

文章编号: 0258-7025(2005)07-0894-05

桌面毛细管快放电 X 射线实验装置 电压测量系统的研究

黄东海¹, Kim Dong-Eon²

(¹ 华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021; ² 韩国浦项科技大学, 韩国 浦项 790-784)

摘要 桌面毛细管快放电 X 射线激光实验装置, 是研究高压大电流放电直接激励 X 射线激光放大技术的快脉冲发生器。其特点是电压高、电流大、脉冲陡、干扰强、空间小。常规绝缘结构的高压无感电阻测量系统难以满足其高电压脉冲测量的要求。研究了一种新型绝缘结构高压无感电阻电压测量传感器及两级分压测量系统, 介绍了传感器的绝缘结构原理、测量系统的组成以及高电压测量结果, 并从理论上验证和分析了测量系统的测量结果及相对误差。实验结果表明, 新型绝缘结构高压无感电阻能同时具有较高电位梯度和较小电感的优点, 设计的电压测量系统峰值误差小, 抗干扰能力强, 可以较好地满足毛细管快放电 X 射线激光实验装置中的高电压测量。

关键词 激光技术; 高电压测量; 电压传感器与测量系统; 新型绝缘结构; 高压无感电阻; X 射线激光; 毛细管快放电

中图分类号 TM 835.1; TN 248.2 文献标识码 A

Study on Voltage Measurement System for the Table-Top Capillary Fast Discharge X-Ray Laser Facility

HUANG Dong-hai¹, KIM Dong-Eon²

(¹ College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)
² Pohang University of Science and Technology, Pohang, Kyunbuk 790-784, Republic of Korea)

Abstract Table-top capillary fast discharge X-ray experiment facility is used to study the X-ray laser amplification by directly fast electric pulse excitation of gases. Due to the characteristics of high voltage, large current, fast pulse, strong disturb and small space available, it is difficult to carry out the high voltage pulse measurement in this setup by a general high voltage non-inductance resistor and single grade voltage-division measuring system. A voltage sensor composed of a kind of high-voltage new insulation structure non-inductance resistor by making slots on the surface of an insulating rod and a two-grade voltage-divider measuring system were developed to accomplish the measurement of the high voltage pulse. The principle of insulation structure of the voltage sensor, the measurement system and the experiment results have been introduced, and the error of the measurement system has also been discussed in detail. Application results indicated that the new voltage-sensor has an advantage of higher potential gradient and smaller inductance simultaneously in air dielectric, and the measurement system has a good anti-disturb ability and smaller firstly-peak measuring error.

Key words laser technique; high voltage measurement; voltage sensor and measuring system; new type insulation structure; non-inductance resistor; X-ray laser; capillary fast discharge

1 引 言

桌面毛细管快放电激励 X 射线激光技术, 作为可实现紧凑、高效、简单及实用的软 X 射线激光器

的新途径^[1~5], 是近 20 年来 X 射线激光领域的研究热点之一。其核心是桌面型高压大电流毛细管快放电 X 射线装置^[6]。装置中两个最重要的电气参数为峰值电容器上的脉冲高电压及毛细管放电主电

收稿日期: 2004-09-01; 收到修改稿日期: 2004-11-11

基金项目: 韩国教育部基础科学研究基金 (BSRI-95-2329) 及韩国科学工程基金 (931-0200-022-2) 资助项目。

作者简介: 黄东海 (1966—), 男, 华侨大学副教授, 硕士, 主要从事高电压绝缘技术的研究。E-mail: dhhuang@hqu.edu.cn

流。其中,峰值电容器上的高电压脉冲波形及参数是整个装置工作状态、性能及参数设置的反应,如装置的充电效率、各元器件工作状态、主间隙气压参数、毛细管主电路工作状态及各回路故障等。因此,对它的测量是实验研究中不可缺少的部分。考虑到实验的方便、安全及放电干扰等问题,通常将整个放电装置置于金属圆筒中,以空气为绝缘,尽量提高实验电压。故装置具有高电压、大电流、陡脉冲、强干扰及小空间的工作特点。由于一般绝缘结构的高压无感电阻在空气介质下的电位梯度较小,单级分压器测量系统的分压比不宜太大,因此常规绝缘结构的高压无感电阻及测量系统难于满足装置中高电压脉冲测量的要求。

2 毛细管快放电装置及工作特点

毛细管快放电装置放电回路可等效为主电容器对峰值电容器脉冲充电回路和毛细管 RLC 放电主回路的组合^[6],如图 1 所示。 E 为直流高压电源; R_0 为保护电阻; C_m 为主电容; G_0 为高压火花间隙; R_1 为脉冲充电电阻(或波前电阻); R_2 为吸能及回路电阻; R_3 为毛细管放电时的等效电阻; L_c 为毛细管放电主回路总等效电感; G_1 为毛细管放电主回路火花间隙; C_p 为高压脉冲峰值电容器。

