

# 关于雷击试验模拟波形的一些资料

铁道科学研究院通信信号研究所雷电防护研究室

研究员 邱传睿

**摘要** IEC 的 81 技术委员会提出的 10/350 模拟波形是根据国际大电网会议公布的雷电参数观测数据的极端值制定的。主要用来测试直击雷防护系统如避雷针等装置的物理损害。至今，国际上发达国家并未认可必须用 10/350 波形来测试电源设备用 SPD。IEC 61643-1 (2002-01) 和 IEC 61643-12 (2002-02) 都未将 10/350 波形用做 IEC 61643-1 规定的 SPD I 类测试。本文根据所收集的美国、英国、法国、德国、澳大利亚及 IEC 其它技术委员会标准，说明在电源用 SPD 测试中使用 8/20 波形的有效性和普遍性。

**关键词** 雷电波形 雷电参数 10/350

最近，国内一些学者对国内外雷击试验模拟波形，特别是对 10/350 波形，发表了一些论文对相关问题进行了热烈的讨论。笔者认为，开展正常的学术讨论，对提高我国防雷学术水平制定既和国际上大多数先进国家防雷标准接轨又符合我国国情的防雷标准无疑是大有裨益的。

广东省防雷中心杨少杰、黄智慧等防雷专家最近编译了美国国家雷电安全防护学会主任兼首席执行官 Richard Kithil 的一篇文章：“美国雷电防护技术规范 and 标准动态变化评述 (A Review of Dynamic Changes In USA Lightning Codes and Standards)” [1]。文中有这样一段话说：“对于想要建立一个综合性的防雷标准库的人来说，应该考虑收集以下一些技术标准或规范：英国 BS 6651 (1999) 《建筑物防雷实用规范》 (Code of Practice for Protection of Structures against Lightning)；澳大利亚 AS 1768 《雷电防护》 (Lightning Protection)；新加坡 CP33 (1999) 《雷电防护实用规范》 (Code of Practice for Lightning Protection)；国际电信联盟标准局 (ITU-T) 第 9、10 章《电信线路和设备雷击防护 (1995)》 (The Protection of Telecommunications Lines and Equipment Against Lightning Strikes (1995))；南非 SABS-03-1985 (1985) 标准《建筑物防雷》 (The Protection of Structures Against Lightning)；德国 DIN 57185 标准《防雷系统》 (1983 翻译版) (Lightning Protection System (trans. 1983))；波兰 PN-86 (1987) 标准《建筑物防雷》 (Lightning Protection of Structures)”。这段话提出了应全面了解国际上各先进国家的防雷标准而不是片面追求某个标准的问题。笔者供职的铁道部科学研究院通信信号研究所雷电及电化干扰防护研究室从 1965 年开始研究 CCITT V 组 K 防护系列标准及日本、英、美、澳大利亚等国相关的防护标准，也研究了 IEC SC 37、IEC TC 64、IEC TC 77、IEC TC 81 等与电磁兼容有关的标准。现在想将我所了解的部分资料摘编给大家，供大家研究。

## 1 关于对雷电参数

### 1.1 国际公认的由雷电观测得出的雷电参数数据

早在 1897 年，意大利学者便利用铁磁物质记录雷电流幅值。最近几十年，世界许多国家都对雷电

参数进行了观测，著名的有美国纽约帝国大厦（楼高 380m）的雷电观测、前苏联莫斯科电视塔的测雷、日本柏崎、刈羽地方的测雷、瑞士圣萨尔瓦托（San Salvadore）山顶的测雷等。世界各国测得的自然界的雷击波形基本是一致的，大约有 80-90%的雷电流是负极性重复脉冲，一次放电过程常常包含多次先导至主放电的过程（初次放电和后续放电），放电脉冲数目平均为 3-4 个，最多的记录到 42 个。下面是国际大电网会议[2]根据各国学者在世界各地长期实测的雷电参数，在国际大电网会议出版物《Electra》中公布的“雷闪参数”为国际公认。国际大电网会议文献 Electra 41(1975) 中 Berger K、Anderson R.B 的论文“雷闪参数”和 Electra 65(1980) 中 Anderson R.B、Eriksson A.J 的论文“工程应用中的雷电参数”见表 1 — 表 6[3]

表 1 峰值电流 (kA) (最小 2kA)

雷击类型	积 累 概 率				
	98%	95%	80%	50%	5%
首次负雷击*	4		20		90
后续负雷击*		4.6		12	30
正 闪 击		4.6		35	250

表 2 雷闪总电荷量 (C)

雷 击 类 型	积 累 概 率		
	95%	50%	5%
首次负雷击	1.1	5.2	24
后续负雷击	0.2	1.4	11
负 闪 击*	1.3	7.5	40
正 闪 击*	20	80	350

表 3 首次雷击电荷量 (C)

雷击类型	积 累 概 率		
	95%	50%	5%
首次负雷击	1.1	4.5	20
后续负雷击	0.22	0.95	4
正 闪 击	2	16	150

表 4 波前最大上升速率 (kA/μs)

雷击类型	积 累 概 率		
	95%	50%	5%
首次负雷击	9.1	24	65
后续负雷击	10	40	162
正 闪 击	0.2	2.4	32

表 5 波前时间 (μs)

雷击类型	积 累 概 率		
	95%	50%	5%
首次负雷击	1.8	5.5	18
后续负雷击	0.2	1.1	4.5
正 闪 击	3.5	22	200

表 6 雷电持续时间 (μs)

