

环境试验与评价

太阳模拟器大功率短弧氙灯放电特性试验测试

宁娟, 邵静怡, 顾志飞, 刘高同

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: **目的** 增强太阳模拟器氙灯驱动运行的可靠性, 给太阳模拟器研制提供技术保障, 针对太阳模拟器大功率短弧氙灯放电特性进行试验研究。**方法** 设计太阳模拟器的大功率短弧氙灯放电特性测试方法, 然后通过理论计算和实际测试验证氙灯电源初始电流对短弧氙灯放电特性的影响, 并采用增设优化电路的方法对其放电特性进行改善。**结果** 在初始电流为 70 A 和 120 A 两种情况下, 弧光放电电流到达谷值以后的电流稳定度分别为 1.8616 和 0.9867, 增设优化电路后, 再次进行短弧氙灯放电特性测量, 将初始电流降低到 60 A, 而稳定度可达到 0.5409。**结论** 改善后的电路基本可实现短弧氙灯放电理想状态, 完成了对短弧氙灯进入电流击穿阶段后形成的稳定弧光放电电流特性的优化, 大大提升了氙灯点灯成功率, 为增强太阳模拟器可靠性提供了试验支持。

关键词: 太阳模拟器; 短弧氙灯; 放电特性; 氙灯触发

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.11.010

中图分类号: V416.5; V524.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)11-0066-05

Experimental Test on Discharge Characteristics of High Power Short Arc Xenon Lamp of Solar Simulator

NING Juan, SHAO Jing-yi, GU Zhi-fei, LIU Gao-tong

(Beijing Institute of Satellite Environment Engineering, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: The work aims to enhance the driving operation reliability of xenon lamp for solar simulator, provide technical support for the development of solar simulator, and study the discharge characteristics of high power short arc xenon lamp for solar simulator. First, test method for discharge characteristics of high-power short arc xenon lamp for solar simulator was designed. Then through the theoretical calculation and practical tests, the influence of the initial current on the discharge characteristics of short arc xenon lamp was verified, and additional optimized circuit for short arc xenon lamp was adopted to improve discharge characteristics. Under the initial current of 70 A and 120 A, the current stability after the arc discharge current reached the current valley was respectively 1.8616 and 0.9867. After the addition of optimized circuit, the discharge characteristics of short arc xenon lamp were measured again, the initial current was reduced to 60 A and the stability was up to 0.5409. The improved circuit can basically achieve the ideal discharge state of short arc xenon lamp. It completes the optimization of the stable arc discharge current characteristic after the xenon lamp enters the current breakdown stage, greatly enhances the success igni-

收稿日期: 2020-05-01; 修订日期: 2020-06-26

Received: 2020-05-01; Revised: 2020-06-26

基金项目: 探月三期研制保障条件项目

Fund: Research and Development Guarantee Condition Project of the Third Phase of Lunar Exploration

作者简介: 宁娟(1984—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空间环境模拟器测控系统设计开发。

Biography: NING Juan (1984—), Female, Master, Engineer, Research focus: design and development of measurement and control system of space environment simulator.

tion rate of xenon lamp, and provides experimental support for improving the reliability of solar simulator.

KEY WORDS: solar simulator; short arc xenon lamp; discharge characteristic; xenon lamp trigger

太阳模拟器是空间环境模拟设备的主要组成部分,为航天器提供与太阳光谱分布相匹配的、均匀的、准直稳定的光辐照。在航天器真空热环境试验中,太阳模拟器是最真实准确的热流模拟手段^[1],应用太阳模拟器可以高精度地完成航天器热平衡试验。太阳模拟器设备关键技术之一是对光源的控制,由于卫星的高精密和卫星试验的严谨,对于太阳模拟器光源的稳定性、可靠性和安全性方面,都提出了很高的要求。氙灯通过其光谱与太阳光谱接近、发光效率高且光色接近日光等优异性能,成为太阳模拟器首选光源。

