



·粒子束及加速器技术·

国产首台交变相位聚焦漂移管加速器的冷测与试运行

谢修瑾¹, 蒲越虎^{1,2}, 赵振堂³

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800; 2. 上海艾普强粒子设备有限公司, 上海 201800;
3. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201204)

摘要: 质子直线注入器是质子治疗系统的重要组成部分。出于项目进度的考虑, 上海先进质子治疗示范装置 APTRON 采用了进口自美国的直线注入器。为了加快质子治疗产业进程, 掌握质子放疗关键技术, 保证产业链安全可控, 注入器团队研发了国产医用质子直线注入器。该直线注入器采用了电子回旋共振 (ECR) 离子源和四翼型射频四极加速器 (RFQ) 的技术方案, 并在漂移管加速器 (DTL) 段创新性地采用了交变相位聚焦 (APF) 结构。在这个过程中, 通过研究 APF DTL 的束流运动规律和设计思想, 自主开发了 APF DTL 的底层物理设计软件, 相继完成了物理设计、电磁设计、机械设计、加工建造、腔体冷测、高频老练和载束实验等多个阶段的工作, 最终成功引出了 7 MeV、7 mA 的质子束流。经过束流系统的测量分析, 认定束流中心能量为 6.975 MeV, 动量分散在 $\pm 0.35\%$ 以内的束流流强为 6.07 mA。成为国产首台医用质子直线注入器和首个实现成功载束的 APF 加速腔。

关键词: 质子治疗; 直线注入器; 交变相位聚焦; 漂移管加速器; 腔体冷测

中图分类号: TL506

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220014

Cold test and beam commissioning of China's first homemade alternating-phase-focused drift tube linac

Xie Xiucui¹, Pu Yuehu^{1,2}, Zhao Zhentang³

(1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
2. Shanghai ATRACTON Particle Equipment Co. Ltd, Shanghai 201800, China;
3. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract: Linac injector is a major sub-system of the proton therapy facility. Due to schedule consideration, the Shanghai advance proton therapy facility APTRON uses a linac injector made by ACCSYS in California, USA. Now, we have developed a linac injector made up of Electron Cyclotron Resonance (ECR) ion source and 4-vane Radio Frequency Quadrupole (RFQ), as well as alternating-phase-focused (APF) Drift Tube Linac (DTL), which is a significant technological innovation. During the last 5 years, we have finished a series of R&D stage including physical design, electromagnetic design, mechanical design, assembly and alignment, cavity cold test, RF conditioning and beam commissioning. Finally, we get 7 mA, 7 MeV proton beam from the down stream Faraday cup. According to the measurement of our beam diagnostic and analysis system, the center energy of the beam is 6.975 MeV, the beam intensity within $\pm 0.35\%$ momentum spread is 6.07 mA.

Key words: proton therapy, linac injector, alternating phase focusing, drift tube linac, cavity cold test

上海先进质子治疗示范装置 APTRON 是一台由中国科学院上海应用物理研究所设计建造的质子治疗专用装置, 坐落于上海市嘉定区瑞金医院北院质子中心。该装置的加速器部分由一台质子直线注入器和一个周长为 24.6 m、由 8 块二极铁和 12 块四极铁的环形同步加速器组成^[1-3]。直线注入器将质子束加速到 7 MeV 后, 通过多圈注入的方式将束流注入到环形同步加速器当中。质子束在环形同步加速器中被加速到 70~250 MeV 后, 通过三阶共振慢引出的方式引出并输送到 6 个不同的治疗终端^[4]。该装置的治疗室部分由实验束终端、固定束终端、眼束线终

* 收稿日期: 2022-01-06; 修订日期: 2022-04-11
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0105408)
联系方式: 谢修瑾, xiexiucui@sinap.ac.cn。
通信作者: 蒲越虎, puyuehu@sinap.ac.cn。

端、180°旋转机架(Gantry)终端、360°旋转机架终端和 Cockscrew 型旋转机架终端共 6 个治疗终端组成^[5]。目前上海先进质子治癌示范装置已经完成部分治疗室的检测工作,正在开始临床研究阶段。该装置的示意图如图 1 所示。