雷 击 类 型	积 累 概 率		
	95%	50%	5%
首次负雷击	30	75	200
后续负雷击	6.5	32	140
正 闪 击	25	230	2000

这一雷电参数观测数值是确定直击雷模拟波形的基础。在 Berger K 和 Anderson R.B 的论文“雷闪参数”中公布了他们在圣萨尔瓦托（San Salvadore）山两个通信塔观测到的雷电波形图（图 1），该图被公认的程度，几乎可以在各国防雷基础理论书籍中找到[4]。

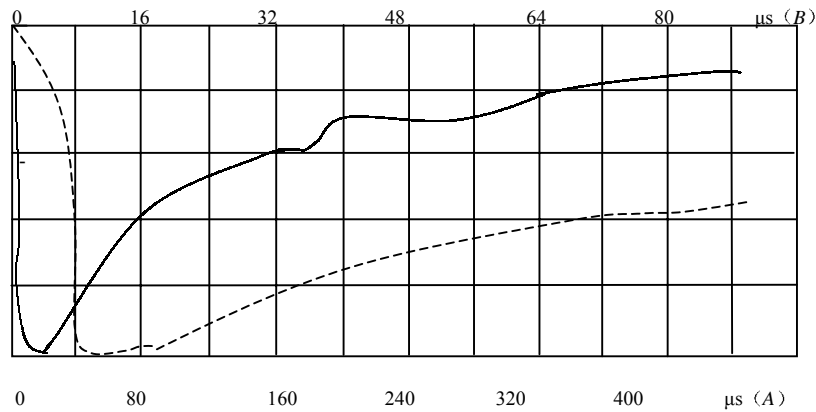


图 1 负闪击时雷电平均电流波形

图 1 中 A (实线) 是对 88 次实测雷电流平均值处理后波形, 反映了一次雷击放电的全貌。B (虚线) 是 10 次实测值取平均而得, 图中时间坐标 A 在下 B 在上。

## 1.2 国际组织和国家标准都采用了国际大电网会议公布的雷电参数

美国 IEEE 标准: IEEE Std 998-1996 IEEE Guide for lightning stroke 的 (请参阅该标准第 2 章 “lightning stroke phenomena” 之 2.4 “stroke current magnitude”)、英国标准 BS 6651-1999 Code of practice for protection of structures against lightning (请参阅该标准 BSI 09-2000 版第 118 页参考文献之 [1]: ANDERSON R.B., and ERIKSSON,A.J.,CIGER, Lightning Parameters for Engineering Application.Electra,1980,69.65-102)、澳大利亚和新西兰标准 AS 1768-1991/NZS 1768-1991 Lightning protection 及 2004 年即将出的修正版 DR 02359 号文件 (请参阅该标准的资料性附录 A “The nature of lightning and the principles of lightning protection”) 等国家标准都采用了国际大电网会议公布的上述雷电参数。IEC TC81 技术委员会的标准, 如 IEC 61024-1 Protection of structures against lightning Part 1:General principles、IEC61312-1 Protection against lightning electromagnetic impulse- Part 1:General principles 也引用了该系列参数 (请参阅该标准的资料性附录 A “Background of the fixed lightning current parameters”)。有趣的是, 由于出发点不一样, 同样引用的同一组参数, 而由此得出得模拟雷电波形却有很大的差异。

## 2 对雷电参数的处理及雷电模拟雷电波形的产生

雷击试验必须有一个尽量模拟自然界的雷闪以及线路或设备上可能出现的浪涌的典型波形, 这就是我们通常说的模拟雷电冲击波形。模拟雷电冲击电波形和自然界的雷击波形是有区别的。实验室模拟的“试验波形”来自于对自然界雷电波形的概括, 但绝非自然界的雷击波形。Berger 等在圣萨尔瓦托测得的 90 次雷电波形, 整理出直击雷负冲击波形前沿为多为  $2\mu s$  -  $4\mu s$ , 最长未超过  $20\mu s$ , 半峰值时间大部分为在  $10\mu s$  -  $100\mu s$  范围内, 50%的半峰值时间小于  $75\mu s$  [5]。在此以前, IEC 于 1960

年 7 月 14 日在 60-2 文件中公布的电压冲击波波形为  $1.2/50 \mu s$ ，电流冲击波波形为  $8/20 \mu s$ [4][5]。上述雷电参数正好证明 IEC 公布的模拟雷电冲击波波形是在对观测的雷电参数的基础上，经数理统计处理后的**平均值**，可以作为模拟雷电波形的代表。