传统氙灯分为长弧氙灯、短弧氙灯和脉冲氙灯,其中,短弧氙灯广泛应用于太阳模拟器领域。国内外对脉冲氙灯放电研究较多,例如赵友全^[2]利用量子理论以及气体放电理论分析了脉冲氙灯放电过程。王磊^[3]通过脉冲氙灯放电仿真和试验得到放电电流和灯光波形图,分析实验结果从而估出了回路电感和电路阻抗等一些无法测定的参数。李丽^[4]对脉冲氙灯在不同的工作电压和极间距情况下进行测试,得出脉冲氙灯发光量随极间距加长而变小,随外加电压提高而增大,脉冲氙灯的效率随着工作电压的增加和极间距的缩短而增加的结论。R. H. Dishington 等人^[5]对脉冲氙灯整个放电过程中的伏安特性关系进行了公式模拟和误差修正,对脉冲氙灯放电过程进行了定量描述。目前现有文献鲜有对短弧氙灯放电特性的介绍。文中主要对太阳模拟器大功率短弧氙灯放电原理及其工作过程中的放电特性进行了研究与分析,设计了短弧氙灯放电特性测试方法,然后通过理论计算和实际测试验证了氙灯电源初始电流对短弧氙灯放电特性的影响,并采用增设优化电路的方法对其放电特性进行改善,有利于增强太阳模拟器氙灯驱动运行的可靠性,对太阳模拟器研制提供技术保障。

1 大功率短弧氙灯放电原理

氙灯内部充满氙气,在自由状态下其两端电阻非常高。要保证氙灯正常点燃,首先氙灯两极需要施加启动电压,灯内大量的电子、正离子等带电粒子被外场加速。当带电粒子受外场力而从阴极向阳极运动时,与其他原子相碰撞,在碰撞过程中,带电粒子的动能就转换成能量,使得其他原子激发,进一步加热阴极,加速氙灯启动。然后再提供瞬时触发电压,用高频高压脉冲击穿氙灯阴阳极之间的惰性气体,氙灯进入电流击穿阶段,放电电流逐渐增加,直至形成弧光放电电流。氙灯两端电压开始急剧下降,电流继续增加,此时氙灯进入电压击穿阶段,呈现负阻特性。弧光放电电流增加到最大之后,开始逐渐下降,氙灯电压跌至最低点后,开始缓慢上升,氙灯进入正常的

弧光放电状态^[6-7]。氙灯内部结构原理如图 1 所示。本次测试采用德国 OSRAM 公司的 XBO 10000 W/HS OFR 氙灯进行试验,该氙灯的最大功率为 10 000 W,冷却方式为风冷^[8]。

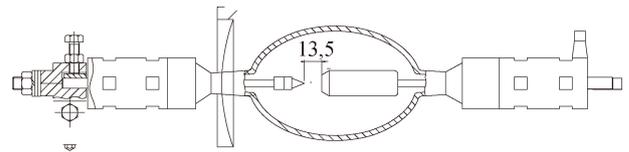


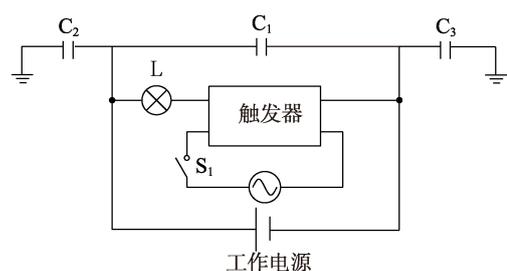
图 1 氙灯内部结构原理

Fig.1 Schematic diagram of internal structure of xenon lamp

研究短弧氙灯工作过程中的放电特性,对于提高氙灯点燃成功率非常重要^[9],而氙灯供电电源的内部结构及参数是影响短弧氙灯弧光放电特性的重要因素,从而也影响了氙灯的点燃过程。这对太阳模拟器研制有着重要的意义,因为氙灯点燃过程的可靠性直接决定了太阳模拟器设备点灯系统的工作状况。