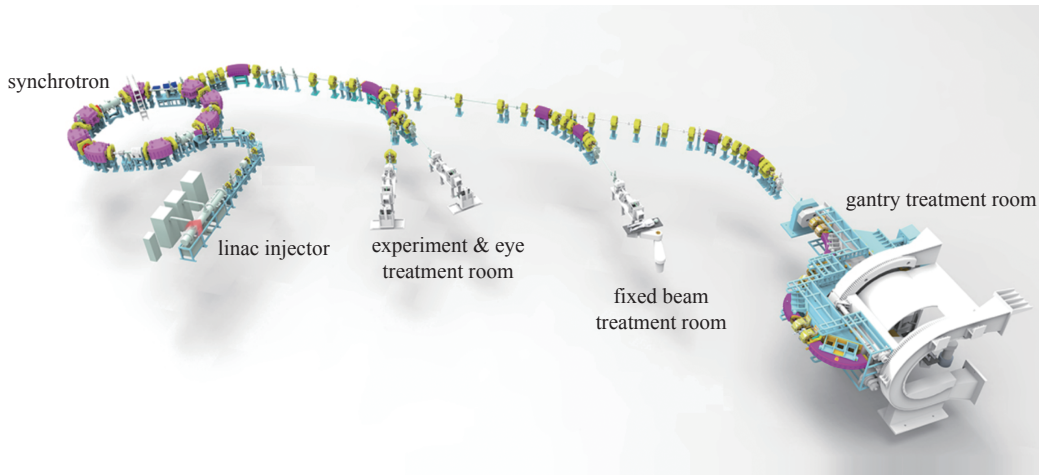


Fig. 1 Schematic diagram of Shanghai advance proton therapy facility APTRON, except the 5th and 6th treatment room

图 1 上海先进质子治癌示范装置 APTRON 示意图,该示意图没有第 5、6 治疗终端

质子直线注入器是质子治癌装置的第一个子系统,由于其处于束流的源头,因而对装置的性能有基础性和决定性的影响。出于工程进度的考虑,先进质子治癌示范装置 APTRON 采用了进口自美国 ACCSYS 公司的质子直线注入器。同时,为了加快质子治癌的产业进程,掌握质子放疗的关键技术,保证产业链安全可控,在科技部十三五项目和上海市联合投资集团的资助下,我们开展了国产质子直线注入器的设计和研制工作。

通常,质子直线注入器由离子源、射频四极加速器(RFQ)、漂移管加速器(DTL)、功率源和其它附属组件组成。目前上海先进质子治癌示范装置 APTRON 的进口自美国的质子直线注入器采用了潘宁离子源、四翼型 RFQ 和 Alvarez 型 DTL 的技术方案。考虑到将来装置运行的长期稳定性和国内相关基础工业的实际情况,选择了 ECR 型离子源加四翼型 RFQ 和 APF 型 DTL 的技术方案^[6-7]。

交变相位聚焦原理(APF)最早在 1970 年代由前苏联科学家 I.M.Kapchinsky 发明并提出概念^[8]。该型加速器由一系列交替变化的加速间隙构成,当粒子束团经过负加速相位时会受到纵向的聚焦作用和横向的散焦作用;相似的,当粒子束团经过正加速相位时会受到纵向的散焦作用和横向的聚焦作用。根据强聚焦原理,该加速器能够提供粒子束团在横向和纵向上总体的聚焦效果。与 Alvarez 型 DTL 加速器相比,APF 型 DTL 由于不需要聚焦元件,因而可以免去极为困难和繁琐的磁中心准直工作,大大地降低了加工难度和建造成本,非常适合用于商业化目的的质子治癌装置。

1 设计与加工

作为一种新型的加速结构,APF 型 DTL 加速器并无公认的成熟设计软件。因而设计 APF 型 DTL 加速器必须原创性地自行开发 APF 设计软件。

由于 APF 型加速器的特点,即束流运动几乎唯一依赖同步相位的分布,因此选取合适的同步相位分布是设计的关键。在历史上,有多种 APF 相位分布被不同的设计者提出并研制。通过计算和分析,设计 APF 型 DTL 加速器时借鉴和采用了日本国立放射线医学综合研究所的岩田良之(Iwata Yoshiyuki)教授提出的相位变化公式^[9]

$$\phi_s(n) = \phi_0 \cdot e^{-a \cdot n} \sin\left(\frac{n - n_0}{b \cdot e^{c \cdot n}}\right) \quad (1)$$

