第 49 卷 第 2 期：651-659 高电压技术 Vol.49, No.2: 651-659
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221859

基于电子束团调控的 μA 级量子电流源研究

焦 强[1]，周 峰[2]，李小飞[2]，胡浩亮[2]，曾冰倩[1]，鲍 进[3]
（1. 华中科技大学电气与电子工程学院，武汉 430074；2. 中国电力科学研究院有限公司，武汉 430074；
3. 国网江苏省电力有限公司营销服务中心，南京 210000）

摘 要：针对单电子隧道效应在实现电流量子化中存在的困难，目前尚无法实现超过 10^{-6} A 的电流，因此引入粒子加速器领域的相关理论与技术，以探索实现电流量子化所需弱流电子束的新原理和新方法。首先，通过束流仿真，验证了基于螺线管磁场和可调狭缝的电子束团调制方法能够有效提高电子束团的稳定性；然后，基于仿真结果，设计了基于小型粒子加速器的实验平台，并针对高稳定度 μA 量级的电流探测需求，设计了阻挡式法拉第杯的探测方案；最后通过实验，在不同电子枪电流输出的情况下，经过调控，电子束团的不稳定性从 2%降低至 0.3%，与理论仿真结果一致。研究结果初步验证了粒子加速器应用于电流量子化的可行性，为量子电流源的理论与工程研究提供了全新的方向和思路。

关键词：量子电流；粒子加速器；电子调束；法拉第杯；可调狭缝

Research on μA Level Quantum Current Source Based on Electron Beam Cluster Regulation

JIAO Qiang[1], ZHOU Feng[2], LI Xiaofei[2], HU Haoliang[2], ZENG Bingqian[1], BAO Jin[3]
(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;
2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;
3. Marketing Service Center, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: In view of the difficulty of single electron tunneling effect in realizing current quantization, the output current intensity above μA can not be realized at present. In this paper, the relevant theories and technologies in the field of particle accelerator are introduced to explore the new principle and method of weak current electron beam needed to realize current quantization. Firstly, through beam simulation, it is verified that the electron bunch modulation method based on solenoid magnetic field and adjustable slit can be adopted to effectively improve the stability of electron bunch. Then, based on the simulation results, an experimental platform based on a small particle accelerator is designed, and a blocking Faraday cup detection scheme is designed for the current detection requirements of high stability μA magnitude. Finally, through experiments, under the condition of different electron gun current output, the instability of the electron beam cluster is reduced from 2% to 0.3% after regulation, which is consistent with the theoretical simulation result. The research in this paper preliminarily verifies the feasibility of applying particle accelerator to current quantization, and provides a new direction and idea for the theoretical and engineering research of quantum current source.

Key words: quantum current; particle accelerator; electronic beam tuning; Faraday cup; adjustable slit

0 引言

电流是最重要的电学物理量之一，其单位安培(A)是电磁量测领域唯一的国际基本单位。第 26 届国际计量大会对安培给出了最新的定义，1 A 定义为“1 s 内$(1/1.602\ 176\ 634)\times10^{19}$个电子移动所产生的电流强度”，即单位时间内通过截面的电荷量，构成电荷量的最小单位是电子电荷 e，所以电流也被量子化了[1-3]。安培的新定义基于电子的基本电荷，基本电荷是一个基本自然常数，其测量相对不确定已高达 10^{-9}。时间量是目前基于量子技术不确定度做的最好的物理量，铯原子喷泉时间频率基准的不确定度好于 2×10^{-15}，实验室中的锶光钟其长期稳定度首次达到 10^{-18} 量级[4-5]。因此，理论上电流强度的量子复现准确度应该与电子电荷量一致，远高于现有的所有电流标准[6-7]。

要实现电流的量子化，必须解决两个问题：一是如何准确控制发射的电子数；二是如何对电子数进行精准探测，国内外也是围绕这两个问题进行开

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目 (5700-202155197A-0-0-00)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5700-202155197A-0-0-00).

展。德国联邦物理技术研究院(physikalisch technische bundesanstalt, PTB)在基于 GaAs 异质结构中动态量子点的单电子泵(single electron pump，SEP)中得到 100 pA 量级的电流，不确定性优于 0.2×10^{-6}[8]。英国国家物理实验室(national physical laboratory，NPL)开发了基于 GaAs 量子点接触(quantum point contact，QPC)电荷传感器的新型误差计数方案，该方案证明了 SEP 传递误差约为 1×10^{-6}[9]。2014 年，使用硅基泵浦器件实现了低精度下的高电流，但产生的电流接近 500 pA，只有 0.1%的精度水平。随后，该设备被证明可以在高达 7.5 GHz 的频率下工作，对应 1.2 nA 的电流强度，与标称值的偏差约为 20×10^{-6}[10]。通过对国内外研究的调研，量子电流装置在电流稳定性、电流强度以及电子探测水平与工程实用尚存在较大的距离，仍需在精加工、超低温、高频技术及电子探测等方面进行技术攻关。

基于单电子隧道效应的电流量子基准由于技术上的困难，目前尚无法实现微安量级的输出，且超低温环境又给实用化带来了困难。此外，还存在高频、精加工等方面的困难，因此在技术没有较大突破的情况下，有必要寻求新的研究方案和实施途径。20 世纪 50 年代，就有人提出可对加速器中的电子流进行直接计数，从而实现基于电子的电荷量这一基本物理常数及频率量的电流量子基准[11-12]。但这一富有创造性的想法由于巨大的技术困难未能得到实现。随着电子加速器技术的发展，高稳定度高强度的电子发射与操控技术已成为可能。

