

ZHOU Ping, WANG Wenjing, JING Tao, ZHANG Aibing, GUO Panlin, SHENG Shugang, JING Yuhui, SUN Yueqiang, LIANG Jinbao, ZHU Guangwu, JI Wentao, MA Liyuan. Development of the testing and calibration platform for space electron radiation environment research payloads (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(6): 738-747. DOI:10.11728/cjss2017.06.738

空间电子辐射环境探测载荷测试定标试验平台研制*

周平^{1,2,3} 王文静^{1,2} 荆涛^{1,2,3} 张爱兵^{1,2,3}
郭盘林⁴ 盛树刚⁴ 景毓辉⁵ 孙越强^{1,2,3}
梁金宝^{1,2} 朱光武^{1,2} 冀文涛^{1,2} 马利媛^{1,2}

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院大学 北京 100049)

4(上海翥业真空设备科技有限公司 上海 201806)

5(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 介绍了中国科学院国家空间科学中心新建成的空间电子辐射环境探测载荷测试定标试验平台. 该平台由中、高能极弱流电子加速器以及内置多维真空转台的真空靶室试验终端组成, 用于对星载空间电子辐射探测器进行地面加速器测试定标. 重点描述了为得到中能极弱流均匀平行束, 采用电子轨迹程序 Egun 对中能极弱流电子加速器进行的物理设计和模拟计算, 给出球形结构电子枪在栅网孔不加栅网、加理想栅网和直径 1mm 孔栅网以及在不同加速管出口能量情况下, 初聚系统和加速管以及经过二次扩束时输运段中电子轨迹的模拟结果. 最终得出能够实现电子枪初始束流减弱 8 个数量级, 获得满足测试定标试验需求的极弱流均匀平行电子束 (在试验终端直径 50 mm 靶上束流面密度为 $10^5 \sim 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 的结论.

关键词 空间电子辐射环境, 电子加速器, 极弱流

中图分类号 TL 53

Development of the Testing and Calibration Platform for Space Electron Radiation Environment Research Payloads

ZHOU Ping^{1,2,3} WANG Wenjing^{1,2} JING Tao^{1,2,3} ZHANG Aibing^{1,2,3}
GUO Panlin⁴ SHENG Shugang⁴ JING Yuhui⁵ SUN Yueqiang^{1,2,3}
LIANG Jinbao^{1,2} ZHU Guangwu^{1,2} JI Wentao^{1,2} MA Liyuan^{1,2}

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

* 中国科学院国家空间科学中心风云四号科研试验卫星研制保障条件建设项目资助

2016-09-30 收到原稿, 017-09-26 收到修定稿

E-mail: pzhou@nssc.ac.cn

2(Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190)

3(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

4(Shanghai Hangye Vacuum Instrument Science and Technology Co., Ltd. 201806)

5(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract In order to test and calibrate the satellite payloads—electron detectors, the medium- and high-energy electron accelerators with extremely weak beam current to simulate the electron radiation environment of space have been built, including the experimental terminal which have a vacuum chamber and a vacuum rotation plate. This work focuses on the physical design and simulation of extremely weak, uniform, parallel electron beam of the medium-energy one, by using electron trajectory program Egun. The simulation results of electron trajectory in the initial focusing system, the accelerating tube and the twice beam broaden on different conditions including without grid, with ideal grid and with 1 mm diameter aperture grid in the spherical electron gun are presented. Finally, the beam density, $10^5 \sim 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ within the $\phi 50 \text{ mm}$ target area, can be weakened by 8 orders of magnitude from the electron gun to the target area, and could satisfy the requirement of electron detectors testing and calibration experiment.

Key words Space electron radiation environment, Electron accelerator, Extremely weak beam current

0 引言

Van Allen 发现辐射带^[1,2] 50 多年后, 空间辐射仍在许多方面严重制约着航天飞行安全^[3]. 特别是对于载人航天, 空间辐射环境的影响更为重要. 因此, 需要对低轨空间站的辐射环境进行监测, 对 57° 倾角的空间站轨道特定位置上可能产生辐射的太阳事件进行预报. 目前对遭遇到空间电子和质子的太阳能电池盒晶体管中的基本物理过程已有若干研究. 尽管如此, 空间辐射以及空间辐射对航天电子系统的作用仍然是空间应用领域的重要研究内容之一.

目前同步轨道上已有 200 多颗正在使用的通信卫星^[3], 还有很多其他卫星分布在邻近区域或具有不同倾角的椭圆轨道上. 在卫星设计与运行中, 需要准确和及时得到卫星运行区域空间辐射环境时空变化的详细资料, 因此对空间辐射环境进行实时监测与分析非常必要.

空间粒子辐射主要由空间带电粒子(电子、质子和重离子)、空间 X 射线、 γ 射线和空间中性粒子(中子、中微子、原子和宇宙尘埃)产生, 其中带电粒子主要来源是辐射带、太阳高能粒子事件、银河宇宙线和

异常宇宙线等. 在辐射带、太阳高能粒子事件和银河宇宙线中都有大量不同能量的电子存在^[4-6]. 空间电子分布在很广的能区, 从 eV 量级到 MeV 量级. 空间电子按其能量可分为 3 类: 空间高能电子, 能量范围为 250 keV~8 MeV (已探知地球磁层内电子最高能量约为 8 MeV); 中能电子, 能量范围为 10~250 keV; 低能电子, 能量范围为 10 keV 以下.

