

GIL雷电试验过冲研究与应用

为解决电力设备气体绝缘高压输电线路 (Gas Insulated High-Voltage Transmission Line, GIL) 样机在雷电冲击耐受电压试验中出现过冲, 研究了雷电试验原理与试验设备冲击发生器的特性, 利用软件Matlab/Simulink建立冲击发生器放电回路模型, 并通过实际试验验证其正确性。基于理论通过仿真分析确定影响波形的主要因素波前电阻、波尾电阻与试品负载, 以及次要影响因素外接引线的长度。试品电容量在3 050 pF以内时, 通过调节调波电阻实现满足标准GB/T 16927.1—2011波形要求, 当超过3 050 pF时, 可采用阻容滤波电路抑制电压峰值过冲或拆分试品进行试验, 以减少负载过大带来的过冲。最后针对GIL试品给出试验方案, 使得雷电试验顺利通过。

周振华 吕学山 丁雄勇/中国能建集团装备有限公司南京技术中心

0 引言

为检验所设计的电力设备气体绝缘高压输电线路 (Gas Insulated High-Voltage Transmission Line, GIL) [1]在工程运行中防雷电的绝缘性能, 标准GB/T 22383—2008额定电压72.5 kV及以上刚性气体绝缘输电线路中6.1.1节规定雷电冲击耐受电压试验是强制型式试验项目之一。标准中6.2.4节特别提出: 应注意样机的长度, 以免因行波引起的过电压。其实, 此要求对样机提出了负载大小的规定, 对样机结构设计和雷电试验有重要的指导作用, 不容忽视。

GB/T 16927.1—2011中7.1.4节提出大尺寸回路雷电冲击试验中易因回路引起的阻尼振荡而导致幅值增加, 出现峰值过冲。雷电过冲若超过样机设计裕度样机内部绝缘件极易发生击穿与闪络, 导致绝缘试验失败; 同时会使得冲击波

形不能满足标准要求, 导致绝缘试验失败。GIL试品雷电试验失败意味着要将样机与试验设备分离, 分解试品, 查找原因, 特别是要细心查看所有绝缘件, 若绝缘件上出现闪络或击穿则必须更换, 重新组装试品, 连接试验设备, 再次做试验。显然会严重影响试品试验进度与研制计划, 增加试品成本、试验费用和人力投入, 最重要的是对雷电试验设备本体也有一定的伤害。

因研制的550 kV GIL在雷电冲击试验中出现过冲, 为找出过冲原因和给出解决方案, 本文从雷电冲击试验原理、设备特性与负载影响等多方面综合分析, 找出过冲机理, 并利用Matlab/Simulink仿真验证。最后针对GIL试品给出雷电解决方案, 成功通过了雷电试验。

本文研究对同类超特高压输电设备有效开展雷电冲击试验有一定的借鉴作用。

1 雷电过冲问题提出

GB/T 11022—2011中4.3节表2规定: 550 kV电力设备雷电冲击耐受电压试验电压为 $\pm 1\ 675\text{ kV}$; GB/T 16927.1—2011中7.3.1.2节规定: 正负极性试验各15次, 无击穿。这对试品的绝缘性能是一个非常严格的考验。雷电试验的加载电压通常按照一定的比例逐渐增加, 如按50%、75%、90%和100%, 目的是通过每一次加载后观察波形及其参数是否满足标准要求, 进行适当设备调整或参数修改, 尽可能使得在100%加载时输出波形符合标准, 同时确保不会出现较大过冲伤害试品。这种试验操作, 人为因



周振华/工程师

关键词/Keywords

雷电试验·
冲击发生器·
过冲·
仿真·

素占主导,不确定性很大,易造成过冲。当然也不排除试品自身的原因造成过冲。

研制的GIL样机模型,如图1所示。雷电试验过程中,加载电压达1 675 kV的90%之前都比较正常,但加载100%后波形显示加载电压为1 834.28 kV,试验要求电压为1 675 kV,相对过冲幅值为8.68%。试品外部出现放电,试验失败。查找原因,发现试品内部一个盆式绝缘子表面存在闪络,如图2所示。



图1 GIL样机模型



图2 盆式绝缘子表面闪络

因每个绝缘件有出厂试验,试品绝缘设计裕度已充分考虑,排除绝缘件和设计因素,不排除本次雷电试验情形应该是过冲所致。为避免再次出现类似情形,首先要了解雷电试验原理及其设备冲击电压发生器。

