第 35 卷第 3 期
2023 年 3 月

强 激 光 与 粒 子 束
HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS

Vol. 35，No. 3
Mar.，2023

·粒子束及加速器技术·

强流脉冲束流位置探测器标定装置物理设计*

李 勤， 何小中， 蒋 薇， 杨治勇， 刘云龙

（中国工程物理研究院 流体物理研究所 脉冲功率科学与技术重点实验室，四川 绵阳 621900）

摘 要： 从强流脉冲电子直线感应加速器电子束流位置探测器测量原理出发，进行了标定装置物理设计，确定标定装置采用同轴结构，对束流探测器位置测量精度和测量范围、偏心同轴线对位置标定结果的影响进行了理论分析，并根据分析结果确定同轴结构内外导体相对位置调节范围、同轴线长度和特性阻抗。电路模拟和实验测量结果验证了在非匹配传输条件下可以得到满足位置标定要求的快脉冲信号波形。

关键词： 直线感应加速器；脉冲电子束；位置探测器；标定；标定装置；设计

中图分类号： TM930.2 **文献标志码：** A **doi**: 10.11884/HPLPB202335.220224

Physical design of calibrated device for intense pulse electron beam position monitor

Li Qin， He Xiaozhong， Jiang Wei， Yang Zhiyong， Liu Yunlong

（*Key Laboratory of Pulsed Power*, *Institute of Fluid Physics*, *CAEP*, *P. O. Box* 919-106, *Mianyang* 621900, *China*）

Abstract: Accurate measurement of the intense pulse electron beam transverse position is not only related to the technology of beam position monitor (BPM) design, machining and assembly, but also related to calibration of BPM. This paper describes the physical design of the calibrated device based on the measuring principle of intense pulse electron beam position monitor in linear induction accelerator. A coaxial line structure is used as the calibrated device. The axial length that affects the electromagnetic field at a given location and the position measurement affected by coaxial line with displaced inner conductor are analyzed in theory, the results determine the length and the characteristic impedance of the coaxial line. The extent of inner conductor displacement is determined by the calculated errors of beam position measurement. Pulse signal mismatch transmission in calibration, the PSpice simulation and experimental measurement are performed, and results show that a required pulse waveform is obtained.

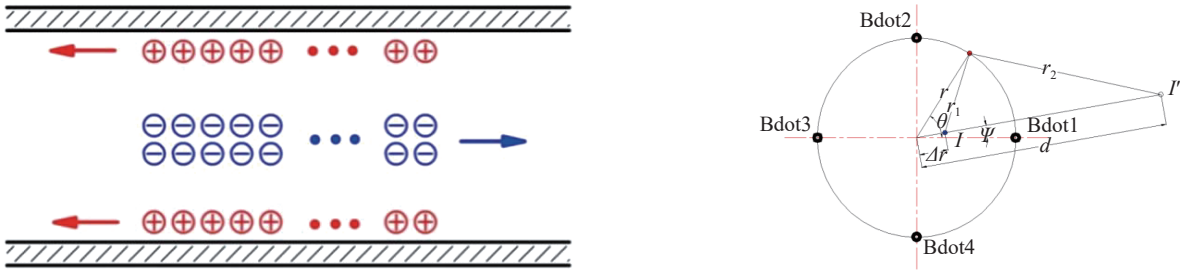
Key words: linear induction accelerator, pulsed electron beam, position monitor, calibration, calibrated device, design

在电子直线感应加速器中，常用电阻环探测器[1-3]和磁探测器[4]作为束流探测器，用于测量束流位置。探测器测量信号为 ns 脉冲信号，具有信号幅度大、可直接测量，需进行波形采集等特点。束流位置是加速器的关键参数，是束流实验调试的判断依据。为了提高测量精确度，不仅要求提高探测器设计、加工、装配技术水平以及合理的信号采集处理技术，而且要求实现探测器的准确标定。束流探测器不是标准产品，需要根据加速器原理、结构、束流信号特点、测量精度等要求进行设计，具有专用性，需专门设计标定装置并建立标定系统进行标定[5-10]。强流脉冲束流位置探测器标定，一般基于探测器测量原理及测量信号特点，设计能模拟束流传输的标定装置，采用比对法进行标定。根据测量原理，确定将传输脉冲信号的同轴线模拟束流传输，同轴结构外导体模拟束传输管道，内导体通过脉冲电流信号来模拟电子束，即采用同轴结构作为标定装置。本文从强流脉冲电子直线感应加速器的磁探测器测量原理出发，对偏心同轴线的影响[11]、束流探测器测量范围[12-13]、脉冲信号非匹配传输等进行理论分析、计算和实验，并根据结果确定同轴线长度、阻抗、内外导体相对位置调节范围等，完成强流脉冲束流位置探测器标定装置物理设计。