中国科学院国家空间科学中心根据星载空间电子辐射环境探测载荷研制任务需求, 在国内首次建立了空间电子辐射环境探测载荷地面测试定标试验平台. 该平台由用于模拟空间电子辐射环境的中能极弱流电子加速器 (50~200 keV) 和高能极弱流电子加速器 (100 keV~2.0 MeV) 以及内置多维转台的真空靶室试验终端、束流诊断系统和中控联锁系统等组成. 其中高能电子加速器是从荷兰高压公司 (HVEE) 定制引进的一台 2 MV Singletron 型极弱流电子加速器; 中能电子加速器是由中国科学院国家空间科学中心、中国科学院高能物理研究所和上海奔业真空设备科技有限公司联合设计, 上海奔业真空设备科技有限公司承制, 是一台完全国产化的 200 keV 中能极弱流电子加速器.

1 极弱流电子加速器

为模拟空间辐射环境中电子的实际情况, 建设中高能极弱流电子加速器, 对空间电子辐射探测器进行地面研制过程中的测试和定标, 然后通过对该探测器在空间电子辐射环境中的探测数据进行分析, 为通信卫星等提供更加准确的空间电子辐射时空变化资料. 本系统主要用于模拟空间中、高能电子辐射环境, 为星载空间中、高能电子辐射探测载荷提供地面测试定标条件, 实现载荷探测功能和性能参数的测试、校准、标定, 以及探测数据的反演分析处理.

空间辐射研究用电子极弱流加速器通常按电子能量可以分为三类. ①低能: 几 eV 到几十 keV, 由于电子枪与离子源都无法提供如此低能的束流, 必须采用加速-减速方案. ②中能: 几十 keV 到几百 keV, 一般采用常规加速方案, 但也可以采用加速-减速方案. ③高能: 几百 keV 到几个 MeV, 均采用常规加速方案. 这里构建的加速器电子能量范围为 50 keV~2.0 MeV.

该中高能电子测试定标系统以高压型电子加速器为核心, 主要由 2 MeV 电子加速器、200 keV 电子加速器、靶室与束测系统、安全防护及中控设备和系统集成五大功能模块组成. 主要设备布局如图 1 所示, 主要技术指标列于表 1.

中国科学院国家空间科学中心 (NSSC) 建成的中高能电子测试定标系统主要指标与美国戈达德航天中心同类装置 GSFC-REF 技术指标的对比列于表 2.

表 1 空间电子辐射探测载荷测试定标试验平台主要技术指标

Table 1 Main specifications of the space electron radiation exploration payloads testing and calibration platform

指标名称	指标值
电子能量	2 MeV 电子加速器: 0.1~2 MeV 200 keV 电子加速器: 10~250 keV (两台加速器配合实现 10 keV~2 MeV 的能量范围)
电子流量	2 MeV 电子加速器: $10^3 \sim 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 200 keV 电子加速器: $10^5 \sim 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
束流能散度	2 MeV 电子加速器: < 0.1% (RMS) 200 keV 电子加速器: < 2.0%
电子束斑	直径 50 mm
靶上电子流不均匀度	直径 50 mm 内 < 10%
靶上电子流稳定度	< 5% (每 30 min 内)
工作真空度	$\leq 5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$
转动精度	0.1°
平动精度	0.1 mm
连续稳定运行时间	360 h
故障率	< 5%
安全性	意外断电设备不会硬损伤

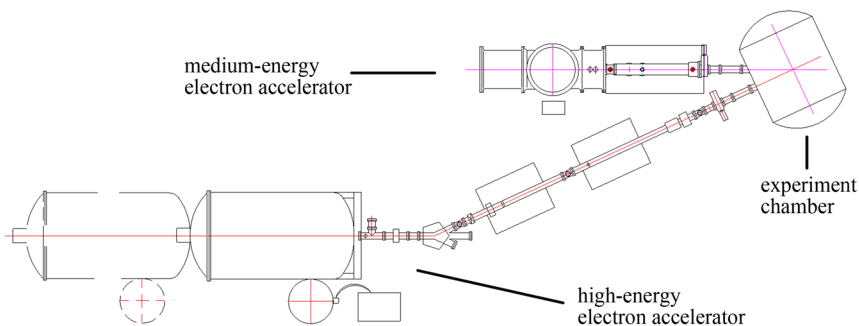


图 1 中高能电子加速器系统布局

Fig. 1 Layout of medium and high energy electron accelerator system

表 2 NSSC 中高能电子测试定标系统与美国戈达德宇航中心
同类装置 GSFC-REF 主要指标对比

Table 2 Contrast of the main specifications between the medium and high energy
electron testing and calibration system of NSSC and Goddard GSFC-REF

