

引文格式: 杨子钰, 董全林, 赵然, 等. 一种 60 kV 太空电子枪的仿真研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(23/24): 100–103.

YANG Ziyu, DONG Quanlin, ZHAO Ran, et al. Study on optical system simulation of 60 kV space electron gun[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(23/24): 100–103.

# 一种 60 kV 太空电子枪的仿真研究

杨子钰<sup>1</sup>, 董全林<sup>1</sup>, 赵然<sup>2</sup>, 邵静怡<sup>3</sup>, 刘洋洋<sup>3</sup>, 王军伟<sup>3</sup>

(1. 北京航空航天大学, 北京 100083;

2. 迪瑞医疗科技股份有限公司, 长春 130012;

3. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

[摘要] 根据设计目标的性能参数和结构位置, 通过综合迭代法得到电子枪初值; 并对钨与 LaB<sub>6</sub> 两种阴极材料的性能, 选择合适的阴极材料, 利用 SOURCES 中相关程序对 60 kV 的太空电子枪进行了仿真, 得到色差系数、束斑直径等仿真结果。根据焦距公式得到一级聚焦系统的焦距并进行聚焦系统的仿真, 得到焦距、束斑和电子光路等仿真结果。通过分析一级聚焦系统的不足之处, 重新设计二级聚焦系统, 并由仿真得到极靴孔直径、线圈激励等性能参数和电磁透镜轴上场分布图。最后根据二级聚焦系统仿真结果, 得出了符合要求的电子枪参数与电子光学参数。

关键词: 太空电子枪; 综合迭代法; 聚焦系统; 光学系统; 电子束

## Study on Optical System Simulation of 60 kV Space Electron Gun

YANG Ziyu<sup>1</sup>, DONG Quanlin<sup>1</sup>, ZHAO Ran<sup>2</sup>, SHAO Jingyi<sup>3</sup>, LIU Yangyang<sup>3</sup>, WANG Junwei<sup>3</sup>

(1. Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Dirui Industrial Co., Ltd., Changchun 130012, China;

3. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

[ABSTRACT] According to the performance parameters and structure position of the design target, the initial value of the gun is obtained by the comprehensive iteration method. Moreover, the performance of tungsten and LaB<sub>6</sub> cathode materials was compared, the appropriate cathode materials were selected, and the 60 kV space electron gun was simulated by using the SOURCES related procedures, and the simulation results such as coefficient of chromatic aberration and beam spot diameter were obtained. According to the focal length formula, the focal length of the first-order focusing system is obtained and the simulation results of the focusing system, such as focal length, beam spot and optical path diagram, are obtained. By analyzing the shortcomings of the first stage focusing system, the second stage focusing system is redesigned, and the performance parameters such as pole shoe hole diameter, coil excitation and the distribution map of the electromagnetic lens axis are obtained by simulation. Finally, the parameters of electron gun and electron optics are obtained according to the simulation results of two-stage focusing system.

Keywords: Space electron gun; Comprehensive iteration method; Focusing system; Optical system; Electron beam

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.23/24.100

随着航天技术和空间工业的发展, 各国都十分重视对大型空间站等长寿命飞行器的轨道组装技术的研究<sup>[1]</sup>。由于宇宙环境的复杂与多变, 飞行器在工作过程中易遭遇突发情况, 导致其自身受到一定程度的损伤, 严重时甚至会影响到工作性能。因此, 空间实时在线修复对于

保障飞行器的安全起到了至关重要的作用, 而实时在线修复需要实时在线加工技术, 故而发展空间焊接技术也是十分必要的<sup>[2]</sup>。

由国外多年研究可知, 目前空间焊接中最主要的应用技术为电子束焊接, 而电子束性能的优劣又直接取决

于电子束焊接核心部件——电子枪<sup>[3-4]</sup>。电子枪通过阴极发射电子,电子经由阴极与阳极间的电压加速后,利用磁透镜形成一定形状和密度的电子束<sup>[5]</sup>。一系列研究表明,电子枪和聚焦系统的结构都会对电子枪的性能产生影响<sup>[6]</sup>。因此,对电子枪和聚焦系统的结构进行设计及优化,对提高电子枪的工作性能具有重要意义,也对后续的相关研究具有一定的指导作用<sup>[7-11]</sup>。