应注意，用  $1.2/50 \mu s$  的模拟电压波和  $8/20 \mu s$  的模拟电流波并不能完全表示自然界的雷击，因此有的人提出了可以描述雷击的另外几种波形，如 CCITT 在 1975 年的《The protection of telecommunication line and equipment against lightning discharges》中认为，室内研究和计算时用  $5/65 \mu s$  的波形。在计算机模拟仿真中有时用  $2.6/40 \mu s$  波形模拟建筑物遭直击雷后建筑物内电流分布。在一些文献上还有  $1/4 \mu s$ 、 $1/10 \mu s$  等陡波前波形。除了模拟直击雷的波形外，在实验室还有一些模拟各种传输线上的雷电浪涌。由于雷电电磁脉冲波是电磁波，电磁波在传输线按传输线的规律传播，以行波方式前进。传输线在微观上是由一系列四端网络链接而成，因此，它有自己的特性阻抗，如铜质架空通信线特性阻抗为  $600 \Omega$ ，对称电缆特性阻抗为  $150 \Omega$ ，5 类高频电缆特性阻抗为  $120 \Omega$ ，小同轴电缆特性阻抗为  $50 \Omega$  等等。由于不同的传输媒介有不同的特性阻抗，各种传输媒介对雷电波的延时和衰耗也是不一样。因此，出现了用于低压数据、通信和信号线的防雷设备试验波形的多样性：如铜质架空明线和被复线用的  $4/300 \mu s$  波形、对称电缆和同轴电缆用  $10/700 \mu s$  波形、电话线  $10/700 \mu s$  波形或者  $10/1000 \mu s$  波形、钢轨用  $10/200 \mu s$  波形及  $10/160 \mu s$ 、 $10/560 \mu s$ 、 $10/600 \mu s$ 、 $10/350 \mu s$ 、 $20/100 \mu s$ 、 $10/250 \mu s$ 、 $20/100 \mu s$  等波形。这些波形在实验室都可以等同使用，但必须清楚，试验条件，目的是尽量使其对试件有相同的效应。

### 3 在 SPD 的雷击试验中采用 $8/20 \mu s$ 模拟雷电波形的国家

在低压配电系统用 SPD 的雷击试验中，以下国家标准中，用  $8/20 \mu s$  冲击电流波形。

3.1 美国：美国保险商试验所有限公司 (Underwriters laboratories Inc., 简称 UL) 标准，UL 1449 Transient Voltage Surge Suppressors 之 2.4 “Transient Voltage Suppressors Test” 表 24.1 列出的冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ 、美国 IEEE 有关雷电防护设备的标准都用的是  $8/20 \mu s$  波形进行冲击电流试验，由于标准太多，下面只将部分标准号列出，以便各位核实：

— IEEE C62.1-1989 《IEEE Standard Gapped Silicon Surge Arresters for AC Power Circuit》第 6 章 “Performance Characteristics and tests” 规定的冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ 。

— IEEE Std C62.11-1999 《IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuit (> 1kV)》第 8 章 “Design test” 规定的冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ 。

— IEEE Std C62.22-1997 《IEEE Guide for Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-current System》第 6 章 “Protection of distribution systems” 规定的冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ 、大电流短波形  $4/10 \mu s$  和小电流  $2000 \mu s$  方波。

— IEEE Std C62.34-1996 《IEEE Standard Performance of Low-voltage Surge Protective Devices (Secondary Arresters)》第 7 章 “Design test” 规定的冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ 。

— IEEE C62.41-1991 《IEEE Recommended Practice on Surge Voltages in Low-voltage AC Power Circuits》第 9 章 “Definition of Standard Surge-Testing Waveforms” 规定的冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ 。

— IEEE Std C62.42-1992 《IEEE Guide for Application of Gas tube and Air Gap Arrester Low-voltage ( Equal to or Less than  $1000V_{rms}$  or  $1200V_{dc}$  ) Surge Protective Devices》第 5.3.6 “Impulse life test” 规定的冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ 。

— IEEE Std C62.62-2000 《IEEE Standard Test Specifications for Surge Protective Devices for Low-voltage AC Power Circuits》第 7 章 “Performance Characteristics and tests descriptions” 规定的冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ 。

3.2 英国：英国国家标准 BS 6651: 1999 《Code of practice for protection of structures against lightning》的资料性附录 C: “General advice on protection against lightning of electronic equipment within or on structures” 的 C.13 “Surge protective devices, location categories and test” 规定冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ 。

BS EN 60099-1: 1994 (该标准是欧洲电气技术标准化委员会 CENELEC 标准, 标志 EN。等同采用 IEC IEC 60099-1: 1991)《Surge Arresters-Part 1: Non-linear resistors type gapped surge arresters for a.c systems》第 8 章 “Type tests” 冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ 、大电流短波形  $4/10 \mu s$ 。

3.3 澳大利亚和新西兰：澳大利亚和新西兰国家标准 AS 1768-1991/NZS 1768-1991 《Lightning protection》的第 5 节 “protection of persons and equipment within buildings ” 规定的冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ 。并在资料性附录 D “Waveshapes for assessing the susceptibility of equipment to transient overvoltage duo to lightning ” 第 87 页 Figure D4 “Location categories ” 中有详细的说明。AS 1768-1992/NZS1768-1991 将于 2004 年修订, 其修订稿 DR 02359 号文对此未做任何修改。”

3.4 法国：法国国家标准 NFC 61 -740-1995 《Equipment for installations that are directly supplied by a low-voltage public distribution network-Lightning arresters for low voltage installations》在第 2 章定义的 2.6 “Courant nominal de décharge d’un parafoudre ( $I_n$ )” 、 2.7 “Courant maximal de décharge d’un parafoudre ( $I_{max}$ )” 中就将冲击电流波形规定为  $8/20 \mu s$ 。

法国电气协会标准 UTE C15-443-1996 《Selection/Application Guide for Surge Protective Devices》也规定冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ 。

3.5 德国：德国 DIN VDE 0675 系列标准 DIN VDE 0675 Part 1 (1994) 《Over voltage arresters with non-linear resistors and series gaps for a.c network》、DIN VDE 0675 Part 2 (1975) 《Over voltage Protective

