

# PTS 装置分层真空轴向绝缘堆设计\*

王 勤, 关永超, 宋盛义, 夏明鹤, 计 策,  
刘其能, 邹文康, 杨 尊, 谢卫平

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 对 PTS 装置分层真空轴向绝缘堆的设计和分析方法进行了研究。利用全电路模拟方法得到了绝缘堆各层的电压波形。利用静电场数值模拟方法,对每层堆中的绝缘环、电极环、均压环、场调整环以及两端接口部分的形状都进行了设计和优化。2 维和 3 维静电场模拟结果表明,绝缘堆的设计能够满足静电场设计要求。采用 2 维 PIC 程序初步计算了绝缘堆金属均压环真空侧电子发射对电压分配不均压度的影响,计算结果表明,真空侧的电子发射会较大地影响绝缘堆电压分配的均匀度,进而对绝缘堆的全堆闪络概率造成较大的影响。

**关键词:** 真空轴向绝缘堆; 全电路模拟; 静电场数值模拟; 粒子模拟

**中图分类号:** TL503.3      **文献标志码:** A      **doi:** 10.3788/HPLPB20102204.0777

PTS 装置是一台多路汇流的大电流装置,设计目标是在等效阻抗为  $0.16 \Omega$  的感性负载上获得幅度  $8 \sim 10$  MA、脉冲上升沿小于  $90 \text{ ns}$  的大电流脉冲,用于开展金属丝阵或其它负载的 Z 箍缩物理实验。该装置由 4 个大的部分构成:外围圆周均匀分布的 12 个独立油箱及内部 Marx 发生器,24 路(分上下两层)同轴结构的中间储能器、激光触发主开关和脉冲形成线,公用水池及内部 12 路独立的三板传输线,中间的真空区(包括绝缘堆、磁绝缘传输线和负载)。分层真空轴向绝缘堆是 PTS 装置的关键部件之一,结构上是装置中水和真空的分界面,电路上实现了多路脉冲大电流的汇聚,电气上是脉冲高压的绝缘支撑结构。绝缘堆的设计主要考虑以下几个方面:真空区的电感,绝缘堆的电压、电场强度和电压分配均匀度,内部磁绝缘传输线和外部水介质三板线的连接以及加工和维护的需求等。本文基于静电场数值模拟方法,对绝缘堆结构进行了详细设计和优化,并利用 2 维 PIC 方法初步计算了绝缘堆金属均压环真空侧电子发射对电压分配不均匀度的影响。

## 1 绝缘堆结构设计

PTS 装置绝缘堆的最大直径(与三板线连接)约为  $3.3 \text{ m}$ ,总高度约  $1.6 \text{ m}$ 。整个绝缘堆由 A,B,C,D 四层组成,每层包括 6 个绝缘环和 5 个均压环,其中中间均压环为电场位形调整均压环,用于调整模块内部的电压分配均匀度。PTS 装置绝缘堆的结构如图 1 所示。

在实际的结构设计中,绝缘堆采用以下尺寸参数:绝缘环的最大外径约为  $\phi 280 \text{ cm}$ ,最小内径为  $\phi 260 \text{ cm}$ ,每个绝缘环厚度约为  $5 \text{ cm}$ ,均压环厚度为  $0.8 \text{ cm}$ ,则绝缘堆每层的总高约为  $35 \text{ cm}$ 。若按  $3 \text{ MV}$  工作电压计算,实际平均工作场强约为  $95 \text{ kV/cm}$ 。该工作场强水平与美国 Sandia 实验室的 PBFA-II (约  $110 \text{ kV/cm}$ ),Saturn(小于  $120 \text{ kV/cm}$ )和 Z 装置(约  $90 \text{ kV/cm}$ )基本相当<sup>[1-3]</sup>。