* 收稿日期：2022-07-13； 修订日期：2022-10-14
基金项目：国防科技专项研究基金项目
联系方式：李 勤，liqin288@163.com。

1　测量原理

强流脉冲电子直线感应加速器的电子束脉冲宽度一般为几十 ns，在束管道中加速传输的电子束，可以等效为在金属管道中的一无限长线电流。当电子束在金属管道内传输时，在管内壁会产生强度相等方向相反的感应电流，如图 1(a)所示。管道内的电场和磁场由电子束和感应电流共同产生。采用镜像法求解[14]，如图 1(b)所示，在管半径为 r 的管道内、位于(Δr, ψ)处(ψ是偏角)的电流 I 在管道内壁产生的感应电流可以由金属管道外、距管道中心为 d 的镜像电流 I' 等效，由金属导体是一等势体的边界条件得到：$I'=-I$, $d=r^2/\Delta r$, Δr 是束流偏离管道中心的距离，即束流横向位置。



(a) induced current caused by electron beam propagation in metal pipe　　(b) electromagnetic field derived from image current

Fig. 1　Sketch of electron beam propagation

图 1　束流传输示意图

根据电磁场理论，推导得到管壁偏角为 θ 处的磁感应强度为

$$B_i(\theta)=\frac{\mu_0 I}{2\pi r}\cdot\frac{1-\rho^2}{1+\rho^2-2\rho\cos(\theta-\psi)} \tag{1}$$

式中：μ_0 是真空磁导率，$\rho=\Delta r/r$。

对式(1)进行泰勒级数展开得到

$$B_i(\theta)=\frac{\mu_0 I}{2\pi r}(1+2\rho\cos(\theta-\psi)+2\rho^2\cos 2(\theta-\psi)+2\rho^3\cos 3(\theta-\psi)+\cdots) \tag{2}$$

由于束流传输时的偏心很小，即 Δr 很小，则 $\rho\ll 1$，忽略高阶项，可以得到 θ=0、π/2、π、3π/2 四个象限点的磁场强度为

$$\begin{aligned}
B_1(\theta=0)&\approx\frac{\mu_0 I}{2\pi r}(1+2\rho\cos\theta+2\rho^2\cos 2\theta+2\rho^3\cos 3\theta)\\
B_2(\theta=\pi/2)&\approx\frac{\mu_0 I}{2\pi r}(1+2\rho\sin\theta-2\rho^2\cos 2\theta-2\rho^3\sin 3\theta)\\
B_3(\theta=\pi)&\approx\frac{\mu_0 I}{2\pi r}(1-2\rho\cos\theta+2\rho^2\cos 2\theta-2\rho^3\cos 3\theta)\\
B_4(\theta=3\pi/2)&\approx\frac{\mu_0 I}{2\pi r}(1-2\rho\sin\theta-2\rho^2\cos 2\theta+2\rho^3\sin 3\theta)
\end{aligned} \tag{3}$$

由式(3)可知，B_1 和 B_3 的差与束流在 x 方向的位置成正比，B_2 和 B_4 的差与束流在 y 方向的位置成正比。磁探测器在四个象限点上设置 4 个小线圈 (B-dot)，匝数为 N、截面积为 A 的小线圈(线圈为微分探头)上的感应电动势为

$$V(\theta)=\frac{NA}{\tau}\cdot B_i(\theta) \tag{4}$$

式中：τ 是积分器的积分常数。

4 个探头线圈信号分别为 V_1、V_2、V_3、V_4，将式(3)代入式(4)并进行差比和计算，得到束流位置为

$$\Delta x=r\cdot\frac{V_1-V_3}{V_1+V_2+V_3+V_4},\quad \Delta y=r\cdot\frac{V_2-V_4}{V_1+V_2+V_3+V_4} \tag{5}$$

理论上可以由式(5)计算得到束流位置，但在实际应用中，由于各种加工公差、装配误差、积分器差异性等的影响，实际的束流位置与理论计算结果有差异，因此，在安装到加速器并用于实验测量前，必须对束流探测器进行标定。

2　标定装置物理设计

2.1　同轴线长度确定

强流脉冲束流探测器测量束流位置的测量原理基于在金属管道中传输的无线长线电流，而位置标定装置长度有限，因此需分析在无限长线电流条件下，一定长度电流在探测器处产生的磁场强度，以此确定同轴线长度。

在金属管道中传输的偏心为 Δr 的无限长线电流 I 产生的磁场如式(1)，则其中长度为 Z 的线电流在管壁任意一点如 M 点产生的磁场强度为

$$B_z(\theta)=\frac{\mu_0 I}{4\pi r}\cdot\frac{1-\rho^2}{1+\rho^2-2\rho\cos(\theta-\psi)}(\sin\beta_1-\sin\beta_2) \tag{6}$$

