压峰值的近似值。然而随着回路逐渐远离雷击点, 感应电压与公式 (C.4) 计算出的数值相比, 会呈越来越低的走势, 因为电流传播速度成为一个相关参数。这时应该使用公式 (C.8) 至 (C.10)。

C.3.3 对感应到在闭合回路中的电流的测试方案

图C.7显示了RBS的近景, 从中可以看到屋顶上的回路。该回路是由短路铜管构成的, 其电流由Pearson电流监视器 (110型) 测出, 并馈送至RBS房屋内的示波器。图C.7b展示了从控制棚看到的击中塔顶的触发雷电。



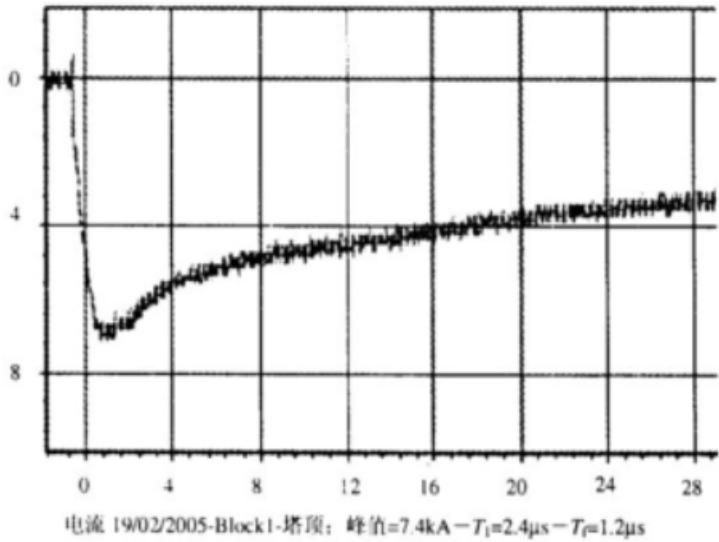
图C.7 对感应到闭合回路中的电流的测试方案

同时记录了在塔顶 (图C.8) 和在回路 (图C.9) 的波形, 可描述为峰值, 半峰值时间 (T_h) 和波前时间 (T_f) 并定义为 $1.25 (T_{90\%} - T_{10\%})$ 。

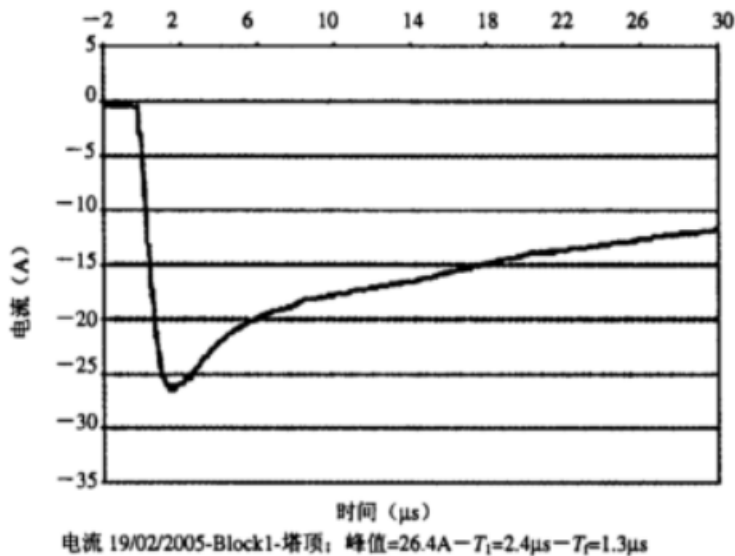
对塔顶和回路记录的电波进行的对比显示, 两者在波形上完全吻合。

测试现场的数据包括:

- 塔的中心线与回路之间的距离: $f = 10.7 \text{ m}$;
- 回路高度: $h = 0.80 \text{ m}$;



图C.8 雷电电流



图C.9 在闭合回路中的感应电流

- 回路宽度: $e = 1.00\text{ m}$;
- 回路导体半径= 0.0075 m 。

公式 (C.6) 将通信塔和回路之间的互感表示为:

$$L_M = 0.0143\text{ }\mu\text{H}$$

公式 (A.2) 将回路自感表示为:

$$L_S = 2.89\text{ }\mu\text{H}$$

公式 (C.7) 针对雷电电流 $I_s = 7.04\text{ kA}$ 的情况, 将预期回路电流表示为:

$$I_{\text{loop}} = 34.8\text{ A}$$

测出的回路电流26.4 A略低于24%的预期值, 因为测试场的实际条件不能完全满足C.2中列出的理论假设条件。在这些假设当中, 电功率线的存在是造成这一差异最重要因素, 部分雷电电流被从台站导出, 导向不致与回路耦合的方向。为了复制雷电电流的测量结果, 这些因素通过向测量软件通报系统增益而得到了补偿。

总之, 正如试验所示, 向闭合回路感应的雷电电流波形与雷电电流本身的波形相同, 而且它们的峰值之间的关系正如公式 (C.7) 所示, 可以根据互感和自感间的比率估算出来。

中 华 人 民 共 和 国
通 信 行 业 标 准
雷电在通信网络和信号网络上的预期浪涌
YD/T 2059-2009

*

人民邮电出版社出版发行
北京市崇文区夕照寺街 14 号 A 座
邮政编码: 100061
北京新瑞铭印刷有限公司印刷
版权所有 不得翻印

*

开本: 880 × 1230 1/16 2010 年 1 月第 1 版
印张: 1.75 2010 年 1 月北京第 1 次印刷
字数: 52 千字

ISBN 978 - 7 - 115 - 1982/10 - 44

定价: 15 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010)67114922