性能指标	NSSC 中高能电子测试定标系统	GSFC-REF
加速器组成	由 2 MeV 电子加速器和 200 keV 电子加速器组成	由 2 MeV 电子加速器和 150 keV 电子加速器组成
靶室真空度	工作真空度 5×10^{-4} Pa 极限真空度 $1.3 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-4}$ Pa	$5 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$ Pa
束斑尺寸	直径 50 mm, 可通过光阑实现对束斑大小的步进调节	最大尺寸直径 51 mm, 可在直径 0.5~12.7 mm 范围内实现束斑大小的步进调节
转台精度	旋转精度: 0.1° . 平动精度: 0.1 mm	旋转精度: 0.1°
束测方案	半导体探测器, 法拉第筒	半导体探测器

从表 2 可以看到, 中国科学院国家空间科学中心建成的中高能电子测试定标系统与美国戈达德航天中心同类装置 GSFC-REF 的主要技术指标相当. NSSC 电子测试定标系统的电子加速器实测电子能量范围 (10 keV~2.2 MeV) 优于 GSFC-REF 的实测能量范围 (50 keV~2.0 MeV). 本项目所建设的试验终端真空度性能指标优于 GSFC-REF, 能够更好地进行空间真空环境模拟, 从而更好地保障载荷测试定标试验结果的准确性. 转台设计方面, NSSC 电子测试定标系统不仅有转动平台还有三维平动, 精度达到 0.1 mm, 充分满足试验需要, 而 GSFC-REF 仅有转动平台没有平动机构, 在试验中会带来很多不便. 在束流测量方面, NSSC 电子测试定标系统不仅配置了半导体探测器进行束流测量, 同时还配置了高精度法拉第筒阵列, 实现束流通量和均匀度的在线测量, 保证了试验过程中束流的高品质. 另外, 从表 1 中还可以看出, 该装置对电子束流的均匀度提出了较高要求, 能够为载荷研制过程中的测试定标提供非常好的条件, 同时也能更加真实地模拟空间电子辐射环境.

2 高能极弱流电子加速器

2.1 主要技术指标

高能极弱流电子加速器, 即 2 MV 电子加速器, 能够提供满足高能电子探测载荷地面定标测试要求的能量为 0.1~2.0 MeV 且束流品质满足要求的电子

表 3 2 MV 高能电子加速器主要技术指标

Table 3 Main specifications of 2 MV
high energy electron accelerator

指标名称	指标值
电子能量	0.1~2 MeV
电子流量密度范围	$10^3 \sim 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
能量精确度	1.0% (0.1~1.0 MV) 1.5% (1.0~2.0 MV)
相对能量分散度	0.1% (RMS)
电子半散角	$< 0.5^\circ$ (8.7 mrad), $E > 0.5 \text{ MeV}$ $< 2.0^\circ$ (35 mrad), $E = 0.1 \text{ MeV}$ (terminal)
高压纹波	200 V (2.0 MV), 50 V (0.1 MV) (terminal)
高压稳定度	$\pm 200 \text{ V}$ (terminal)
束流强度	连续可调, 最大 $1 \mu\text{A}$
电子束斑	直径 50 mm
靶上电子流不均匀度	直径 50 mm 内 $< 10\%$
靶上电子流稳定度	$< 5\%$ (每 30 min 内)
连续稳定运行时间	360 h
故障率	$< 5\%$

束, 是高能电子测试定标系统的重要组成设备. 该加速器是从荷兰高压公司 (HVVE) 进口定制的, 其主要性能指标列于表 3.

2.2 加速器组成

2 MV Singletron 型电子加速器主要由电子加速器主体 (EA)、开关磁铁 (SW)、电子辐照输运线及辐照终端 (EI)、计算机控制系统以及 SF₆ 充入/回收系统等几大功能模块组成, 如图 2 所示. 这里重点讨论加速器本体和电子辐照输运线两部分.

2.2.1 电子加速器主体 (EA)

2 MV 加速器主体系统由电子枪、初聚系统、直流高压发生器、高压加速柱、加速管、钢桶、法拉第筒和真空系统等组成. 电荷为 e 的一个电子通过电位差为 U 的电场后, 增加的动能为

$$\Delta W = eU. \quad (1)$$

直流高压发生器提供高电压 U . 该发生器用中频电源交流电压进行多级倍压整流, 由升压变压器、整流器、电荷搬运电容 (副边电容) 和滤波升压电容 (主电容) 组成, 被包容在高压加速柱内. 高压加速柱的高端是高压电极 (球极), 加速柱外表面是一圈一圈的均压环 (表面高度光洁的椭圆截面不锈钢环), 均压环之间并联分压电阻, 并嵌有保护间隙, 避免环间分压不均或过电压 (放电).

加速管的高电压端安装电子枪和初聚焦系统, 低电压端 (电子流出口) 借助高压绝缘瓷环焊接在钢桶的端板法兰上. 电子枪为加速器产生和供给电子, 一般分热冷 (场致发射) 两类. 电子由电子枪发射, 电子枪的发射极是一个间接加热的平面电极 (热场发射阴极), 与冷发射阴极 (场致发射) 相比, 具有发射流稳定、分散度小、噪音低的优点.