Devices Application of valve arresters for a.c network》、DIN VDE 0675 Part 3 (1982) 《Over voltage Protective Devices Protective series gaps for a.c network 》规定冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ 。

3.6 日本：日本电力标准 JEC 203 《電力用避雷器》第 2 章“术语”规定标准冲击电流为  $8/20 \mu s$  和  $4/10 \mu s$ [6]。

日本铁路标准 JRS 37104-1-14R7C 《保安器（電力用）》第 6 条“試驗方法”规定冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ [6]。

4 在 SPD 的雷击试验中采用  $8/20 \mu s$  模拟雷电波形的国际组织

4.1 ITU（国际电信联盟）建议：ITU-T K.12 1989 《CHARACTERISTICS OF GAS DISCHARGE TUBES FOR THE PROTECTION OF TELECOMMUNICATIONS INSTALLATIONS》之 4.6.1 “Test currents”规定对气体放电管的冲击电流波形为  $8/20 \mu s$ ；

4.2 IEC（国际电工委员会）的除 TC 81 以外的其它技术委员会

IEC 除 TC 81 以外的其它技术委员会规定在 SPD 的雷击试验中采用  $8/20 \mu s$  模拟雷电波形的很多，以下只引其中的一部分，读者还可在 IEC 的 SC 37、TC64、TC 77 等的标准或文件中查找。

— 1960 年 7 月 14 日，IEC 以 IEC 60-2 文件的方式公布了模拟雷电波形的参数：冲击电压波形为  $1.2/50 \mu s$ ，允许裕度：峰值，3%， $T_1$ ， $\pm 30\%$ ， $T_2$ ， $\pm 20\%$ 。冲击电流波形为  $8/20 \mu s$  和  $4/10 \mu s$ ，允许裕度：峰值，10%， $T_1$ ， $\pm 10\%$ ， $T_2$ ， $\pm 10\%$ [4][5]，用于碳化硅、空气间隙、气体放电管的冲击特性试验。

— IEC 61643-1（2002-01）《Surge protective devices connected to low-voltage power distribution system part 1: Performance requirement and testing methods》在 3.8 “标称放电电流”、3.10 “II 类测试的最大放电电流”中确切的规定采用  $8/20 \mu s$  波形，该标准中 3.9 “冲击电流”规定了用于 I 类测试的  $I_{imp}$ ，在 7.1.1 “I 类测试电流”中对获取  $I_{imp}$  的方法，但不是用  $10/350 \mu s$  波形。笔者将在下文引用资料说明。

— IEC 61643-12（2002-02）《Low-voltage Surge protective devices - part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution system- Selection and application principles》在 3.9 “标称放电电流 ( $I_n$ )”、3.12 “ $8/20 \mu s$  电流冲击”中确切的规定试验低压配电系统用 SPD 采用  $8/20 \mu s$  波形。在 3.12 “冲击电流 ( $I_{imp}$ )”中规定用与 IEC 61643-1 同样的方法获取  $I_{imp}$ 。该标准明确了获取  $I_{imp}$  不是用  $10/350 \mu s$  波形。

— IEC 61000-4-5（2001-04）《Electromagnetic compatibility(EMC)-Part 4-5:Testing and measurement techniques-Surge immunity test》在第 4 章“Definitions”定义了  $8/20 \mu s$  电流冲击波用于电子设备的雷击试验。

## 5 在 IEC 61643-1 和 IEC 61643-12 中，到底用的什么波形

5.1 IEC 61643-1 (2002-01) 中，规定如何获取  $I_{imp}$  和进行 SPD 的 I 类测试的？笔者从英文稿和等同采标后的我国国家标准 GB 18802.1-2002 《低压配电系统的电涌保护器 (SPD) 第 1 部分：性能要求和试验方法》中看到是下述说法：

5.1.1 GB 18802.1-2002 的 3.9 “冲击电流 impulse current  $I_{imp}$ ” 说：“它由电流峰值  $I_{pek}$  和 电荷量  $Q$  确定。其试验应根据动作负载试验程序进行。这是用于 I 类测试的 SPD 分类试验” [7]。如何由电流峰值  $I_{pek}$  和 电荷量  $Q$  来得到  $I_{imp}$ ？该标准的 7.1.1 “I 类测试电流” 说：“冲击电流  $I_{imp}$  由电流峰值  $I_{pek}$  和电荷量  $Q$  的参数来确定。冲击试验电流应在 10ms 内获得  $I_{pek}$  和  $Q$  值。能达到表 3 参数的典型波形是单向冲击电流。”至于表 3 “I 类测试参数” 内容是什么，查 GB 18802.1-2002 第 15 页便知。这里关键的数是 10ms，只要在在 10ms 内获得  $I_{pek}$  和  $Q$  值的单向冲击电流都是合格的。就其波形的持续时间而言， $350\mu s$  不具有唯一性。

5.1.2 EC 61643-12 (2002-02) 中的 5.5.2.2 “ $I_{imp}$  and  $I_{max}$  for SPDs according to class I and class II tests” 有如下的论述：