式中: $\phi_s(n)$ 表示第 n 个加速间隙的同步相位; a, b, c, ϕ_0, n_0 是自由参数。该式用 5 个自由变量描述数 10 个加速间隙的同步相位分布,兼具表现的丰富性和表述的简洁性,体现了“降维”的设计思想,是设计 APF 型 DTL 加速器的最佳思路。

在确定了相位变化方案以后,为了避免繁琐浩瀚的底层束流动力学代码的开发,我们采用了 BEAMPATH 开源程序的束流动力学模块,并在其基础上自行开发了核心优化算法^[10]。其逻辑框如图 2 所示。

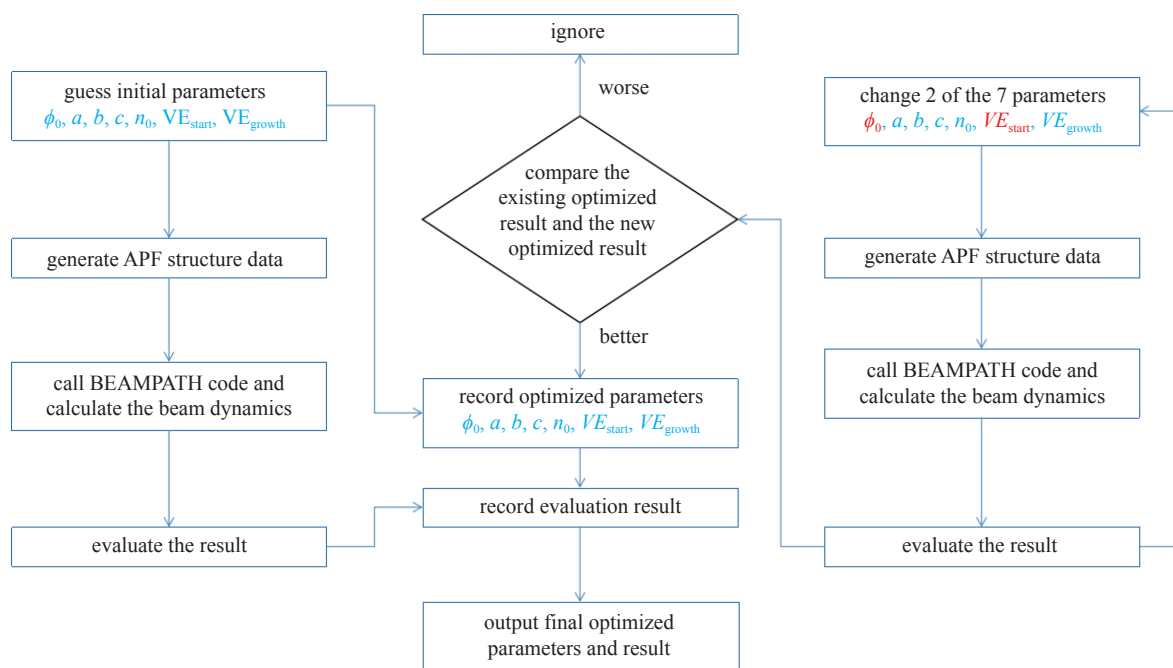


Fig. 2 Logical diagram of alternating-phase-focused (APF) design code

图2 APF设计软件的基本逻辑框图

在确定物理参数以后,我们利用 CST 微波工作室软件进行了电磁设计^[11-12],其最大表面电场约为 1.65 倍 Kilpatrick 标准,如图 3 所示。

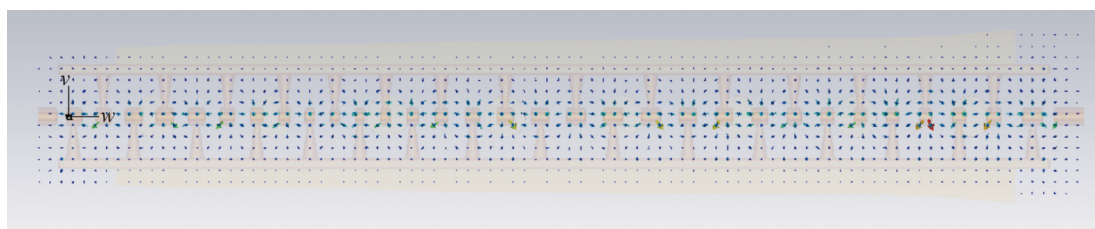


Fig. 3 Electromagnetic design of APF cavity

图3 APF加速器的电磁设计模型

本文采用了国际公认的 TraceWin 软件对从 CST 模型中导出的“真实场”分布文件进行了端到端模拟^[13]。模拟结果显示束流运动过程与设计值有比较好的符合度。