本文通过对电子加速器中发射的大量电子进行调控，在束流下游的传输线上增加螺线管磁场散束和多孔剥离的刮束系统，将电子枪发出的电子束团的不稳定性从 2%降低至 0.3%，平均电流强度提升至微安量级，探索了区别与单电子隧道效应的电流量子产生方式，期望从原理上寻求电流量子化的新方法和新技术。

1 系统简述

1.1 加速器简介

粒子加速器是利用磁场力约束带电粒子运动轨迹，并通过电场力加速带电粒子而达到高能量的特种电磁装置[13]。射频电子直线加速器是目前产生约兆电子伏特(MeV) 量级电子束的常规手段，一般作为驱动自由电子激光、储存环、正负电子对撞机等大型科学装置的注入器。这类装置通常所需的电子束要求单个束团达到几百 pC 以上的高电荷量。我国自 20 世纪 50 年代后期就开始了电子加速器的研究，并于 20 世纪末 21 世纪初建成了以电子直线加速器为电子束注入器的储存环和对撞机。与国际上发展趋势相同，国内也是以研究强流电子束的产生与应用为主。

目前，加速器领域已具有成熟的电子束研究平台与技术，包括束流物理理论、束流动力学仿真软件、精确测量技术等。因此，可以考虑利用电子加速器产生的弱流电子束，经传输路径上的多狭缝刮束获得电流量子化所需要的高稳定度电子。

1.2 方案简述

基于加速器的准单电子产生装置的总体方案如图 1 所示[13]。首先，由电子枪产生一定强度的弱电子束流，经过脉冲高压静电场加速后束流被加速至几十 keV；束流随后在调束部分经过螺线管磁铁的聚散焦结构和束流剥离孔，电子束团外围发射度较大的电子被阻挡剥离，束团强度被精准控制到流强微安量级，最后在探测单元通过高精度的法拉第杯进行电子流强测量[14-15]。

由于采用射频加速结构，电子束在微观上呈现与射频场同频率的束团，对应的流强为束团流强。宏观上，因高压引出源和功率源的重复频率，电子束呈现与重复频率一致的矩形脉冲，对应的流强为宏脉冲流强。考虑到功率源的占空比， 整个时间轴上对应的流强为平均流强。对 3 种不同流强的定义描述如图 2 所示。

量子电流输出装置实际输出的是电荷束团，其波形与电流波形对应。根据不同的产生和引出机理，不同装置输出的电荷状态不同。以射频直线加速器为例，由于射频电子直线加速器是利用微波场将电子枪产生的束流变成一个个微脉冲短束团，其理想波形如图 2 所示，其周期即为射频周期 T_{rf}，每个微脉冲束团都占据一定宽度，在该宽度内考虑束流流强，也即微脉冲流强(bunch current，I_{bunch})，如图 2。此外，由于受功率源限制，用于加速电子束的微波

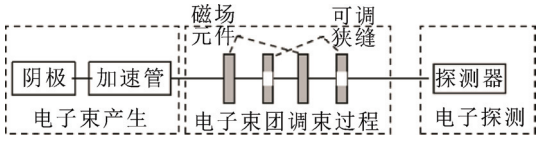


图 1 基于粒子加速器的电流量子化方案总体布局

Fig.1 General layout of current quantization scheme based on particle accelerator

场都有一定的占空比，体现为由微脉冲序列串构成宏脉冲具有一定的重复频率，相应的周期即宏脉冲周期，在一个宏脉冲内的平均流强即脉冲流强(pulse current，I_{pulse})。而对于宏观时间的平均流强，即图 2 中表示的平均电流(mean current，I_{mean})，表示的为整个时间轴上的平均流强。

从图 2 可以看出，在射频场周期固定的条件下，整个时间轴上的平均流强可以通过改变功率源重复频率调节，宏脉冲流强则不随其改变。而基于加速器的量子化电流要求能够稳定发射且被精准测量，因此后续主要针对宏脉冲流强开展研究。

1.3　弱流电子束的产生

电子枪是束流的发射端，由电子枪引出的电子束质量直接影响后端加速结构及传输结构出口处的束流质量。电子枪作为束流的源头，从辐射防护、调束以及电子探测方面要求其发射的束流强度不能太高，束流品质好。若流强太大，则在调束部分会由于束流损失过大而引起狭缝的损坏和较强的辐射；若束流品质差，比如能散大，或者发射度较大，会在加速管部分造成束损，对后面的束流光学部分带来较大影响。目前常用的电子枪包括热阴极电子枪、冷阴极电子枪、光阴极电子枪等。其中，热阴极电子枪工作原理是通过加热阴极，增加金属内部电子的动能，克服金属表面逸出功，向外发射电子。热阴极电子枪主要有热阴极栅控电子枪、热阴极直流电子枪、热阴极微波电子枪。从稳定性、使用寿命及加工、运行等成本方面考虑，该研究基于一台小型热阴极电子枪作为电子发射源，如图 3 所示，电子枪出口处的电子束流参数如表 1 所示[15-16]。

