

国 际 电 信 联 盟

ITU-T

国际电信联盟
电信标准化部门

K.67
(02/2006)

K系列：干扰的防护

雷电对电信和信令网络造成的预期浪涌

ITU-T K.67建议书



国际电信联盟

雷电对电信和信令网络造成的预期浪涌

摘要

本建议书介绍了雷电对接入网络电信线路和使用金属导体的消费者所在地信令线路造成的预期浪涌（过压和过流）特性（波形和峰值）。这些预期浪涌值是作为一组雷电电流参数的函数提出的，这些参数可以将雷电确定为各类电磁耦合对电信或信令线路造成损伤的根源。

本建议书旨在评估线路安装地点抗预期浪涌电流保护措施（如浪涌防护器）的有效性。

来源

ITU-T第5研究组（2005-2008年）按照ITU-T A.8建议书规定的程序，于2006年2月13日批准了ITU-T K.67建议书。

关键词

雷电、过流、过压、浪涌、转变点。

前言

国际电信联盟（ITU）是从事电信领域工作的联合国专门机构。ITU-T（国际电信联盟电信标准化部门）是国际电信联盟的常设机构，负责研究技术、操作和资费问题，并且为在世界范围内实现电信标准化，发表有关上述研究项目的建议书。

每四年一届的世界电信标准化全会（WTSA）确定ITU-T各研究组的研究课题，再由各研究组制定有关这些课题的建议书。

WTSA第1号决议规定了批准建议书须遵循的程序。

属ITU-T研究范围的某些信息技术领域的必要标准，是与国际标准化组织（ISO）和国际电工技术委员会（IEC）合作制定的。

注

本建议书为简明扼要起见而使用的“主管部门”一词，既指电信主管部门，又指经认可的运营机构。

遵守本建议书的规定是以自愿为基础的，但建议书可能包含某些强制性条款（以确保例如互操作性或适用性等），只有满足所有强制性条款的规定，才能达到遵守建议书的目的。“应该”或“必须”等其它一些强制性用语及其否定形式被用于表达特定要求。使用此类用语不表示要求任何一方遵守本建议书。

知识产权

国际电联提请注意：本建议书的应用或实施可能涉及使用已申报的知识产权。国际电联对无论是其成员还是建议书制定程序之外的其它机构提出的有关已申报的知识产权的证据、有效性或适用性不表示意见。

至本建议书批准之日止，国际电联尚未收到实施本建议书可能需要的受专利保护的知识产权的通知。但需要提醒实施者注意的是，这可能并非最新信息，因此特大力提倡他们通过下列网址查询电信标准化局（TSB）的专利数据库：<http://www.itu.int/ITU-T/ipr/>。

© 国际电信2006年

版权所有。未经国际电联事先书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

目录

页码

1	范围	1
2	参考文献	1
3	定义	2
4	缩写词	3
5	参考配置	3
6	防护措施	4
6.1	固有保护	4
6.2	初级保护	5
6.3	等电位连接、接地和屏蔽	5
7	雷电引发的预期浪涌	6
7.1	对建筑物的直接雷击（损伤源S1）： 雷电电流通过电信或信令线路进入 建筑物（交换局、客户大楼或远地点）	6
7.2	对建筑物附近或建筑物本身的雷击（损伤源S1或S2）： 建筑物（交换局、客户大楼或远地点）内部电信 或信令线路中的感应浪涌	7
7.3	对电信或信令线路的直接雷击	9
7.4	邻近电信线路的雷闪	10
附件A	雷击建筑物本身或附近引发的建筑物内部感应浪涌	13
A.1	概述	13
A.2	邻近建筑物的雷击	13
A.3	对建筑物的雷击	17
附件B	邻近线路的雷击对电信线路感生的浪涌： 充分导电土壤	20
附录I	雷击建筑物本身或附近而在建筑物内感生的浪涌： 基于经验的方案和结果	23
I.1	引言	23
I.2	理论模型	23
I.3	试验测试场和测试方案	25
参考书目		30

引言

威胁电信和信令网络的过压和过流的根源在于雷电（直接或间接雷击）、电力线中故障电流感应（包括牵引系统）、与电力线接触以及地电位的升高。

称为“防护措施”的保护方式，都与“线路”（如使用屏蔽而不是非屏蔽电缆）或系统的具体部分相关。后者可大体分为三类：

- 在设施和外部线路上采用等电位连接、接地和屏蔽等安装措施，应减少雷电能量对线路的耦合；
- 利用防护设备分流多余能量（如使用放电管）或切断线路（如使用熔丝），以防过多能量接触易损部件；这些防护设备被定义为“初级保护”；
- 使用具有适当介质强度、载流容量和电阻的设备，使它能对面临的情况具有承受力；这一特性被定义为“固有保护”。

防护设备（初级保护）可用于防过压（浪涌保护器（SPD），如具有碳或金属电极的气隙保护器；陶瓷气体放电管（GDT）、半导体防护设备）和防过流（如熔丝、热线圈、自复过流保护器、熔丝等）。

目前尚需确定防护组件和装置的规格，以及浪涌对其具体安装点造成的威胁。浪涌的威胁必须低于受影响的保护组件和设备的承受力。这一承受力水平是由相关测试确定的。

本建议书研究了这些防护组件和设备安装地点出现的雷电对电信和信令网络造成的预期浪涌。

用于预期电涌评估的某些公式和假设为粗略近似值，需要提炼改进。

雷电对电信和信令网造成的预期浪涌

1 范围

本建议书的职责范围是确定雷电在交换局、客户大楼和远地点等建筑内外的电信接入网和信令线路各过渡点造成的预期浪涌（过压和过流）。

本建议书的目的在于研究雷电电流作为一种损伤源，其过压和过流对使用金属导体的电信和信令网络产生的影响，而这种影响又取决于作为研究对象的线路（见3.6）遭受雷击的部位。

预期浪涌是按作为每类（ S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 ）损伤源（见3.6）的浪涌保护电平函数（SPL，见3.7）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。

本建议书对旨在线路安装地点抗预期浪涌电流的保护措施（如浪涌防护器）的有效性进行评估。

2 参考文献

下列ITU-T建议书和其他参考文献的条款，在本建议书中的引用而构成本建议书的条款。在出版时，所指出的版本是有效的。所有的建议书和其它参考文献均会得到修订，本建议书的使用者应查证是否有可能使用下列建议书或其它参考文献的最新版本。当前有效的ITU-T建议书清单定期出版。本建议书引用的文件自成一体时不具备建议书的地位。

- [1] ITU-T Lightning Handbooks, Chapter 10 (1995), *Overvoltages and overcurrents measured on telecommunication subscriber lines.*
- [2] ITU-T Recommendation K.46 (2003), *Protection of telecommunication lines using metallic symmetric conductors against lightning-induced surges.*
- [3] ITU-T Recommendation K.47 (2000), *Protection of telecommunication lines using metallic conductors against direct lightning discharges.*
- [4] ITU-T Recommendation K.56 (2003), *Protection of radio base stations against lightning discharges.*
- [5] IEC 62305-1:2006, *Protection against lightning – Part 1: General principles.*
- [6] IEC 62305-2:2006, *Protection against lightning – Part 2: Risk management.*
- [7] IEC 62305-4:2006, *Protection against lightning – Part 4: Electric and electronic systems within structures.*

