



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

中国科技核心期刊

10 kV太空电子枪的光学系统设计及仿真研究

陈鹤 董全林 邵静怡 刘洋洋 王军伟 裴一飞

Design and simulation of the optical system of 10 kV space electron gun

CHEN He, DONG Quanlin, SHAO Jingyi, LIU Yangyang, WANG Junwei, PEI Yifei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2021.02.005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

半主动激光导引头光学系统设计及线性度分析

Design of optical system for semi-active laser seeker and related linearity analysis

航天器环境工程. 2020, 37(3): 303–309 <https://doi.org/10.12126/see.2020.03.016>

微尺度质谱仪离子源结构设计及离子光学系统仿真

Structural design and optical system simulation of ion source for microscale mass spectrometer

航天器环境工程. 2019, 36(1): 83–88 <https://doi.org/10.12126/see.2019.01.013>

典型星载遥感器光学系统总剂量效应防护方法与设计

Protection method for total dose effect on the optical system of typical satellite remote sensor and related design

航天器环境工程. 2018, 35(4): 371–376 <https://doi.org/10.12126/see.2018.04.011>

太阳极紫外成像仪光学系统研制

Development of an optical system for solar extreme ultraviolet (EUV) imaging telescope

航天器环境工程. 2019, 36(4): 393–397 <https://doi.org/10.12126/see.2019.04.016>

三轴振动试验系统工作平台的谐振频率分析

Resonant frequency analysis on the platform of tri-axial vibration system

航天器环境工程. 2017, 34(1): 35–39 <https://doi.org/10.12126/see.2017.01.006>

预紧力对系统频率漂移的影响

The influence of preload on system frequency variations

航天器环境工程. 2017, 34(6): 636–641 <https://doi.org/10.12126/see.2017.06.011>

10 kV 太空电子枪的光学系统设计及仿真研究

陈鹤¹, 董全林^{1*}, 邵静怡², 刘洋洋², 王军伟², 裴一飞²

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 为使电子枪的性能满足太空环境下的作业要求, 对 10 kV 太空电子枪的光学系统进行设计与仿真研究, 给出一套完整的设计方法及流程。首先选择合适的阴极材料, 仿真得到电子束的轨迹; 而后算出合适的焦距, 对一级聚焦电子光学系统进行仿真。鉴于一级聚焦系统不能实现在工作距离为 300 mm 时束斑直径为 0.4 mm 的设计目标, 进而设计二级聚焦系统并利用仿真分析对系统参数进行优化。仿真分析结果表明, 该设计方法能够得到符合工作需求的电子光学系统参数, 可为以后太空电子枪的设计提供参考。

关键词: 太空电子枪; 聚焦系统; 光学系统; 电子束; 仿真分析

中图分类号: O463⁺.1; TB115

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2021)02-0148-05

DOI: [10.12126/see.2021.02.005](https://doi.org/10.12126/see.2021.02.005)

Design and simulation of the optical system of 10 kV space electron gun

CHEN He¹, DONG Quanlin^{1*}, SHAO Jingyi², LIU Yangyang², WANG Junwei², PEI Yifei²

(1. School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

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

Abstract: According to the performance requirement of the electron gun to be worked in the space environment, the optical system of 10 kV space electron gun is designed, along with simulation analysis. Firstly, the trajectory of the electron beam is obtained through the simulation with the proper cathode material. Then, the appropriate focal length is determined and a single-lens focusing system is simulated. In view of the restriction of the capability of the single-lens focusing system, a two-lens focusing system is designed to meet the requirements. A complete set of design methods and processes is given in this paper. The simulation results show that by the above methods, the electro-optical parameters can be optimized to meet the engineering requirements. This research can help the future design of space electron guns.

Keywords: space electron gun; focusing system; optical system; electron beam; simulation analysis

收稿日期: 2020-11-03; 修回日期: 2021-04-11

基金项目: 北京卫星环境工程研究所创新基金项目 (编号: CAST-BISEE 2019-040)

引用格式: 陈鹤, 董全林, 邵静怡, 等. 10 kV 太空电子枪的光学系统设计及仿真研究[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(2): 148-152

CHEN H, DONG Q L, SHAO J Y, et al. Design and simulation of the optical system of 10 kV space electron gun[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(2): 148-152