1.4　电子束团传输

由于热阴极发射、加速电场、加速电源等存在一定程度的不稳定性，加速器输出束团的能量及强度存在抖动，同时由于电子间的空间电荷效应，电子束团内部也存在不均匀性。空间电荷力是电子束在传输过程中横向发射度增长的重要因素，必须充分加以考虑。一般在低能段采用螺线管线圈的磁场来聚焦，其可以克服束流空间电荷效应及其他因各种效应导致的束流横向发射度增长引起的束流半径过分增加。外加螺线管时，会在轴上产生纵向磁场，由于洛伦兹力的作用，使粒子做辐向运动，从而达到聚焦的作用。忽略束流聚焦过程中形成的轴向电场和束旋转引起的轴向磁场，假设 γ 为常数，则束流在磁场中的横向运动包络方程[17]可以写为

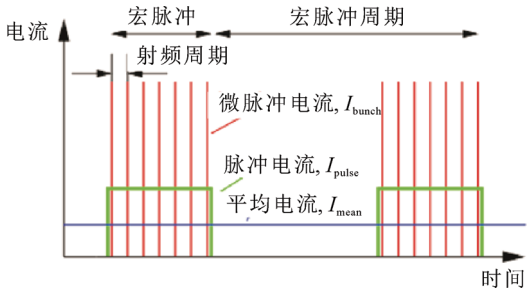


图 2　加速器中电流与电子束团示意图

Fig.2　Diagram of current and electron bunch in accelerator

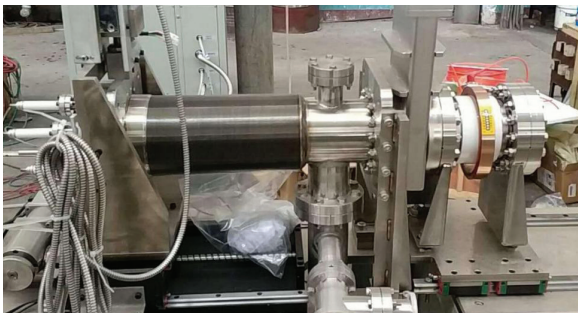


图 3　小型粒子加速器实验装置

Fig.3　Small particle accelerator experimental device

表 1　小型粒子加速器输出电子束流参数

Table 1　Output electron beam parameters of small particle accelerator

参数	数值
电子束能量/keV	15
束流脉冲强度/A	0.5
脉冲重复频率/Hz	1~50
脉冲平顶宽度/μs	2.0~4.5
束流在阴极下游 100 mm 处直径/mm	≤4
电子枪静态真空度/Pa	≤2×10^{-7}
束流强度不稳定性	>2%

$$\frac{\mathrm{d}^2 r}{\mathrm{d}z^2}=\frac{\mathrm{e}I\mu_0}{2\pi m_0\beta^3\gamma^3 c}\times\frac{1}{r}-\left(\frac{\mathrm{e}B(z)}{2m_0\beta\gamma c}\right)^2 r+\frac{\varepsilon^2}{\beta^2\gamma^2}\times\frac{1}{r^3} \quad (1)$$

式中：r 为束流横向包络，m；z 为纵向坐标，m；γ 为电子相对能量；β 为电子相对速度；e 为电子电荷量；m_0 为电子静止质量；c 为光速；μ_0 为真空中磁导率；$B(z)$为螺线管产生的轴向磁场，T；ε 为束流初始发射度，mm·mrad；I 为束流流强，A。式(1)右边第 1 项是由于空间电荷效应影响产生的散焦项，第 2 项是由于螺线管产生的纵向磁场的存在产生的聚焦项，需要聚焦磁场能够克服空间电荷效应并达到过聚焦的状态，因此在不考虑束流初始发射度的影响下，磁场强度的最小值需满足前两项系数

相等，即

$$\frac{\mathrm{e}I\mu_0}{2\pi m_0\beta^3\gamma^3 c}-\left(\frac{\mathrm{e}B(z)}{2m_0\beta\gamma c}\right)^2=0 \tag{2}$$

分别取磁场 $B(z)$的幅值为 0.020、0.025、0.030 和 0.350 T，利用 Python 编程求解微分方程，计算得到不同磁场强度时的束流包络线，如图 4 所示。由图 4 可见，束流在空间电荷力的作用下先发散，然后在聚焦磁场作用下聚束，但当磁场过小时，束流聚束后又会明显发散，破坏后面束流的品质。当磁场过大时，束流会出现振荡，出现多个聚焦点，且最后也会剧烈发散，所以聚焦磁场的强度选择要合适，如图 4 所示，当磁场强度为 0.03 T 时，束流聚焦后并没有迅速发散，而是呈聚束趋势，使得束流后面的品质较好。

1.5 电子束团调束

电子束团在调束系统中通过螺线管磁场进行聚焦(或散焦)，从而获得特定截面积的电子束。为了对电子束团中的电子个数进行控制，通过狭缝可以刮去外围粒子，并且可以通过调节狭缝的大小，控制所得束流的尺寸和流强等参数。

从加速器出口开始到束流传输线的模板，对束团的横向分布进行仿真，将束流分割成若干个非常薄的薄片，分别计算其半径的均方根值得到束流的包络曲线如图 5 所示。

从图 5 束流包络曲线可知，其束腰位置在 0.4288 m 处，束腰半径为 0.3298 mm。对比 1 ps 长度的束流薄片在磁场和空间电荷效应下的包络变化情况，具有大致相同的变化趋势。