$I_{imp}$  and  $I_{max}$  and their submultiples are test parameters use in the operating duty test for class I and class II tests respectively. They are related to the maximum values of discharge current, which are expected to occur only very rarely at the location of the SPD in the system.  $I_{max}$  is associated with class II tests and  $I_{imp}$  is associated with class I tests. 中文可以表达为：“ $I_{imp}$  和  $I_{max}$  及其约数，分别用做动态 I 类测试和 II 类测试。它们都和放电电流的最大值相关联，而系统中安装 SPD 的位置上发生放电电流的最大值的情况却极少。 $I_{max}$  用做 II 类测试， $I_{imp}$  用做 I 类测试”。

该标准 65 页表 2 提供了  $I_{imp}$  的优选值，复制为本文表 7：

表 7  $I_{imp}$  的优选值

$I_{pek}$ (kA)	1	2	5	10	20
$Q$ (AS)	0.5	1	2.5	5	10

注：一般，与  $I_{imp}$  有关的波形持续时间长比  $I_n$  有关的波形持续时间长。并且， $I_n < I_{imp}$ 。

按表中数据， $I_{pek}$  最大是 20 kA，与之对应的电荷量是 10 库仑。一次雷击放电的电量为几库仑，因此对于 SPD 来说，10 库仑的电荷量已经比较严酷了。笔者下文引用的材料“IEC TC 81 文件”说明，即使架空电源线引入建筑物时，对安装在 LPZ0<sub>A</sub> 和 LPZ1 界面的 SPD，要求的 I 类测试的  $I_{imp}$  最大值也小于 20 kA，而为  $I_{imp} > 12.5$  kA。

## 5.2 IEC 61643-12 (2002-02) 中对 SPD I 类测试的论述

IEC 61643-12 (2002-02) 附录 A “IEC 61643-1 中试验程序的解释” 中对 SPD I 类测试采用的

波形作了规定，英文原文（第 105 页）：

The waveshape is always 8/20 whether it is a class I test or a class II test because it is used as a comparative value. It is used to select an SPD when comparing its protective characteristics to the impulse withstand voltage of the equipment to be protected. The typical waveshape for class I tests is  $I_{imp}$  defined by  $I_{pek}$  and Q, but this waveshape is not so different from an 8/20 waveshape in terms of rate of rise of current. Therefore, the 8/20 waveshape is used to obtain a common basis for comparison of SPD protective characteristics.

其译文：

无论是 I 类或 II 类测试，**波形总是 8/20**，因为，I 类或 II 类测试其值都是用作比较的。它以比较被保护设备的冲击耐压和 SPD 的防护特性，以便选择使用 SPD。I 类测试的典型波形是用  $I_{pek}$  和 Q 定义的  $I_{imp}$ ，但该波形与 8/20 波形用电流上升速率来表示并没有什么差别。因此，对于 SPD，都用 8/20 波形便可获得比较 SPD 防护特性的共同基准。

这里并规定 SPD 的 I 类测试必须用 10/350  $\mu$ s 波形。

SC 37 的标准也用过 10/350  $\mu$ s 波形，IEC 61643-311 (2001-10)《Components for low-voltage surge protective devices-part 311: Specification for gas discharge tubes(GDT)》中 21 页的 6.1.6 “耐电流能力的要求”，表 4 “耐电流能力”中列出的冲击放电电流试验用的是 8/20 波形或 10/350  $\mu$ s 波形，相关部分复制为表 8：

表 8 GDT 耐电流能力的要求

8/20 波形冲击电流、10 次 (kA)	0.5	1.0	2.5	5	10	20
10/350 波形冲击电流、1 次 (kA)			1	2.5	4	4

比如说，用 5 kA 、8/20 波形冲击电流冲击 10 次的效果等于用 2.5kA 、1/350 波形冲击电流冲击 1 次的效果。而大家注意，8/20 波形冲击电流 10 kA 和 20 kA 这两项都表的是与 4kA 、1/350 波形冲击电流冲击 1 次的等效。因此，表 4 的注 a)说，“这时可酌情增加 8/20 波形冲击的次数，如 20 次”。也可以说，8/20 波形冲击电流 10 kA 冲击 10 次与 1/350 波形冲击电流 4kA 冲击 1 次可以认为等效。

#### 6 IEC TC 81 技术委员会所编写的防雷标准，引用 10/350 $\mu$ s 波形的原因和应用范围

最早，10/350  $\mu$ s 冲击波形是实验室用来模拟通信线和数据线上的波形的，并且用得不多，所以许多人不太熟悉。其实，美国 IEEE 标准 IEEE Std C.62.36-1991（该标准在 1991 年后有两次修订，即 1994 年版和 2000 年版）就用了 10/350 波形，以后该标准在 1991 年后有两次修订，即 1994 年版和 2000 年版都用了 10/350 波形。但都不是将其作为“直击雷”模拟波形来用的。IEEE Std C.62.36 标准的英文名字是“IEEE Standard Test Methods for Surge Protectors Used in Low-Voltage Data, Communications,

and Signaling Circuits”。说的是低压通信线、数据线、信号线上的模拟雷电试验。在 IEEE Std C.62.36-2000 的 8. “ Impulse-limiting-voltage test (冲击限制电压试验)” 一节说的特别清楚，与该标准表 2 中引用的其它波形，如 10/1000  $\mu$ s、10/250  $\mu$ s 一样，该波形是 “Suggested waveforms for the impulse-limiting-voltage test(建议用于冲击限制电压试验的波形)”不是模拟“直击雷”的波形。IEC SC37 编制的标准 IEC 61643-21 (2000) “Surge Protective Devices Connected to Telecommunications and Signaling Networks-Performance Requirements and Testing Methods(电信和信号网络用浪涌保护器-性能要求和试验方法)”也用了 10/350  $\mu$ s 冲击波形，但都是用于通信和数据线的模拟雷电试验，和“直击雷模拟试验”无关。