## 1 空间焊接用电子枪仿真分析

空间焊接用电子枪的设计目标如表 1 所示。

根据设计目标,利用综合迭代法可得到电子枪的初值,并将其作为设计依据,如表 2 和 3 所示。

### 1.1 阴极材料的选择

常见的电子枪阴极可以分为直热式和间热式两种。直热式阴极结构简单、工作温度高,多采用难熔的纯金属,如钨等;间热式阴极性能稳定,但发射效率较低,多采用氧化物或 LaB<sub>6</sub> 等。考虑到阴极寿命、发射束流等因素,可选择钨阴极与 LaB<sub>6</sub> 阴极,根据电子光学计算可得,钨与 LaB<sub>6</sub> 各项参数如表 4 所示。

根据表 4 中数据可知,LaB<sub>6</sub> 的逸出功小、熔点低,在一定温度范围内,发射能力高于钨。相对于钨来说,LaB<sub>6</sub> 可在较低的温度下发射更多的电子,降低了对电子枪耐高温特性的要求<sup>[12]</sup>。且 LaB<sub>6</sub> 具有性能稳定,寿命长等优点,故而选择 LaB<sub>6</sub> 作为阴极材料。

### 1.2 电子枪的仿真

电子枪的发射组件由发射阴极、栅极和阳极等部件组成,阴极受加速电子轰击而升温,到达一定温度后产生热发射电子,电子经阳极的加速电场作用,最终形成一定形状和速度的电子束。利用 SOURCES 相关程序,可根据电子枪的初值,绘制出相应的电子枪网格分布,

表 1 空间焊接用电子枪设计目标

Table 1 Design objective of electron gun for space welding

设计目标	数值
加速电压 /kV	60
电子束功率 /kW	3.6
电子束束流 /mA	60
最小束斑直径 /mm	0.4
工作距离(电子枪底部至工作平面) /mm	300

表 2 电子枪初始参数

Table 2 Initial parameters of electron gun

初始参数	数值
相对论修正电压 $U_r/V$	63600
注腰半径 $R/mm$	0.15
束流密度 $J_c/(A \cdot cm^{-2})$	7.64

最终得到束斑直径等电子枪相关性能参数,如表 5 所示。

## 2 聚焦系统的仿真分析

太空电子枪电子光学系统位置分布如图 1 所示。坐标原点  $O$  处为阴极端面,距离  $O$  点 34 mm 处为束腰,距离  $O$  点 285 mm 处为聚光镜中心线。

由表 1 可知工作距离为 300 mm。设  $x$  为物面距离, $y$  为像面距离(315mm),物面交叉斑直径为  $r_1=0.3$  mm,像面直径  $r_2=0.4$  mm,由牛顿光学公式

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{y}{x} \quad (1)$$

可得到  $x=236.25$  mm。

表 3 电子枪优化仿真输出参数

Table 3 Electron gun optimization simulation output parameters

输出参数	数值
阴极截面直径 $r_c/mm$	1.08
导流系数 $P/\mu P$	0.00374
迭代阴极半锥角 $\theta/(^\circ)$	1.4166
阴极曲率半径 $R_c/mm$	22.55
阳极曲率半径 $R_a/mm$	10.4
阳极孔半径 $r_a/mm$	0.279
阳极轴上交点 $Z_{ac}/mm$	12.147
阳极顶点 $Z$ 轴坐标 $Z_a/mm$	12.15
$R_c/R_a$	3.005
在 $Z_a$ 点的电子束半径 $r_b(Z_a)/mm$	0.451
$ \tan\phi_2/\tan\phi_1-1 $	0.0029
束腰位置 $Z_w/mm$	34.03

表 4 钨与 LaB<sub>6</sub> 阴极电子枪参数

Table 4 Tungsten and LaB<sub>6</sub> cathode electron gun parameters

阴极材料	灯丝温度 /K	束流密度 / ( $A \cdot cm^{-2}$ )	电子枪亮度 / ( $A \cdot cm^{-2} \cdot Sr^{-1}$ )	功函数 / eV	Richardson 常数	熔点 T/K
W	2700	3.55	$10^5$	4.5	120	3653
LaB <sub>6</sub>	1800	5.44	$10^6$	2.7	60	2800