束流相空间特性是衡量束流品质的重要参数，因此观察束流不同位置处的相空间分布可以看出电磁场对束流品质的影响。图 6 分别给出 1 ps 束流在螺线管线圈磁场的作用下不同位置处相空间的变化情况，其中横坐标表示电子在 x 或者 y 方向的分布，纵坐标表示对应方向的速度分量与 z 方向速度分量的夹角 θ，单位为毫弧度(mrad，1 mrad=10^{-3} rad)。从图 6 可以看到经过螺线管和狭缝的作用，电子束流的发射度逐渐改善，在传输的末端，发射度较电子枪出口处下降约 4 倍，且大部分的电子集中在传输中心线附近。

综上可见，狭缝刮去束流外围品质较差的粒子，保留中心高品质稳定的粒子，经过聚焦磁场的聚焦作用，束流横向尺寸大大减小，且束流相空间减小，呈蝴蝶结形状，束流品质得到提高，束流稳定性得到提高。

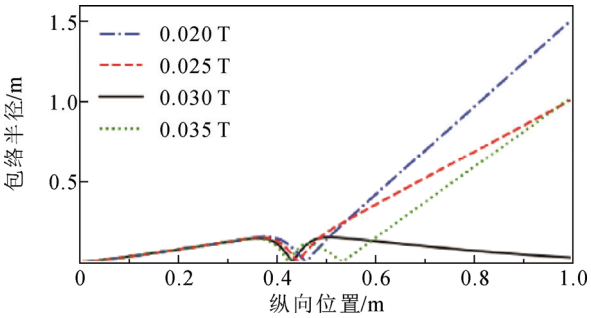


图 4 不同磁场强度下束流包络

Fig.4 Beam envelope under different magnetic field intensities

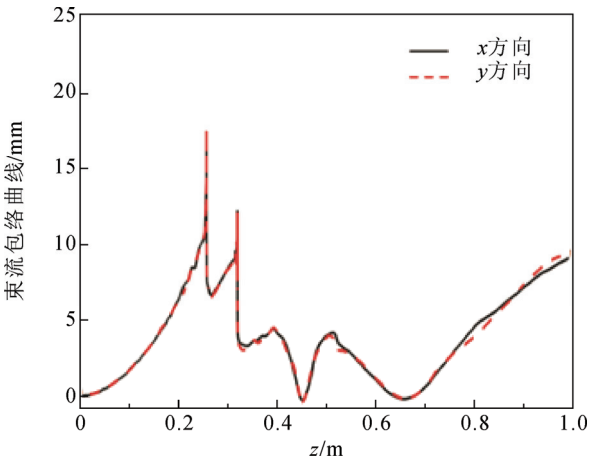


图 5 电子束流横向分布

Fig.5 Transverse distribution of electron beam

2 电子束流调控实验平台

2.1 实验平台

根据仿真结果，搭建了基于小型热阴极电子枪的电子束团调控实验平台，如图 7 所示。按照功能可分为：

1）电子枪接口：电子枪即电子发射端与调束腔体安装在两个支架上，两部分结构通过 CF100 的法兰进行连接，使两个腔体贯通，出口处安装快速电流互感器，实现纳秒量级的电流采样；