发射电子流初始能量低, 发散度大, 需要在接近发射极处增加一个约几千伏到万伏量级的引出电极, 把电子拉到加速管的入口. 引出电极与加速管入口之间还安装了静电偏转电极, 使电子束偏转一个角度进入加速管, 从而可以减少能散和反向粒子的冲击.

为避免电子束通过加速管时与气体分子碰撞发散以及保证加速管的电绝缘, 加速管内需要确保 10^{-6} Pa 以上的真空度, 由安装在接近加速管出口处钢桶以外的涡轮分子泵组实现.

2.2.2 电子辐照输运线

2 MV 电子加速器输运线将加速器加速的电子束送达真空试验终端, 对电子束的性能参数进行测量, 有时还要对这些参数进行必要的调整使其满足实际工作需要. 输运线由法拉第筒、螺线管透镜、静电导向器、分析磁铁、固定光阑、涡轮分子泵、可伸缩光阑和磁屏蔽等组成.

加速器输运线的长度根据需要确定. 这里的高能电子束辐照系统输运线长度为 6~7 m, 可将电子送达辐照处真空靶室内. 一般加速器的输运线要尽可能将束流损失减少至最低限度, 然而这里的加速器设计思路和其他加速器完全不同. 其产生的电子束最大为 $1 \mu\text{A}$, 进入输运线后降至纳安 (nA) 量级 ($1 \text{ nA} = 10^{-9} \text{ A}$), 进行辐照所需电子流密度仅为 $10^3 \sim 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 当束斑直径为 50 mm 时, 电子流量为 $2 \times (10^4 \sim 10^8 \text{ s}^{-1})$, 相当于 $3.2 \times (10^{-15} \sim 10^{-11}) \text{ A}$, 即 $3.2 \text{ fA} \sim 32 \text{ pA}$, 比加速器产生的电子束低很多量级. 因此这里的电子束流输运线除将电子送达靶室外, 还必须承担减小束流、阻挡散射电子并

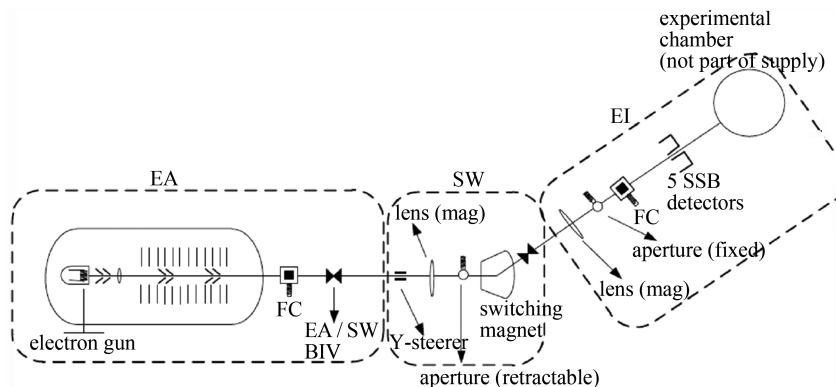


图 2 2 MV Singletron 型电子加速器组成

Fig. 2 Schematic of 2 MV Singletron electron accelerator

且使留下的电子流满足实验要求的任务. 同时, 如此弱的电流检测也十分困难, 对试验室的电磁环境要求非常高.

3 中能极弱流电子加速器的研制

3.1 主要技术指标

中能极弱流电子加速器, 即 200 keV 电子加速器, 主要提供覆盖 50~200 keV 能量范围的电子束, 束流能量的准确度高、能散小, 束流为弱束流且连续可调. 200 keV 电子加速器可为中能电子探测载荷的地面定标测试提供满足要求的电子束条件, 并与高能加速器配合实现 50 keV~2 MeV 宽量程范围的标准束源. 其主要技术指标列于表 4.

3.2 加速器设计的关键问题

减弱电子流和磁场影响是设计中能极弱流电子加速器两个关键问题. 由于降低能量与减弱电子流是相互矛盾的, 为减弱束流, 通常希望输运线长一些. 中能极弱流电子加速器中的电子特别是低能端的电子很容易受磁场影响而偏转. 输运线长会加大磁场的影响, 进而提高加速器的能量下限. 由于存在这一矛盾, 使中能加速器研制更加困难.

由于电子能量很低 (最低 30 keV), 很小的磁场就会使电子偏转. 例如不锈钢电极加工后未退火去磁,

剩余磁场就能造成极大的干扰. 干扰来自横向磁场 (与束流方向垂直的磁场), 纵向磁场 (沿束流方向的磁场) 不造成干扰. 对横向磁场干扰的估算可采用如下公式:

$$\tan\theta = BL/B_p. \quad (2)$$

其中 B 为横向磁场平, L 为加速器及输运线长度, B_p 为电子的磁刚度, θ 为磁场造成的电子偏转角.