式中：β_1、β_2 是点 M 对轴向长度 Z 的张角，如图 2 所示。设轴向长度 $Z=\pm nr$（n 是正整数），则式(6)可改写为

$$B_z(\theta)=\frac{\mu_0 I}{2\pi r}\cdot\frac{1-\rho^2}{F(\rho)}\frac{1}{\sqrt{1+F(\rho)/n^2}}$$
$$F(\rho)=1+\rho^2-2\rho\cos(\theta-\psi) \tag{7}$$

按式(7)计算不同范围的电流在点 M 产生的磁场强度 B_z，并与无限长电流产生的磁场强度 B 相比，结果如图 3 所示。结果表明，点 M 场强的 70.7% 由 $Z=\pm r$ 范围的电流产生，在 $Z=\pm 7r$ 范围的电流已使点 M 的场强达到 99%，即束流探测器测量信号强度的 70.7% 由轴向范围为$\pm r$ 的场产生，99% 的信号大小来自于$\pm 7r$ 轴向范围的场强。为达到磁场强度测量误差≤1%，要求标定装置长度需大于 $14r$。

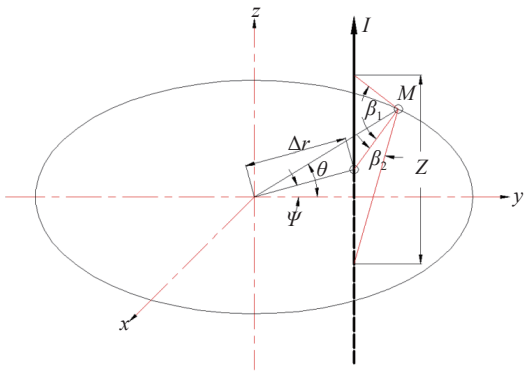


Fig. 2　Sketch of axial magnetic field generated by infinite length line current

图 2　无限长电流在范围 Z 内的磁场示意图

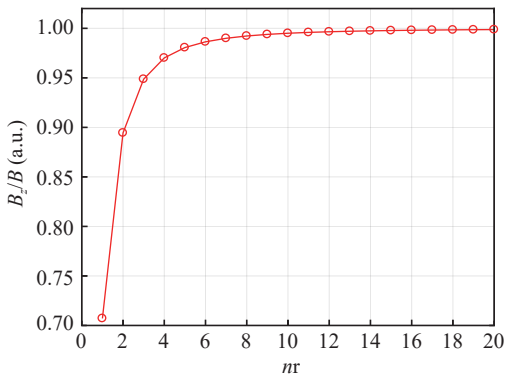


Fig. 3　Magnetic field *vs* axial distance

图 3　磁场强度沿轴向范围的变化

2.2　标定装置特性阻抗

进行束流探测器位置标定时，通过调节标定装置内外导体的相对位置，模拟束流位置的变化，得到束流探测器在不同位置的测量结果，实现探测器位置标定。实际上偏心同轴线与偏心束流产生的电磁场有一定差异，根据文献 [11]，对于内导体半径为 r_i、外导体半径为 r 的偏心同轴线，在管壁处的磁场分布的泰勒展开为

$$B_c(\theta)=\frac{\mu_0 I}{2\pi r}\left[1+\frac{\rho_c^2 r^2}{(r^2-r_i^2)\ln(r/r_i)}+\cdots\right]\left[1+\frac{2\rho_c r^2\cos(\theta-\psi)}{r^2-r_i^2}+\frac{2\rho_c^2 r^4\cos 2(\theta-\psi)}{(r^2-r_i^2)^2}+\cdots\right] \tag{8}$$

式中：$\rho_c=\dfrac{\Delta R}{r}$，$\Delta R$为内导体几何中心相对外导体几何中心的偏离。当 $\rho_c\ll 1$，忽略 ρ_c^2 及以上高阶项得到

$$B_c(\theta)\approx\frac{\mu_0 I}{2\pi r}\left[1+2\rho_c\frac{r^2}{r^2-r_i^2}\cos(\theta-\psi)\right] \tag{9}$$

比较式(9)与式(2)，两式中与束流位置相关的项不同，当偏心束流和偏心同轴线的位置偏移 $\Delta r=\Delta R$ 时，则 $\rho=\rho_c$，此时偏心电流和偏心同轴线在管壁处产生的磁场强度相差了一个比例因子$\dfrac{r^2}{r^2-r_i^2}$，即两者在管壁处产生的磁场强度不同。