3 定义

本建议书定义了以下术语：

3.1 雷电造成的危险浪涌电压：浪涌电压的峰值 U_p 大于或等于设备或电信线路导线绝缘体所能承受的浪涌电压。

3.2 等效衰变半峰值时间 (T_2) [1]：脉冲电压或电流的半峰值时间 (T_2)，是该电压和电流自其实际起始点至降至半峰值的最初瞬间所用的时间段。（脉冲电压或电流的实际起始点，是该电压或电流分别在 0.3 或 $0.1 \cdot T_1$ 的时间达到峰值的 30% 或 10% 之前的瞬间。）

3.3 波前时间或上升时间 (T_1) [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% 两个瞬间之间时间段的 1.67 倍。

脉冲电流的波前时间 T_{1i} 被定义为：脉冲达到峰值 10% 和 90% 两个瞬间之间时间段的 1.25 倍。

3.4 雷电保护电平 (LPL)：系一组参数，用于确定对表现为雷电电流[4]的损伤源的保护电平。

注 – 雷电保护电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。IEC 62305标准采用了4种雷电保护电平（I至IV），并为每个LPL设定了一组最大雷电电流参数（表1）。

3.5 峰值 (x_p) [1]：浪涌电压/电流峰值 (x_p) 被定义为浪涌期间观测到的最大值。

3.6 损伤源：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 ：对电信或信令线路进入的建筑物（交换局、客户大楼或远地点）的雷闪；
- 损伤源 S_2 ：对邻近电信或信令线路进入的建筑物（交换局、客户大楼或远地点）的雷闪；
- 损伤源 S_3 ：对进入建筑物（交换局、客户大楼或远地点）的电信线路的雷闪；
- 损伤源 S_4 ：对邻近进入建筑物（交换局、客户大楼和远地点）的电信线路的雷闪。

3.7 浪涌保护电平 (SPL)：作为损伤源的雷电电流在电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。

注 – 本建议书介绍了3种浪涌保护电平（I至III），并估算出每个SPL的预期危险浪涌电压和电流的峰值和波形。

3.8 波前陡度，或上升速度 (S) [1]：波前陡度或上升速度 (S) 是电压或电流的平均导数，可通过峰值 x_p 和波前时间 T_1 之间比率加以确定：

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

3.9 浪涌：自外部电气来源耦合到电信线路上的瞬时过压或过流。

注1 – 电气来源一般为雷电和AC/DC供电系统。

注2 – 电气源耦合可能是以下的一种或多种情况：电场（电容性）、磁场（感应性）、导电（电阻性）、电磁场。

3.10 雷电引起的浪涌：任何一种电磁（导电、感应和电容性）耦合造成的雷电引发的浪涌。

注 – 它具有以下五个参数特征：峰值、波前时间（ T_1 ）、半峰值时间 T_2 （或时间参数 T_1/T_2 ）、陡度和比能。

3.11 浪涌防护设备（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是保护电路与支架的结合。

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。

4 缩写词

本建议书使用了下列缩写词：

BN 等电位连接网络

CBN 共用等电位连接网络

E 交换局

LPL 雷电保护电平

MDF 主配线架

MET 主接地端子

NT 网络终端

S 用户

SPD 浪涌保护器

SPL 浪涌保护电平

5 参考配置

图1显示了配有金属对称导线的电信线路的参考配置，从中可以看到参考节点以及它们之间的电缆段。

对图1所示转变点的说明如下[2]：

- 转变点L： 交换局大楼内设备接口与外部电缆之间的转变点；
- 转变点E： 交换局大楼入口，如主配线架（MDF）；
- 转变点P： 纸绝缘和塑料绝缘埋地电缆之间的转变点；
- 转变点C： 埋地电缆和架空电缆之间的转变点；
- 转变点D： 屏蔽和无屏蔽架空电缆之间的转变点；
- 转变点S： 客户大楼的入口；

- 转变点A：客户大楼内设备接口与外部电缆之间的转变点；
- 转变点M：交换局大楼内设备接口与内部电缆之间的转变点；
- 转变点I：客户大楼内设备接口与内部电缆之间的转变点。

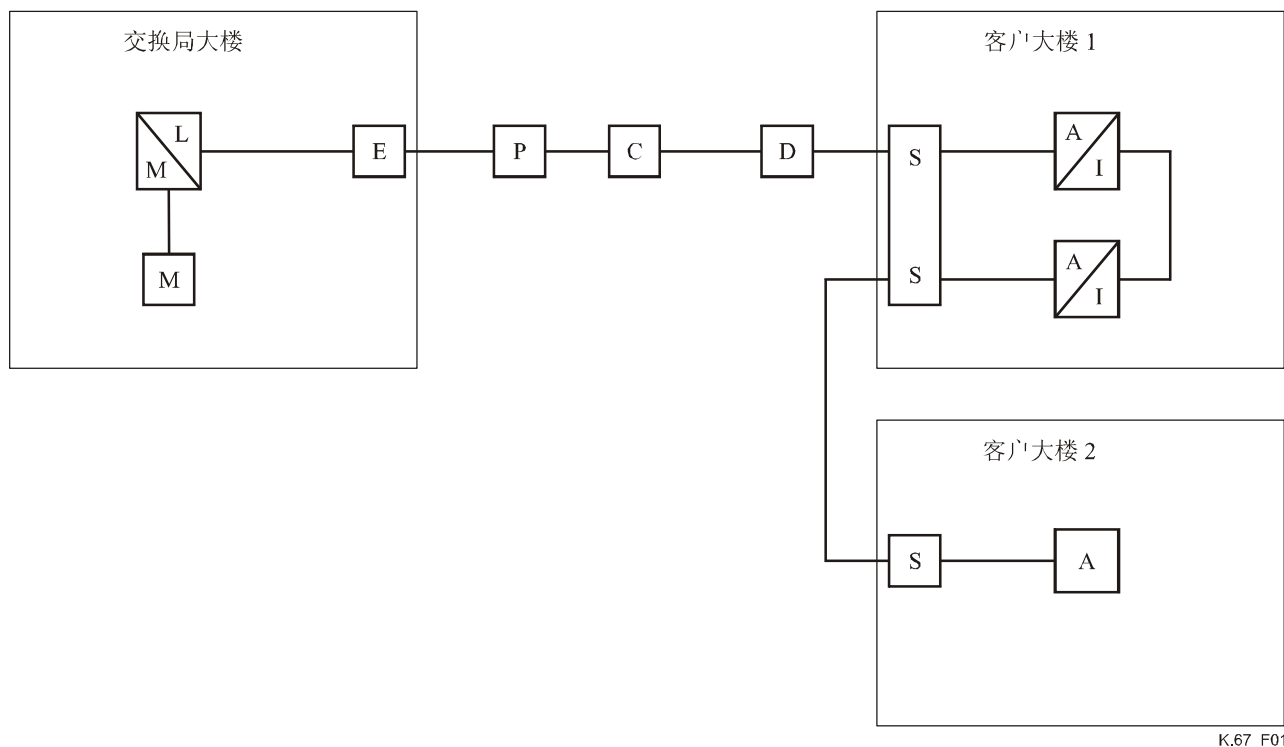


图1/K.67 – 参考配置

6 防护措施

6.1 固有保护

有必要使用具有适当介质强度、载流容量和电阻的设备、从而对面临情况具有承受力（设备的固有抗力特性），以保护设备并限制其受损的风险。

ITU-T K.20、K.45和K.21建议书为分别安装在交换局大楼、接入网和客户大楼等不同地点的电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7.4）。由于这类浪涌最为常见，根据风险评估的结论[2、3、6]，附加保护措施（初级保护）仅用于“暴露”的设备。