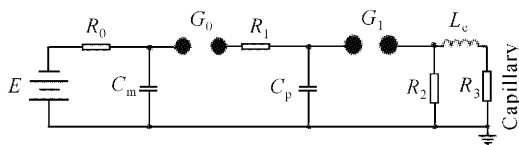


图 1 毛细管快放电装置等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of capillary fast discharge facility

工作时,主电容 C_m 充电后通过火花间隙 G_0 对峰值电容器 C_p 脉冲充电, C_p 上能获得很高的电压值。当 C_p 上的充电电压达到主放电火花间隙 G_1 的击穿电压时, C_p 上的能量通过 G_1 对预电离^[6] 的毛细管放电形成主电流。因放电主回路采用无感高压峰值电容器 C_p 及同轴传输线结构,可得到纳秒级的陡前沿脉冲放电电流。实际构建的装置中, C_m 最大充电电压约 500 kV,充电效率为 87%,主放电火花间隙 G_1 不发生击穿时 C_p 上的电压波为类标准雷冲击波,其波头约为 1.5 μ s;毛细管放电主回路电流为正弦衰减振荡波形,最大值为 100 kA,最小上升时间(负载短路)约 12 ns,整个装置置于高 1.5 m,

直径为 1.6 m 的不锈钢圆筒内。图 2 为用 PSPICE 软件仿真得到的在充电电压为 360 kV 及某一毛细管负载时峰值电容器上的电压及毛细管主电流波形。

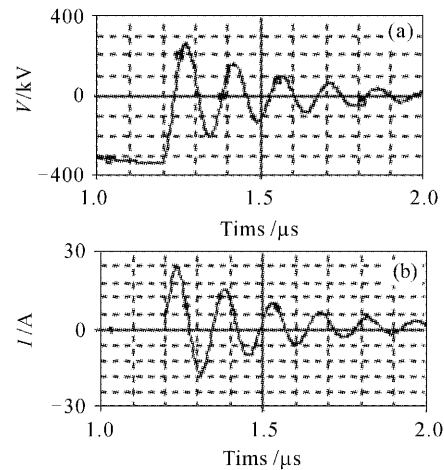


图 2 毛细管主电流及峰值电容器电压 PSPICE 仿真波形

(a) 峰值电容器电压波形;(b) 毛细管主电流波形

Fig. 2 PSPICE simulations for capillary current and peaking capacitor voltage

(a) voltage waveform for peaking capacitor;
(b) capillary current waveform

由此可见,装置具有高电压、大电流及陡脉冲的工作特点,测量峰值电容器电压的传感器必须采用高压无感电阻。根据实际装置可用的物体空间和最低实验电压,测量峰值电容器上电压的高压无感电阻电位梯度不应小于 8 kV/cm。常规绝缘结构的高压无感电阻是将电阻丝采用无感绕法直接绕在圆柱型绝缘支架上。此时,气体沿面放电距离和匝间距离性质不同但数值相等。因此,这种电阻存在小电感和相邻两匝高电位差的矛盾,其空气介质中的电位梯度约 3~5 kV/cm^[7],无法满足装置中的高电压测量。

3 电压测量系统

3.1 电压传感器

在圆柱形绝缘支架表面开槽,将电阻丝绕在槽中,既可以增加匝间沿面放电距离,又可以保证较小的匝间距。利用这种绝缘结构并采用无感绕法的高压电阻可作为毛细管快放电装置中的电压传感器,其绝缘结构如图 3 所示。

图 3(a)为用圆柱形绝缘支架制成的高压电阻

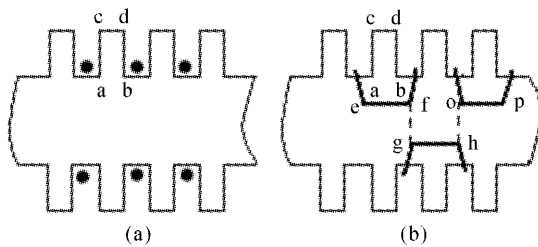


图 3 绝缘结构原理示意图

(a) 绝缘结构; (b) 无感绕法

Fig. 3 Theory diagram for new insulator structure

(a) insulator structure; (b) non-inductance coiling

的绝缘结构剖面图。图中黑圆点代表电阻丝, a, b, c, d 表示槽棱。从图 3(a) 中可知, 电阻丝绕在槽子内底部时, 电阻的残余电感决定于 a, b 两点的垂直距离, 即槽间距。如果固体介质的绝缘有足够的强度而不击穿, 匝间沿面放电距离则是匝间沿槽棱的路程 $ac + cd + db$, 并随槽深的增加而增大。由于沿面放电电压随沿面放电距离的增加而增大, 故可以通过加大槽深(不改变槽间距)来提高电阻单位长度承受的电压-电位梯度, 而不会引起残余电感的增加。