本文在 2 中谈到，由于不同的传输媒介的特性阻抗，因此，对雷电波的延时和衰耗也是不一样的，因此在低压数据、通信和信号线的防雷设备试验波形有多种多样：如 4/300  $\mu$ s 波、10/700  $\mu$ s 波、10/1000  $\mu$ s 波、10/200  $\mu$ s、10/160  $\mu$ s、10/560  $\mu$ s、10/600  $\mu$ s、10/350  $\mu$ s、20/100  $\mu$ s、10/250  $\mu$ s、20/100  $\mu$ s 等波形。在传输线上的雷电浪涌波形都有较长的持续时间，和直击雷的波形有相当大的区别。

IEC TC 81 的标准 IEC 61024 -1 《建筑物防雷 第一部分：通则》于 1988 年 6 月在东京会议上提出，1990 年公布。该标准制定的直击雷模拟波形 10/350 的波形的根据也是国际大电网会议公布的“雷闪参数”但在 TC 81 技术委员会采用了上述参数的极端值，即采用最长的半峰值时间 350  $\mu$ s (该数据在雷击中出现的概率为不管是首次负雷击还是后续负雷击都只有 1%，正闪击小于 50%)，峰值电流采用最高的 200 kA (该幅值在雷击中出现的概率为不管是首次负雷击还是后续负雷击都只有 1%，正闪击小于 5%)，电荷量采用最高的 100 库仑 (该幅值在雷击中出现的概率为不管是首次负雷击还是后续负雷击都几乎为 0，正闪击小于 1%)。其数值参看表 9-表 11。

表 9 首次雷击雷电流参数 (取自 IEC 61312-1 表 1)

电 流 参 数	保 护 级 别		
	I	II	III
峰 值 电 流 $I$ (kA)	200	150	100
波 前 时 间 $T_1$ ( $\mu$ s)	10	10	10
半 峰 值 时 间 $T_2$ ( $\mu$ s)	350	350	350
短 时 雷 击 电 荷 量 $Q_s$ (C)	100	75	50
比 能 量 $W/R$ (MJ/ $\Omega$ )	10	5.6	2.5

IEC 61024 -1 为什么这样做是有其合理的原因：因为，IEC 61024 -1 是建筑物防雷标准，该标准中所取的雷电参数应该能够防护各种类型的建筑物，例如，对于含易燃易爆物质的建筑物，就应当在雷击时得到 100%的防护，这时，必须用最严酷的雷电参数来测试防雷设备，采用 10/350 的波形去检测 LPS (雷电防护系统)，保证建筑不受雷电的物理损害，是完全正确的。

表 10 后续雷击雷电流参数（取自 IEC 61312-1 表 2）

电 流 参 数	保 护 级 别		
	I	II	III
峰 值 电 流 $I$ (kA)	50	37.5	25
波 前 时 间 $T_1$ ( $\mu$ s)	0.25	0.25	0.25
半 峰 值 时 间 $T_2$ ( $\mu$ s)	100	100	100
平 均 陡 度 $I/T$ (kA/ $\mu$ s)	200	150	100

表 11 长时间雷击雷电流参数（取自 IEC 61312-1 表 3）

电 流 参 数	保 护 级 别		
	I	II	III
短 时 雷 击 电 荷 量 $Q_1$ (C)	200	150	100
持 续 时 间 $T$ (s)	0.5	0.5	0.5

是否一定要用 10/350 的波形去检验低压电力配电系统 SPD，IEC TC81 的文件有以下说法：

— IEC 61312-3 (2000) 《雷电电磁脉冲 (LEMP) 的防护 第 3 部分 对浪涌保护器 (SPD) 的要求》：第 17 页，3.2 SPD I 类测试 “在 IEC 61643-1 中所定义的对安装与 LPZ0<sub>A</sub>/1 界面上的电流型避雷器的测试程序。其它 SPD 按顺序安装。

按 I 类测试的 SPD 应做冲击电流为  $I_{imp}$  的工作负载试验”。

— IEC 61312-3 (2000) 第 25 页，第 4 章 “有关威胁值 — 雷电流参数”：“从首次雷击的初始相关威胁参数出发，规定 10/350 为模拟直接雷电闪击的浪涌电流波形。**这是用以验证 SPD 能量配合的合适波形**”。

— IEC 81/191/NP 文件：IEC 62305-4 《雷电防护—第 4 部分：建筑物内的电气和电子设备的防护》，第 13 页，3.3 “SPD 的 I 类测试 用 IEC 61643-1 的测试程序对电流型避雷器用 **10/350 或类似冲击电流波形**进行的测试”。

— IEC 81/212/ CD 文件：IEC 62305-4 《雷电防护—第 4 部分：建筑物内的电气和电子设备的防护》，第 11 页，3.15 “对 SPD 进行的 I 类测试程序 (IEC 61643-1)”。