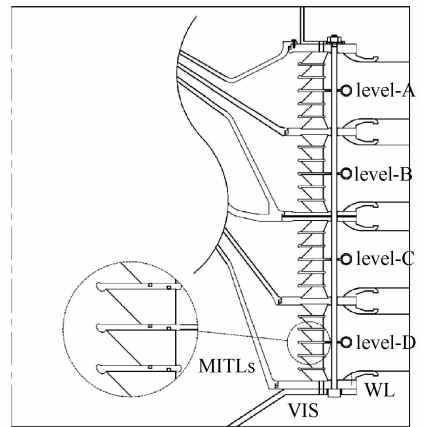


Fig. 1 PTS vacuum insulator stack

图 1 PTS 装置真空绝缘堆

## 2 分析及结果

### 2.1 全电路模拟

采用无损传输线模型进行分析,同时结合单路样机(即 PTS 装置中的一路)的实验结果,可以得到 PTS 装置的 Marx 发生器、中间储能器、激光触发主开关、脉冲形成线、水介质自击穿开关、三板传输线、板/堆过渡区、绝缘堆、磁绝缘传输线、负载等各部分的等效电路模型,再根据

\* 收稿日期:2009-11-10; 修订日期:2010-02-05

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50937004);中国工程物理研究院科学技术发展基金项目(2008A0402015)