对于偏心同轴线，当内导体偏离中心时，同轴线内电场分布发生变化，导致内导体表面电流沿角向分布发生变化，其分布与同轴线尺寸和偏心大小有关。如果将偏心同轴线内导体等效为一线电流，并将等效线电流的位置视为内导体的电中心，则线电流的位置将不会是内导体的几何中心，即偏心同轴线内导体的几何中心与电中心不重合。

设几何偏心为 ΔR 的偏心同轴线的电中心为 ΔR_0，则偏心为 ΔR_0 的线电流在管壁处产生的磁场分布如式(1)所示，其泰勒级数展开并忽略 ρ^2 及以上高阶项为

$$\mathrm{B}_{\mathrm{ci}}(\theta) \approx \frac{\mu_0 I}{2\pi r}\left[1+2\frac{\Delta R_0}{r}\cos(\theta-\psi)\right] \tag{10}$$

偏心同轴线与偏心线电流在管壁处的磁场分布相等，即 $B_{\mathrm{c}}(\theta)=B_{\mathrm{ci}}(\theta)$，由此可得

$$\Delta R_0 = \Delta R\frac{r^2}{r^2-r_i^2} \tag{11}$$

式(11)表明偏心同轴线电中心比几何中心大。图 4 是按式(11)计算的偏心同轴线电中心与几何中心比随特性阻抗 Z_0 的变化情况，Z_0=50 Ω 时，电中心与几何中心的比值为 1.23，随 Z_0 增大，比值迅速降低，然后随 Z_0 增大而缓慢降低。

根据测量原理，束流探测器测量位置是线电流位置，即偏心同轴线内导体的电中心位置，而对束流探测器位置进行比对标定时，采用内导体几何中心作为位置真值，将位置真值与测量结果进行比较，得到位置校正结果。根据以上分析，当标定装置采用低阻抗同轴线时，将使位置标定结果误差增大，因此必须采用高阻抗同轴线设计。根据图 4 结果，当同轴线特性阻抗 Z_0=160 Ω 时，电中心与几何中心相差 0.5%，Z_0=200 Ω 时相差 0.1%，可以据此确定标定装置特性阻抗。

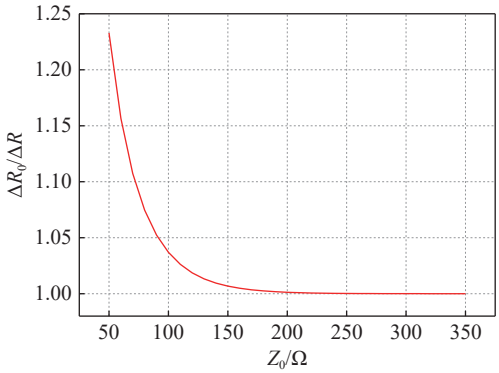


Fig. 4　Ratio of electric center to geometric center *vs* characteristic impedance of coaxial line

图 4　同轴线电中心与几何中心比值随特性阻抗变化

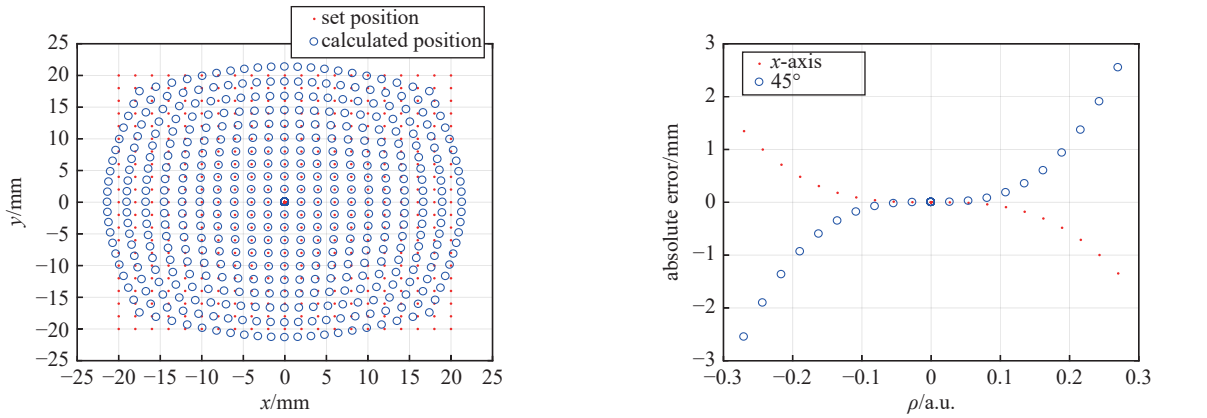
2.3　同轴线内外导体位置调节范围

对测量信号按式(5)计算得到束流位置，只有当束流偏心较小时，即 $\rho \ll 1$，才能得到准确的束流位置[15]，但当束流偏心较大时，由于不满足高阶忽略近似条件，将引起较大的位置测量结果误差。因此，可通过分析高阶近似条件引入的误差随束流位置的变化，确定同轴线内外导体相对位置的调节范围。