0 引言

电子束焊接技术由于其能量密度高、焊缝深宽比大等诸多优点被广泛应用于太空焊接^[1]。基本上所有电子束装备都离不开核心部件——电子枪^[2], 电子枪的性能直接决定电子束性能的优劣, 而电子枪的性能取决于其电子光学系统的结构^[3]。

通常认为材料表面电子在获得足够能量后会垂直于材料表面逸出到真空环境中, 此后受到电场力的作用而改变方向。太空焊接用电子枪要将逸出的电子束进行汇聚, 必须采用聚焦系统^[4-6]。目前, 常用的电子聚焦方法有磁聚焦和静电聚焦。磁聚焦系统主要应用在电子显微镜、电子扫描探针等大型室内分析型设备中, 其优点是易于满足旁轴条件, 不易出现高压打火等现象; 但是, 此类系统结构庞大、功耗大, 安装调试复杂。而静电聚焦主要利用电场力实现对电子束的汇聚, 结构简单、工作时无额外功耗^[7-8]。

太空焊接用电子枪的电子束半径在 0.1 mm 量级, 对聚焦系统的要求较高, 综合考虑功耗、体积和易控性等因素, 以及聚焦系统与阴极发射系统和阳极靶的匹配后, 通常选择磁聚焦系统。本文将详细介绍 10 kV 太空电子枪光学系统的设计方法及流程。

1 一级聚焦电子光学系统

一级聚焦电子光学系统(简称一级聚焦系统)包括高压部分、三极电子枪和 1 个聚光镜, 电子枪阴极材料选用六硼化镧(LaB₆), 系统已知的性能参数和设计目标如表 1 所示。经计算, 电子衍射效应产生的束斑直径极限在 0.1 nm 量级, 远小于大束流要求的 0.1 mm 量级。阴极发射电子束在阳极孔下端附近产生束腰(即电子束轨迹中第 1 个最小横截面的位置), 阴极和阳极轴上距离约为 6.6 mm。

表 1 一级聚焦系统初始结构参数及设计目标

Table 1 Initial structural parameters and design goals of the single-lens focusing system

已知性能参数	加速电压/kV	10
	电子束功率/kW	3
设计目标	束斑直径/mm	0.4
	电子束束流/mA	300
	工作距离/mm	300

1.1 电子枪参数计算

考虑阴极寿命、加热温度以及发射束流等因

素, 电子枪的阴极材料可选用钨或 LaB₆^[9]。根据电子光学设计理论, 分别计算这 2 种阴极材料电子枪的发射束流密度, 结果见表 2。需说明的是: 钨阴极通常做成圆片状, 而为便于制造或安装, 实际使用如图 1 所示的矩形片, 两者的发射面积略有差异, 但对使用过程中发射束流密度的影响不大; 根据文献研究, LaB₆ 阴极的性质有所差异, 本文计算所选用的参数应能保证足够的发射束流; 表 2 中的钨阴极发射面积约相当于 LaB₆ 阴极发射面积的 2 倍。

表 2 钨与 LaB₆ 阴极电子枪参数

Table 2 Parameters of tungsten and LaB₆ cathode electron guns

阴极材料	灯丝温度/K	功函数/eV	Richardson 常数	束流密度/(A·cm ²)
W	2700	4.5	120	1.5
LaB ₆	1800	2.7	60	2.6

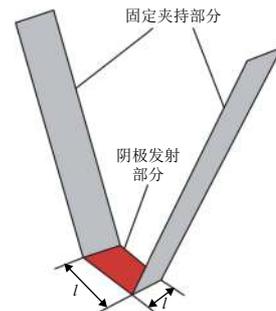


图 1 实际使用的钨阴极结构

Fig. 1 The actual tungsten cathode structure

电子枪结构及其电子束轨迹如图 2 所示。

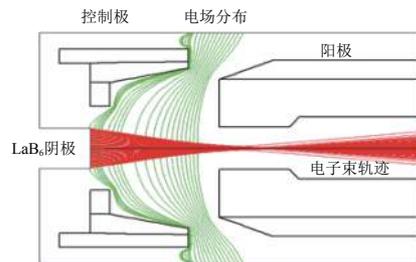


图 2 电子枪结构及其电子束轨迹示意

Fig. 2 Schematic diagram of the structure of electron gun and its electron beam trajectory

