

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

S波段HYBRID聚束-加速结构的样机研制

高斌 裴士伦 王辉 赵世琦 池云龙

Development of S-band hybrid bunching-accelerating structure prototype

Gao Bin, Pei Shilun, Wang Hui, Zhao Shiqi, Chi Yunlong

引用本文:

高斌, 裴士伦, 王辉, 赵世琦, 池云龙. S波段HYBRID聚束-加速结构的样机研制[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33: 024002. doi: 10.11884/HPLPB202133.200162

Gao Bin, Pei Shilun, Wang Hui, Zhao Shiqi, Chi Yunlong. Development of S-band hybrid bunching-accelerating structure prototype[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 024002. doi: 10.11884/HPLPB202133.200162

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.200162>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Hybrid聚束器的场分布测量与调配

Field distribution measurement and tuning of the hybrid buncher

强激光与粒子束. 2017, 29: 065104 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201729.160529>

ESS靶前束流剖面及束晕监测器样机的研制

Development of beam profile and beam halo monitors prototype in front of target station for ESS

强激光与粒子束. 2019, 31: 115106–115106 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.190167>

S波段超宽带高平均功率多注速调管的研制

Development of S-band ultra wideband high average power multi-beam klystron

强激光与粒子束. 2020, 32: 103005–1–103005–6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200202>

S波段6 MeV边耦合电子直线加速器的设计研究 (英)

Design studies on S-band 6MeV side coupled electron linac

强激光与粒子束. 2017, 29: 045102 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201729.160477>

低磁场S波段相对论返波振荡器的工作特性

Operating characteristics of an S-band relativistic backward wave oscillator with low magnetic field

强激光与粒子束. 2019, 31: 033001 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.190010>

加速100 mA质子束的低 β 超导半波长谐振腔内的高阶模 (英)

High order modes in low beta SRF half wave resonator cavity for 100 mA proton acceleration

强激光与粒子束. 2017, 29: 085102 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201729.170070>



·粒子束及加速器技术·

S 波段 HYBRID 聚束-加速结构的样机研制^{*}

高 斌¹, 裴士伦², 王 辉³, 赵世琦³, 池云龙³

(1. 清华大学 工程物理系, 北京 100084; 2. 中国原子能科学研究院 回旋加速器研究设计中心, 北京 102413;

3. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049)

摘 要: Hybrid 聚束-加速结构是把驻波预聚束器、行波聚束器和标准加速管集成到一起的新型 RF 结构。简述了对 S 波段 Hybrid 聚束-加速结构样机的束流动力学优化和微波设计结果, 解释了 Hybrid 结构导致发射度增长的原因, 对此样机进行了射频低功率测试。样机的冷测结果与 RF 设计结果一致性很好。在冷测频率 2 855.21 MHz 处, 实测 S_{11} 小于 -45 dB, 腔间相移偏差小于 $\pm 2^\circ$, VSWR ≤ 1.2 对应的带宽大于 5 MHz, 轴向场分布完全满足动力学要求。

关键词: 聚束系统; Hybrid 聚束-加速结构; 非谐振微扰法; 反射相位法; 低功率测试

中图分类号: TM931

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.200162

Development of S-band hybrid bunching-accelerating structure prototype

Gao Bin¹, Pei Shilun², Wang Hui³, Zhao Shiqi³, Chi Yunlong³

(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Research and Design Center for Cyclotron, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

3. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Hybrid bunching-accelerating structure (HBaS) is a novel RF structure integrating a standing-wave(SW) pre-buncher (PB), a traveling-wave (TW) buncher (B) and a standard accelerating structure together. This paper presents the design results, including beam dynamic optimization, microwave design and the cold test of the S-band HBaS prototype, and explicates the reason of transverse emittance increasement caused by the hybrid structure. The low RF power results are in good agreement with the RF design. The measured S_{11} at operation frequency is less than -45 dB, the phase shift deviation is less than $\pm 2^\circ$ and the bandwidth is more than 5 MHz (VSWR ≤ 1.2). The axis field distribution fully meets the dynamic requirements.