6.2 初级保护

使用初级保护可防止过多能量进入电信和信令设备（如设备和导线绝缘体）的易损部分。为此，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给出了作为雷电保护电平（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电平（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/K.67 – 根据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
首次短雷击	峰值电流	I _p	kA	200	150	100	
	短雷击	Qshort	C	100	75	50	
	比能	W/R	kJ/Ω	10 000	5 625	2 500	
	时间参数	T ₁ /T ₂	μs/μs	10/350			
随后长雷击	峰值电流	I _p	kA	50	37.5	25	
	平均陡度	di/dt	kA/μs	200	150	100	
	时间参数	T ₁ /T ₂	μs/μs	0.25/100			
长雷击	长雷击	Qlong	C	200	150	100	
	时间参数	Tlong	s	0.5			
雷闪	雷闪电荷	Qflash	C	300	225	150	

6.3 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d.c.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。

7 雷电引发的预期浪涌

7.1 对建筑物的直接雷击（损伤源S1）：雷电电流通过电信或信令线路进入建筑物（交换局、客户大楼或远地点）

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业务之中。因此，部分雷电电流直接或通过浪涌保护器（SPD）进入与之相连的电信或信令线路的电缆护套或电缆导线，因为电缆也是进入建筑物的业务之一。

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，进入电信或信令线路的雷电电流，是以10/350 μs波形和峰值 I_f 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 个进入建筑物的业务分担。

如果进入建筑物的电信或信令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_f ）的峰值雷电电流，并可以通过以下算式表示：

$$I_f = \frac{0.5 \times I_p}{n \times m} \quad \text{用于未屏蔽线路} \quad (2)$$

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_f ）可表示为：

$$I_f = \frac{0.5 \times I_p \times R_s}{n \times (m \times R_s + R_c)} \quad \text{用于屏蔽线路} \quad (3)$$

式中：

R_s = 屏蔽或金属管单位长度的欧姆电阻；

R_c = 导线单位长度的欧姆电阻。

导线与主接地端子（MET）之间的开路电压，大体与接地电阻产品成正比，若电缆未加屏蔽，也同流向接地网络的那部分雷电电流成正比。如果电缆装有屏蔽，导线与连接电缆屏蔽的MET之间的开路电压，大致与屏蔽电阻产品和流过屏蔽的那部分雷电电流成正比，且受到线芯至屏蔽（如5 kV）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电信线路都适用。

7.2 对建筑物附近或建筑物本身的雷击（损伤源S1或S2）：建筑物（交换局、客户大楼或远地点）内部电信或信令线路中的感应浪涌

对建筑物附近或建筑物本身的雷击，会因为雷电电流（ di/dt ）的时间导数，将共模浪涌电压感应到建筑物（交换局、客户大楼或远地点）内的电信或信令线路之中。以下等式给出了感应开路电压的峰值 V_{io} 。

$$V_{io} = L_M \times \frac{di}{dt} = L_M \times \frac{I_p}{T_1} \quad (4)$$

式中：

L_M = 感应回路与雷电电流之间的互导；

I_p = 雷电电流的峰值；

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 μs 至10 μs ）会很短暂，其波前时间也与后续雷击（如0.25 μs ）的波前时间相似，正如附录I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：

$$I_{sc} = \frac{V_{oi} \times T_1}{L_S} \quad (5)$$

或

$$I_{sc} = \frac{L_M}{L_S} \times I_p \quad (6)$$

式中：

L_S = 感应回路的自感。

就短路电流（ I_{sc} ）而言，雷电电流参数是图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I）的波形，因此在最坏情况下，它被描述为10/350 μs 波形。

图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} ）。如附件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 （ $h = 5 m$ ； $e = 10 m$ ）的未屏蔽回路算出的估计值。

表2/K.67 – 直击建筑物（S₁）和电信线路（S₃）本身和建筑物（S₂）附近的雷电对电信或信令线路不同节点的各条导线造成的预期开路电压和短路电流

	直接雷击建筑物 损伤源S ₁			雷击建筑物附近 损伤源S ₂		直接雷击电信线路 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
SPL	(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]	(首次雷 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	等式(2)或(3)	250	6	5	0.1	0.50 ^(注2)	等式(12) 或(14)
II	等式(2)或(3)	190	4.5	3.5	0.07	0.50 ^(注2)	等式(12) 或(14)
III	等式(2)或(3)	125	3	2.2	0.05	0.50 ^(注2)	等式(12) 或(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 m；e = 10 m）；回路导线半径：0.5 mm。							
注2 – 等式(12)或(14)可用于特殊情况。设线路对地的击穿电压等于100 kV，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）：

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

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

以下等式给出的系数K_{s3}可以降低表2列出的屏蔽线路的浪涌电压值：

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

式中：

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

V_{cs} = 以下等式给出的导线与屏蔽之间的电压：

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

将等式(4)和(5)分别用于V_{io}和I_{sc}，公式(8)则变为：

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

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）。

7.3 对电信或信令线路的直接雷击

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。

在两种情况下，进入电信或信令线路的雷电电流，都可以用10/350 μ s波形和峰值 I_f 加以描述。如传播效应忽略不计，可假设网络不同地点的预期电流同为10/350 μ s波形（交换局、客户大楼或远地点）。

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 $2 \times 100 \text{ kV} / 400 \Omega = 500 \text{ A}$ ），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断接地，便可适用情况b的分析。

在情况b中，必须考虑到电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 个业务之间双向传播。

如果电信或信令线路未屏蔽或未通过金属管敷设，线路的每个 m 导体将承载等量（ I_f ）雷电电流峰值，可估算为：

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

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

等式(12)给出的值等于或低于下述值：

$$I_f \leq 8 \times A \quad [\text{kA}] \quad (13)$$

式中 A 为电信和信令导体[mm^2]的横截面积。

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_f ）可表示为：

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

式中：

R_s = 屏蔽或金属管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5 kV）的局限。当屏蔽间断接地时，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。上述等式(12)、(13)和(14)可用于特殊情况。