实际解决方法有: 使加速器顺着当地的地磁场方向, 用玻莫合金筒屏蔽外来磁场, 减少加速器及输运线长度, 束流附近的一些部件加工后退火去磁, 利用导向线圈纠正磁场造成的电子偏转. 在设计中几种方法同时使用, 从而尽可能降低磁场干扰的影响. 利用一对导向器可以纠正磁场造成的电子偏转. 偏转也不能过大, 否则无法纠正.

3.3 减弱电子流的方法

由于需要的是连续电子流, 因此不能采用脉冲化和扫描等手段来减弱电子流. 目前可行的减弱电子流的方法有如下三种: ①减少电子枪发射的电子流, ②利用初聚系统、加速管和分析磁铁减弱电子流, ③利用束流输运线上的螺线管和光阑减弱电子流.

3.3.1 利用电子枪减弱电子流

根据电子热发射理论^[7], 可以导出不存在外加电场时的电子热发射

$$J_0 = AT^2 \exp[-f/(kT)]. \quad (3)$$

其中: J_0 为零场电子发射电流密度; T 为绝对温度; f 为电子的逸出功; k 为波尔兹曼常数 ($8.617 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$); A 为发射常数, 其理论值为 $120 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$.

在常用的电子枪中, 如果阴极温度较低而阳极电位较高, 阴极和阳极间不存在空间电荷积累, 产生热限制流; 反之, 如果阴极温度较高而阳极电位较低, 阴极和阳极间存在空间电荷积累以致阴极栅极间出现电位最低点, 则产生空间电荷限制流.

热限制流和空间电荷限制流都不能产生极弱电子流. 比较合适的方法是采用拒斥场. 令栅极电位低于阴极电位. 阴极发射的电子具有一定的能量分布, 只有能量较高的电子能够通过栅极. 以平面二极管为例, 如果栅极电位为 U , 则从栅极引出的电子流密度为^[7,8]

$$J = J_0 \exp[eU/(kT)]. \quad (4)$$

表 4 中能极弱流电子加速器主要性能指标

Table 4 Main specifications of medium energy electron accelerator

指标名称	指标值
电子能量	10~200 keV
电子流量密度范围	$10^5 \sim 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
高压精确度	better than 1.0%
高压纹波	better than 0.1%
高压漂移	0.1% (每 8 h 内)
束流精确度	2%
束流半散角	1°
电子束斑	直径 50 mm
靶上电子流均匀度	< 10%
靶上电子流稳定度	< 5% (每 30 min 内)
连续稳定运行时间	360 h
故障率	< 5%

显然 $J < J_0$, e 为电子电荷绝对值. 考虑到阳极与阴极逸出功之差 eU_C , 式 (4) 修改为

$$J = J_0 \exp[e(U + U_C)/(kT)]. \quad (5)$$

这里 U_C 为 0.1 V 量级. 在不知道 U_C 的情况下可用式 (4) 计算.

对于极弱流加速器, 采用拒斥场电子枪是非常合适的. 因为只需要安装一个精确的栅极电源, 即通过改变栅极电位大幅度调节电子流, 通常可调节几个量级, 只需要安装一个精确的栅极电源, 而通过改变阴极加热电流调节电子流很困难. 利用解析公式可由阴极温度估计出平面二极管情况的发射电子流密度, 可应用于带栅网的电子枪 (见表 5), 当阴极温度为 1700 K 时, 从 0 ~ -1 V 调节栅极电压, 发射电流随之变化的范围约为 $0.4 \mu\text{A} \sim 4 \text{nA}$. 由此可见, 通过调节栅极电压可以达到 5 个量级的发射电子流密度调节. 所以采用拒斥场电子枪是可行的.

设计电子枪、初聚系统和加速管时通常利用电子轨迹程序 Egum. 虽然计算量较大, 但是这种计算对设计初聚系统和加速管是必要的, 电子枪初聚系统和加速管段计算模型如图 3 所示.

将图 3 所示电子枪初聚系统和加速管段计算模型输入 Egum 电子轨迹模拟程序, 对电子枪和电子枪及加速管段的电子轨迹进行模拟, 结果如图 4 和图 5 所示. 这些结果对设计电子枪初聚系统和加速管段具有重要指导意义.

显然在栅极孔加栅网能够使电子流得到更大的发散, 从而进入相同加速管入口光孔的电子流更少,

达到更大程度衰减电子流的目的.

3.3.2 利用输运线减弱电子流

第二和第三种方法都是先让电子流急速会聚然后急速扩散, 利用光阑挡住外围电子流, 只让中心少量电子通过. 中能区加速器不宜加分析磁铁. 目前利用束流输运线上的螺线管和光阑最多只能把电子流减弱至 3%, 即减弱 1.5 个量级. 利用初聚系统和加速管最多也只能减弱电子流 1 至 1.5 个量级. 因此主要的手段还是减少电子枪发射的电子流.