此外,在完成初步方案的设计后,我们对该方案进行了较为全面的误差分析。我们评估了注入束流能量、位置、角散、发射度、束团长度、动量分散误差,腔体本身功率馈入的幅值和相位误差以及机械加工精度误差共 9 种误差的单独影响和综合影响,揭示了该种类型的加速器对注入能量和建场功率误差较为敏感的固有属性。更进一步地,通过对所有误差的联合分析,我们发现了制造 APF 加速器所具有的本征风险,即在某些特定的误差组合下,APF 的加速效率会大大地低于设计预期^[14]。

最后,根据这些发现,我们在设计中引入了鲁棒性指标,即有针对性地对敏感误差参数进行有意识的“脱敏”设计,取得了较好效果。

在完成了物理和电磁设计以后,我们又完成了该方案的机械设计。在机械设计中,我们创新性地采用了一体化的算盘结构,并在上海克林技术公司完成了机械加工。

2 冷测与调场

在完成机械加工以后,对该加速器腔体进行了冷测试验。冷测实验采用了小球微扰法的原理对腔体的轴向加速电场进行了测量,如图 4 所示。

为了评估实测场与设计场的符合程度,我们通过数据处理将实测场拟合到设计场,并将它们之间每个单元积分电场(即电压)的相对误差的平均值作为评估指标,即

$$G = \frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} \left| \frac{V_m}{V_d} - 1 \right| \quad (2)$$

式中: V_m 为单个单元的实测积分电场, V_d 为单个单元的设计积分电场。通过调整调谐器插入腔体的深度, 我们调试出一组与设计值符合得比较好的实测场, 该状态下积分场的一致性指标为 0.0296, 符合物理设计提出的误差要求, 如图 5 所示。

为了估算该实际电场下束团运动的稳定性, 计算了理想粒子初始相位与最终能量的关系, 如图 6 所示。

由图 7 可见, 在蓝色圆圈标识的 $0.6 \sim 3 \text{ rad}$ 相位内, 相宽约 2.4 rad (145°) 的粒子最终能量都可以达到 7 MeV 左右。根据以上测量和计算分析, 认为该 APF 型 DTL 能够正常地载束运行。

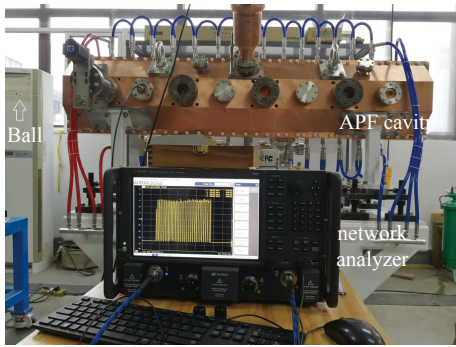


Fig. 4 Cold test of APF cavity, using perturbation method

图 4 小球微扰法测得的 APF 加速器加速电场

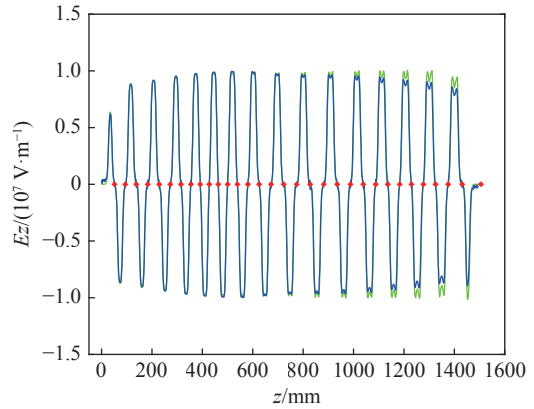


Fig. 5 Comparison between CST simulated electric field (green) and network analyzer measured electric field (blue), the consistency index of integral field under this situation is 0.0296