对于客户大楼而言，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，通过上述等式(12)、(13)和(14)估算出的值可以适用。

注 – 有关雷电直击电信线路引发浪涌电流的现有资料很少。在《雷电手册》第10章[1]中，加拿大的一份调查报告说：“300 A、300 μ s半衰变情况是雷电直击电杆造成的，该电杆距碳监测点大约200米。该监测点还配备有电平计数器和数字波形监测器。电缆和电杆都受到严重损坏。”对于击中线路的雷电电流峰值尚没有现成信息。如假设这一300A浪涌电流是由大约30kA雷电电流造成的（相当于50%的概率），就可以估算出分别与LPL I或III相关的2或1kA值。当雷电电流为200kA（LPL I）或100kA（LPL III）时，可以通过 $n=1$ 和 $m=20$ 的等式(6)获得相同结果。

7.4 邻近电信线路的雷闪

7.4.1 概述

不同国家开展的几项调查，研究了电信网络某些转变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[1]中报告了这些调查的结果。

ITU-T K.20、K.21和K.45建议书为电信设备确定的固有抗力要求，是以《雷电手册》第十章[1]显示的调查结果为依据的。

附加防护措施（初级保护）的使用，仅限于“暴露的”设施，并且是通过风险评估[2、3、6]估算得出的。

图2显示了本建议书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，在电信线路的“x”点上，即六米（ $h = 6$ ）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。

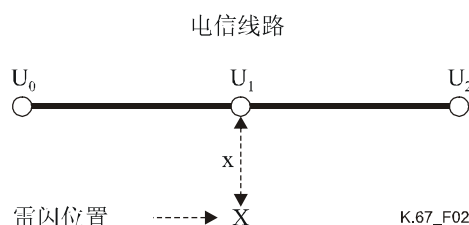


图2/K.67 – 对线路附近的雷电引发的浪涌进行估算的参考配置

SPL的定义为：

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

式中：

U_{SPL} = 与选中的SPL相应的电压；

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} ）；

$N_T(U)$ = 可感生等于或高于电压U的雷击的总数。

附件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。

附件B还提出了与危险浪涌电压相关的短路电流的估算方式。

7.4.2 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转变点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130 m/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8/20 μs 波形是利用参考[5]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。

7.4.3 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_o 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/K.67 – 在交换局和客户端测出的开路浪涌电压
和短路浪涌电流**

概率	交换局端		客户端	
	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

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（ $U_R = 50 \text{ V}$ ）和客户端（ $U_R = 150 \text{ V}$ ）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/K.67 – 在交换局和客户端测出的开路危险
浪涌电压和短路浪涌电流**

SPL	交换局端		客户端	
	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/K.67 – 建筑物附近雷闪（ S_4 ）对电信或信令线路
不同节点的各条导线造成的预期
开路电压和短路电流**

SPL	邻近电信或信令线路的雷击（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 η _s = 0.05）	节点L、E、 P和C （测出的）		节点D、 S和A （算出的 η _e = 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 μs [kV]	感应 电流： 8/20 μs [A]	感应 电压： 8/20 μs [kV]	感应 电流： 8/20 μs [A]	感应 电压： 10/700 μs [kV]	感应 电压： 10/700 μs [kV]	感应 电流： 10/350 μs [A]	感应 电压： 10/700 μs [kV]	感应 电压： 10/700 μs [kV]	感应 电流： 10/350 μs [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。										

附件A

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

雷电在设施内布线形成的回路中感生的浪涌，是许多ITU-T K系列建议书重要议题。雷电浪涌是以其波形和峰值为特征的。

附录I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生的开路电压（ V_{io} ）和短路电流（ I_{io} ）。

A.2 邻近建筑物的雷击

等式(4)可用于计算邻近建筑物的雷击在回路中感生的开路电压（ V_{io} ）峰值，其互感（ L_M ）可用以下近似等式表示（假设入射磁场是平面波）[3、6]：

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

式中（见图A.1）：

h = 回路的宽度或高度[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；

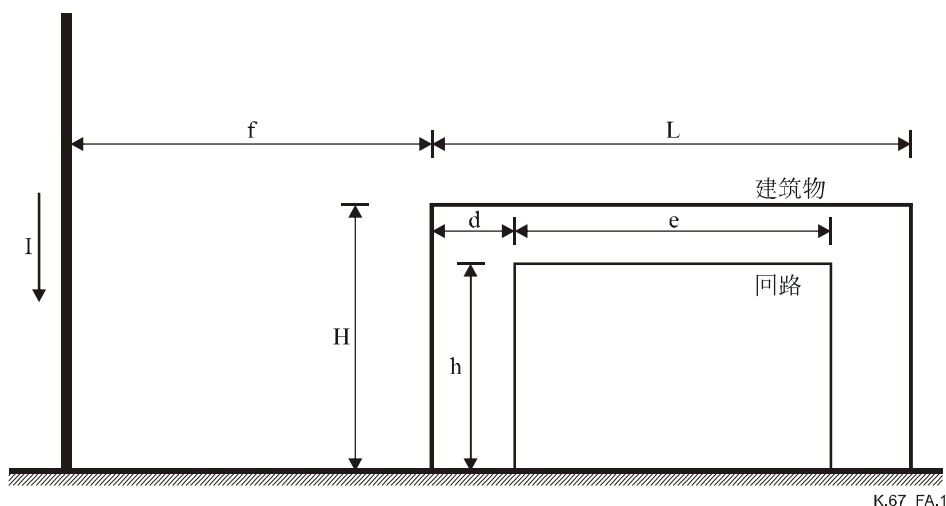
$\eta = 0.12 \times w$ = 建筑物屏蔽（LPZ 1的屏蔽）的屏蔽系数，其中 $w \leq 5$ m是格栅形空间屏蔽的网带宽度[5、6]；

K_s = 屏蔽系数，其中考虑到电缆屏蔽效应；

以及：

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.1/K.67 – 邻近建筑物的雷击

如果对线路的欧姆电阻忽略不计（最坏情况），可用等式(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 ），可用下列等式的计算：

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

式中：

r = 回路线路的半径[m]。

等式(4)可估算出在回路内部感生的预期危险浪涌电压。根据SPL的定义：

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

式中：

U_{SPL} = 与被选SPL相应的电压；

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（见图A.2）：

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

式中：

N_g = 地面落雷密度（雷击/ km^2 ·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）；

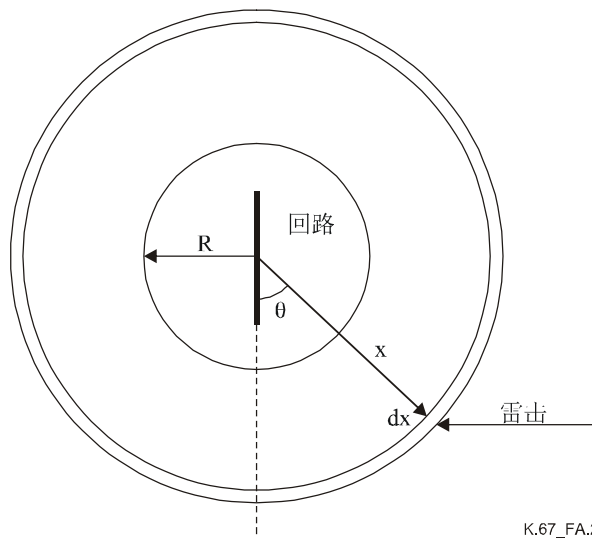
$p(i)$ = 雷击电流的概率函数。

注1 – 如ITU-T K.47建议书所示， $p(i) = 10^{-2} e^{(a-bi)}$ 其中 $i \geq 0$ ，其中“i”为雷击峰值电流[kA]， $a = 4.605$ 和 $b = 0.0117$ ，其中 $i \leq 20$ kA，以及 $a = 5.063$ 和 $b = 0.0346$ ，其中 $i > 20$ kA。