2 短弧氙灯点燃电路放电特性测试方法

短弧氙灯点燃电路主要由工作电源、触发器、氙灯、保护电容、触点开关组成,如图 2 所示。首先由工作电源为氙灯提供开路电压,加速氙灯启动,并进入弧光放电过程。然后点动触点开关 S_1 ,触发器接通 220 V AC 交流电,并产生瞬时高压,击穿氙灯阴阳极之间的惰性气体,点燃氙灯。氙灯触发后,工作电源电压降至氙灯正常工作电压,电路通过电容 C_1 对系统进行绝缘保护,其作用是利用电容隔直流通交流的器件特性,触发器触发后为氙灯提供一个点燃回路,可以确保氙灯可以正常点燃。选用 KEYSIGHT N8952A 电源进行测试,该电源具有输出功率可以灵活调整的特点,在低电流时输出更高电压,或在低电压时输出更大电流,都由最大额定输出功率来限制,这样仅使用单台电源就可以满足电源额定电压高于氙灯开路电压的要求。



(L—氙灯, C_1 —电容, S_1 —触点开关)

图 2 短弧氙灯点燃电路

Fig.2 Ignition circuit of short arc xenon lamp

3 电源初始电流对短弧氙灯放电影响

选用 KEYSIGHT N8952A 电源进行放电特性试验，测试电源初始电流对短弧氙灯放电特性的影响。首先将 N8952A 点灯电压设定为 150 V，电流设定为 70 A，进行 3 次测试，2 次点灯成功，1 次点灯失败。选择其中一次点灯成功的曲线进行分析，如图 3a 所示。电流谷值维持在 4 A，电流谷值持续时间约 2.6 ms。然后维持电源设定电压 150 V 不变，将初始电流提高至 120 A，进行 3 次测试，均点灯成功。选择其中一

次点灯成功曲线进行分析，如图 3b 所示。电流谷值维持在 48 A，电流谷值持续时间约 1 ms。

从表 1 可以看出，电源电流设定值在 70 A 和 120 A 两种情况下对触发后电流到达峰值的时间和电流峰值的影响不大，而对比电流谷值和电流谷值持续时间在两种情况下却有明显差别。电流谷值和电流谷值持续时间是氙灯能否正常点燃的关键因素，电流谷值持续时间相对越短越好，电流谷值相对越高越好。这表明电弧的能量大，不易熄灭，更有利于氙灯点燃。

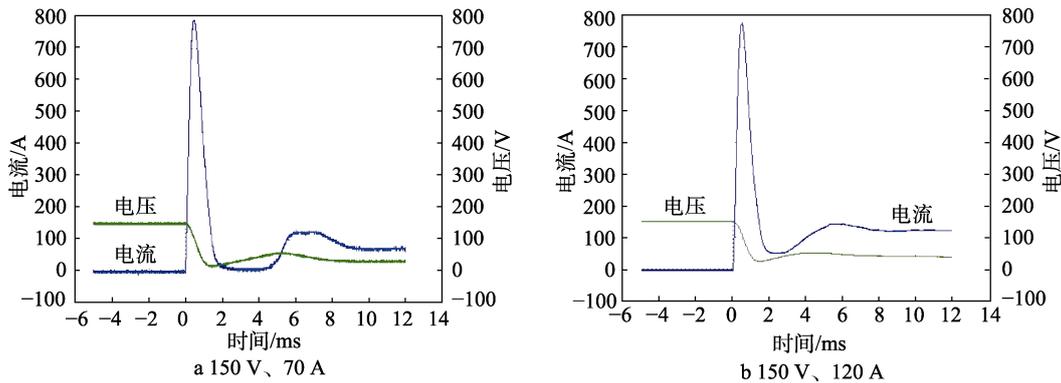


图 3 N8952A 氙灯放电特性
Fig.3 Discharge characteristic of xenon lamp on N8952A

表 1 N8952A 初始电流 70 A 和 120 A 对氙灯放电特性影响测试结果对比

Tab.1 Comparison on effect of initial current of 70 A and 120 A of N8952A on discharge characteristics of xenon lamp