作者简介:王 勤(1975-),男,副研究员,博士,长期从事脉冲功率与高压绝缘技术研究;caepifp108wm@163.com。

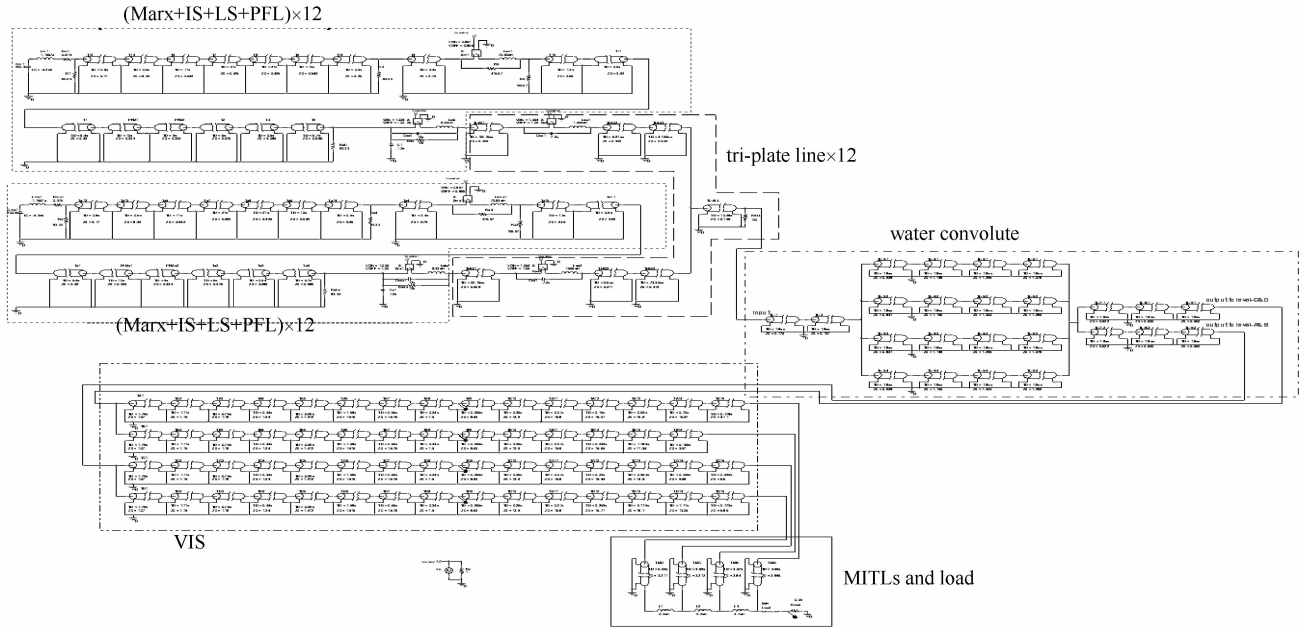


Fig. 2 Diagram of PTS circuit  
图 2 PTS 装置全电路模型

PTS 装置的实际连接方式,可以得到如图 2 所示的 PTS 装置全电路模型。

将介质自击穿开关的导通电压设定为 3.2 MV,在 Marx 发生器充电 70 kV(即输出 4.2 MV)时,可以得到如图 3 所示的绝缘堆电压波形,此时,负载上的电流幅度为 10.27 MA、上升沿约为 62 ns。

### 2.2 静电场数值模拟

在绝缘堆的静电场设计中,要求:均压环真空侧的表面电场法向分量小于 260 kV/cm,水侧的表面电场法向分量小于 200 kV/cm;阴极三相点场强小于 30 kV/cm;绝缘环间电压分配均匀度小于 10%<sup>[4]</sup>。上述要求需要通过优化绝缘环和均压环的数量和外形轮廓以及磁绝缘传输线和板/堆过渡区的结构进行多次优化和计算后才能实现。图 4 给出了最终优化设计后的计算模型。

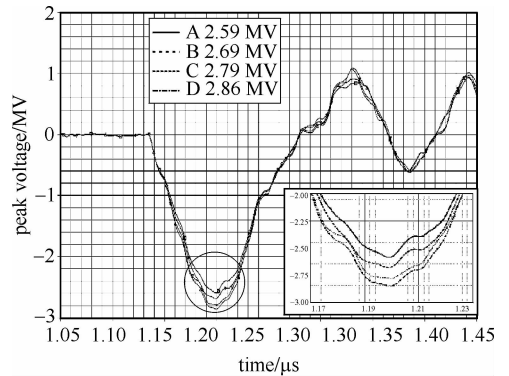


Fig. 3 Stack voltage predictions

图 3 计算得到的绝缘堆各层的电压波形

计算得到了绝缘堆各层的电压分配均匀度和关键部位的峰值场强,如表 1 和表 2 所示。在计算峰值场强

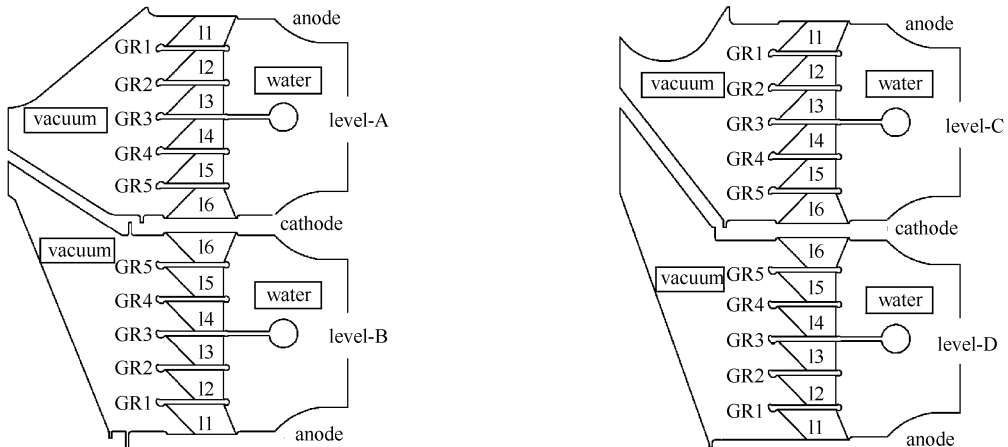


Fig. 4 Simulation models of level A~D

图 4 绝缘堆各层的计算模型

表 1 绝缘堆电压分配不均压度计算结果

Table 1 Grading summary of each level

insulator ring	variation/%			
	level-A, $V_{a-k}=2.59$ MV	level-B, $V_{a-k}=2.69$ MV	level-C, $V_{a-k}=2.79$ MV	level-D, $V_{a-k}=2.86$ MV
I1	2.4	2.0	2.8	2.1
I2	-1.7	-2.1	-1.6	-2.1
I3	-0.8	-0.7	-1.0	-0.7
I4	-0.9	-1.5	-0.7	-1.5
I5	-1.7	-1.3	-1.8	-1.4
I6	2.7	3.6	2.3	3.6