图 5 CST 模拟电场 (绿色) 与网络分析仪实测电场 (蓝色) 的对比

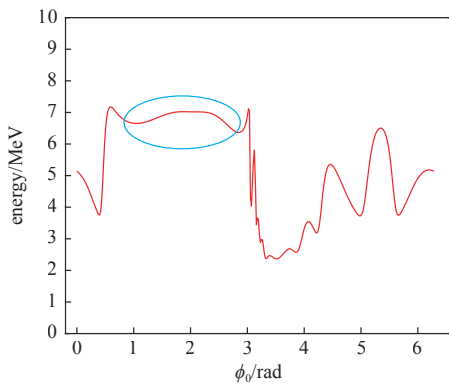


Fig. 6 Linac injector and beam diagnostic system in commissioning

图 6 调试中的质子直线注入器和束诊系统

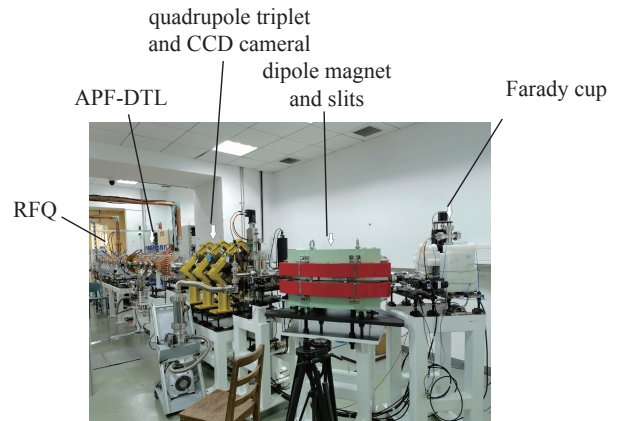


Fig. 7 Relation between initial phase and final energy of ideal particle

图 7 理想粒子初始相位与最终能量的关系

3 载束运行

在经过以上分析计算后, 注入器团队决定对 APF 加速器进行载束实验。在完成离子源和 RFQ 的调试, 确定束流已经被引出到 RFQ 出口后, 首先安装并准直 3 块聚焦磁铁, 并在聚焦磁铁下游安装法拉第筒。经过调试, 可以看到法拉第筒上明显的束流信号。

之后, 将 APF 加速器安装到聚焦磁铁后方, 并在 APF 下游安装束诊系统^[15]。束诊系统由一个 ACCT 流强探测器、一个双狭缝发射度测量仪、一组三聚焦四极磁铁、一个荧光靶、一个带入口和出口狭缝的二极磁铁和位于束诊段末端的法拉第筒组成, 如图 7 所示。

在载束实验开始后, 首先调整两个可变调谐器的插入深度, 将功率馈入腔体; 然后将腔体功率逐步增加到设计值附近; 经过一段时间的老练后, 控制离子源触发出束流, 即可在法拉第筒上看到微弱的束流信号。之后调节匹配段磁铁磁场, 可以在 APF 出口处的电流传感器上看到引出束流约 6.5 mA ; 但是通过二极铁的电流量分析, 发现

该束流能量仅为 5.8 MeV。经过仔细地复核,认为设计和验算的过程并没有错误,于是开始逐个排查可能出现错误的环节。最后认定腔体采样环可能存在焊接不良,导致在功率计上看到的功率值要远远大于实际值。

经过对采样环的修复和重新标定,再次调节功率源的功率至设计值,即在二极铁下游的法拉第筒上看到 7 MeV 的引出束流,经过调节,该束流最大可达 7 mA,如图 8 所示。

图 8 中红色为离子源出口的 ACCT 信号,绿色为 APF 出口处 ACCT 束流信号,黄色为二极铁后法拉第筒的信号,该信号对应的质子束能量为 7 MeV。由于示波器的电阻为 $50\ \Omega$,故法拉第筒上信号对应的流强为约 7 mA。利用束诊系统二极铁前后的两个狭缝,我们精确测量了束流的中心能量为 6.975 MeV,其中动量分散 $\pm 0.35\%$ 以内的束流流强为 6.07 mA。该流强已经超过 APTRON 现有进口直线注入器的运行流强,完全满足质子治癌的实际需求。