按照式(3)和式(5)计算不同束流位置时的探测器位置测量结果，并与束流位置比较，结果如图 5 所示，其中图 5(a)是束流设置位置和计算位置在横向平面的结果比较，计算位置即是理想束流探测器的位置测量结果，理想束流探测器指无公差、探头性能一致的探测器，图 5(b)是在 x 轴和 45°方向束流设置位置和计算位置的绝对误差随偏心的变化。结果表明：随束流偏心增大，绝对误差增大，当 $\rho>0.2$ 时，绝对误差将大于 0.5 mm，而当 $\rho<0.1$ 时，绝对误差小于 0.1 mm。同时考虑在加速器实验时，束流偏心一般较小，而且要求束流探测器在小偏心时的测量结果更准确。据此确定同轴线内外导体相对位置在横向方向的调节范围为±0.1r。

2.4　非匹配条件下快脉冲信号传输分析与实验

在设计位置标定装置时，为减小偏心同轴线的影响，需增大同轴线特性阻抗，同时由于标定系统的大电流要求和传输电缆特性阻抗限制，将使标定系统成为非匹配脉冲信号传输系统，出现信号反射叠加，影响脉冲波形，因此



(a) beam position in transverse plane　　(b) absolute errors of beam position between setting and calculation

Fig. 5　Compareison between measurement of ideal BPM and set position

图 5　理想束流探测器位置测量结果与束流位置设置结果比较

需分析研究脉冲波形变化情况及主要影响因素。

应用 PSpice 电路模拟技术，通过建立等效电路，分析同轴线特性阻抗、电长度、负载变化等对脉冲信号的影响。根据标定系统脉冲信号传输线路建立等效电路如图 6 所示。图中 V1 为脉冲信号源，设置其幅度为 5 kV、前沿 20 ns、脉宽 90 ns，T1、T3 为特性阻抗 50 Ω 的信号输入输出电缆，T2 为位置标定装置，R_1 负载电阻。设置电压电流探头测量负载电压 V_R、负载电流 I_R 和标定装置输入电流 I_B，标定装置输入电流就是束流探测器测量信号，称为标定电流信号。

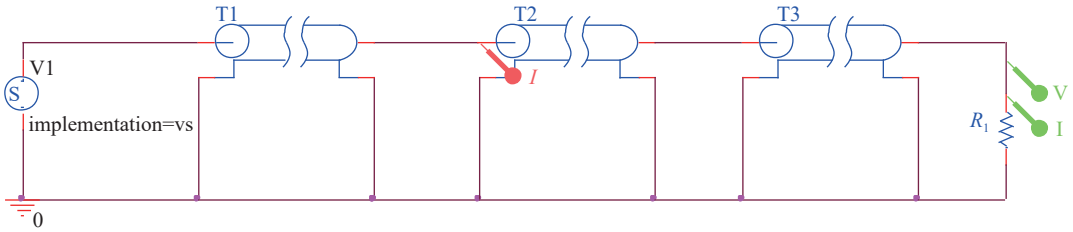


Fig. 6　Equivalent circuit

图 6　等效电路图

首先分析标定装置特性阻抗对脉冲信号波形的影响，在负载电阻为 50 Ω、标定装置电长度为 3 ns 的条件下，计算不同特性阻抗时的负载电压、电流和标定电流信号，结果如图 7 所示。其次分析标定装置电长度对脉冲信号波形的影响，在负载为 50 Ω、标定装置特性阻抗为 300 Ω 时，计算不同电长度时的脉冲波形，结果如图 8 所示。最后分析负载电阻的影响，在标定装置电长度为 8 ns、特性阻抗为 300 Ω 时，计算不同负载电阻时的结果如图 9 所示。