设定值		电流特性					电压特性			
电压/V	电流/A	电流峰值/A	电流达到峰值时间/ μ s	电流谷值/A	电流达到谷值时间/ μ s	电流谷值持续时间/ μ s	电压谷值/V	电压达到谷值时间/ μ s	电压峰值/V	电压达到峰值时间/ μ s
150	70	793	463	4.5	2010	2596	13	1443	59	5265
150	120	777	485	48	1988	1000	24	1313	50	4334

在氙灯未触发前，氙灯内高压气体处于未电离状态^[10-11]，电源内部电容 C 为充满电的状态。当点击触发按钮后，触发器产生一个高压脉冲，击穿氙灯内部气体，氙灯瞬间短路，形成电流回路，电流立即增大，电容迅速放电，产生放电电流 I_1 ，电压 U_1 开始下降，通过氙灯的电流 $I_3=I_1+I_2$ ，电流达到峰值，电容 C 完成放电后开始充电（如图 4 所示电路）。

在设定电流为 70 A 的情况下，图 3 氙灯放电特性曲线所对应的试验测试数据见表 2。由表 2 可知，在电流谷值持续时间为 2596 μ s，电压变化为 32.2 V，N8952A 电源输出端的内部电容 C 为 5400 μ F，根据式（1）可得 $I_4=67$ A。

$$I_4 = C \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

在电容 C 充电时， $I_2=I_3+I_4$ ，已知 $I_2=70$ A，可得 $I_3=3$ A。由此可知电源的供电电流几乎都用于电源内部电容 C 充电，故留给氙灯的电流值很小。如果适当增大设定电流值到 120 A，则电源产生电流除了给电源内部电容充电外，还够维持氙灯正常点燃。对于

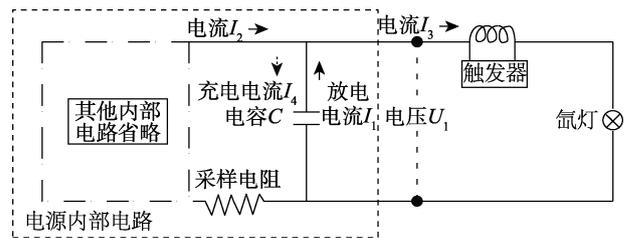


图 4 氙灯电源点燃过程电流流向
Fig.4 Current diagram in the ignition process of the xenon lamp

表 2 N8952A 初始电流 70 A 氙灯放电特性测试数据

Tab.2 Test data on the discharge characteristics of the xenon lamp at 70 A initial current of N8952A

事件	时间/ μ s	电流/A	电压/V
触发瞬间	0	0	150
电流峰值	463	792.921	107.029
电压谷值	1443	101.464	12.5565
电流谷值开始	2010	4.98114	20.5967
电流谷值结束	4606	9.00125	52.7575
电压峰值	5265	61.2625	58.7877

不同的电源结构还需要具体分析，文中提供了一种理论方法可以对电源的初始电流进行估算。

4 设计优化电路改善氙灯放电特性的方法

通过优化电路设计来改善氙灯放电特性，完成对氙灯进入电流击穿阶段后形成的稳定弧光放电电流特性的优化。在电路中新增电容 C_2 和可调电阻 R ，在电源电流除了给电源内部电容 C_1 充电外，不够维持氙灯正常点燃的情况下，通过电容 C_2 对氙灯进行持续供电，从而维持氙灯的正常点燃电流。电容 C_2 选择与电源输出端内部电容大小相近、耐压性能相同的电解电容，选用电容 C_2 为 5000 μF ，另新增一个可调电阻 R 用于分担一部分电压，可以减缓电容 C_2 的放电速率。当 C_1 已经放电结束，开始充电时，电容 C_2 仍能够继续给氙灯供电。优化后的电路如图 5 所示。