1.2 聚焦线圈参数计算

一级聚焦系统结构设计如图 3 所示, 其中: 阴极端面中心为坐标原点 O , 束腰在距 O 点 11 mm 处, 聚光镜中心线距 O 点 285 mm; S 为极靴间隙; D 为极靴孔直径; 假设工作平面距聚光镜下端 300 mm, 即工作距离为 300 mm。

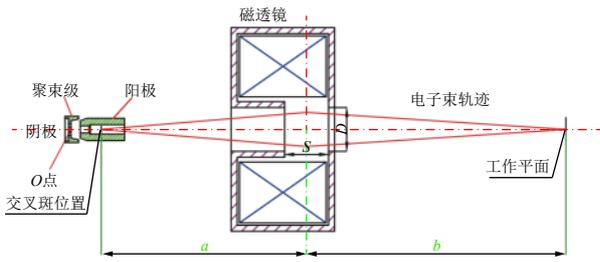


图3 一级聚焦系统结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the single-lens focusing system

由聚光镜像距 $b=315\text{ mm}$, 物面交叉斑直径 $h_1=0.3\text{ mm}$, 像面束斑直径 $h_2=0.4\text{ mm}$, 可根据牛顿光学公式

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{b}{a}, \quad (1)$$

计算得到聚光镜物距 $a=236.25\text{ mm}$ 。

继而可根据焦距公式

$$f_1 = \frac{ab}{a+b}, \quad (2)$$

计算得到聚光镜焦距 $f_1=135\text{ mm}$ 。

1.3 一级聚焦系统仿真

ABER 程序利用一阶有限元法来计算光路图, 可以涵盖聚光镜以及偏转器的光路仿真。根据此程序进行计算, 可得到一级聚焦系统性能参数的仿真结果如表3所示, 光路如图4所示。

表3 一级聚焦系统性能参数

Table 3 Performance parameters of the single-lens focusing system

项目	参数名称	参数值	备注
聚光镜参数	S/D	0.8	$S=8\text{ mm}; D=10\text{ mm}$
	归化激励	0.045	$V_1/(NI)^2$
电子束性能	焦距 f_1/mm	135	透镜中心面到焦点的距离
	放大倍数	1.33	
	像面束斑直径 mm	0.4	

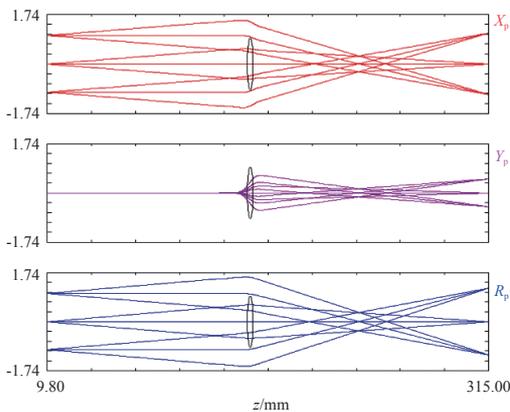


图4 一级聚焦系统光路图

Fig. 4 Optical path of the single-lens focusing system

图4中: Y_p 表示的是模拟轴上电子束的出射轨迹, X_p 和 R_p 是不同电子束的出射轨迹; 纵坐标表示电子束的径向位置。

为确保电子枪可以产生足够的束流, 可通过 Source 程序查看束流发射情况, 如图5所示。



图5 一级聚焦系统电子轨迹图

Fig. 5 Electron trajectory map of the single-lens focusing system

根据计算结果及图5可以看出, 聚光镜焦距仅有 135 mm , 并不能实现在工作距离为 300 mm 时束斑直径为 0.4 mm 的设计目标; 并且束流经过透镜时已经开始发散, 使得束流的能量损失较多。因此需在此聚光镜前增加一级聚光镜(下文称新增聚光镜为第一聚光镜 CL1, 现有聚光镜为第二聚光镜 CL2), 成为二级聚焦电子光学系统(简称二级聚焦系统)。

2 二级聚焦电子光学系统

2.1 二级聚焦系统设计

二级聚焦系统设计如图6所示, 几何参数如表4所示。该系统较之一级聚焦系统, 为了调整束斑大小和系统结构将阳极长度增加到 18 mm , 并将聚光镜数量由1个增加为2个。