Key words: bunching system; hybrid bunching-accelerating structure; non-resonant perturbation measurement; SLAC method; low power test

在电子直线加速器中, 标准聚束系统通常由驻波预聚束器、行波聚束器及标准加速管组成^[1]。通过调整各部件对应移相器以优化三者之间的相位关系, 获得低发射度、低能散的高品质束流, 此类聚束系统已在 BEPC 装置中成功应用。在后续建成的大科学装置中, 常使用两个或多个次谐波聚束器代替预聚束器, 进一步降低发射度提高俘获效率, 此类聚束系统在 BPEC II, SSRF 中已投入使用^[2-3]。在工业加速器领域, 由于建造成本和束线空间的限制, 标准聚束系统通常简化变相速加速结构, 束流传输效率偏低, 发射度和能散都偏高^[4]。在控制建造成本的前提下, 为了提升工业加速器束流品质, 提出对标准聚束系统进行简化: 集成驻波预聚束器、行波聚束器和第一根加速管组成 Hybrid 聚束-加速结构 (HBaS)。它使用一套微波功率源和波导传输系统, 实现对热阴极电子枪出口长脉冲束流速度调制、均匀聚束、加速的功能, 控制了建造费用, 具有广阔的应用前景。目前, 国际上对 Hybrid 结构开展了广泛的研究: INFN-LNF/UCLA/SAPIENZA 合作组在 2009 年提出 Hybrid 光阴极注入器的概念^[5-8], DESY 和中科院高能所也在 Hybrid 聚束器上做了相关的研究^[9-11]。本文回顾了使用 Parmela, HFSS 对 S 波段 HBaS 样机的优化过程, 对使用 HBaS 作为聚束系统导致发射度增长的原因进行了解释, 并进行了仔细的调谐和低功率测试。测试结果表明所有技术参数均达到设计指标, 自主完成了该样机的研制任务。

^{*} 收稿日期: 2020-06-12; 修订日期: 2020-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11475201); 中国科学院青年创新促进会基金项目

作者简介: 高 斌 (1990—), 男, 博士, 从事直线加速器物理与微波技术研究; gaobin2019@126.com。

1 设计概述

S波段 HBaS 样机通过动力学模拟得到各加速单元的长度和场分布结果,微波设计得到结构单元和耦合器的真空尺寸结果,两者共同指导机械方案设计。如图 1 所示,HBaS 的特点是减少与预聚束器、行波聚束器相关的移相器、衰减器、功分器、吸收负载等微波器件的使用。与标准聚束系统相比,HBaS 聚束系统的建造成本显著降低。