在该文件的第 19-19 页，7.1.2 译文如下：

“ 7.1.2 SPD 选择时考虑设备位置和放电电流

SPD 应当能够承受它们安装点可能出现的放电电流。SPD 系统的有下列安装点：

MB 主配电板，该位置在线路进入 LPZ1 区或 LPZ0<sub>A</sub>/LPZ1 或 LPZ0<sub>B</sub>/LPZ1 的边界。

SB 副配电板（或第二电板），该位置在 LPZ1/LPZ2 或更高的边界。

SA 插座，该位置在电子电气设备或电子电气设备终端。

SPD 安装点放电电流的期望值可以根据 LPL（雷电防护水平），通过计算传导和感应的浪涌电流来确定。若计算有困难或不确定，可采用以下条款给定的近似值。

使用 SPD，取决于它们的耐雷能力，IEC 61643-1 作了分类。

当预期有全部或部分雷电流通过 SPD 放电时，选择经 I 类测试的 SPD。因此，在安装点 MB 处的 SPD 应当通过 I 类测试。

当仅需 SPD 限制感应浪涌时和只需 SPD 泄放部分雷电流时，选择经 II 类试验的 SPD。因此，通过 II 类测试的 SPD 可以用在 SB 或 SA，并处于经 I 类试验的 SPD 的下方。

经 III 类试验的 SPD 用作设备的细防护。因此，经 III 类试验的 SPD 安装在 SA 位置，在 MB 和 SB 的下方。

#### 7.1.2.1 I 类试验的 SPD-冲击电流 $I_{imp}$

SPD 的冲击电流  $I_{imp}$  应当根据下列两个条件选择：

- \*  $I_{imp} \geq I'_{imp}$  在雷电直接闪击建筑物时
- \*  $I_{imp} \geq 10kA$  在雷电直接闪击输入线路时

注：在雷电直接闪击输入线路时，应当考虑沿导体向两方向流动的部分雷电流可能击穿线路对地的绝缘。”

该标准描述的 SPD 的安装位置：MB — 主配电板、SB — 副配电板（或第二电板）、SA — 插座这三个部位，即 IEEE 标准 IEEE C62.41-1991 《IEEE 建议：低压交流电路上的浪涌电压》所说的 A、B、C 三个部位（Location category A、Location category B、Location category C，请参阅该标准第 40 页的 Fig 9 Location category），英国标准 BS 6651-1999 《建筑物防雷实用规范》的附录 C “含电子设备的建筑物防雷建议”之 C.13 “浪涌保护器（SPD）、安装类别和测试”中的 A、B、C 三个部位（请参阅该标准的 C.13.1.3.1 安装类别 C、C.13.1.3.2 安装类别 B、C.13.1.3.3 安装类别 A，其中有极其详细的规定）。澳大利亚和新西兰标准 AS 17681992/NZS1768-1991 中规定也与 IEEE 完全一致，该标准在资料性附录 D “Waveshapes for assessing the susceptibility of equipment to transient overvoltage due to lightning” 第 87 页 Figure D4 “Location categories” 中有详细说明。

— IEC 81/238/ CDV 文件：IEC 62305-4 《雷电防护—第 4 部分：建筑物内的电气和电子设备的防护》，第 11 页，3.15 “对 SPD 进行的 I 类测试程序”。该标准的附录 D 第 90 页 “SPD 的选择和安装”对 “SPD 的 I 类测试—冲击电流  $I_{imp}$ ” 说：“该类型 SPD 通常安装在 MB 位置。要求 SPD 的最小冲击电流  $I_{imp}$  能够包含在 MB 点可能出现的部分雷电流（典型为 10/350 浪涌）”。

— IEC 81/239/ CD 文件：IEC 62305-1 《雷电防护—第 1 部分：总则》，附录 E，第 2 页：“对

I 类测试，通过电流峰值和规定的电荷，定义了试验电流  $I_{imp}$ ，建议采用 10/350 浪涌”。

从 IEC 81 的文件看，几乎没有一个强制要求使用 10/350  $\mu$ s 波形。IEC 61643-12 (2002-02) 在第 107 页，附录 A 5.3.4 “根据 I 类测试和 II 类测试程序，对 SPD 进行的工作负载试验”说，“工作负载试验用 15 个 8/20 波形的标称放电电流冲击代替通常在高压试验中用的 20 个冲击。理由是工作负载试验比用 IEC 60099-4 的试验更加严酷（例如，浪涌数量和波形）。由此可以看出，IEC 81 的文件和 IEC SC37、TC64 等有些不同，据笔者所知，SC37、TC64 也发文给 TC 81，要求各技术委员会之间协调，IEC 81 在出 IEC 81/238/CDV 时也采纳了一些 SC37、TC64 的意见，IEC 81 也向与 ITU、IEEE 等作些协调工作，笔者相信，随着大家对雷害机理的深入了解，各国的防雷标准一定会协调一致。

注：

- [1] 美国雷电防护技术规范和标准动态变化评述 杨少杰、黄智慧、余乃枏 《雷电防护与标准化》2003 年第 1 期
- [2] 国际大电网会议，法文为 Conference International des Grand Reseaux Electriques，缩写 CIGRE。英文为 International Conference on Large High Voltage Electric System。
- [3] 本文表 1 — 表 6 引自据澳大利亚 DR02359 文件表 1。
- [4] 该图 引自“雷电对铁路信号设备的危险影响极其防护”，铁道科学院通信信号研究编著 北京大学出版社 1991 年 2 月出版。
- [5] 引自 CCITT Publication 1975 《The protection of telecommunication line and equipment against lightning discharges》（国际电信联盟出版物，〈防雷手册〉）
- [6] 引自《信号保安体系-雷害对策ハンドブック》嶋原和田等编著 株式会社サンユーツヤ 平成 4 年 2 月 第二版。
- [7] “动作负载试验”的原文为 operating duty test，似应译为工作负载试验或动态试验。