表 5 电子枪仿真结果

Table 5 Electron gun simulation results

虚拟交叉直径 / $\mu m$	虚拟交叉位置 / mm	球差系数	
		3 <sup>rd</sup> /mm	5 <sup>th</sup> /mm
299.665787	33.826546	-6.1502785e+05	6.4275486e+05
色差系数		总发射电流 /A	
(1/2)/mm	(1)/mm		
1.2849131e+01	-4.9555366e+03	0.0600	

根据焦距公式

$$f_1 = \frac{xy}{x+y} \quad (2)$$

计算得出焦距  $f_1=135 \text{ mm}$ 。

### 2.1 一级聚焦系统仿真

MLENSC 程序可通过一阶有限元法来计算不饱和磁透镜的磁场分布、轴上磁通密度分布等。ABER 程序可以利用其计算结果对聚焦透镜和偏转器进行光路仿真，由此可得到仿真的结果如表 6 所示，光路图如图 2 所示。其中， $X_p$ 、 $Y_p$  和  $R_p$  为不同电子束的出射轨迹。

根据计算结果及相关光路图可以看出，工作距离要求为 300 mm，而聚光镜焦距小于工作距离，这样会导致电子束发散，能量耗损过多，无法满足设计需求，故而需要再增加一节聚焦透镜，形成二级聚焦透镜。

### 2.2 二级聚焦系统仿真

二级聚焦系统电子光学系统设计如图 3 所示。初步拟定  $CL_1$  为弱激励透镜， $CL_2$  为强激励透镜。

其中， $S_c$  为束腰直径； $S_w$  为工作平面束斑直径； $CL_1$  为第一聚光镜； $CL_2$  为第二聚光镜。

考虑机械结构等因素，选取  $a=150 \text{ mm}$ ， $b=89 \text{ mm}$ ， $c=11 \text{ mm}$  作为初值，经由焦距公式和弱激励公式可得到  $CL_1$  与  $CL_2$  的几何参数与激励参数如表 7 所示。利用 ABER 程序可得到光路图，如图 4 所示。

## 3 电子枪相关参数确定及仿真

使阴极参数不变，根据电子枪的初始参数来调整极间距，得到电子枪性能参数如表 8 所示。

根据以上计算结果，电子光学系统设计参数如表 9

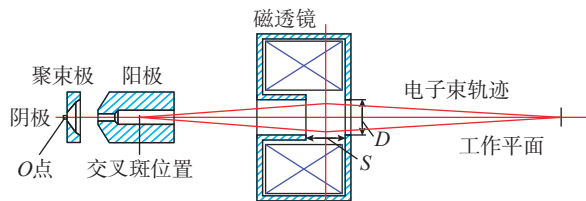


图 1 太空电子枪电子光学系统位置示意图

Fig.1 Position diagram of electronic optical system of space electron gun

表 6 一级聚焦系统性能参数

Table 6 Performance parameters of first-order focusing system

参数名称	计算结果
$S/D$ (极靴间距 $S=8 \text{ mm}$ ; 极靴孔直径 $D=10 \text{ mm}$ )	0.8
归化激励	365.7
焦距 $f_1/\text{mm}$	60
电子束放大倍数	-0.15
像平面束斑 $\mu\text{m}$	400