图 3(b) 是无感绕法示意图, 图中黑粗线均代表实际的电阻丝, 线段 ef, gh, op 是在槽棱上所开的切口, 为采用无感绕法电阻丝提供折回通路。为了保证每匝电阻丝在折回处两端及匝间有足够的沿面放电距离, 每相邻两槽棱上的切口均应位于斜对方向(如 ef 和 gh 及 op 和 gh) 并在圆周方向上相隔一定的距离(如 fg 和 oh), 切口的深度应等于槽深。由于相邻两匝在折回处的放电通路有两条: 一是沿槽棱表面方向, 其最短距离就是图 3(b) 中的 $ac + cd + db$; 另一条为图 3(b) 所示沿槽圆周方向的 $gf + oh$ 。由于圆周方向的距离 oh 和 gf 是每匝电阻丝在折点处两端的沿面放电距离, 承受的电压为相邻两匝之间(o, f 两点之间) 受的电压的一半, 故只要使 gf, oh 的长度不小于 $ac + cd + db$ 总长的一半, 并保证相邻两匝不发生沿槽棱表面方向的沿面放电, 那么相邻两匝之间也不会沿槽圆周方向沿 gf 和 oh 途径发生沿面放电。

从理论上来说, 随着开槽深度的增加, 电阻的电位梯度也增加。但是, 由于沿面放电电压与沿面放电距离的非线性特性, 电位梯度的提高也随开槽深度增加呈非线性增加并趋于饱和^[8]。区别于常规绝缘结构的高压无感电阻, 新型的无感电阻实际是通过增加电阻的直径并在直径方向开槽的绝缘结构,

以保持匝间距不变的同时增加匝间沿面放电距离, 从而有效地提高电位梯度而不会增加残余电感。

3.2 测量系统

采用新型绝缘结构的高压无感电阻作第一级分压器, 用高压探头 Tektronix P6015A 作第二级分压器, 以及双层屏蔽电缆和频宽为 100 MHz 数字示波器构成了峰值电容器上高压冲击电压测量系统, 其原理如图 4 所示。

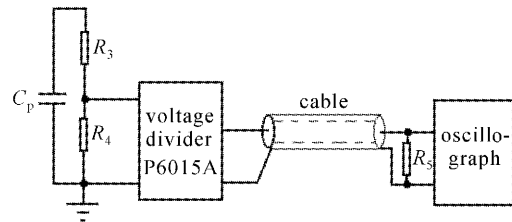


图 4 高压测量系统原理图

Fig. 4 High voltage measurement system

测量系统中, 第一级分压器的高压臂电阻 R_3 置于不锈钢圆筒中, 低压臂 R_4 置于圆筒外并用铁盒屏蔽。由于装置周围还有高压触发电路及高压预电离电路, 为了减少它们的放电高频干扰对测量结果的影响, 信号电缆用双层屏蔽电缆和示波器连接, 电缆末端接有阻抗匹配电阻 R_5 。高压探头 Tektronix P6015A 的上升时间为 4 ns, 频带为 75 MHz, 分压比为 1000:1。测得由第一级分压器单独构成的测量系统方波响应时间 T 约 15 ns。

4 实验结果及分析

4.1 传感器设计及测量结果

根据新型绝缘结构, 实际设计和制作了高压测量系统测量电阻 R_3, R_4 。电阻采用圆柱形聚四氟乙烯作为绝缘支架, 利用精密车床开槽, 采用无感绕法制成, 电阻两极装有均压环, 其绝缘结构尺寸及电阻值如表 1 所示。

在实验条件为毛细管负载时, 用设计的测量电阻及测量系统测量了充电电压为 360 kV 时的峰值电容器电压, 图 5 为峰值电容器 C_p 上的实测电压波形。

从图 5 可知, 测量得到的峰值电容器上的电压波形清楚, 无噪音信息, 测量系统具有较好的抗干扰能力。波形前面的近似斜角波部分为主电容器 C_m 对峰值电容器 C_p 脉冲充电过程; 后面的高频振荡部分为毛细管主放电回路振荡放电引起。第一峰值(负