表 2 绝缘堆的峰值场强

Table 2 Peak field summary

VIS rings	level-A, $V_{a-k}=2.59$ MV			level-B, $V_{a-k}=2.69$ MV		
	$E_n/(kV \cdot cm^{-1})$		$E_t/(kV \cdot cm^{-1})$	$E_n/(kV \cdot cm^{-1})$		$E_t/(kV \cdot cm^{-1})$
	vacuum side	water side	CTP	vacuum side	water side	CTP
I1	—	—	8.80	—	—	6.82
GR1	173.2	115.1	—	174.2	120.1	—
I2	—	—	9.80	—	—	7.01
GR2	156.9	136.8	—	190.9	152.0	—
I3	—	—	9.44	—	—	9.13
GR3	162.7	174.1	—	203.4	179.2	—
I4	—	—	7.00	—	—	7.36
GR4	182.0	137.8	—	203.8	151.3	—
I5	—	—	8.55	—	—	7.01
GR5	204.8	129.7	—	184.7	119.5	—
I6	—	—	2.50	—	—	2.79

VIS rings	level-C, $V_{a-k}=2.79$ MV			level-D, $V_{a-k}=2.86$ MV		
	$E_n/(kV \cdot cm^{-1})$		$E_t/(kV \cdot cm^{-1})$	$E_n/(kV \cdot cm^{-1})$		$E_t/(kV \cdot cm^{-1})$
	vacuum side	water side	CTP	vacuum side	water side	CTP
I1	—	—	10.10	—	—	8.75
GR1	165.1	123.9	—	169.3	142.6	—
I2	—	—	9.12	—	—	8.68
GR2	193.7	162.8	—	192.4	150.8	—
I3	—	—	8.54	—	—	11.90
GR3	227.4	187.7	—	210.4	191.3	—
I4	—	—	8.54	—	—	9.09
GR4	238.1	155.8	—	208.7	151.6	—
I5	—	—	8.47	—	—	8.75
GR5	238.0	124.2	—	188.5	144.5	—
I6	—	—	2.69	—	—	2.95

时,采用的是通过全电路模拟得到的绝缘堆各层的电压峰值。从表 1 和表 2 的结果可以看出,设计的 PTS 绝缘堆结构能够满足静电场设计的要求。

在 2 维静电场数值模拟的基础上,进行了 3 维静电场数值模拟校验,目的是考察绝缘堆的非旋转对称结构(外围绝缘拉杆以及内部磁绝缘传输线电极上狭缝)对电压分配均匀度的影响,如图 5 所示。

表 3 给出了计算得到的绝缘堆模块 A 的 2 维和 3 维模型电压分配均匀度对比。从表 3 可以看出,2 维的计算结果和考虑了非旋转对称结构后的 3 维计算结

表 3 2 维和 3 维模型电压分配均匀度对比

Table 3 Summary of 2-D and 3-D simulation results of voltage variation

insulator ring	variation/%	
	level-A, $V_{a-k}=2.59$ MV	
	2-D	3-D
I1	2.4	2.6
I2	-1.7	-1.6
I3	-0.8	-1.0
I4	-0.9	-1.0
I5	-1.7	-1.6
I6	2.7	2.6