2 冲击电压发生器工作原理

冲击电压发生器是利用高压电容通过球隙对电阻电容回路放电来产生雷电冲击电压^[2]。

由于受整流设备和电容额定电压的限制,单

级冲击发生器的最高电压一般不超过200~300 kV。如需更高的冲击电压,采用多级冲击电压发生器,结构如图3所示。

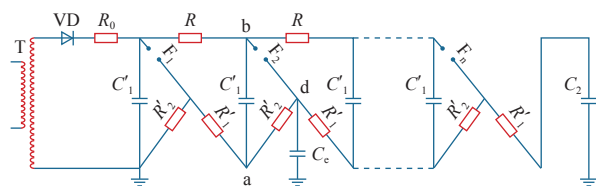


图3 高效率多级冲击发生器电路图

工作原理是利用多级电容器并联充电,然后通过球隙串联放电,从而产生高幅值的冲击电压,其等效冲击发生器常用回路如图4所示。

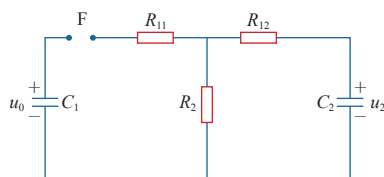


图4 冲击发生器常用回路

图4中, R_{11} 为阻尼电阻,主要用来阻尼回路中寄生的振荡; R_{12} 为波前电阻,主要用来调节波前时间。

3 雷电过冲分析与措施

3.1 雷电冲击试验波形

高电压实验室进行雷电冲击耐受电压试验,主要设备是冲击电压发生器,其输出波形的控制和改进一直是高电压试验技术领域的重点、难点问题之一。

雷电冲击波形定义^[3]如图5所示。图5中: t_f 为波前时间; O_1 为视在原点; P 为峰值处; A 为30%峰值点; B 为90%峰值点; Q 为半峰值点; t_r 为半峰值时间。GB/T 16927.1—2011对雷电波波形进行了规定:峰值容差为基准曲线最大值 U_0 的 $\pm 3\%$,本试验即 $1\,675\text{ kV} \pm 3\%$ ($1\,624.75 \sim 1\,725.25\text{ kV}$),波前时间 $1.2\text{ }\mu\text{s} \pm 30\%$ ($0.84 \sim 1.56\text{ }\mu\text{s}$),半峰值时间 $50\text{ }\mu\text{s} \pm 20\%$ ($40 \sim 60\text{ }\mu\text{s}$),相对过冲幅值不超过10%。因试品电压等级和电容量比较大时,试验电路容易与试品回路中的电感产生谐振,导致雷电

过冲超出标准规定，无形中增加了对试品绝缘性能的考核强度，同时也非常容易破坏绝缘件。随着超特高压输电技术和输电设备的快速发展，对冲击发生器的输出能力和控制要求越来越高。

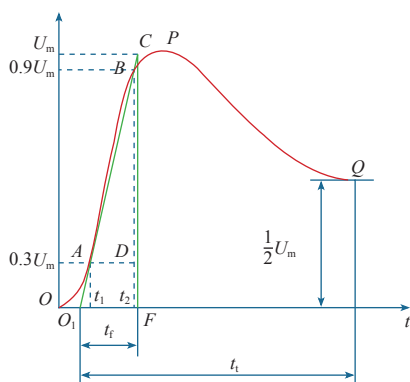


图5 雷电冲击波形定义

3.2 建立电路模型

根据雷电冲击试验实际电路，利用Matlab/Simulink建立4 800 kV/480 kJ冲击发生器放电回路电路模型^[4-7]，如图6所示，可知影响雷电冲击试验输出波形的主要因素有设备本体电感、试验回路中连接导线电感、波头电阻、波尾电阻和试品负载等。