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 = 等式(4)给出的可在回路中感生电压 U 的峰值雷击电流。



图A.2/K.67 – 对邻近建筑物的雷击在回路内感生的浪涌进行估算的参考配置

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

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

式中 $x \cong f+d$ 而且 W 是通过以下算式得出的常数：

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

求等式(A.4)的积分、将结果插入等式(A.3)，再进行代数操作，就得出以下等式：

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

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

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

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

式中：

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

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

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

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

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

在(A.7)至(A.9)的等式中， 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)的等式简化成等式(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。

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

表A.1和A.2显示了根据(A.7)至(A.9)的等式，为不同 SPL 、 U_R 、回路和建筑物规模的不同数值设定的 U_{SPL} 值。

同一原则也适用于在回路中感生短路电流。由此生成的等式与(A.7)至(A.9)的等式相似，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)的等式做如下修改：

$$I_{LIM} = \frac{20 \times W}{R \times L_S} \quad (\text{A.15})$$

$$C_1 = \frac{b_1 \times R \times L_S}{W} \quad (\text{A.16})$$

$$C_2 = \frac{b_2 \times R \times L_S}{W} \quad (\text{A.17})$$

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 200 kA 相当于后续雷击的 50 kA 等等）。所以，由于函数 $p(i)$ 被用于计算(A.7)至(A.9)的等式，计算 U_{SPL} 所用的后续雷击的波前时间则乘以4，如 $T_1 = 1 \text{ } \mu\text{s}$ ，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/K.67 – 邻近建筑物的雷击在建筑物内25 m²回路中
感生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 m; e = 10 m; r = 0.5 mm (L _s = 41.2 μH); η = 1; K _s = 1。						

**表A.2/K.67 – 邻近建筑物的雷击在建筑物内50 m²回路中
感生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	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 m; e = 10 m; r = 0.5 mm (L _s = 52.4 μH); η = 1; K _s = 1。						

可利用等式(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显示了利用等式(A.2)算出的用于不同回路规模的部分结果。

表A.3/K.67 – 用于不同回路规模的以μH计算的电感值 (L_S)

h (m)	e = 20 m		e = 10 m	
	r = 0.5 mm	r = 5 mm	r = 0.5 mm	r = 5 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

在建筑物遭雷击的情况下，可以考虑下列三种情况：

- 1) 受到装有独立避雷针的LPS防护的建筑物（如天线塔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 ≤ 5 m的格栅形空间屏蔽（LPS）防护的建筑物。

在前两种情况下，可利用等式(4)算出在建筑物内回路中感生的开路电压(V_{io})，其中的互感 L_M 可用以下等式[4、6]：

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

式中（见图A.3）：

h = 回路的高度[m]；

e = 回路的长度[m]；

d = 引下线和电流回路之间的距离[m]；

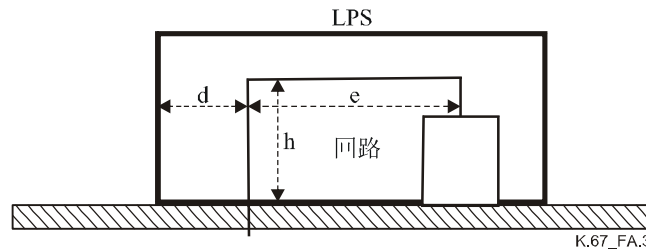
K_c = 考虑到引下线分担电流的因素；

K_s = 考虑到电缆屏蔽的屏蔽效应的屏蔽因素；

而且：

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.3/K.67 – 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，设 $K_c = 1$ ；对于LPS有多条引下线情况[6]：

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

式中：

n = 四周等距离设置的引下线数量。

对于建筑物受格栅形空间屏蔽LPS保护的第三种情况，可用等式(4)计算开路感应电压的峰值，其中的互感 L_M 由下列等式[6]表示为：

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

式中（见图A.4）：

d_w = 回路至墙的距离[m]；

d_r = 回路至屋顶的距离[m]；

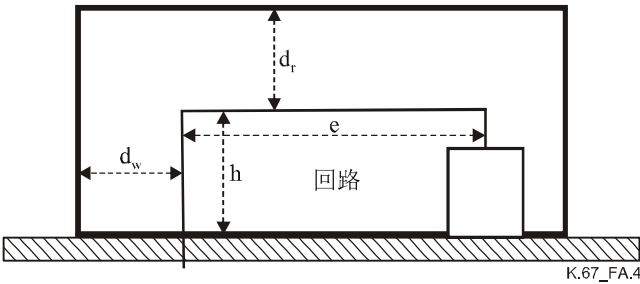
K_h = 等于0.01的配置系数[$1/m^{0.5}$]；

K_s = 考虑到电缆屏蔽的屏蔽效应的屏蔽因数；

而且：

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/K.67 – 对建筑物的雷击：
格栅形空间屏蔽LPS

如线路的欧姆电阻忽略不计（最坏情况），可用等式(5)或(6)估算出短路电流（ I_{sc} ），而其中以亨利计算的回路自感（ L_S ）可通过等式（A.2）算出。

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/K.67 – 对建筑物的直接雷击在建筑物内 50 m^2
回路中感生浪涌的峰值

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
计算条件： $L_S = 42 \text{ μH}$ ； $L_M = 0.792 \text{ μH}$ ；回路面积 50 m^2 （ $h = 5 \text{ m}$ ； $e = 10 \text{ m}$ ）； $K_c = 1$ ； $K_s = 1$ ； $d = 4 \text{ m}$ ； $r = 0.5 \text{ m}$ 。				

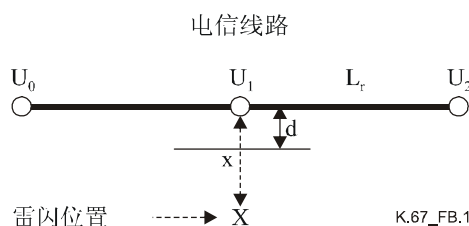
附件B

邻近线路的雷击对电信线路感生的浪涌： 充分导电土壤

在初等段位“ $L_r \times dx$ ”对电信线路感生等于或高于U的电压的雷击数量可表示为：

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

其中 N_g 是地面落雷密度， L_r 为线路长度， $p(i)$ 是ITU-T K.25和K.47建议书以及IEC 61663-1给出的雷击电流概率函数，而 I 则是可在线路一特定点感生电压U的峰值雷击电流。