表 5 阴极温度为 1700 K 时电子枪的发射能力

Table 5 Electron emission ability of the cathode at 1700 K

栅极电压/V	发射电流密度/(A·cm ⁻²)	发射电流/A (发射面积 0.04 cm ²)
0.000	0.862×10^{-5}	3.448×10^{-7}
-0.100	0.436×10^{-5}	1.744×10^{-7}
-0.200	0.220×10^{-5}	8.800×10^{-8}
-0.300	0.111×10^{-5}	4.440×10^{-8}
-0.400	0.562×10^{-6}	2.248×10^{-8}
-0.500	0.284×10^{-6}	1.136×10^{-8}
-0.600	0.143×10^{-6}	5.720×10^{-9}
-0.700	0.725×10^{-7}	2.900×10^{-9}
-0.800	0.366×10^{-7}	1.464×10^{-9}
-0.900	0.185×10^{-7}	7.400×10^{-10}
-1.000	0.935×10^{-8}	3.740×10^{-10}

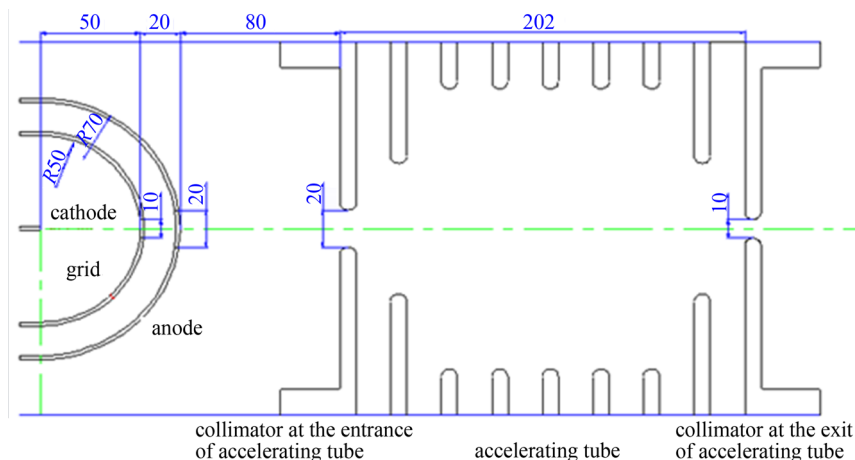


图 3 电子枪初聚系统和加速管段计算模型

Fig. 3 Calculation model of electron first focusing system and accelerating tube part

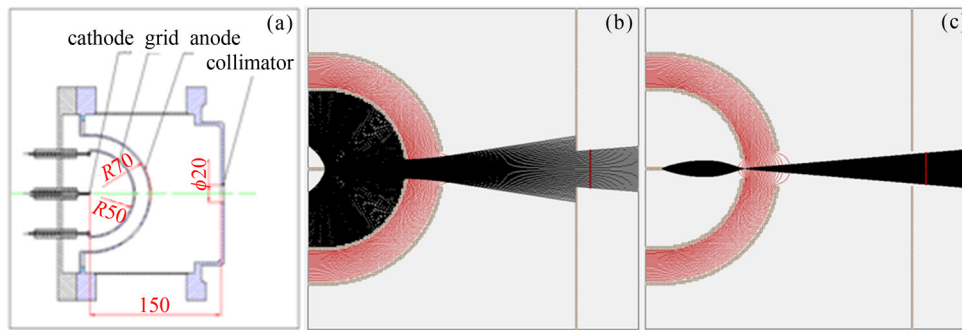


图4 球面电子枪结构示意图(a); 栅极孔加栅网, 电子流初始能量为 0.1 eV , 阴极电压为 0 V , 栅极电压 -0.1 V , 阳极电压为 $+20\text{ kV}$ 时利用 Egun 模拟的电子轨迹 (b); 栅极孔不加栅网, 电子流初始能量为 0.1 eV , 阴极电压为 0 V , 栅极电压 -0.1 V , 阳极电压为 $+20\text{ kV}$ 时利用 Egun 模拟的电子轨迹 (c)

Fig. 4 (a) Structure of semispherical electron; Egun simulation results of electron trajectory as the grid aperture with (b) and without (c) grid, the initial energy of electron current is 0.1 eV , the voltage for the cathode is 0 and for the grid is -0.1 V , the voltage for the anode is 20 kV