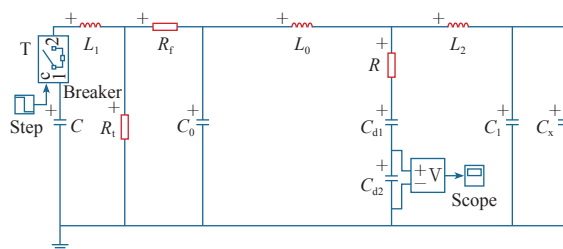


图6 雷电冲击试验放电回路电路模型

图6中，C为冲击发生器主电容；T为断路器； L_1 为本体固有电感； R_f 为波前电阻； R_t 为波尾电阻； L_0 为冲击电压发生器与分压器间的高压引线电感； C_0 为本体杂散电容； R 、 C_{d1} 和 C_{d2} 为弱阻尼电容分压器； L_2 为外接引线电感； C_1 为外接高压引线对地杂散电容及试品对地杂散电容； C_x 为试品电容量；Scope为模拟示波器。

根据GIL试验与相关文献[4-7]，确定模型中各参数值：主电容电容量0.041 7 μF （电压设为 u_0 ）； L_1 电感量为116.3 μH ； R_f 电阻值为188.3 Ω ； R_t 电

阻值为1 560 Ω ； L_0 电感量约为1 μH ； C_0 电容量为379.66 pF； R 电阻值为384 Ω ； C_{d1} 电容量为340.3 pF； C_{d2} 电容量为0.947 μF ； L_2 电感量为22 μH ； C_1 电容量为140.688 pF；试品电容量 C_x 设为1 355.75 pF（GIL样机总长度25 m，电容按54.23 pF单相/m计算），仿真结果如图7所示，试验结果如图8所示。

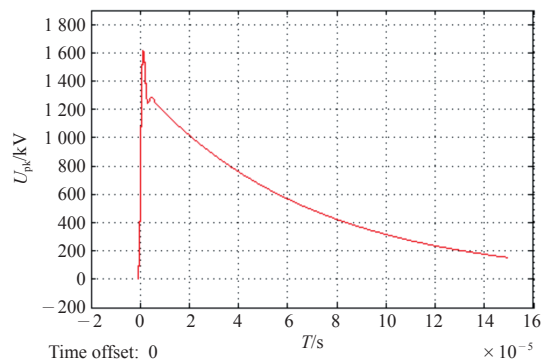


图7 GIL仿真波形

通过GIL仿真波形与试验波形比较，可推断图6建立的雷电冲击试验电路模型是正确的。

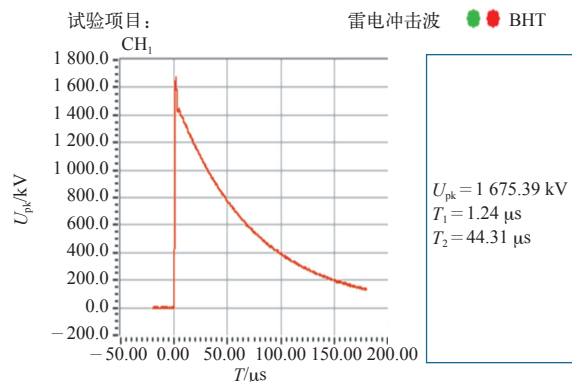


图8 GIL试验波形

3.3 雷电过冲原因分析

(1) 根据试验设备特性分析

根据上文表述， R_f 与 R_t 为调波电阻，首先着重研究 R_f 、 R_t 对波形的影响^[8]。当试验回路中没有接入试品时，建立空载电路模型，如图9所示。

根据图9的电路，假定 R_f 不变， R_t 变化和 R_t 不变， R_f 变化两种条件下进行仿真分析，结果分别如图10和图11所示。

通过分析： R_t 主要影响波形的下降部分，越大

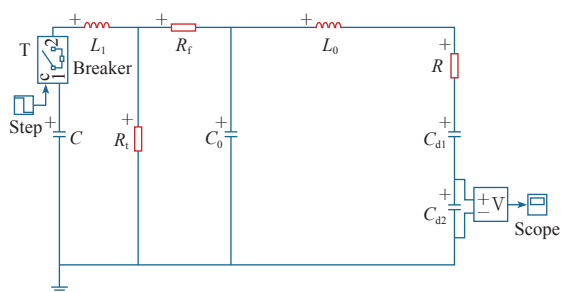
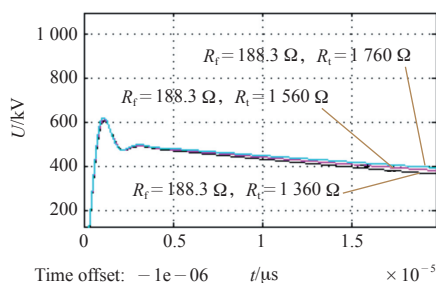
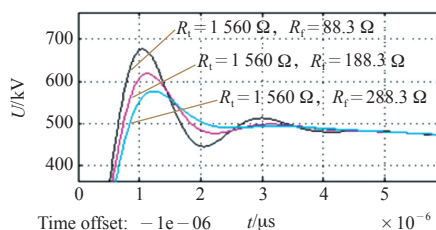