峰值) 对应着峰值电容器上的充电电压, 波前电阻 R_1 上的电压为第一峰和第二峰之间的峰峰值。根据测量结果、分压器的分压比和各电阻的实际长度可得到测量电阻 R_3, R_4 上的耐受电压峰值和电位梯

度, 数值见表 1。比较图 2(a) 及图 5, 峰值电容器 C_p 上的电压波形及第一峰值数据, 理论计算结果和实测结果符合较好。

表 1 电阻绝缘结构尺寸、实测峰值电压及电位梯度参数

Table 1 Parameters of size and potential gradient for resistors R_3 and R_4

Parameters	R_3	R_4
Type	Measurement	Measurement
Distance between slots /mm	1.5	1.5
Depth of slots /mm	2.0	2.0
Distance between cuts in diameter /mm	3.0	3.0
Diameter /mm	50	50
Length /mm	300	20
Resistance /k Ω	4.85	0.26
Peaking value of withstanding voltage /kV	315	16
Applied waveform during test	Normal lighting wave-like	Normal lighting wave-like
Potential gradient /(kV/cm)	10.5	8.0

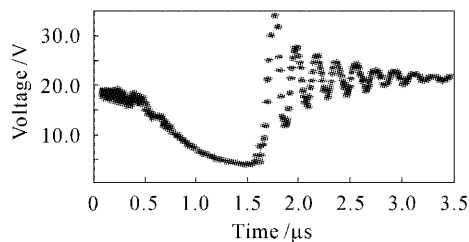


图 5 峰值电容器 C_p 实测的电压波形

Fig. 5 Measured voltage waveform for peaking capacitor

4.2 误差估算及分析

通过杜阿美尔(Duhamel)积分^[9]求解测量系统在 $u_i(t)$ 输入下的响应 $u_o(t)$ 得到

$$u_o(t) = u_i(t)g(0) + \int_0^t u_i(\lambda)g'(t-\lambda)d\lambda. \quad (1)$$

忽略高压探头 Tektronix P6015A 引起的电压测量误差, 认为误差主要由第一级分压器引起。由于毛细管主放电回路电阻很小, 主间隙自击穿后的过程相当于波前截断。在理想的截断下(截断后的输入 $u_i(t)$ 为零), 当测量系统的响应时间 T 远小于截断时间 t_q 时, 测量系统的峰值误差为 T/t_q ^[9]。但毛细管快放电装置的放电过程为截断后的高频振荡, 故峰值误差将有所不同。

假定截断前的输入电压为斜角波, R_3, R_4 组成的分压系统为无感 RC 网络, 其归一化阶跃响应为 $g(t) = 1 - \exp(-t/T)$, 主放电间隙在 t_q 时刻击穿, 测量系统的实际输入可写为

$$u_i(t) = \begin{cases} \frac{t}{t_q} & 0 \leq t \leq t_q \\ \frac{U_0\omega_0}{\omega} e^{-\delta(t-t_q)} \sin[\omega(t-t_q) + \beta] & t \geq t_q \end{cases}, \quad (2)$$

$$\text{其中 } \delta = \frac{R}{2L}; \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}; \delta = \omega_0 \cos\beta; \omega =$$

$\omega_0 \sin\beta; \beta = \arctan \frac{\omega}{\delta}; R, L, C$ 及 U_0 分别为毛细管主放电回路中的等效电阻、等效电感、峰值电容器电容及主间隙 G_1 击穿(t_q 时刻)时峰值电容器上的电压。将(2)式代入(1)式可求解各峰值对应的时间、幅值及相对误差。

由于得到的方程为超越方程, 无法求得输出响应的显性表达式, 用数学大师 Mathematica 4 软件^[10]求数值解。根据实际的回路及毛细管负载参数, 取 $R = 0.6 \Omega, C = 1.8 \text{ nF}, L = 300 \text{ nH}$ 。根据图 2 及图 5 所示电压波形, 取截断时刻 $t_q = 1.2 \mu\text{s}$, 计算得到测量系统响应前 3 个峰值(包括正峰值及负峰值)及其相对误差, 数据见表 2 所示。

从表 2 可知, 截断后测量系统输出响应的峰值比对应输入的峰值小并发生相位滞后; 其中第一峰值的相对误差及相移均较小, 相对误差比理想截断下的相对误差($T/t_q = 1.25\%$)还小; 其他峰值的相对误差都较大, 接近 23%, 这主要是因为截断后测量系统的输入为高频振荡波, 它可近似看成不断的正、负截断过程, 各段的截断时间约为高频振荡波周