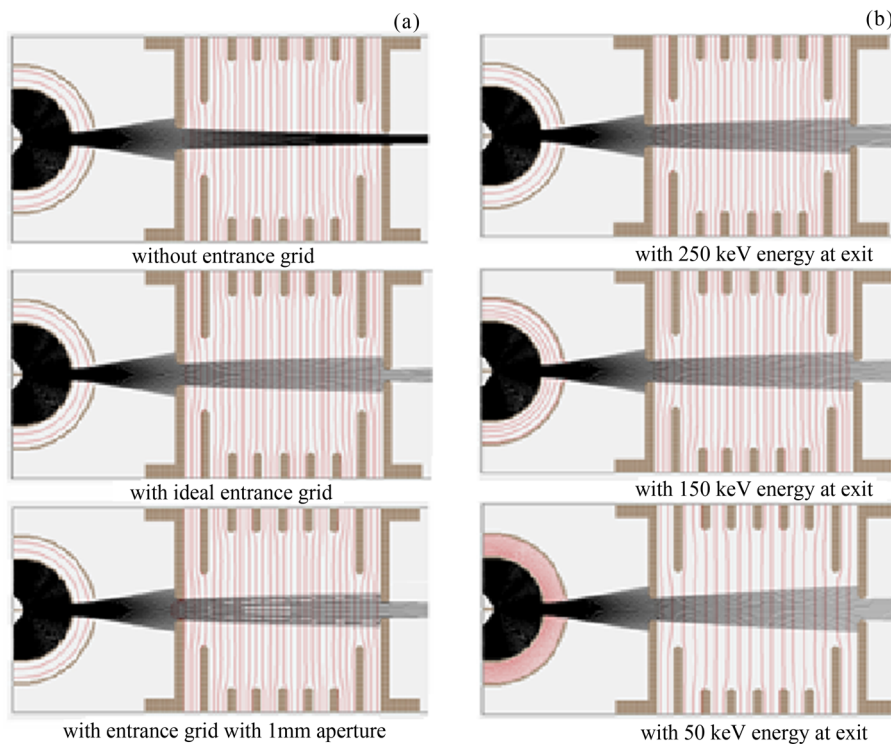


图5 (a) 加速管段入口不加栅网、加理想栅网和加孔洞直径 1 mm 栅网三种情况下, 电子流初始能量 0.1 eV , 阴极电压 0 V , 栅极电压 -0.1 V , 阳极与加速管段入口电位为 $+20\text{ kV}$ 时利用 Egun 模拟的电子轨迹; (b) 加速管段入口加理想栅网, 电子流初始能量 0.1 eV , 阴极电压 0 V , 栅极电压 -0.1 V , 阳极与加速管段入口电位为 $+20\text{ kV}$, 加速管段出口电位分别为 250 , 150 和 50 keV 时利用 Egun 模拟的电子轨迹

Fig. 5 (a) Egun simulation results of electron trajectory without grid, with ideal grid and with 1 mm diameter aperture grid at the entrance of accelerator tube, respectively. The initial energy of electron current is 0.1 eV , the voltage for the cathode is 0 V , the grid is -0.1 V and the anode is $+20\text{ kV}$ which is equal to the voltage for the entrance of the accelerator tube. (b) Egun simulation results of electron trajectory with ideal grid at the entrance of accelerator tube. The final energy of electron current is 250 , 150 and 50 keV . The other situations conditions are the same to Fig. 4(a)

在运输段中,利用螺线管使通过加速管入口光阑的电子流会聚然后急速扩散,再利用第二个光阑挡住外围电子流,只让中心少量电子通过.扩散的主要目的是改善电子流均匀度.一般情况下电子流密度遵循高斯分布.通过扩散和光阑阻挡留下中心的少量电子,能够得到很均匀的电子流.扩散也同时减弱了电子流.

定义通过靶室接收光阑的电子流强度与通过加速管出口光阑的电子流强度之比为电子流衰减因子 α ,螺线管的焦距为 f ,通过螺线管后的会聚角(等于其后的扩散角)为 θ ,电子流的扩散距离为 L ,加速管出口光阑的孔半径为 R_0 ,靶室接收光阑的孔半径为 R_T ,电子流到达靶室接收光阑处的半径为 R_2 .

通过加速管出口光阑的电子流可认为近似于平行束,有

$$\tan\theta = R_2/L = R_0/f, \quad (6)$$

$$\alpha = (R_T/R_2)^2 = (R_T f)^2/(L R_0)^2. \quad (7)$$

为了提高衰减系数和电子流通量的调节范围,提出二次扩束方案.通过Egun电子轨迹模拟程序对加速器运输段二次扩束时的电子轨迹进行模拟,结果如图6所示.

此方案需要两个 f ,且 L_S 和 L 均相同的螺线管,会聚角分别为 θ_1 与 θ_2 .第二个螺线管前设一个中间光阑,其孔半径与加速管入口光阑相同.电子流到达中间光阑处的半径为 R_1 ,前后两段的衰减因子分别为 α_1 与 α_2 .通过中间光阑的电子流可认为近似于平行束.

$$\tan\theta_1 = R_1/L = R_0/f, \quad (8)$$

$$\tan\theta_2 = R_2/L = R_0/f, \quad (9)$$

$$\alpha_1 = (R_0/R_1)^2 = [(R_0 f)/(L R_0)]^2 =$$

$$(f/L)^2, \quad (10)$$

$$\alpha_2 = (R_T/R_2)^2 = [(R_T f)/(L R_0)]^2, \quad (11)$$

$$\alpha = \alpha_1 \alpha_2 = (R_0/R_1)^2 (R_T/R_2)^2 = (f/L)^2 [(R_T f)/(L R_0)]^2 = (R_T f^2)^2/(L^2 R_0)^2. \quad (12)$$

通过两次扩束,电子流最高可以衰减三个量级.与一次扩束方案相比,二次扩束方案有三个优点:(1)衰减电子流的能力增强一倍;(2)电子流通量的调节范围增大,达到1.5个量级;(3)大部分电子流衰减发生在前一段,后一段的衰减因子相当小,进一步减少了被抛弃的电子因散射进入靶室的可能性.