果并没有太大的差别。

### 2.3 PIC 初步计算

进行 PIC 计算的目的是为了考察均压环端部电子发射对绝缘堆中绝缘环电压分配均匀度的影响,进而对全堆闪络概率的影响<sup>[5]</sup>。本文进行的 PIC 计算考虑的是 2 维情况,且只计算了绝缘堆 A 层的结构。利用 MAGIC 程序,建立绝缘堆 A 层的计算模型。图 6 给出了计算模型在  $t=0$  和  $t=100$  ns 两个时刻的电子发射情况。图中 I1~I6 为绝缘堆 A 层中不同绝缘环的编号。为了便于进行定性分析,设定均压环端部的电子发射阈值为  $100$  kV/cm,即:均压环端部表面场强大于  $100$  kV/cm 时就会出现电子发射。

图 7 中, I1~I6 分别对应图 6 中绝缘堆 A 层的 6 个绝缘环。从图 7 可以看出,在  $t \approx 30$  ns 时刻,由于绝缘堆 A 层电压的升高,均压环端部场强超过了设定的场发射阈值,此时开始出现电子发射。由于电子发射的影响,绝缘环电压分配均匀度发生了较大的变化,总的趋势是:随着电子发射的加剧,绝缘环 6 的电压逐渐增大,可以达到没有电子发射情况下的 1.4 倍左右。

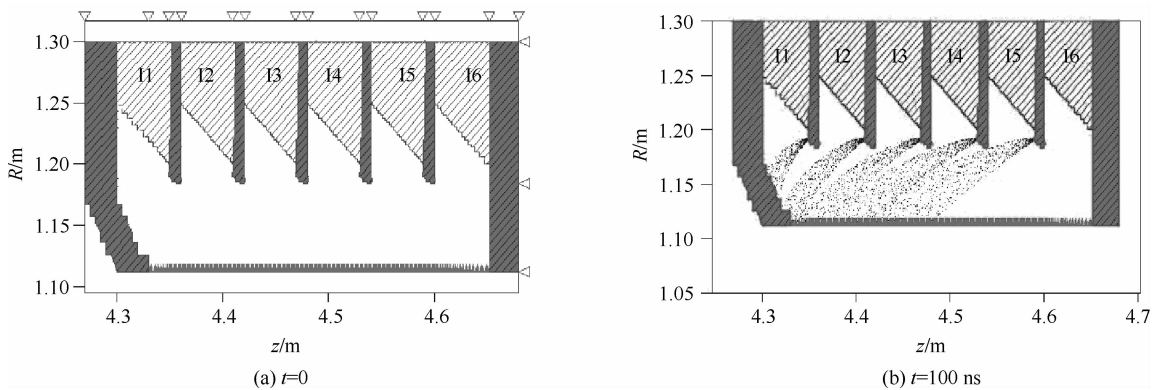


Fig. 6 Electron emission in insulator stack level-A

图 6 绝缘堆模块 A 的电子发射情况

由此得到以下结论:(1)均压环真空侧端部的电子发射将极大地影响绝缘环的电压分配均匀度,从而进一步影响绝缘堆的全堆闪络概率——使得全堆闪络概率变大;(2)必须控制均压环真空侧端部的场强,使之小于不锈钢表面的真空电子发射阈值(约  $250$  kV/cm),因此,静电场数值模拟中要求均压环端部真空侧法向场分量小于  $260$  kV/cm 的设计准则是十分必要且有效的。

### 3 结 论

本文依据静电场数值模拟方法,设计的 PTS 绝缘堆的静电场计算结果如下:均压环真空侧的表面电场法向分量小于  $238.1$  kV/cm、水侧的表面电场法向分量小于  $191.3$  kV/cm;阴极三相点场强小于  $11.9$  kV/cm;绝缘环间电压分配均匀度小于  $3.6\%$ 。满足静电场设计准则要求。

3 维静电场数值模拟校验的结果显示,非旋转对称结构对绝缘堆电压分配均匀度的影响很小。由于均压环端部电子发射的影响,绝缘堆一个模块中各绝缘环的电压分配均匀度可以从小于  $3.6\%$  增大到约  $40.0\%$ 。这种电压分配均匀度的剧烈变化会使得绝缘堆的全堆闪络概率急剧增大<sup>[6]</sup>,可能导致绝缘堆的闪络。