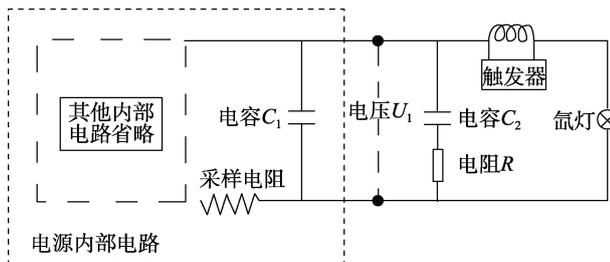


图 5 氙灯放电特性测试优化后电路
Fig.5 Optimized circuit diagram on the discharge characteristic of the xenon lamp

设定氙灯电源的初始电流为 60 A，初始电压为 150 V，经调节测试，当电阻 R 调节到 1.5 Ω 时，氙灯放电优化输出曲线如图 6 所示。电流 I_6 基本维持在 60~70 A 左右，电弧能量平稳，且电流下降后仍处于较高水平，没有出现明显电流谷值，非常利于氙灯稳定点燃。

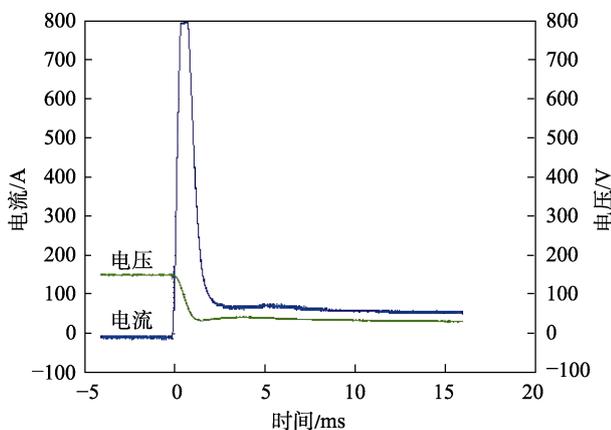


图 6 优化后的氙灯放电特性输出曲线
Fig.6 Optimized output curve on the discharge characteristic of the xenon lamp

对比图 3 和图 6 三条曲线在弧光放电电流达到最低点后，电流的最大值、最小值、平均值，可以得出电流达到谷值时间之后时间内弧光放电电流的稳定度，见表 3。

表 3 电流达到谷值时间之后时间内弧光放电电流的稳定度
Tab. 3 Stability of arc discharge current after $T_{1\text{min}}$

N8952A	最大值/A	最小值/A	平均值/A	稳定度
150 V、70 A	125.584	4.5006	65.0423	1.8616
150 V、120 A	141.457	47.9899	94.7235	0.9867
150 V、60 A， 增加改善电路	74.0241	42.5066	58.2654	0.5409

由表 3 可见，在初始电流为 70 A 和 120 A 两种情况下，电流达到谷值之后时间内弧光放电电流的稳定度分别为 1.8616 和 0.9867，而将初始电流降低到 60 A，并增加改善电路后，稳定度却达到了 0.5409。可见通过优化电路可以达到改善短弧氙灯弧光放电电流稳定性的目的，通过新增的阻容电路可以维持住电弧能量，使氙灯在点燃过程中不宜熄灭，可实现氙灯稳定点燃。

5 结语

随着我国航天技术的发展，太阳模拟器的应用越来越广泛，如何增强氙灯驱动可靠性成为太阳模拟器光源驱动领域关注的焦点^[12-13]。文中首先对大功率短弧氙灯的放电过程进行了分析，提供了短弧氙灯点燃电路放电特性测试方法，然后根据氙灯电源初始电流对短弧氙灯点燃的影响进行了试验分析。在初始电流为 70 A 和 120 A 两种情况下的弧光放电电流到达谷值以后的电流稳定度分别为 1.8616 和 0.9867，采用增设电容电阻优化电路的方法对短弧氙灯放电特性进行了改善，将初始电流降低到 60 A 而稳定度可达到 0.5409。改善后的电路基本达到氙灯放电理想状态，该试验为增强太阳模拟器氙灯光源稳定性^[14]提供了试验支持。

参考文献：

[1] 杨林华, 李站松. 国外大型太阳模拟器研制技术概述[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(2): 162-164.
YANG L H, LI H S. The Development of Large Solar Simulator in the World[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(2): 162-164.