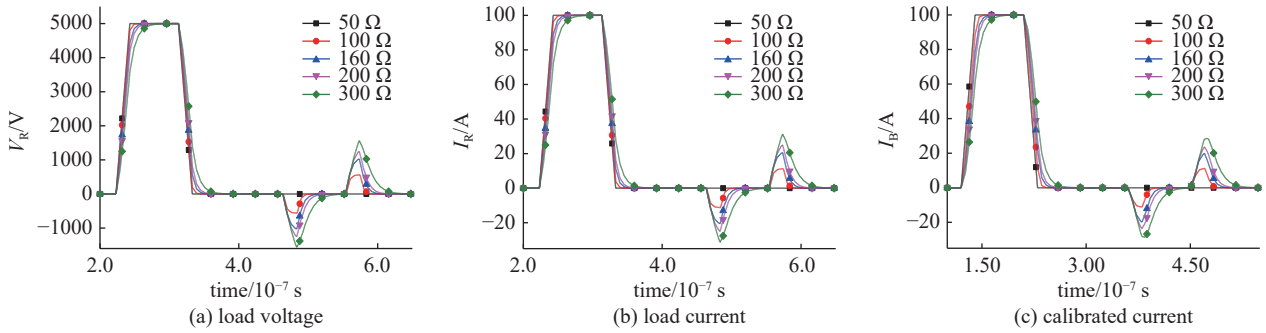


Fig. 7　Pulse waveform in different characteristic impedance of calibrated device

图 7　不同标定装置特性阻抗时的脉冲波形

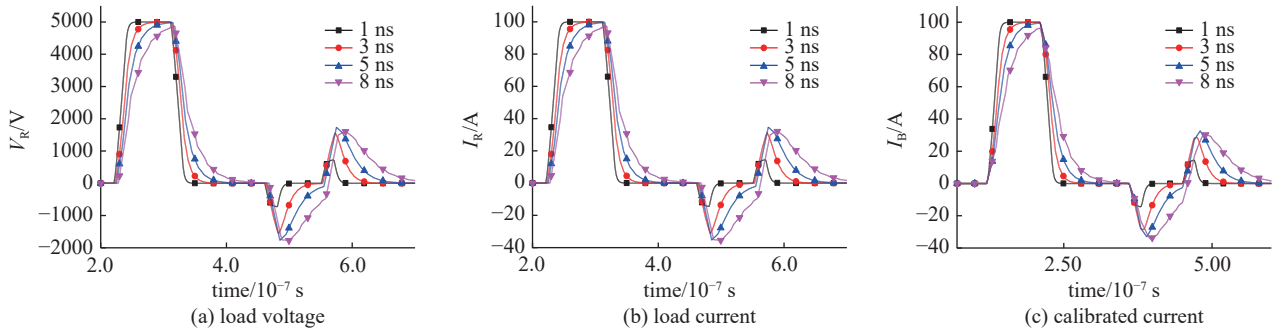


Fig. 8　Pulse waveform in different length of calibrated device

图 8　不同标定装置电长度时的脉冲波形

模拟计算结果表明，标定装置特性阻抗和电长度对负载电压电流和标定电流大小无影响，但会显著影响脉冲信号波形，特性阻抗趋近匹配电阻、电长度越短，波形越好；负载电阻改变负载电压电流大小，不改变标定电流大小，并且对标定电流脉冲波形无影响。

为验证电路模拟结果，在两套同轴结构上进行实验测量。同轴结构特性阻抗为 300 Ω，电长度分别为 3 ns 和 8 ns。8 ns 同轴结构信号输入输出端采用锥形过渡连接 N 型电缆头，并与信号电缆实现匹配连接，而 3 ns 同轴结构无锥形过渡段。采用 P6015 和 P4100 探头测量负载电压和电流，电阻环束流探测器测量标定电流。首先测量脉冲信号

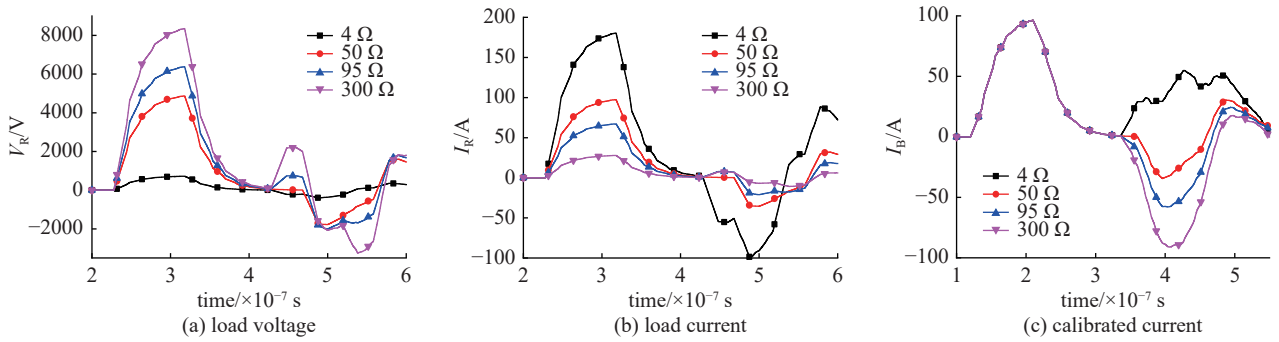


Fig. 9　Pulse waveform in different load resistance

图 9　不同负载下的脉冲波形

源输出信号。脉冲信号源输出通过匹配电缆连接 50 Ω 电阻负载，在负载上测量的电压 V_0 和电流 I_0 信号，波形如图 10 所示。

应用电长度为 8 ns 的同轴结构，测量不同负载电阻时的负载电压、电流和标定电流，结果如图 11 所示。

在负载电阻为 50 Ω 时，测量两套同轴结构上的负载电压、电流和标定电流，结果如图 12 所示，其中 V_R，I_R，I_B 对其最大值进行归化。

实验测量结果验证了电路模拟结果，但 3 ns 同轴结构信号波形只稍好于 8 ns 同轴结构，未有模拟结果的显著变化，分析可能是两种同轴结构信号输入输出端不同导致。