靶室入口处还需要安装一个螺线管,保证电子流平行入射靶室.运输段需要安放两组导向线圈,保证电子流对中准确.

4 试验终端

本装置两台加速器共享一套试验终端,即两台加速器的束流线汇入同一个直径1.5m、直段1.6m轴线水平卧式放置的真空靶室.束流中心线在靶室几何中心交汇,夹角呈 25° .其中2MV电子加速器的束流线垂直靶室轴线通过靶室几何中心,200kV电子加速器束流线与2MV电子加速器束流线在同一水平面内通过靶室几何中心且与之呈 25° 夹角注入该真空靶室(见图1).真空靶室内有一套一维滑台用于在线监测束流,一套5维转台(x, y, z, Φ_1, Φ_2),位于两个转盘之一上的束流靶点测量装置用于测量靶点位置束流品质.当测量的束流品质符合试验要求后,再把另一个转盘上的待测试定标设备移动到靶点位置进行试验.该真空靶室极限真空度为 5×10^{-5} Pa.工作真空度为 5×10^{-4} Pa,该指标满足近地空间卫

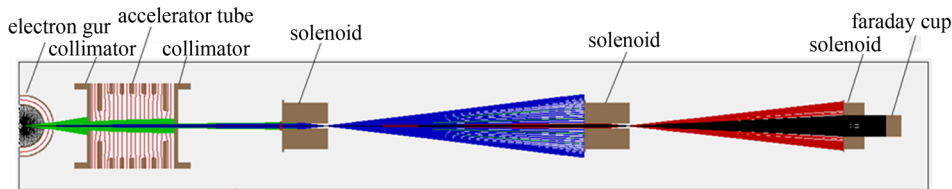


图6 利用Egun程序模拟的经过运输段二次扩束的电子轨迹

Fig. 6 Egun simulation results of electron trajectory including the twice beam broaden in the transport tube



图7 真空靶室实物

Fig.7 Photo of vacuum chamber

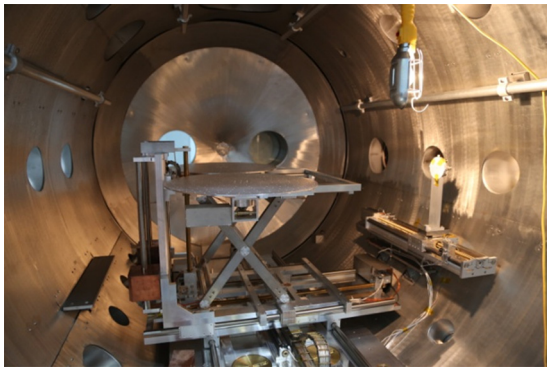


图8 真空转台实物

Fig.8 Photo of vacuum rotating plate

星载荷测试定标时模拟运行环境的要求。真空靶室及真空转台实物分别如图7和图8所示。

5 结语

极弱流电子加速器是一种特殊的加速器,已有研究资料很少,其研制工作极具挑战性。通过采购高能极弱流电子加速器和研制中能极弱流电子加速器,组

成了空间中高能电子辐射环境定标测试系统。该系统两台电子加速器均为高压型静电加速器,其束流能量精确,束流稳定性极好,而且经过特殊的弱束和扩束设计,具有束流能量和通量调节范围宽、束流空间分布均匀性高的优点,能够满足空间电子辐射研究探测器地面定标试验需求。目前,该电子辐射环境定标测试系统的实验室建设及验收已完成,各项指标达标,能够为开展相关定标测试提供服务。

参考文献

- [1] National Aeronautics and Space Administration. Pioneering Astrophysicist James Van Allen Dies [OL][2016-07-01]. http://www.nasa.gov/vision/universe/features/james_van_allen.html
- [2] HESS W N. The Radiation Belt and Magnetosphere [M]. Waltham, Mass, United States: Blaisdell Publishing Co, 1968
- [3] KAMIDE Y, CHIAN A C L. Handbook of the Solar-Terrestrial Environment [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2010
- [4] PISACANE V L. The Space Environment and Its Effects on Space Systems [M]. Washington D C: American Institute of Aeronautics and Astronautics Press, 2008
- [5] TRIBBLE A C. The Space Environment: Implications for Spacecraft Design [M]. Princeton: Princeton University Press, 1995
- [6] JIAO Weixin. Space Exploration [M]. Beijing: Peking University Press, 2002 (焦维新. 空间探测 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2002)
- [7] MENG Zhaoying. Cathode Electronics [M]. Beijing: People's Education Press, 1961 (孟昭英. 阴极电子学引论 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1961)
- [8] TONG Linsu, XIMEN Jiye, DING Shouqian, *et al.* Computer Aided Design for Electro-optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990 (童林夙, 西门纪业, 丁守谦, 等. 电子光学计算机辅助设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990)