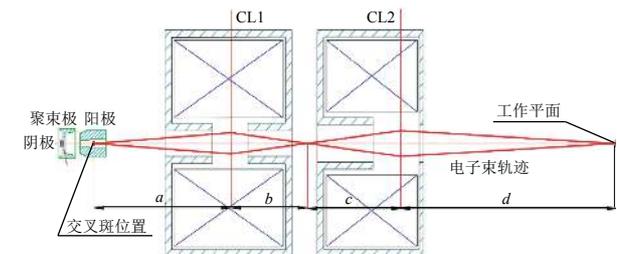


图6 二级聚焦系统结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the two-lens focusing system

表4 二级聚焦系统几何参数

Table 4 Geometric parameters of the two-lens focusing system

参数名称	参数值	备注
CL1物距 a/mm	待求	$a+b+c=120\text{ mm}$
CL1像距 b/mm		
CL2物距 c/mm		
CL2像距 d/mm	311.5	CL2下端面至工作平面距离
电子枪束腰直径 S_c/mm	0.3	根据实际电子枪计算
工作平面束斑直径 S_w/mm	0.4	电子光学系统要求

由图6可知, 根据实际机械结构, CL1 的物距 a 、像距 b 与 CL2 的物距 c 之和为定值; 根据光学几

何关系, a 、 b 、 c 与 CL2 的像距 d 之间应满足如下关系:

$$\begin{cases} a+b+c = \text{constant} \\ S_c \times \frac{b}{a} \times \frac{d}{c} = S_w \end{cases} \quad (3)$$

于是, 可计算出参数 a 、 b 、 c 的值如表 5 所示。

表 5 CL1 位置选取参数计算结果

Table 5 Calculated results of position selection parameters for CL1

a/mm	b/mm	c/mm	$(a+b+c)/\text{mm}$
145.9	11.67	22.4	180
79	19	52	150
55	10	55	120

综合考虑机械结构, 选取 $a=55 \text{ mm}$ 、 $b=10 \text{ mm}$ 、 $c=55 \text{ mm}$ 作为初值, 则可据式 (2) 计算得到 CL1 的焦距 $f_1=8.46 \text{ mm}$ 。

若 S/D 取值为 1, 则可由焦距近似公式

$$\frac{f_1}{D} = 0.46 \sqrt{0.63 + \left(\frac{S}{D}\right)^2}, \quad (4)$$

计算得到: 极靴孔直径 $D=14 \text{ mm}$, 极靴间隙 $S=14 \text{ mm}$ 。此时, 可由电子枪加速电压 $V_r=10 \text{ kV}$ 及

$$\frac{V_r}{(NI)^2} = 0.0048 + 0.00065 \frac{S}{D}, \quad (5)$$

计算得到线圈激励参数 $NI=1361 \text{ A}\cdot\text{T}$ 。

2.2 二级聚焦系统仿真

利用 ABER 程序仿真得到上述二级聚焦系统光路如图 7 所示。

由图 7 可知, 该二级聚焦系统不能保证电子枪束腰直径为 0.3 mm , 为此需要重新调整, 将 CL1 调成弱激励, CL2 调成强激励。经过迭代仿真, 得到调整后的二级聚焦系统光路如图 8 所示。

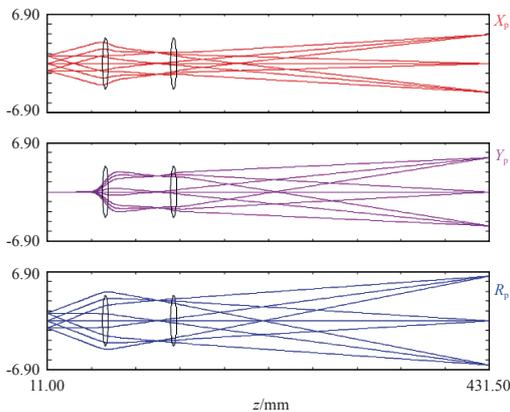


图 7 二级聚焦系统光路图

Fig. 7 Optical path of the two-lens focusing system

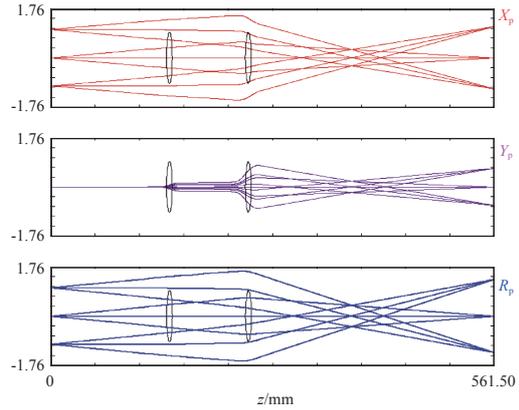


图 8 调整后的二级聚焦系统光路图

Fig. 8 Optical path of the improved two-lens focusing system

3 电子光学系统设计参数

第 2 章设计的二级聚焦系统的仿真结果显示其二级聚光镜的位置并不是最优的, 因此需要通过迭代仿真得出满足设计目标的最优参数值, 经调试优化后的电子光学系统参数如表 6 所示。