图B.1/K.67 – 对邻近线路的雷电感生的浪涌
作出估算的参考配置

可感生等于或高于U的电压的雷击总数可表示为：

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

其中 d 是不导致直接雷击的最小距离。假设近似关系 $d = 3h$ （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，以下述等式做出估算：

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

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

式中：

I_p = 雷电电流的峰值（以kA计算）；

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

$$v = 0.43 \text{ and } \left(1 + \frac{v}{\sqrt{2-v^2}} \right) = 1.3.$$

将等式(B.4)的 I_p 插入等式(B.2)，求其积分，将结果插入等式(15)，再通过代数操作得出下列等式：

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

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

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

注1 – 出现三个等式(B.5)、(B.6)和(B.7)而不是仅一个等式的原因在于，函数 $p(i)$ 在 $i = 20$ kA处出现了断点。

式中：

$\eta =$ 是线路的屏蔽系数（线路无屏蔽时， $\eta = 1$ ）

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

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

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

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

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

在(B.5)至(B.7)的等式中， 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($\eta = 1$)的等式(B.5)为依据，为 SPL 和 U_R 等不同值确定的 U_{SPL} 值。

表B.1/K.67 – 作为提供给不同参考电压 U_R 值的 SPL 函数、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 (kV)	危险浪涌电压, U_{SPL} [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

表B.1将参考电压值的两倍 ($2 \times U_R$) 定为“危险”电压的较低开路限值，以便考虑到线路终端的反射。例如， $U_R = 0.75 \text{ kV}$ 和 $SPL = 0.01$ 的考虑，意味着1%的超过1.5kV的感应开路电压等于或高于64kV。

短路电流 (I_{sc}) 的峰值可估算如下：

$$I_{sc} = \frac{U_{SPL}}{Z} \quad (B.13)$$

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等式(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意味着在某段时间，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 5Ω 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 40Ω 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/K.67 – 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**

$U_R \text{ (kV)}$	危险浪涌电压, $U_{SPL} \text{ [kV]}$		
	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

可用等式(B.13)估算出短路电流 (I_{sc}) 的峰值，其中的 Z 等于 50Ω 或 100Ω 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 I

雷击建筑物本身或附近而在建筑物内感生的浪涌： 基于经验的方案和结果

I.1 引言

本附录的目的在于支持这样一种假设：在非闭合回路感生电压的雷击的波形，具有极短的波前时间和持续时间，而且在非闭合回路感生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。

I.2 理论模型

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I.1）。该电流产生的磁感应场表示为：

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

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。

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

因而：

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

感应到回路中的驱动电压是以磁通量的时间导数给出的：

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

等式(I.4)可写成：

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

式中：

L_M 是雷电通道和回路等之间的互感：

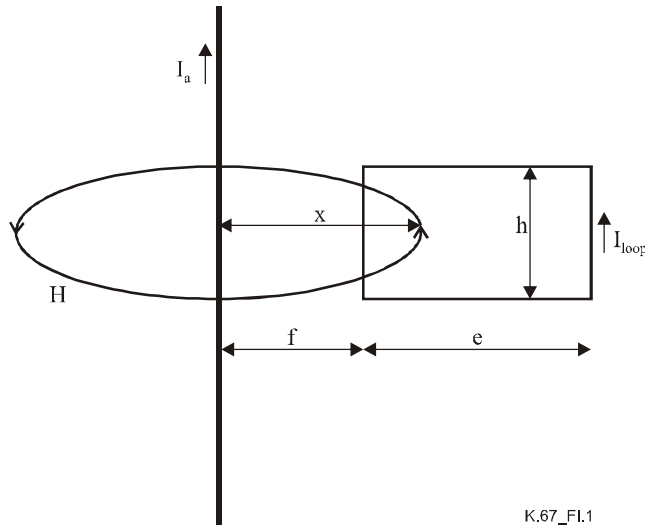
$$L_M = \frac{h \times \mu_0 \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right)}{2 \times \pi} = 0.2 \times h \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right) \text{ in } \mu\text{H} \quad (I.6)$$

感生电流 I_{loop} 可表示为：

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

式中：

L_S 是回路的自感。

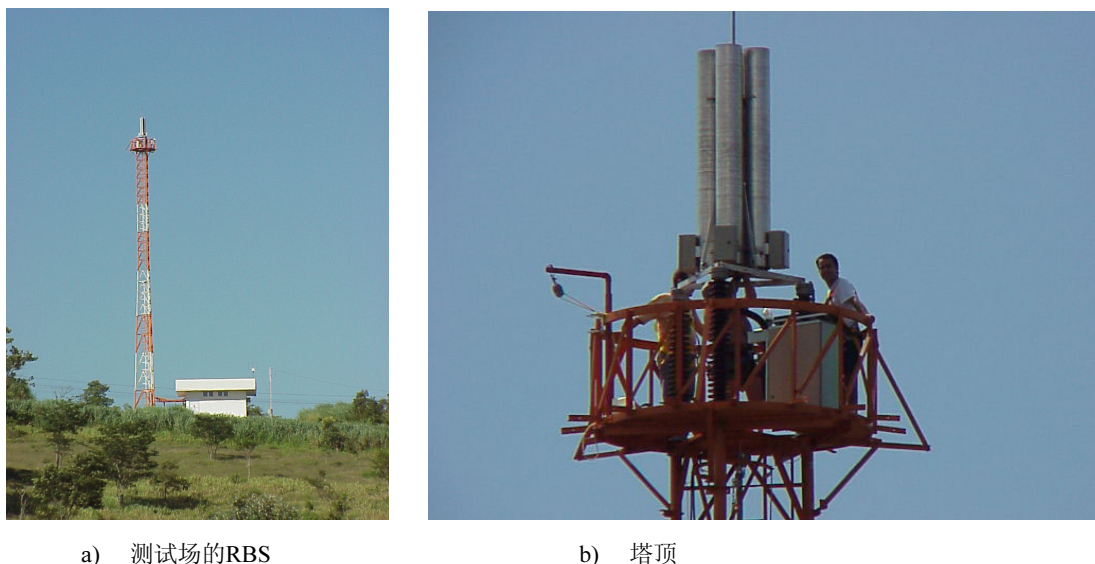


图I.1/K.67 – 进入回路的感应

I.3 试验测试场和测试方案

I.3.1 试验测试场

图1.2a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1.2b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。