图9 空载电路模型

图10 R_f 不变, R_f 变化仿真波形比较图11 R_f 不变, R_f 变化仿真波形比较

则半峰值时间越长, 但能小幅度提高冲击效率; R_f 主要影响波形的上升部分, 越大则波前时间越长, 却能大幅度地降低冲击效率。显然, 当负载在试验设备试验能力范围内, 通过调整波前、波尾电阻值能够使雷电输出波形满足标准规定的波前时间和半峰值时间。

(2) 根据试品特性分析

试品特性方面, 主要考虑负载大小对波形输出的影响^[9]。GIL外壳与导体通过绝缘件支撑绝缘隔开, 在进行雷电冲击试验时样机在电路中相当于一个大容量电容(见图1)。根据图6的模型, 对试品电容量 C_x (即试品负载)在1 000~5 000 pF范围内进行仿真研究, 要求加载电压峰值为1 675 kV。假定不同负载下, 仅调节波前、波尾电阻使得波形需满足波前时间 $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ ($0.84 \sim 1.56 \mu\text{s}$), 半峰值时间 $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ ($40 \sim 60 \mu\text{s}$), 考察波形峰值与目标峰值1 675 kV的容差。

表1数据分析可知, 当负载电容量超过3 050 pF时, 相对过冲幅值已接近标准中10%的规定, 负载继续增大输出波形将不再满足标准要求。

表1 调节 R_f 、 R_f 在保证波形条件下的峰值过冲分析

负载 / pF	R_f / Ω	R_f / Ω	$t_f / \mu\text{s}$	$t_f / \mu\text{s}$	仿真 / kV	与标准1 675 kV容差 (%)
1 000	336.5	1 560	1.075	46	1 675	0
2 000	263.8	1 800	1.44	50	1 675	0
3 000	176.3	2 200	1.55	55	1 797	6.79
3 050	156.3	2 350	1.56	54	1 860	9.95
3 080	146.3	2 400	1.56	53.5	1 885	11
3 200	126.3	2 500	1.56	49.8	1 978	15

(3) 外接引线 L_2 的影响

如表2所示, 电路模型参数设置除下表参数外同上。

表2 调节 L_2 在保证波形条件下的峰值过冲分析

长度/m	R_f / Ω	R_f / Ω	$t_f / \mu\text{s}$	$t_f / \mu\text{s}$	仿真/kV	容差(%)
15	298.9	1 560	1.36	44.6	1 675	0
20	298.9	1 560	1.365	43.36	1 682	0.004
25	298.9	1 560	1.375	43.14	1 687	0.007

注: 高压引线通常 $\geq 15 \text{ m}$, 按经验值每米约 $1 \mu\text{H}$ 计算。表2中数据分析可知, 随着外接引线 L_2 长度的增加, 波前时间有小幅度增大, 半峰值时间相应减小, 但会引起微小幅度的电压峰值过冲。

3.4 解决方法

结合上文分析和有关文献, 当试品负载超过约3 050 pF后, 波形在满足波前和波尾时间的前提下, 过冲将超过峰值电压的10%, 波形难以满足标准要求。如果不能更改试品设计或者将试品分段试验, 则需要从设备自身找解决方案。有文献表明^[4-7], 因常规冲击电压发生器的试验能力有局限性, 针对日益增多的高电压等级大电容量试品, 有建议在试验回路中增加一个阻容滤波结构, 该结构由电容 C_c 与电阻 R_c 并联后与试品 C_x 共同组成阻容滤波电路, 能够有效抑制雷电过冲, 如图12所示。