2）束流管道：束流管道由 316L 不导磁不锈钢加工而成，外径 110 mm，在该管道上设计了 7 个 CF35 的法兰口，构成运动部件与备用接口；

3）螺线管线圈：由漆包线绕制的线圈外加磁轭，构成对电子束流的磁场调控装置，安装在束流管道的外壁；

4）溅射离子泵：束流管道的真空度要求达到 10^{-7} Pa，需采用大口径的离子泵进行真空维持；

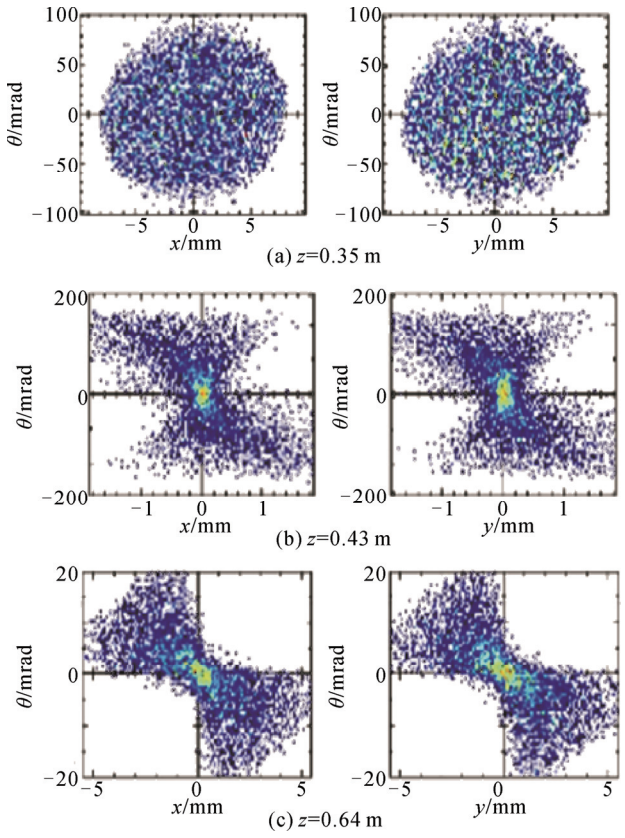


图 6　不同位置的束流相位图

Fig.6　Beam phase diagrams at different positions

5）可调狭缝：可调狭缝通过伺服电机控制，可准确地将狭缝的开孔中心与真空腔中轴线对齐，实现对电子束团的横向刮束；

6）束流末端：真空腔的末端为 CF100 的法兰，该法兰上通过陶瓷密封和固定了一个铜制法拉第杯，其作为束流强度测量的装置。

2.2　电子束流探测

法拉第杯杯芯是一个金属筒体，束流打在法拉第杯上被完全阻止而使其带电，把杯芯接地就会有电流产生，该电流大小反映了束流的强弱[18-19]。将此电流接到 I/V 转换放大器上，再接入 A/D 转换器采集得到束流流强的数值，因此法拉第杯能给出束流流强的绝对值。有两种因素会造成测量的误差：第一种是入射的带电粒子撞击法拉第杯表面产生低能量的二次电子而逃离；第二种是入射粒子的反向散射，其影响误差的本质是产生电流的电荷不再由入射电子数目提供，而是由净电荷，即入射电子与反射和二次电子差决定。采用 FLUKA 软件对二次电子的产生进行仿真，脉冲束流强度为 0.5 A，束流脉冲为 2 μs，束流能量为 15 keV，设置电子数目为 10^6。仿真结果如图 8(a)所示。可以看到，当 15 keV 的电子轰击在无氧铜上时，产生了一定量的二次电子，占比约 1%，但法拉第杯经过轴向加长，部分二次电子被法拉第杯重新吸收，且由于其能量较低，无法再次产生。从测量面看，逸出法拉第杯的二次电子数目在 1000 量级，占入射电子比例为 0.1%。根据仿真完成了法拉第杯的加工，如图 8(b)所示。

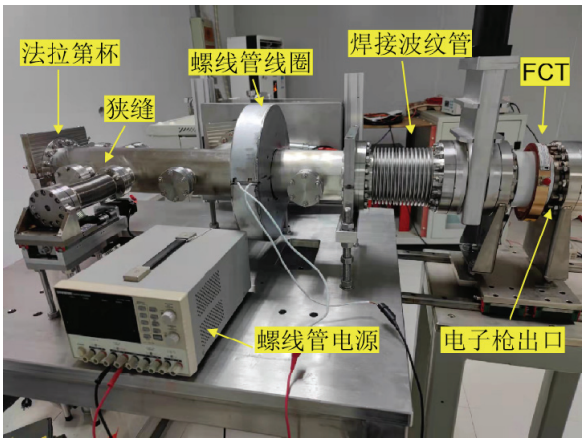
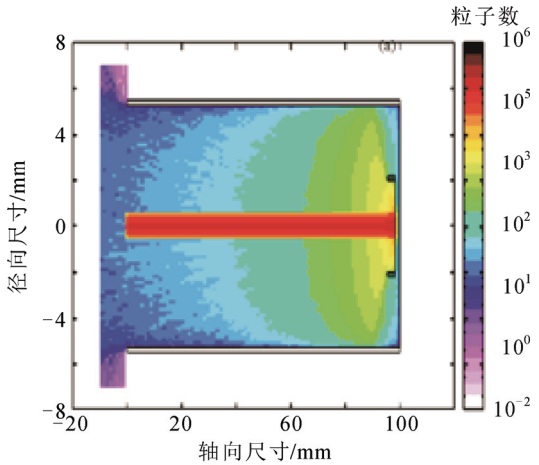
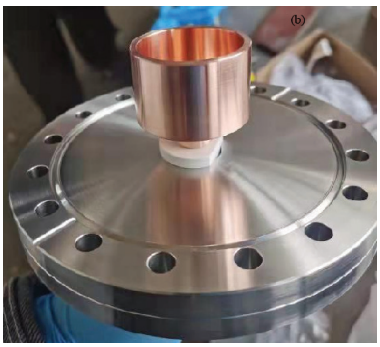


图 7　电子束团调控实验平台

Fig.7　Electron bunch control experimental platform



(a) FLUKA仿真二次电子分布



(b) 加工的法拉第杯实物图

图 8　法拉第杯二次电子仿真与实物

Fig.8　Faraday cup secondary electron simulation and physical object

根据对采样率和测量信号的分析，对采样电阻和万用表的型号参数进行了选择。采样电阻型号为RJ711-0.25W-40R，阻值为 40 Ω(精度 0.01%)。采样电阻将脉冲电流信号转换为脉冲电压信号，转换后脉冲电压的幅值在 10 V 以内，直接输入到万用表中进行测量。由于电流脉冲宽度在几个微秒量级，要求万用表具有较高的采样频率。FLUKE8558A 具有最高 5 MHz 的采样频率，可以进行高速测量，在 5 MHz 的采样频率下，测量 1 μs 的电压脉冲，每个 1 μs 脉冲至少可以采样 5 个数据点，从而保证采集速度，得出电压幅值。将函数信号发生器 KEYSIGH T33600A 与 FLUKE8558A 连接，8558A 直接测量信号发生器输出电压；万用表与上位机直接通过网线连接，通过以太网传输数据，连接示意图如图 9(a)所示。经过测试，在 5 MHz 采样率下，测量噪声带来的干扰小于 0.05%，如图 9(b)所示。

基于法拉第杯的测量系统误差来源 ε 主要由法拉第杯的二次电子引入的误差 ε_1、采样电阻误差 ε_2 及万用表误差 ε_3 组成，根据误差合成公式，系统测量误差为

$$\begin{aligned}\varepsilon=&(1+\varepsilon_1)\times(1+\varepsilon_2)\times(1+\varepsilon_3)-1=\\&\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3+\varepsilon_1\varepsilon_2+\varepsilon_2\varepsilon_3+\varepsilon_1\varepsilon_3+\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3\approx\\&\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3=0.001\,51\end{aligned}\tag{3}$$