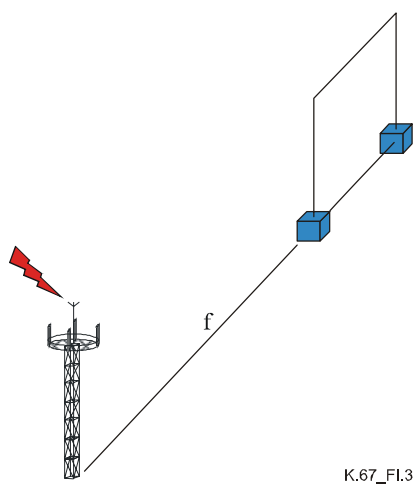


图I.2/K.67 – 测试场的RBS

I.3.2 进入回路的感应电压的测试方案

图1.3显示了试验方案，其中雷电是由电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：

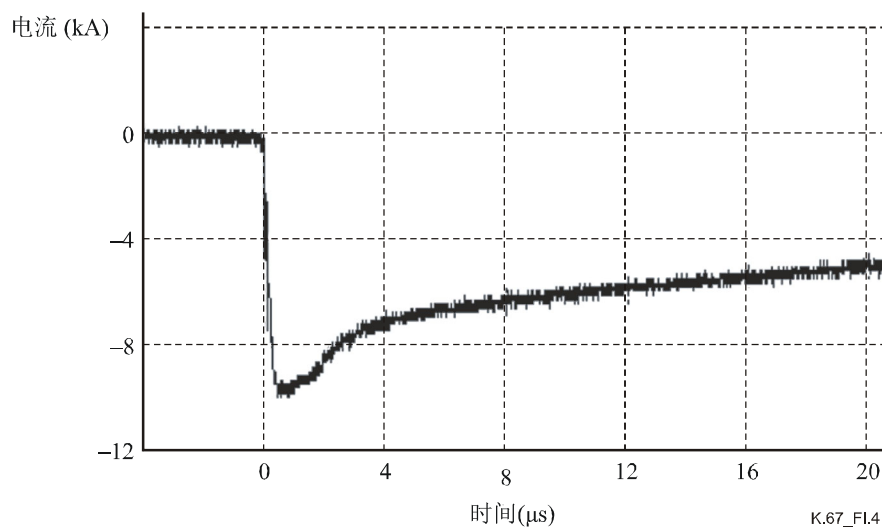
- 回路尺寸： $e = 1.5 \text{ m}$ 和 $h = 2.0 \text{ m}$ （回路面积= 3 m^2 ）；
- 回路与雷电之间的距离， $f = 100 \text{ m}$ 。



图I.3/K.67 – 进入非闭合回路的感应电压的测试方案

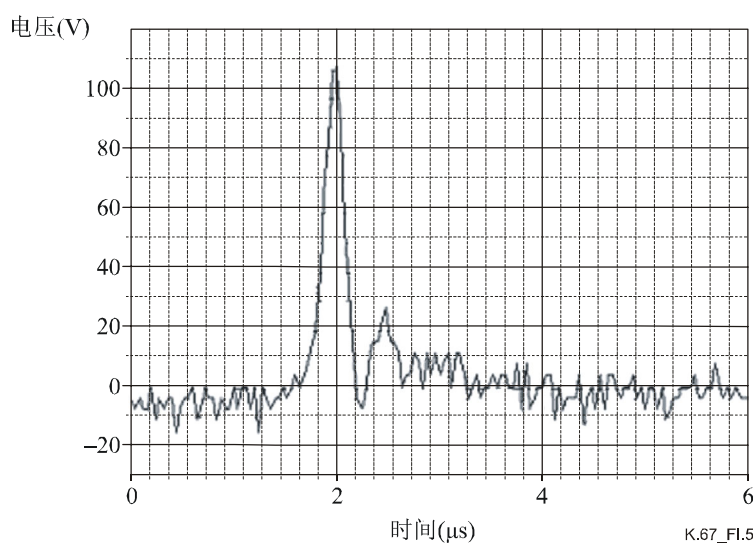
图I.4展示了测出的雷电电流，其主要参数归纳如下：

- 电流：波前时间（T）= 0.375 ms;
- 峰值（ I_s ）= 9.8 kA.



图I.4/K.67 – 触发雷电电流

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



（时标未与图I.4同步）

图I.5/K.67 – 测出的回路内感生电压

将数字值插入等式（I.4）并认定电流波形为梯形，我们便得到一个持续时间为0.375 μ s和峰值为157 V的直角波形。将此值与图I.5相比可以看出，它略高于测出的数值（110 V）。

根据Rusck的研究工作[I.1]，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Rusck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，我们得出：

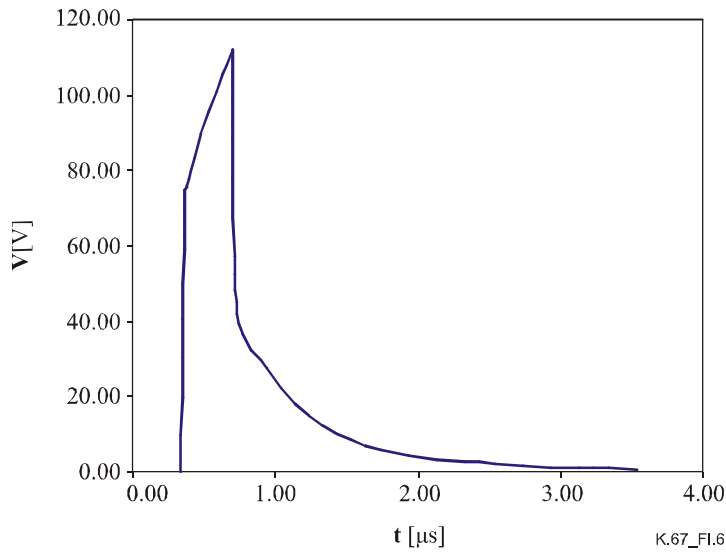
$$\frac{dB}{dt} = 0 \quad \text{其中 } t \leq r_0/v_0 \quad (\text{I.8})$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{60I_0v}{r_0^2Tv_0} \left\{ \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \left[\left(\frac{v_0t}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} t \right\} \quad \text{其中 } r_0/v_0 \leq t \leq r_0/v_0 + T \quad (\text{I.9})$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{60I_0v}{r_0^2Tv_0} \left\{ \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \left[\left(\frac{v_0t}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} t - \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \left[\left(\frac{v_0(t-T)}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} (t-T) \right\} \quad (\text{I.10})$$

$$\text{其中 } t \geq r_0/v_0 + T$$

等式(I.9)和(I.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等式，就可得出图A.6所示波形。这一波形具有112 V的峰值，与测出的电压完全吻合。