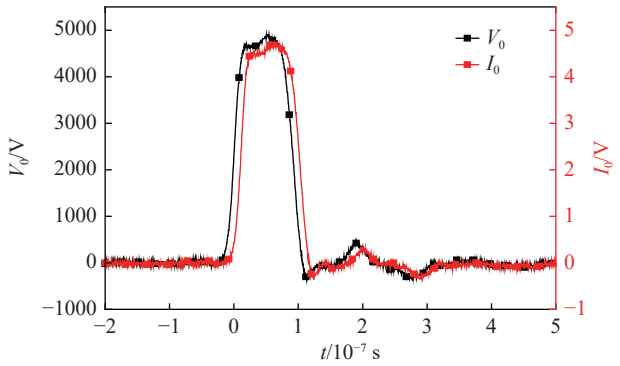


Fig. 10　Output voltage and current waveform of pulse signal source

图 10　脉冲信号源输出电压、电流波形

电路模拟和实验结果表明，经过非匹配传输后，将使脉冲信号前沿变慢、平顶变差，但通过选择合适的特性阻抗和电长度，可以得到满足位置标定要求的脉冲波形。

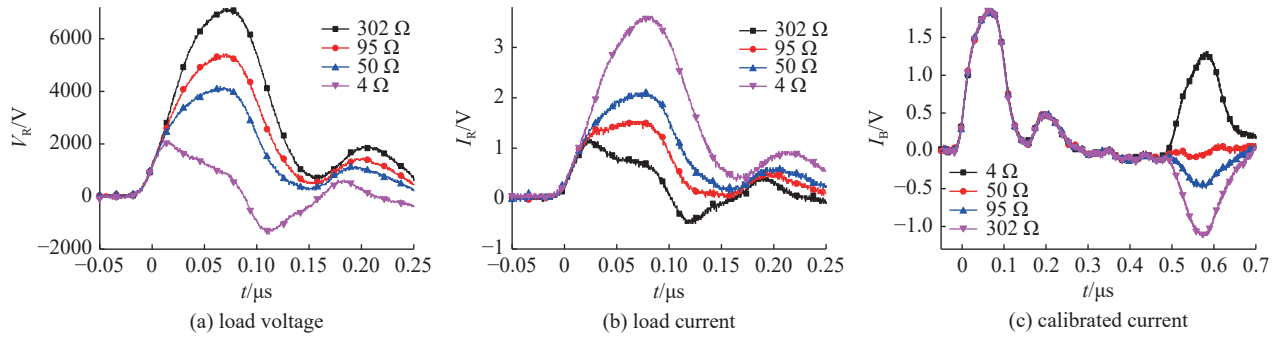


Fig. 11　Pulse waveform measurement in different load resistance

图 11　不同负载时的测量结果

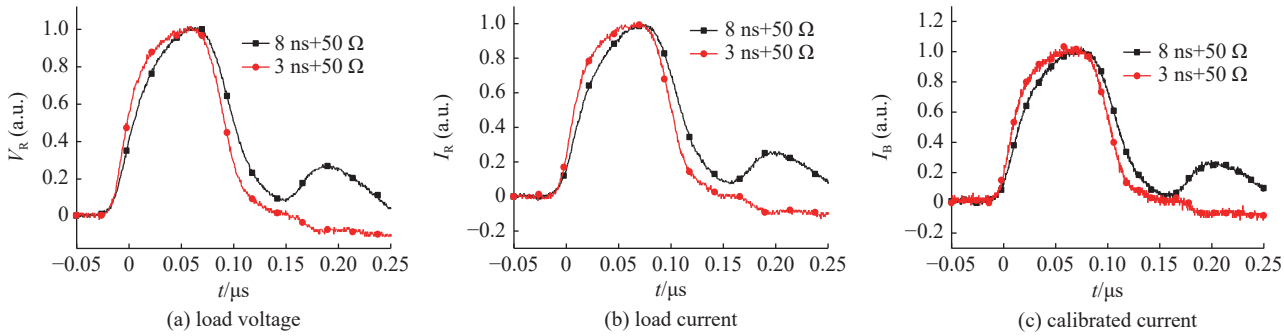


Fig. 12　Pulse waveform measurement in different electric length

图 12　不同电长度时的测量结果

综合标定装置特性阻抗和长度的理论分析结果和实验结果，确定强流脉冲束流探测器位置标定装置长度为 14r，特性阻抗≥200 Ω。

3 结　论

根据强流脉冲束流位置探测器测量原理及测量信号特点，确定采用同轴结构作为标定装置，通过分析束流探测器测量范围以及偏心同轴线电中心和几何中心的偏差随同轴线特性阻抗的变化情况，确定标定装置长度为管径 r 的 14 倍，特性阻抗≥200 Ω。根据位置测量结果误差随束流位置变化的分析结果，确定同轴线内外导体相对位置调节范围为±0.1r。标定装置的高阻抗设计使标定系统成为非匹配脉冲信号传输系统，通过建立等效电路进行模拟计算，并对模拟结果进行实验验证，明确在非匹配传输条件下可以得到满足位置标定要求的快脉冲信号波形，由此完成位置标定装置物理设计。

参考文献：

[1] 何文龙. 电阻环法模拟测量电子束流动大小和位置[C]//10 MeV直线感应加速器会议文集. 1994.（He Wenlong. Intensity and position measurements of an intense particle beam using resistance ring[C]//Proceedings of the conference on 10 MeV Liner Induction Accelerator. 1994）

[2] Fessenden T J, Stallard B W, Berg G G. Beam current and position monitor for the Astron accelerator[J]. Review of Scientific Instruments, 1972, 43(12): 1789-1792.

[3] 谢宇彤, 代志勇, 韩青. 电阻环束流探测器的标定[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(1): 151-155.（Xie Yutong, Dai Zhiyong, Han Qing. Improvement on the accuracy of beam bugs in linear induction accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(1): 151-155）

[4] 李勤, 李洪, 陈楠, 等. 用于测量强流脉冲电子束的B-dot[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(9): 1390-1394.（Li Qin, Li Hong, Chen Nan, et al. B-dot monitor for intense electron beam measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(9): 1390-1394）

[5] 赵籍九, 尹兆升. 粒子加速器技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.（Zhao Jijiu, Yin Zhaosheng. Particle accelerator technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006）

[6] 王盛昌, 王安鑫, 徐韬光. 用于质子加速器的壁电流探头的研制[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(9): 2179-2182.（Wang Shengchang, Wang Anxin, Xu Taoguang. Design of wall current monitor for proton accelerators[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(9): 2179-2182）