所示。

PLOTF 程序用来绘制电磁透镜、偏转器和消象散器轴上场分布。利用 PLOTF 程序可绘制电磁透镜轴上场分布，如图 5 所示。

由图 5 可知， $CL_1$  的轴上最大磁感应强度是 0.0582 T， $CL_2$  的轴上最大磁感应强度是 0.00595 T。

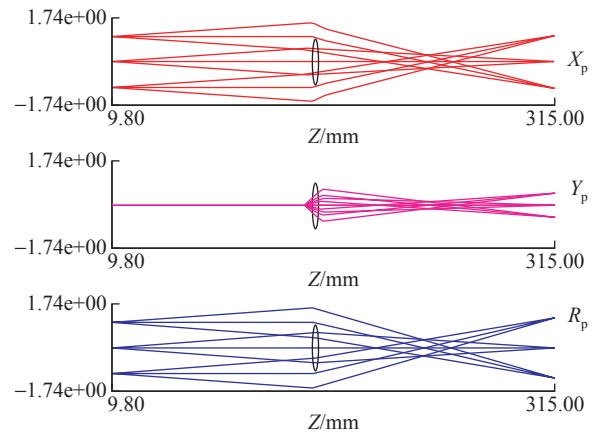


图 2 一级聚焦透镜光路图

Fig.2 Optical path diagram of first-order focusing lens

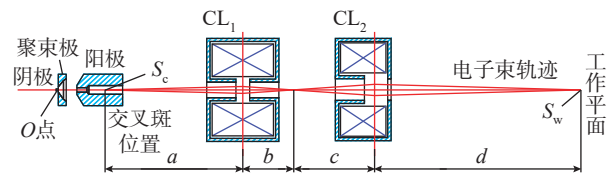


图 3 太空电子枪二级聚焦系统示意图 (mm)

Fig.3 Schematic diagram of the second-order focusing system of the space electron gun (mm)

表 7 电子光学系统几何参数

Table 7 Geometric parameter for electronic optical system

透镜	物距 $a/\text{mm}$	极靴孔直径 $D/\text{mm}$	极靴间距 $S/\text{mm}$	线圈激励 (A·T)
$CL_1$	150	10	10	684
$CL_2$	250	18	18	3416

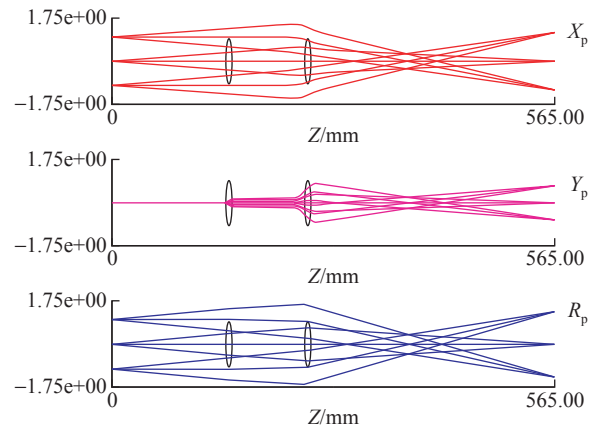


图 4 Munro 计算电子运动轨迹图

Fig.4 Trajectory of electrons calculated by Munro

表 8 电子枪性能参数

Table 8 Performance parameters of electron gun

功率/kW	加速电压/kV	阴极直径/mm	聚束极孔径/mm
3.6	60	1	4
阳极孔径/mm	束流大小/mA	交叉斑直径/ $\mu\text{m}$	交叉斑位置/mm
4	60	300	33.8

表 9 电子光学系统设计参数

Table 9 Design parameters of electronic optical system

聚光镜	位置/mm	线圈激励(A·T) (实际的激励要增加 50%)	S/D (S=14 mm, D=14 mm)
CL <sub>1</sub>	150	183	1
CL <sub>2</sub>	250	800	1

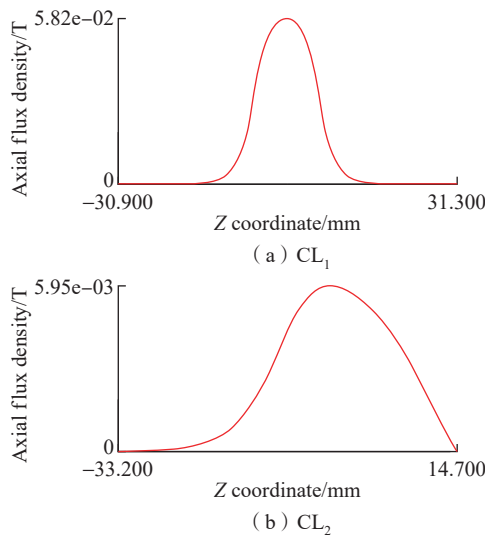


图 5 两种激励透镜轴上磁感应强度分布

Fig.5 Distribution of magnetic induction intensity on two kinds of excitation lens axis

## 4 结论

本文根据太空电子枪项目的要求,实现了一套 60 kV 电子枪的仿真分析。针对一级聚焦系统仿真过程中存在的问题,重新设计了一套二级聚焦系统并进行仿真,仿真得到的电子枪性能指标中,加速电压为 60 kV,功率为 3.6 kW,束流大小为 60 mA,符合设计指标,可以为后续的相关研究提供一定的依据和参考。

## 参考文献

- [1] 李春旭,蒋彩云,何成旦,等.空间电子束电聚焦系统的设计[J].中国航空学报,2002,28(4):256-262.
- LI Chunxu, JIANG Caiyun, HE Chengdan, et al. Design of space electron beam electric focusing system[J]. Acta Aeronautica Sinica, 2002, 28(4): 256-262.
- [2] 李志远,钱乙余,张九海.先进连接方法[M].北京:机械工

业出版社,2002.