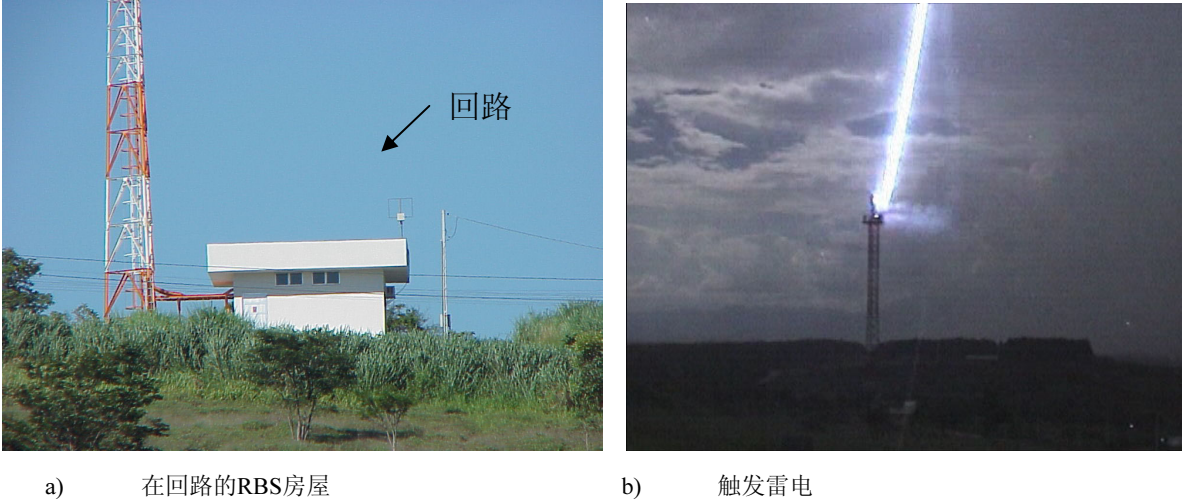


图I.6/K.67 – 利用Rusck模型计算出的电压波

根据等式(I.9)和(I.10)可以得出结论，对于距离雷击点（ $f < Tv_0$ ）较近的回路，可以通过按等式(I.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，感生电压与等式(I.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。这时应该使用等式(I.8)至(I.10)。

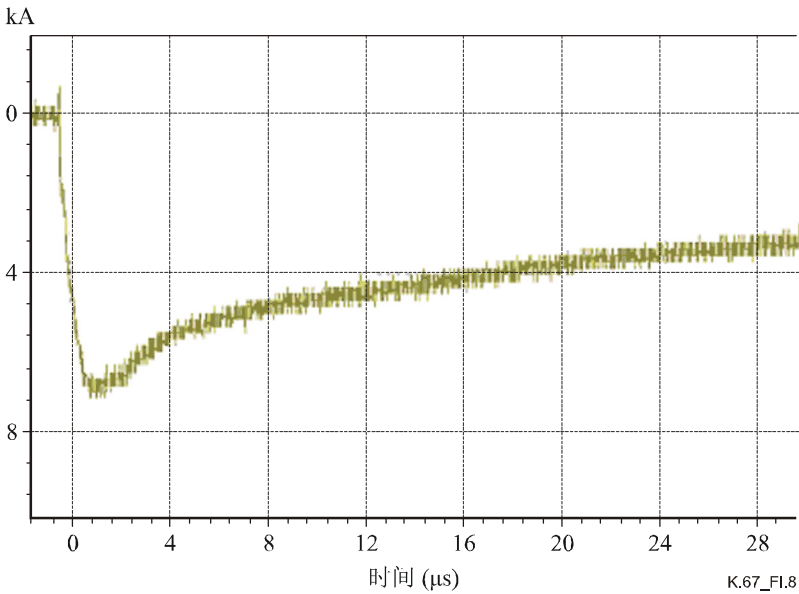
I.3.3 对感生到在闭合回路中的电流的测试方案

图I.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I.7b展示了从控制棚看到的击中塔顶的触发雷电。



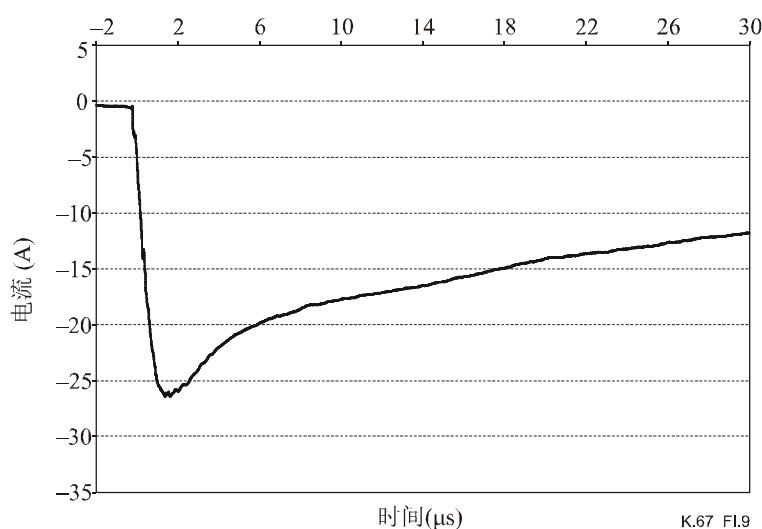
表I.7/K.67 – 对感生到闭合回路中的电流的测试方案

同时在塔顶（图I.8）和回路（图I.9）记录的电波，可描述为峰值、半峰值时间（ T_h ）和波前时间（ T_f ），并定义为 $1.25 (T_{90\%} - T_{10\%})$ 。



电流19/02/2005 – Block 1 – 塔顶
峰值= 7.4 kA – $T_h = 24 \mu s$ – $T_f = 1.2 \mu s$

图I.8/K.67 – 雷电电流



电流19/02/2005 – Block 1 – 回路
峰值= 26.4 A – $T_b = 24 \mu s$ – $T_f = 1.3 \mu s$

图I.9/K.67 – 闭合回路中的感生电流

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： $h = 0.80 \text{ m}$;
- 回路宽度： $e = 1.00 \text{ m}$;
- 回路导体半径= 0.0075 m .

等式 (I.6) 将电信塔和回路之间的互感表示为：

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

等式(A.2)将回路自感表示为：

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

等式(I.7)针对雷电电流 $I_a = 7.04 \text{ kA}$ 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%）预期值，因为测试场的实际条件不能完全满足I.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，向闭合回路感生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等式(I.7)所示，可以根据互感和自感间的比率估算出来。

参考书目

- [I.1] RUSCK (S.): Transactions of the Royal Institute of Technology, No. 120, *Induced lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low voltage networks*, Stockholm, 1958.

ITU-T系列建议书

A系列	ITU-T工作的组织
D系列	一般资费原则
E系列	综合网络运行、电话业务、业务运行和人为因素
F系列	非话电信业务
G系列	传输系统和媒质、数字系统和网络
H系列	视听及多媒体系统
I系列	综合业务数字网
J系列	有线网络和电视、声音节目和其他多媒体信号的传输
K系列	干扰的防护
L系列	电缆和外部设备其他组件的结构、安装和保护
M系列	电信管理，包括TMN和网络维护
N系列	维护：国际声音节目和电视传输电路
O系列	测量设备技术规程
P系列	电话传输质量、电话安装及本地线路网络
Q系列	交换和信令
R系列	电报传输
S系列	电报业务终端设备
T系列	远程信息处理业务的终端设备
U系列	电报交换
V系列	电话网上的数据通信
X系列	数据网、开放系统通信和安全性
Y系列	全球信息基础设施、互联网协议问题和下一代网络
Z系列	用于电信系统的语言和一般软件问题