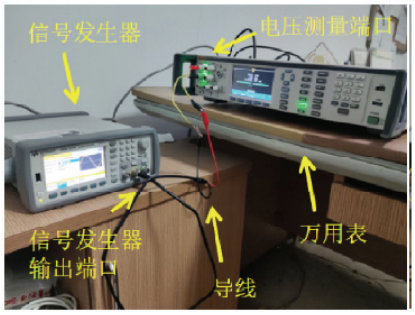
该系统的测量误差为 0.15%，其中最大的误差来源于法拉第杯二次电子产生引入的电荷转换为电流的误差，若要提高系统测量精度，则可采用抑制电场以及法拉第杯结构优化等方式进一步抑制二次电子产生。

3 微安级量子电流源调试

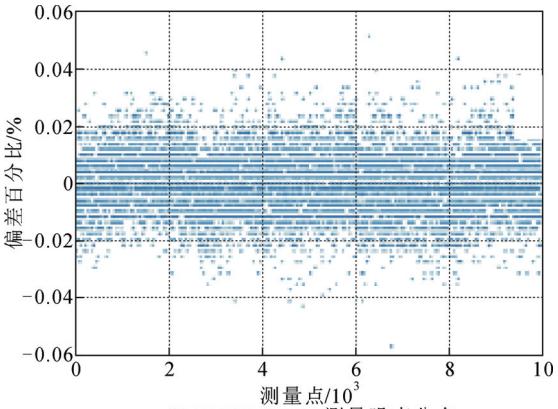
3.1 电子束团波形

本文采用的电子源为热阴极电子枪，由热电子发射和热阴极的空间电荷限制流可知，电子枪的发射能力受温度限制的 Schottky 方程、空间电荷作用力限制的 Child-Langmuir 定律双重作用[20-22]，通常电子枪设计工作在空间电荷限制流区域。从上述分析可以看到，一个微脉冲的束流在时间尺度上接近方波分布，在采用 Bergoz 公司快速束流互感器(fast current transformer，FCT，型号 FCT122)测量时，FCT 测量的一个微脉冲如图 10 中的箭头所指，上升沿和下降沿的时间在 ns 量级，束流波形接近方波，在中心点附近束流稳定性较好。

将电子枪输出的脉冲束流流强设置为 0.3 A，重复频率设置为 1 Hz，调节调束狭缝的孔径为 12 mm，设定脉宽时间为 2 μs，8558A 的采样率为 5 MHz，则在一个脉冲中，可采样 10 个点，调节磁场强度为 0.029 T，测量到一个微脉冲波形如图 11。由于采样率的限制，实际上无法测量到上升沿和下降沿，图 11 所示上升和下降只是画折线图连接的。在平顶段束流流强的稳定性很高，为 0.24%，主要是通过刮束的方式将电子束团边缘不稳定的电子刮掉，中心区域的电子从发射端开始就比较稳定，因此最终输出的电子束团流强比较稳定。



(a) FLUKE8558A 测试连接图



(b) FLUKE8558A测量噪声分布

图 9 基于法拉第杯的电子束流探测装置及测试结果

Fig.9 Electron beam current detection device based on Faraday cup and test results

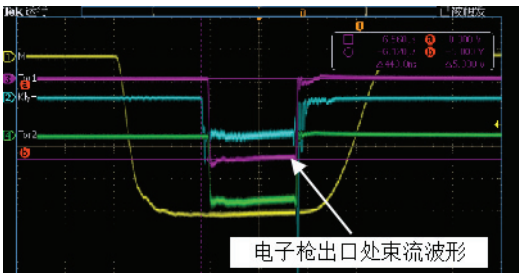


图 10 电子枪出口处 FCT 测量的电子束团波形

Fig.10 Waveform of electron bunch measured by FCT at the exit of electron gun

3.2　调束平台输出电流幅值

整套调束装置的系统运行稳定后，将电子枪输出的脉冲束流流强 I_{gun} 分别设置为 0.3、0.1 A，重复频率 f 设置为 1 Hz，脉冲宽度 4.5 μs，调节调束狭缝的孔径 R_s 分别为 12、6、2 mm，采用法拉第杯进行电流强度测量。取平顶部分中心点的电流值，作为该脉冲波形的电流脉冲幅值 I_{pulse}，测试结果如表 2 所示。

由表 2 可见，输出束流的脉冲强度不仅和电子枪的输出电流有关，也与狭缝的孔径有关，在固定电子枪输出束流强度的情况下，可以通过调节狭缝孔径的尺寸进行不同束流强度的输出，若采用多组狭缝组合，则可以实现多系数调节，从而实现较大范围的束流强度调节。

单脉冲针对的是微秒量级的微脉冲束流，当调节微脉冲个数，即设置脉冲重复频率时，可在宏观的时间尺度上得到不同的平均流强。当重复频率为 1 Hz，脉宽为 4.5 μs 时，1 s 内的平均流强 I_{mean} 如表 3。

由表 3 可见，当电子枪输出束流强度为 0.3 A，狭缝孔径为 12 mm，重复频率为 1 Hz，脉宽为 4.5 μs 时，平均流强为 1.062 μA。根据中心点电流值 I_p、脉冲频率 f 以及平顶脉冲时间 t_{pulse}，可计算电流的平均流强为

$$I_{mean} = I_p f \times t_{pulse} \tag{4}$$

当调节重复频率为 2 Hz 时，即 1 s 内有两个微脉冲，对应的平均流强为 2.124 μA。在本装置中重复频率最大可以设置为 50 Hz，即平均流强最大可为 53.1 μA。从上述测试结果可以看出，可以通过多参量的调节来实现不同强度的电流输出，在不改变输出束流状态下，可以改变狭缝的孔径、重复频率来对微脉冲电流强度和平均电流强度进行调节，且输出的电流波形是矩形波，非常适合于基于频率调节的高频波合成。