[7] 邹俊颖. HLS II 注入器束流位置测量系统的研制及应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.（Zou Junying. Development and application of injector beam position monitor system at HLS II[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014）

[8] 王建新, 刘宇, 张浩, 等. 积分式束流变压器的标定研究[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(s1): 620-623.（Wang Jianxin, Liu Yu, Zhang Hao, et al. Calibration of integrating current transformer[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(s1): 620-623）

[9] 李吉浩, 孙葆根, 何多慧, 等. HLS 直线加速器条带束流位置检测器基于对数比方法的标定[J]. 原子能科学技术, 2007, 41(3): 339-342.（Li Jihao, Sun Baogen, He Duohui, et al. Mapping of strip line beam position monitor at HLS LINAC based on logarithm ratio processing method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(3): 339-342）

[10] 王贵诚, 王筠华, 蒋道满, 等. BPM 定标系统及其应用[J]. 核技术, 2003, 26(4): 254-256.（Wang Guicheng, Wang Junhua, Jiang Daoman, et al. A BPM calibration system and its application[J]. Nuclear Techniques, 2003, 26(4): 254-256）

[11] 何小中, 庞健, 李勤, 等. 束流模拟装置的阻抗对标定结果的影响[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 035104.（He Xiaozhong, Pang Jian, Li Qin, et al. Influence of beam test stand's impedance on calibration results[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 035104）

[12] Shokair I R. Measuring axially varying beam position using *B*-dot monitors[J]. Review of Scientific Instruments, 1989, 60(9): 2969-2974.

[13] Ekdahl C A. Fourier-analyzing coil arrays for pulsed relativistic electron beam experiments[J]. Review of Scientific Instruments, 1984, 55(8): 1221-1228.

[14] Carlson R L, Ridlon R N, Stout L E. Multigigahertz beam current and position monitor for relativistic electron beams[J]. Review of Scientific Instruments, 1986, 57(10): 2471-2474.

[15] Rienstra W W, Haworth M D. An exact analysis for beam centroid position monitors used in pulsed intense relativistic electron-beam experiments[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(10): 2363-2367.