根据如图12所示电路, 对试品负载超过3 080 pF进行仿真, 如表3所示。

表3数据分析可知, 采用阻容滤波结构后, 负载电容量在5 000 pF范围内, 输出波形能够满足波

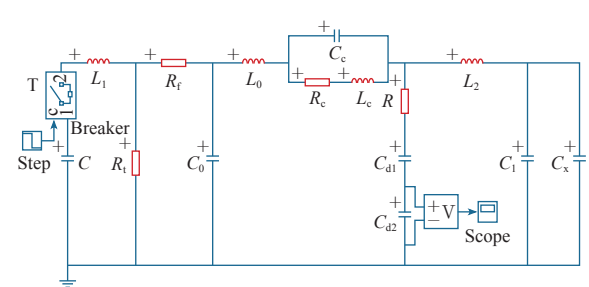


图12 增加阻容滤波的雷电冲击试验电路模型

表3 在保证波形条件下的抑制回路的仿真

负载/pF	R_f/Ω	R_c/Ω	$t_1/\mu s$	$t_2/\mu s$	仿真/kV	容差(%)	备注
3 200	126.3	2 500	1.56	49.8	1 978	15	无滤波结构
3 200	96.3	1 560	0.92	43.6	1 675	0	有滤波结构
							$C_c = 2\,500\text{ pF}$
							$R_c = 82.3\ \Omega$
5 000	96.3	2 080	1.12	55.69	1 675	0	有滤波结构
							$C_c = 15\,000\text{ pF}$
							$R_c = 84\ \Omega$

形要求，大于5 000 pF需另行验证。

4 试验

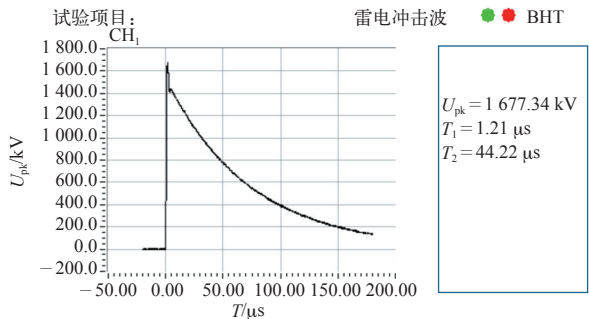
通过上文对雷电试验的研究，试品在初设计时就应结合试验进行设计。针对4 800 kV/480 kJ冲击发生器进行雷电冲击试验，当负载电容量在3 050 pF以内时，可以通过调波电阻实现满足标准的波形；当超过3 050 pF时，如果试验机构没有采用阻容滤波部件，则需考虑试品分段试验，以减少负载过大带来的峰值过冲。

在实际试验中，试验机构操作人员往往凭经验调整调波电阻，人为因素显然易造成过冲。为尽可能地避免过冲，在试验前利用软件仿真，获取能够满足波形标准要求的波前、波尾电阻值，再应用到实际试验设备调整中，确保有效试验。本项目设计的GIL试品电容总量为1 355.75 pF，不需要采用抑制措施，可直接采用图6模型仿真，结果如表4和图13所示。

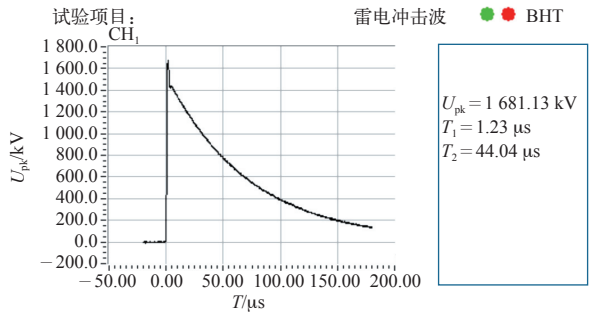
表4中数据分析可知，通过仿真指导试验，不失为一种控制因人为因素而导致过冲的有效途径，能够缩短设备调试时间。