3.3　调束平台输出电流稳定性

整套调束装置的系统运行稳定后，将电子枪输出的脉冲束流流强分别设置为 0.3、0.1 A，重复频率 f 设置为 1 Hz，调节调束狭缝的孔径分别为 12、6、2 mm，采用法拉第杯进行电流强度测量。在各测量点，取平顶部分中心点前后各 1.5 μs 的电流值，根据最大值 I_{max}、最小值 I_{min} 和平均值 I_p 计算稳定度 S_b，如式(5)所示。

$$S_b = \frac{I_{max} - I_{min}}{2I_p} \times 100\% \tag{5}$$

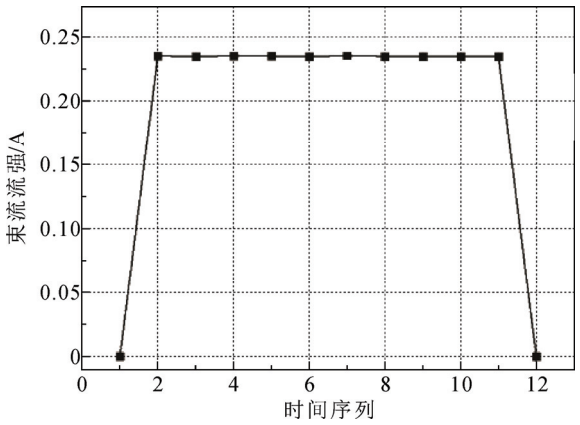


图 11　法拉第杯测量的一次微脉冲波形

Fig.11　A micro pulse waveform measured by Faraday cup

表 2　不同初始输出和孔径下探测的脉冲电流强度

Table 2　Pulse current intensity detected under different initial output and aperture

I_{gun}/A	R_s/mm	I_{pulse}/A
0.3	12	0.2360
0.3	6	0.1066
0.3	2	0.0142
0.1	12	0.0823
0.1	6	0.0494
0.1	2	0.0058

表 3　不同初始输出和孔径下探测的平均电流强度

Table 3　Average current intensity detected at different initial outputs and apertures

I_{gun}/A	R_s/mm	f/Hz	I_{mean}/μA
0.3	12	1	1.0620
0.3	6	1	0.4797
0.3	2	1	0.0639
0.1	12	1	0.3704
0.1	6	1	0.2223
0.1	2	1	0.0261

测试结果如表 4 所示，可以看到在不同的初始电流、孔径下，单个脉冲束流流强的不稳定性 S_b 均在 0.3%以内。

4　结论

本文基于电子加速器的电子调束技术在量子电流中的应用开展研究。通过电子束流的动力学分析，仿真结果表明通过在加速器束流输出一定的情况下，利用螺旋管磁场和可调狭缝的组合能有效地对电子束团的横向尺寸进行控制，从而提高电子束团的稳定性。

表 4 调束平台输出电流的稳定性测试

Table 4 Stability test of output current of beam adjusting platform

I_{gun}/A	R_s/mm	I_{max}/A	I_{min}/A	I_p/A	S_b/%
0.3	12	0.2366	0.2354	0.2360	0.25
0.3	6	0.1069	0.1063	0.1066	0.24
0.3	2	0.0142	0.0141	0.0142	0.25
0.1	12	0.0825	0.0821	0.0823	0.25
0.1	6	0.0495	0.0493	0.0494	0.24
0.1	2	0.0058	0.0057	0.0058	0.25

1）采用束流动力学模拟，研究了在聚焦磁场和狭缝共同作用下束流包络和相位的分布，经过螺线管和狭缝的作用，电子束流的发射度在逐渐改善，在传输的末端，发射度较电子枪出口处下降了约 4 倍，且大部分的电子集中在传输中心线附近。

2）设计了基于法拉第杯的电子束团探测方案，采用 FLUKA 软件对二次电子产生进行仿真，二次电子产生率低于 0.1%；利用 FLUKE8558A 万用表和 0.01%精度采样电阻，电子束团测量系统的测量误差为 0.15 %。

3）搭建了基于小型热阴极电子枪的电子束团调控实验平台，在 1 Hz 的重复频率下电子束团不稳定性优于 0.3%，对应的平均流强大于 1 μA，与出口处的 FCT 测量结果相比，有效地提高了束流的稳定度。通过电子调控的实验结果，验证了数值分析结果，即在磁场和狭缝的共同作用下能够对束流的横向分布进行较好的调节。

通过本文的研究，探索了区别与单电子隧道效应的电流量子产生方式，对寻求电流量子化的新方法和新技术具有重要的参考价值。

参考文献 References

[1] 沈平子，贺 青，张钟华，等. 电磁计量单位制沿革[J]. 计量技术，2019(5)：36-42，80.
SHEN Pingzi, HE Qing, ZHANG Zhonghua, et al. The revolution of the SI units of electromagnetism[J]. Measurement Technique, 2019(5): 36-42, 80.