### 参考文献:

- [1] Cook D L, Members of PBFA II Project Team. Status of PBFA II engineering[C]//4th IEEE International Pulsed Power Conf. 1983:11-14.
- [2] Bloomquist D D, Stinnett R W, McDaniel D H, et al. Saturn, a large area X-ray simulation accelerator[C]//6th IEEE International Pulsed

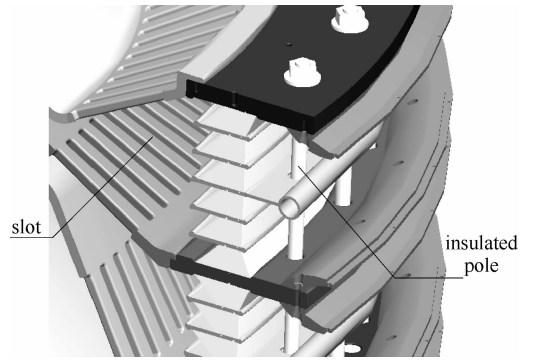


Fig. 5 Non-central symmetry structures of VIS

图 5 绝缘堆的非旋转对称结构

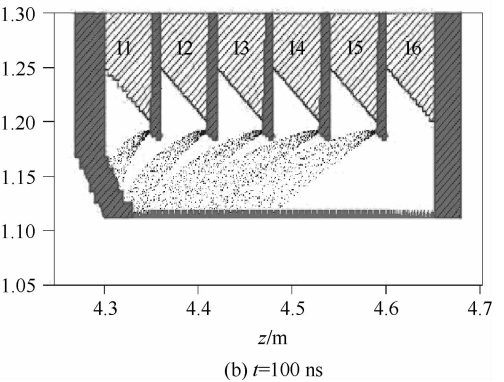


Fig. 7 Voltage variation of each insulator vs time

图 7 绝缘堆模块 A 各绝缘环电压分配随时间的变化

Power Conf. 1987;310-317.

- [3] Smith I D, Corcoran P A. Design criteria for the Z vacuum insulator stack[C]//11th IEEE International Pulsed Power Conf. 1997;168-176.
- [4] Shoup R W, Long F, Martin T H, et al. Design validation of the PBFA-Z vacuum insulator stack[C]//11th IEEE International Pulsed Power Conf. 1997;1608-1613.
- [5] Mostrom M A, Hughes T P, Clark R E, et al. IVORY PIC simulations of the Z insulator stack[C]//11th IEEE International Pulsed Power Conf. 1997;460-465.
- [6] 王 勳, 丁伯南, 谢卫平. 多层长渡越时间轴向绝缘堆的闪络概率分析[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(7):934-938. (Wang Meng, Ding Bonan, Xie Weiping. Design and analysis methods of vacuum insulator stack of Z-pinch device. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(7):934-938.)

## Design of PTS vacuum insulator stack

Wang Meng, Guan Yongchao, Song Shengyi, Xia Minghe, Ji Ce,

Liu Qineng, Zou Wenkang, Yang Zun, Xie Weiping

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621900, China*)

**Abstract:** The design and analysis method of PTS vacuum insulator stack are presented. The voltage waveforms of each level are obtained by full circuit simulation. The shapes of the components (grading rings, insulator rings, anode and cathode conductors) in each level and the design of the water and MITLs interfaces, were optimized by the electrostatic analysis code. The 3-D and 2-D voltage variation of each insulator of level-A is compared, and the difference is neglectable. The time-dependent performance of insulator stack was evaluated using 2-D PIC code. The voltage variation change caused by electron emission on vacuum side of grading rings is serious, and can greatly affect the whole stack flashover probability.

**Key words:** vacuum insulator stack; circuit simulation; electrostatic analysis; particle-in-cell simulation