[2] 赵友全, 苗佩亮, 何峰, 等. 脉冲氙灯放电过程分析与实验测定[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1978-1982.
ZHANG Y Q, MIAO P L, HE F, et al. Study on the Discharge Properties of Xeon Flash Lamp and Experimental Measurement[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,

- 2014, 34(7): 1978-1982.
- [3] 王磊. 氙灯微秒级泵浦固体染料激光主放电回路参量优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
WANG L. The Research of Microsecond Level Xenon Lamp Pumped Solid State Dye Laser Parameters of Discharge Circuit [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [4] 李丽. 脉冲氙灯特性分析及应用[J]. 光电对抗与无源干扰, 2001(1): 42-46.
LI L. Characteristic Analysis and Application of Xenon Flash Lamp[J]. Electro-Optic Warfare & Radar Passive Countermeasures, 2001(1): 42-46.
- [5] DISHINGTON R H, HOOK W R, HILBERG R P. Flash lamp Discharge and Laser Efficacy[J]. Applied Optics, 1974, 13(10): 2300-2310.
- [6] 钱北行, 韩吉祥, 吴大军. 20 kW 氙灯单元试验开关电源研究[J]. 航天器环境工程, 2004, 21(3): 33-37.
QIAN B X, HAN J X, WU D J. Research on Switching DC Power Supply of Unit Test of 20 kW Xenon Lamp[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2004, 21(3): 33-37.
- [7] 陈佳, 邵若燕, 崔新强, 等. 高功率脉冲氙灯灯管的性能[J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 2988-2991.
CHEN J, SHAO R Y, CUI X Q, et al. Spectra of High Power Pulsed Xenon Lamp Tubes and their Impact Resistances[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(12): 2988-2991.
- [8] 张容, 李竑松, 向艳红, 等. KFTA 太阳模拟器研制[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(6): 548-553.
ZHANG R, LI H S, XIANG Y H, et al. Development of KFTA Solar Simulator[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(6): 548-553.
- [9] CHANG Y N, YANG T H, CHAN S Y, et al. Design of Electronic Ballast for Short-arc Xenon Lamps[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(7): 1-1.
- [10] 郭向朝, 李海兵, 林文正, 等. 大功率脉冲氙灯的放电研究[J]. 光子学报, 2009, 38(6): 1363-1366.
GUO X C, LI H B, LIN W Z, et al. Discharge of Pulse Xenon Lamps[J]. ACTA Photonica Sinica, 2009, 38(6): 1363-1366.
- [11] 张华, 范滇元. 氙灯的瞬态放电特性研究[J]. 光学精密工程, 1999, 7(4): 28-33.
ZHANG H, FAN D Y. Transient Property of Xenon Flashlamp Discharge[J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 7(4): 28-33.
- [12] WANG W, AICHMAYER L, LAUMERT B, et al. Design and Validation of a Low-cost High-flux Solar Simulator Using Fresnel Lens Concentrators[J]. Energy Procedia, 2014, 49: 2221-2230.
- [13] JÖRG P, PATRICK C, ANTON M, et al. . A Novel 50 kW 11000 Suns High-Flux Solar Simulator Based on an Array of Xenon Arc Lamps[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2007, 129(4): 405-411.
- [14] 刘石. 高精度准直式太阳模拟器及其关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
LIU S. Study On Key Technique of Collimation Solar Simulator with High-Precision[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.