4 结 论

经过 5 年多的努力,克服了科研道路上的种种困难,完成了 APF 加速器的物理设计、电磁设计和机械加工。利用小球微扰法对完成组装和准直的加速器进行了冷腔测试,通过对比积分场的设计值和实测值,以及评估理想粒子在实测场中的运动,我们确定了加速器设计和加工的准确可靠性。通过进一步调试和载束试验,取得了中心能量 6.975 MeV,动量分散 $\pm 0.35\%$ 以内的束流流强为 6.07 mA 的质子束。目前该直线注入器已经可以满足质子治癌的基本需求,并且通过了 8 h 连续无故障稳定运行试验。与国外较为成熟的商品化直线注入器相比,首台国产质子直线注入器仍然处于工程样机阶段,仍然需要在产品可靠性、成本可控性和设计美观性等方面进行进一步的努力。

参考文献:

- [1] Zhang Manzhou, Zhang Miao, Xie Xiucui, et al. Eddy current effects in a high field dipole[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2017, 28: 173.
- [2] Xie Xiucui, Zhang Manzhou, Qiao Jian. The magnet sorting of APTRON[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91: 014711.
- [3] 张满洲, 李浩虎, 李德明. 上海质子医疗装置的涡流效应[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(5): 1357-1360. (Zhang Manzhou, Li Haohu, Li Deming. Estimate of eddy current effects in APTRON[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(5): 1357-1360)
- [4] Yang Yuhui, Zhang Manzhou, Li Deming. Simulation study of slow extraction for the Shanghai Advanced Proton Therapy facility[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2017, 28: 120.
- [5] Miao Chunhui, Liu Ming, Yin Chongxian, et al. Precise magnetic field control of the scanning magnets for the APTRON beam delivery system[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2017, 28: 172.
- [6] Ren Haitao, Peng Shixiang, Lü Pengnan, et al. Intense beams from gases generated by a permanent magnet ECR ion source at PKU[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 02B905.
- [7] Ma Pengfei, Zheng Shuxin, Yu Xudong, et al. Physical design of a single-amplifier-driven proton linac injector for a synchrotron-based proton-therapy system in China[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 900: 32-39.
- [8] Wangler T P. RF linear accelerators[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- [9] Iwata Y, Yamada S, Murakami T, et al. Alternating-phase-focused IH-DTL for an injector of heavy-ion medical accelerators[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2006, 569(3): 685-696.
- [10] Batygin Y K. Particle-in-cell code BEAMPATH for beam dynamics simulations in linear accelerators and beamlines[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, 539(3): 455-489.
- [11] Computer Simulation Technology AG. CST Studio Suite[M]. Stuttgart: Dassault Systemes, 2008.
- [12] Li Xuan, Pu Yuehu, Yang Fan, et al. RF design and study of a 325 MHz 7 MeV APF IH-DTL for an injector of a proton medical accelerator[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, 30: 135.
- [13] Uriot D, Pichoff N. TraceWin documentation[M]. Paris: CEA/SACLAY, 2011.
- [14] Xie Xiucui, Pu Yuehu, Yang Fan, et al. Design of a 7-MeV APF DTL with robust considerations[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 908: 49-59.
- [15] 安超凡, 谢修瑾, 蒲越虎. 粒子束团状态对测量束流发射度及能量的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 114001. (An Chaofan, Xie Xiucui, Pu Yuehu. Effects of bunch state on measurement of beam emittance and energy[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 114001)

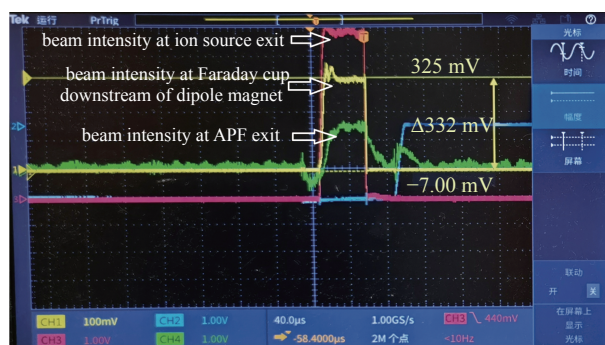


Fig. 8 Beam signal in oscilloscope

图 8 示波器中的信号