表4 通过仿真确定 R_f 、 R_c 应用到GIL雷电试验中的数据比较

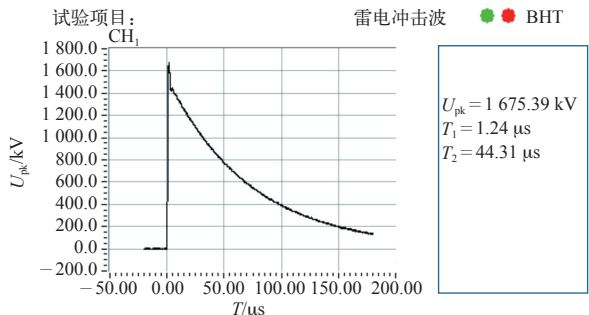
负载/pF	R_f/Ω	R_c/Ω	$t_1/\mu s$	$t_2/\mu s$	仿真/kV	容差(%)	备注
1 355.75	297.3	1 560	1.265	44.30	0	0	仿真见图8
1 355.75	297.3	1 560	1.21	44.22	1 677.34	0.14	试验 见图13
1 355.75	297.3	1 560	1.23	44.04	1 681.13	0.36	
1 355.75	297.3	1 560	1.24	44.31	1 675.39	0.23	
1 355.75	297.3	1 560	1.25	43.70	1 687.53	0.74	



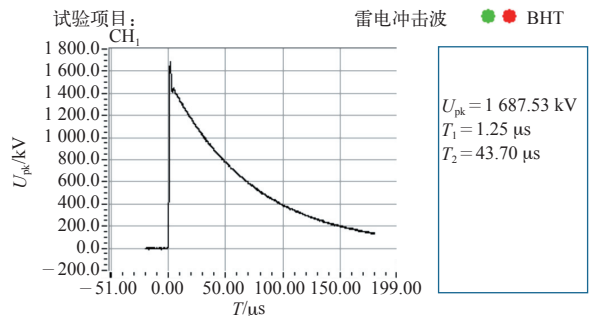
备注：北京华天机电研究所有限公司001



备注：北京华天机电研究所有限公司001



备注：北京华天机电研究所有限公司001



备注：北京华天机电研究所有限公司001

图13 GIL试验波形

5 结束语

本文主要研究了GIL试品雷电冲击试验,建立了冲击发生器放电回路模型,基于理论通过仿真分析确定影响波形的主要因素和次要因素。最后针对GIL试品给出了试验方案,使得雷电试验顺利通过。

波前电阻 R_f 主要影响波形的下降部分,越大则半峰值时间越长,但能小幅度提高冲击效率。

波尾电阻 R_r 主要影响波形的上升部分,越大则波前时间越长,却能大幅度的降低冲击效率。

随着外接引线 L_2 长度的增加,波前时间有小幅度的增大,半峰值时间相应减小,会引起微小幅度的电压峰值过冲,但影响程度不大。

当负载电容量在3 050 pF以内时,可以通过调波电阻实现满足标准的波形;当超过3 050 pF小于5 000 pF时,试验设备需采用过冲抑制结构,如果试验机构没有采用阻容滤波结构,则需考虑将试品分段试验,以减少负载过大带来的峰值过冲。

通过本文研究也可逆向指导设计产品,比如本项目研制的550 kV GIL技术要求每米电容量不大于60 pF,按照4 800 kV/480 kJ冲击发生器常规试验能力,试品电容量不超过3 050 pF,则当产品设计正确的前提下,GIL总设计长度不超过50.83 m,都能进行雷电耐压冲击试验,并且波形能够满足标准要求。

参考文献

- [1] 阮全荣,谢小平. 气体绝缘金属封闭母线输电线路工程设计研究与实践 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2011:32-35.
- [2] 张红. 高电压技术 [M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2009:93-96.
- [3] GBT 16927.1—2011 高电压试验技术 第1部分:一般定义及试验要求 [S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [4] 申萌,钟磊,陆建挺,等. 标准雷电冲击电压过冲抑制回路的仿真及试验研究 [C]. 电工测试技术学术交流论文集,2012:259-266.
- [5] 钟磊,申萌,李华良,等. 限制特高压开关设备雷电冲击过冲的试验回路开发 [J]. 高压电器,2014,50(10):20-30.
- [6] 王浩洋,孙伟,傅正财,等. 负荷对冲击电压发生器输出能力的影响研究 [J]. 高压电器,2009,45(5):92-95.
- [7] 王浩洋,孙伟,傅正财,等. 负荷对冲击电压发生器输出能力的影响研究 [J]. 高压电器,2009,45(5):92-95.
- [8] 宣耀伟,乐彦杰,张娜飞,等. 雷电冲击试验冲击电压发生器调波电阻的确定 [J]. 机电工程,2014,50(10):388-392.
- [9] 王浩洋. 冲击电压发生器的同步和特殊负载下的输出特性研究 [D]. 上海:上海交通大学,2009.

(收稿日期:2015-05-21) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告