[2] 马爱文，王 琦，张佳楠. 浅谈国际单位量子化变革对我国计量体系的影响[J]. 中国测试，2020，46(11)：1-4.
MA Aiwen, WANG Qi, ZHANG Jianan. Discussion on the influence of quantization reform of international units on China metrology system[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(11): 1-4.

[3] 黄晓钉，蔡建臻，王 路. 电学量子计量技术的进展与趋势[J]. 宇航计测技术，2012，32(5)：31-35.
HUANG Xiaoding, CAI Jianzhen, WANG Lu. The recent technique trend and progress of quantum metrology on electricity[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2012, 32(5): 31-35.

[4] 房 芳，张爱敏，林弋戈，等. 时间：天文时-原子秒-基于常数重新定义秒[J]. 中国科学：物理学 力学 天文学，2021，51(7)：074208.
FANG Fang, ZHANG Aimin, LIN Yige, et al. Time: Astronomical time-atomic time-redefining second based on constant[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2021, 51(7): 074208.

[5] 纪 亮. 中国计量院成功研制出铯原子喷泉基准钟(NIM6)[J]. 中国计量，2020(2)：9.
JI Liang. China Institute of Metrology has successfully developed a cesium fountain reference clock (NIM6)[J]. China Metrology, 2020(2): 9.

[6] 雷 民，姜春阳，李登云，等. 高电压比例标准装置技术综述[J]. 高电压技术，2021，47(6)：1893-1904.
LEI Min, JIANG Chunyang, LI Dengyun, et al. Review of high voltage ratio standard devices technology[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1893-1904.

[7] 葛磊蛟，李元良，陈艳波，等. 智能配电网态势感知关键技术及实施效果评价[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2269-2280.
GE Leijiao, LI Yuanliang, CHEN Yanbo, et al. Key technologies of situation awareness and implementation effectiveness evaluation in smart distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2269-2280.

[8] KAESTNER B, KASHCHEYEVS V. Non-adiabatic quantized charge pumping with tunable-barrier quantum dots: a review of current progress[J]. Reports on Progress in Physics, 2015, 78(10): 103901.

[9] PEKOLA J P, SAIRA O P, MAISI V F, et al. Single-electron current sources: toward a refined definition of the ampere[J]. Reviews of Modern Physics, 2013, 85(4): 1421-1472.

[10] BAE M H, AHN Y H, SEO M, et al. Precision measurement of a potential-profile tunable single-electron pump[J]. Metrologia, 2015, 52(2): 195-200.

[11] SCHERER H, LOTKHOV S V, WILLENBERG G D, et al. Steps toward a capacitance standard based on single-electron counting at PTB[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(2): 666-669.

[12] VAN DER HEIJDEN J, TETTAMANZI G C, ROGGE S. Dynamics of a single-atom electron pump[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 44371.

[13] 童光球，赵克功，张秀增. 单个电子隧道电流基准及其在计量科学中的潜在应用[J]. 物理，1997，26(7)：434-436.
TONG Guangqiu, ZHAO Kegong, ZHANG Xiuzeng. Single electron tunnel current reference and its potential application in metrology[J]. Physics, 1997, 26(7): 434-436

[14] 张钟华. 量子计量基准的现状[J]. 仪器仪表学报，2011，32(1)：1-5.
ZHANG Zhonghua. Development of quantum measurement standards[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(1): 1-5.

[15] 裴元吉. 电子直线加速器设计基础[M]. 北京：科学出版社，2013.
PEI Yuanji. Design basis of electron linear accelerator[M]. Beijing, China: Science Press, 2013.

[16] 邓庆勇. BEPCII 储存环逐束团测量研究[D]. 北京：中国科学院大学，2015.
DENG Qingyong. Bunch-by-bunch measurement of BEPCII storage ring[D]. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.

[17] 李小飞，余佶成，胡桐宁，等. 应用于电流量子化的弱流电子束装置概念设计[J]. 自动化仪表，2020，41(8)：61-65.
LI Xiaofei, YU Jicheng, HU Tongning, et al. Conceptual design of weak-current E-beam equipment for the application to current quantization[J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41(8): 61-65.

[18] BARYSHEVSKY V G. Coherent radiation produced by a relativistic

bunch of charged particles passing through a photonic crystal[J]. arXiv, 2022: 2201.09530.

[19] 胡桐宁. 紧凑型亚毫米波 FEL 预注入器关键技术研究[D]. 武汉：华中科技大学，2013.
HU Tongning. Key technology researches of Submilimeter-wave FEL Pre-injector[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[20] RICHTER C, KALUZA M, KARSCH L, et al. Dosimetry of laser-accelerated electron beams used for in vitro cell irradiation experiments[J]. Radiation Measurements, 2011, 46(12): 2006-2009.

[21] MEI Y, LI S J, ARRINGTON J, et al. A direct-sampling RF receiver for MOLLER beam charge measurement[J]. arXiv, 2021: 2110.09575.

[22] GUNNARSSON J B, TORFASON K, MANOLESCU A, et al. Space-charge limited current from a finite emitter in Nano- and Microdiodes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(1): 342-346.



JIAO Qiang

焦　强

1999—，男，硕士生

主要从事量子电流探测、电路设计及仿真方面的研究工作

E-mail: m202172048@hust.edu.cn



ZHOU Feng

Ph.D., Professor

Corresponding author

周　峰(通信作者)

1980—，男，博士，教授级高工，硕导

主要从事电力计量、量子传感方面的研究工作

E-mail: zhoufeng@epri.sgcc.com.cn

收稿日期　2022-10-31　修回日期　2023-01-29　　编辑　卫李静