表 6 优化后的电子光学系统设计参数

Table 6 Design parameters of optimized electronic optical system

项目	参数名称	参数值	备注
电子枪参数	加速电压/kV	10	
	功函数/eV	2.7	
	Richardson常数	60	
	阴极工作温度/K	2000	
	电子束功率/kW	3	
	电子束束流/mA	300	
	束腰直径/mm	0.282	
第一聚光镜 CL1	位置/mm	60	阴极中心距透镜中心的距离
	线圈激励/(A·T)	70	仿真得到
	S/D	1	$S=14 \text{ mm}; D=14 \text{ mm}$
第二聚光镜 CL2	位置/mm	225	阴极中心距透镜中心的距离
	线圈激励/(A·T)	360	仿真得到
	S/D	1	$S=18 \text{ mm}; D=18 \text{ mm}$

由表 6 可以看到, 电子枪在保证电子束束流为 300 mA 的情况下, 电子枪束腰直径的最优解为 0.282 mm , 并未达到 0.3 mm 的系统参数要求, 但为了保证在 300 mm 工作距离的像面上束斑直径能达到 0.4 mm , 表 6 中的参数已是最优的结果。

4 结束语

综上所述, 为实现太空电子枪项目的设计目标, 根据前项工作中完成设计的电子枪结构和性能参数, 设计了聚焦系统, 并进行了光学计算及仿真

分析。研究发现,一级聚焦系统不能实现在工作距离为 300 mm 时束斑直径为 0.4 mm 的设计目标,继而设计了二级聚焦系统。对二级聚焦系统的光学参数进行仿真分析表明,该系统能够实现既定设计目标。

需说明的是,现设计中未考虑大电流情况下库仑力对束斑质量的影响,后续研究会将这部分影响加入到电子枪的初值设计中。

参考文献 (References)

- [1] 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, 43(12): 41-43
- [2] 陈文雄,徐军,张会珍,等. 电子枪理论研究的新进展[J]. 电子显微学报, 2006, 25(6): 455-462
CHEN W X, XU J, ZHANG H Z, et al. Advances in electron gun theory research[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2006, 25(6): 455-462
- [3] 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 S Y, HUANG Y P, LIU C D. Design and calculation on electron-beam generating system of high-voltage electron-beam welding equipment[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2007(4): 126-128
- [4] 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, 2(4): 36-45
ZHOU G D, LIN D. The design and analysis of electron optical system for electron beam welding machine[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1981, 2(4): 36-45
- [5] 王德. 空间电子束焊枪电子光学系统的设计[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2004
- [6] 刘畅. 浅析空间电子束焊枪电子光学系统的设计[J]. 科技风, 2016(7): 7
- [7] 李春旭,王德,何成旦. 空间用电子束焊枪电子光学系统的设计[J]. 甘肃科学学报, 2004, 16(3): 61-64
LI C X, WANG D, HE C D. Design of electronic optical system for space electron beam gun[J]. Journal of Gansu Sciences, 2004, 16(3): 61-64
- [8] YUAN X S, 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
- [9] 韩建德,王衍章,郑树起,等. 电子束焊机六硼化镧阴极发射性能研究[J]. 山东工业大学学报, 2001, 31(4): 313-318
HAN J D, WANG Y Z, ZHENG S Q, et al. Study of the emitting properties of LaB₆ in electron beam welder[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2001, 31(4): 313-318

(编辑: 闫德葵)

一作简介: 陈鹤(1983—),男,博士研究生,研究方向包括高分辨率透射电子显微镜、超快电子显微镜、电子束设备电子光学的设计。E-mail: chinachenhe@yahoo.com。

*通信作者: 董全林(1964—),男,博士学位,教授,博士生导师,研究方向包括光电精密仪器的设计、电子束处理以及高压电源的实验和模拟评估,透射电子显微镜等。E-mail: dongquanlin@buaa.edu.cn。