期的一半(75 ns),这个数值和测量系统响应时间 (15 ns)在同一数量级内。

表 2 测量系统输出响应峰值及误差

Table 2 Voltage peaking values and relative errors for the measurement system

Peaking number	Input voltage $u_i(t)$		Output voltage $u_o(t)$		Relative error /%	T/t_q /%
	Peaking /V	Time / μ s	Peaking /V	Time / μ s		
1	-1	1.20	-0.988921	1.20284	1.1	1.25
2	0.798516	1.26	0.615814	1.27337	22.88	
3	-0.637628	1.32	-0.494193	1.33325	22.49	

由于测量系统输入与输出之间的第一峰值误差及相移很小,实测电压波形的第一峰值可视为峰值电容器上实际的充电电压,其对应的时刻可作为主间隙自击穿时刻。尽管其他峰值电压数据因误差较大仅可作为参考,但有了峰值电容器上实际的充电电压及主间隙自击穿时刻两个关键参数就可以诊断装置各种工作状态及参数设置是否正确等各种信息。因此,研制的测量系统能满足桌面毛细管快放电装置用于 X 射线激光放大实验研究的需要。如果要得到其他峰值电压的实际值,可通过减少测量系统响应时间以减少测量误差或进行误差校正。

从表 1 可知,测量系统的高压臂电阻的电位梯度达 10.5 kV/cm。开槽后相邻两匝间的沿面放电距离从不开槽时的 1.5 mm 增大到开槽后的 5.5 mm,其数值约为原来的 3.6 倍,开槽后电阻的电位梯度约为不开槽后空气中时的 3 倍。当然,上述电位梯度数值并非是这样绝缘结构高压电阻电位梯度的极限值。

5 结 论

针对毛细管快放电装置的高电压、大电流、陡脉冲、强干扰及小空间工作特点,研究了一种在圆柱型绝缘支架表面开槽和切口的新型绝缘结构高压无感电阻作为电压测量传感器以及由它组成的二级高压测量系统。实际的测量和理论分析表明,测量系统第一峰值误差小,抗干扰能力强,测量结果和理论值符合较好,可以较好地满足毛细管快放电 X 射线实验装置的高电压测量及其工作状态的信息诊断。

参 考 文 献

- 1 Hyan-Joon Shin, Dong-Eon Kim, Tong-Nyong Lee. Soft-x-ray amplification in a capillary discharge [J]. *Phys. Rev. E*, 1994, **50**(2):1376~1382
- 2 J. J. Rocca, V. Shlyaptsev, F. G. Tomasel *et al.*. Demonstration of a discharge pumped table-top soft-X-ray laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(16):2192~2195
- 3 C. D. Macchietto, B. R. Benware, J. J. Rocca. Generation of milli joule-level soft-x-ray laser pulses at a 4-Hz repetition rate in a highly saturated tabletop capillary discharge amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(16):1115~1117
- 4 Cheng Yanli, Zhao Yongpeng, Xiao Xifan *et al.*. Experimental investigation on ablation character of capillary discharge [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):536~542
程元丽,赵永蓬,肖亦凡等. 毛细管快放电中的管壁烧蚀[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):536~542
- 5 Li Sining, Cheng Yanli, Zhao Yongpeng *et al.*. Computation and analysis of atomic parameters in Ne-like sequence discharging capillary [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11):1581~1584
李思宁,程元丽,赵永蓬等. 毛细管放电条件下类氖序列原子参量计算与分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11):1581~1584
- 6 Huang Donghai, Lee Kitae, Kim Dongeon. High voltage and large current fast capillary discharge technology and device used to study X-ray laser amplification [J]. *High Voltage Engineering*, 2003, **29**(1):42~44
黄东海,李奇泰,金东彦. 用于研究 X 射线激光的毛细管快放电技术及装置[J]. *高电压技术*, 2003, **29**(1):42~44
- 7 T. J. Gallagher, A. J. Pearmain. *High Voltage Measurement, Testing and Design* [M]. Great Britain: Pitman Press, Bath, 1984. 121
- 8 Zhu Deheng, Yan Zhang. *High Voltage Insulation* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992. 87
朱德恒,严璋. *高电压绝缘* [M]. 北京:清华大学出版社, 1992. 87
- 9 Zhang Renyu, Chen Changyu, Wang Changchang. *High Voltage Testing Technology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 150~161
张仁豫,陈昌渔,王昌长. *高电压试验技术* [M]. 北京:清华大学出版社, 2003. 150~161
- 10 Hong Weien. *Mathematics Operation Master-Mathmatica 4* [M]. Beijing: People Post Press, 2002. 2~164
洪维恩. *数学运算大师 Mathematica 4* [M]. 北京:人民邮电出版社, 2002. 2~164