LI Zhiyuan, QIAN Yiyu, ZHANG Jiuhai. Advanced connection method[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002.

[3] 陈文雄,徐军,张会珍,等.光电子学与激光技术:电子枪理论研究的新进展[J].中国学术期刊文摘,2007,13(16):7-8.

CHEN Wenxiong, XU Jun, ZHANG Huizheng, et al. Optoelectronics and laser technology: New progress in theoretical research of electron gun[J]. Abstract of Chinese Academic Journals, 2007, 13(16): 7-8.

[4] 郭光耀,韩瑞清.各国空间电子束焊接技术的发展[J].现代制造,2009(33):24-25.

GUO Guangyao, HAN Ruiqing. Development of space electron beam welding technology in various countries[J]. Modern Manufacturing, 2009(33): 24-25.

[5] 李斗星.透射电子显微学的新进展 II Z 衬度像、亚埃透射电子显微学、像差校正透射电子显微学[J].电子显微学报,2004(3):278-292.

LI Douxing. The new progress of transmission electron microscopy II Z contrast image, and transmission electron microscopy, aberration correction transmission electron microscopy[J]. Journal of Electron Microscopy, 2004(3): 278-292.

[6] 周广德,林达.电子束焊接装置用电子光学系统的设计与分析[J].焊接学报,1981(4):36-45.

ZHOU Guangde, LIN Da. Design and analysis of electronic optical system for electron beam welding device[J]. Journal of Welding, 1981(4): 36-45.

[7] 张德添,刘安生,朱衍勇.电子显微技术的发展趋势及应用特点[J].现代科学仪器,2008(1):6-10.

ZHANG Detian, LIU Ansheng, ZHU Yanyong. Development trend and application characteristics of electron microscopy[J]. Modern Scientific Instruments, 2008(1): 6-10.

[8] 陶振凯,狄杰建,赵玉侠.基于 60 kV/6 kW 电子枪的 15 kW 电子枪的研制[J].焊接技术,2014(12):41-43.

TAO Zhenkai, DI Jiejian, ZHAO Yuxia. Development of 15 kW electron gun based on 60 kV/6 kW electron gun[J]. Welding Technology, 2014(12): 41-43.

[9] 倪士勇,黄以平,刘春东.高压电子束焊机中电子束发生系统的设计计算[J].机械工程与自动化,2007(4):126-128.

NI Shiyong, HUANG Yiping, LIU Chundong. Design and calculation of electron beam generating system in high voltage electron beam welder[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2007(4): 126-128.

[10] YUAN X, ZHANG Y, YANG H, et al. A gridded high-compression-ratio carbon nanotube cold cathode electron gun[J]. IEEE Electron Device Letters, 2015, 36(4): 399-401.

[11] 陶宗明,张清泽.磁透镜成像公式的简易推导[C]//中国物理学会华东六省市年会暨全国凝聚态物理学术会议.北京:中国物理学会,2001.

TAO Zongming, ZHANG Qingze. Simple derivation of magnetic lens imaging formula[C]//Annual Meeting of Six Provinces and Cities in East China and National Condensed Matter Physics Conference of Chinese Physical Society. Beijing: Chinese Physical Society, 2001.

[12] 何成旦,李鹤岐,许启晋.电子枪新型阴极的设计[J].甘肃工业大学学报,2003,29(3):1-5.

HE Chengdan, LI Heqi, XU Qijin. Design of new cathode for electron gun[J]. Journal of Gansu University of Technology, 2003, 29(3): 1-5.

通讯作者:董全林,教授,研究方向为电子束技术、惯性导航与制导等。

(责编 晓月)