参考文献：

- 1、Anderson R.B, and Eriksson A.J ,(CIGRE),Lightning Parameters for Engineering Application. Electra, 1980,69,65-102.
- 2、AS 1768-1991 Lightning Protection 2003 年修订稿草稿，澳大利亚 DR02359 文件
- 3、“雷电对铁路信号设备的危险影响极其防护”，铁道科学院通信信号研究编著 北京大学出版社 1991 年 2 月出版。
- 4、IEEE Std 998-1996 IEEE Guide for lightning stroke shielding of substations 美国国家标准出版局 1996 年 11 月
- 5、BS 6651-1999 Code of practice for protection of structures against lightning 英国标准出版局 2000 年 9 月
- 6、AS 1768-1991/NZS 1768-1991 Lightning protection 澳大利亚和新西兰标准 澳大利亚标准服务中心 1991 年 9 月
- 7、IEC 61024-1: 1991 Protection of structures against lightning Part 1:General principles
- 8、IEC61312-1 1995 Protection against lightning electromagnetic impulse- Part 1:General principles
- 9、UL 1449: 1985 Transient Voltage Surge Suppressors 美国保险商试验所有限公司标准 1992 年 4 月版
- 10、IEEE C62.1-1989 IEEE Standard Gapped Silicon Surge Arresters for AC Power Circuit 美国国家标准出版局

1989年9月

- 11、IEEE Std C62.11-1999 IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuit ( $>1\text{kV}$ ) 美国国家标准出版局 1999年3月
- 12、IEEE Std C62.22-1997 IEEE Guide for Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-current System 美国国家标准出版局 1997年9月
- 13、IEEE Std C62.34-1996 IEEE Standard Performance of Low-voltage Surge Protective Devices (Secondary Arresters) 美国国家标准出版局 1996年9月
- 14、IEEE C62.41-1991 IEEE Recommended Practice on Surge Voltages in Low-voltage AC Power Circuits 美国国家标准出版局 1991年10月
- 15、IEEE Std C62.42-1992 IEEE Guide for Application of Gas tube and Air Gap Arrester Low-voltage (Equal to or Less than  $1000V_{\text{rms}}$  or  $1200V_{\text{dc}}$ ) Surge Protective Devices 美国国家标准出版局 1993年5月
- 16、IEEE Std C62.62-2000 IEEE Standard Test Specifications for Surge Protective Devices for Low-voltage AC Power Circuits 美国国家标准出版局 2000年2月
- 17、BS EN 60099-1: 1994 Surge Arresters-Part 1: Non-linear resistors type gapped surge arresters for a.c systems 欧洲电气技术标准化委员会 CENELEC 标准 英国标准出版局 2001年10月版
- 18、NFC 61-740-1995 Equipment for installations that are directly supplied by a low-voltage public distribution network-Lightning arresters for low voltage installations 法国标准 1995年7月
- 19、UTE C15-443-1996 Selection/Application Guide for Surge Protective Devices 法国电气协会标准
- 20、DIN VDE 0675 Part 1 (1994) Over voltage arresters with non-linear resistors and series gaps for a.c network 德国标准
- 21、DIN VDE 0675 Part 2 (1975) 《Over voltage Protective Devices Application of valve arresters for a.c network 德国标准
- 22、DIN VDE 0675 Part 3 (1982) 《Over voltage Protective Devices Protective series gaps for a.c network 德国标准
- 23、ITU-T K12 1995 CHARACTERISTICS OF GAS DISCHARGE TUBES FOR THE PROTECTION OF TELECOMMUNICATIONS INSTALLATIONS1 国际电信联盟标准
- 24、ITU-T K17 1993 Test on power-fed repeaters using solid-state devices in order to check the arrangements for protection from external interference 国际电信联盟标准
- 25、The protection of telecommunication line and equipment against lightning discharges 1978 国际电信联盟出版
- 26、IEEE C62.33-1982 Standard Test Specification for Varistor Surge- Protective Devices 1988年3月修订稿
- 27、ANSI/IEEE Std C62.64-1997 IEEE Standard specifications for surge protectors used in low-voltage data, communications, and signaling circuits 美国国家标准出版局 1997年5月
- 28、IEC 60099-1: 1991) Surge Arresters-Part 1: Non-linear resistors type gapped surge arresters for a.c systems
- 29、IEC 61643-1 (2002-01) Surge protective devices connected to low-voltage power distribution system part 1: Performance requirement and testing methods
- 30、IEC 61643-12 (2002-02) Low-voltage Surge protective devices - part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution system- Selection and application principles
- 31、IEC 61643-21 Low voltage surge protective device-Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and signaling networks-Performance requirements and testing methods
- 31、IEC 61000-4-5 (2001-04) Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-5:Testing and measurement techniques-Section 5:Surge immunity test
- 32、IEC 81/191/NP : IEC 62305-4 Protection against lightning Part 4:Electrical and electronic systems within structures

33、 IEC 81/212/ CD : IEC 62305-4 Protection against lightning Part 4:Electrical and electronic systems within structures

34、 IEC 81/238/ CDV: IEC 62305-4 Protection against lightning Part 4:Electrical and electronic systems within structures