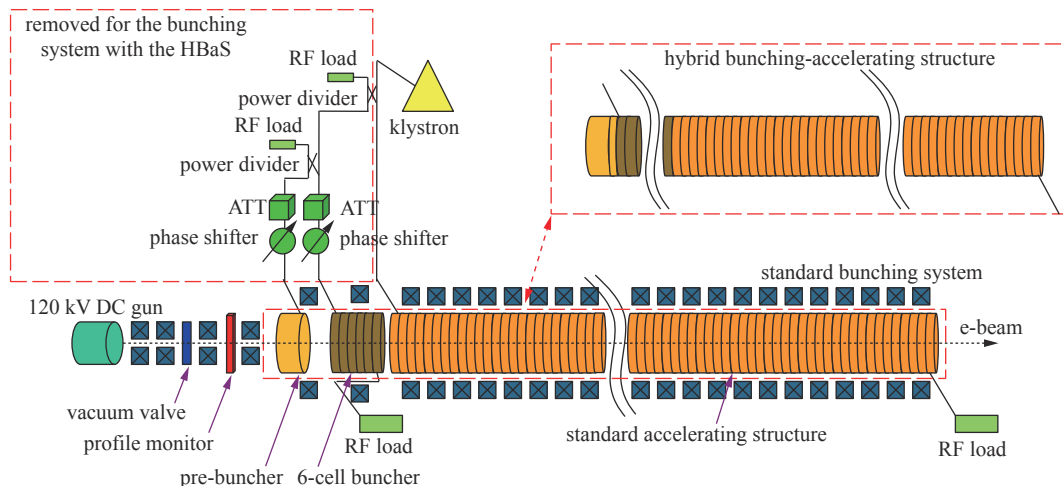


Fig. 1 Schematic of replacing the standard bunching system with the hybrid bunching-accelerating structure (HBaS)

图 1 采用 Hybrid 聚束-加速结构代替标准聚束系统示意图

1.1 动力学设计

详细的动力学设计过程见文献 [12], 此处简要叙述动力学模拟的物理背景、方法和结果。HBaS 是一种同时包含驻波和行波电磁场的微波结构, 驻波场对电子枪出口的长脉冲束流进行速度调制, 形成初步的束团结构。行波场对长脉冲束团进行进一步聚束, 并加速到设计能量。使用 EGUN 生成热阴极枪初始粒子分布, 导入 Parmela 中进行动力学模拟。

由于 HBaS 的驻波场紧邻行波场, 在 Parmela 输入文件中需设置驻波场和行波场纵向间距为 0, 相位差为 π , 而在使用标准聚束系统进行动力学分析时, 预聚束器和聚束器的纵向距离以及相位差均作为优化束流品质的自由量可调。另外, Parmela 软件只考虑了空间电荷但未考虑束流负载效应, 工业辐照加速器通常是长脉冲束流, 需要对加速电场进行修正。对于稳态束流负载, 需要把微波场手动修正后再带入到 Parmela 中进行计算。对于长脉冲束流引起的瞬态束流负载, 控制低电平激励进行补偿, 使作用于长脉冲束流头部粒子的场和尾部粒子的场一致。

中国科学院高能物理研究所设计的 S 波段 100 MeV/100 kW 电子直线加速器^[13-14], 采用标准聚束系统, 加速器出口处的束流能量 100 MeV, 传输效率 70% 以上, 峰峰值能散小于 4 MeV。使用 HBaS 替换原标准聚束系统, 仔细调节它的各腔体排布、行驻波电场强度、相位等参数, 并和标准聚束系统的束流相空间做比较, 最终确定 HBaS 各加速单元的排布。

表 1 是进行束流动力学模拟时的 6 种结构单元排布方案。1, 3, 5 是不同加速单元排布下的变相加速结构方案, 2, 4, 6 是在其前端加入驻波预聚束部分后的方案。动力学模拟结果见表 2。结果表明: 1) 对于热阴极电子枪出口的长脉冲束流, 添加驻波预聚束部分后束流的传输效率和能散接近标准聚束系统的水平。2) 方案 6 的传输效率

表 1 加速单元排布方案

Table 1 β value for the accelerating cells

variant	β value for the cells in the SW section		E_{SW}/E_{TW}	β value for the cells in the TW section							
	SW1	SW2		TW1	TW2	TW3	TW4	TW5	TW6	TW7	TW8
1	—	—	—	0.75	0.75	0.75	1	1	1	1	1
2	1.26	0.74	0.437	0.75	0.75	0.75	1	1	1	1	1
3	—	—	—	0.75	0.75	0.75	0.75	1	1	1	1
4	1.26	0.74	0.44	0.75	0.75	0.75	0.75	1	1	1	1
5	—	—	—	0.75	0.75	0.75	0.88	0.92	0.95	1	1
6	1.26	0.74	0.425	0.75	0.75	0.75	0.88	0.92	0.95	1	1

表 2 动力学模拟结果

Table 2 Beam dynamic results for the bunching system

variant	capturing efficiency/%	E_{ave}/MeV	trans efficiency/%	E_{ave}/MeV	trans efficiency/%	E_{ave}/MeV	$\delta E/\text{MeV}$
	bunching system exit		chicane system exit		linac exit		
1	78.9	11.1	51.4	11.8	51.4	101.2	± 3.9
2	84.6	11.6	66.5	11.6	66.5	100.6	± 4.0
3	83.7	10.9	70.4	11.2	70.4	94.8	± 9.9
4	89.1	12.3	71.0	12.3	71.0	101.4	± 3.9
5	81.6	11.2	70.4	11.5	70.4	95	± 10.1
6	87.4	12.3	72.8	12.3	72.8	101.	± 3.9

最高、能散最小, 变相速段更接近绝热过程。

再考察两种聚束系统对束流横向发射度的影响。如图 2 所示, 和标准聚束系统相比, 采用 HBaS 聚束系统的束流在加速器出口发射度增长约 60%。根据腔式预聚束器的相关理论, 衡量聚束特性的聚束参数表达式如下

$$R = \frac{\pi L V_g}{\lambda \beta_{e0} V_0} \quad (1)$$

式中: R 为聚束参数; L 为漂移节长度; V_g 为聚束电压; β_{e0} 同步粒子速度; V_0 为注入电压。

HBaS 结构由于功率耦合的原因, 漂移长度 L 较短, 为使 HBaS 出口的束流的相宽和常规聚束系统接近, 调制电压 V_g 是常规预聚束器的 3 倍, 约 90 keV。这导致了在预聚束腔中聚束过程相对急促, 发射度变大。

通过大量的迭代计算, 动力学结果给出的 HBaS 结构单元要求如表 3 所示。样机共包括 44 个结构单元, 分别为 2 个工作在 $\pi/2$ 模式的驻波腔、输入/输出耦合器及 40 个工作在 $2\pi/3$ 模式的行波腔。馈入功率为 14 MW 时, 样机出口电子束能量约 10 MeV。

表 3 Hybrid 聚束-加速结构动力学要求

Table 3 Dynamic requirements for the HBaS

β values for the cells in the SW section		E_{SW}/E_{TW}	β values for the cells in the TW section							
SW1	SW2		TW1	TW2	TW3	TW4	TW5	TW6	TW7	TW8~42
1.26	0.74	0.44	0.75	0.75	0.75	0.88	0.92	0.95	1	1

1.2 微波设计和机械设计

在微波设计时, 驻波场和行波场会在功率耦合腔 SW2 中产生磁边界。在 SUPERFISH 中^[15] 设置正确的边界条件, 分别设计驻波腔 SW1、功率耦合腔 SW2 和行波部分尺寸。调节栏片厚度 r_1 和 r_2 改变 E_{SW}/E_{TW} 。并使用 HFSS 对输入、输出耦合器及整管三维设计, 设计模型如图 3 所示, 具体设计过程可见文献 [16]。

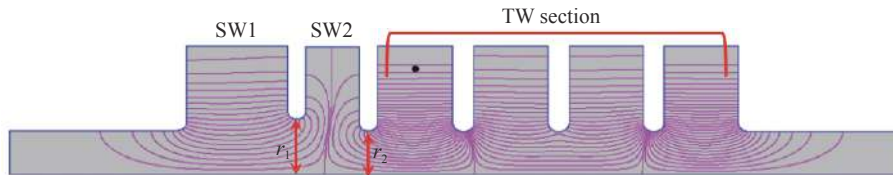


Fig. 3 SUPERFISH model for the HBaS

图 3 HBaS 的 SUPERFISH 模型图

图 4 给出了 HBaS 的三维机械设计模型。实际带束流运行时, 该加速结构外部将套有螺旋管线圈。因此, 冷却水管入口和出口布置在输出耦合器一端, 同时输入/输出耦合器均采用了相对小巧的法兰及短波导设计。

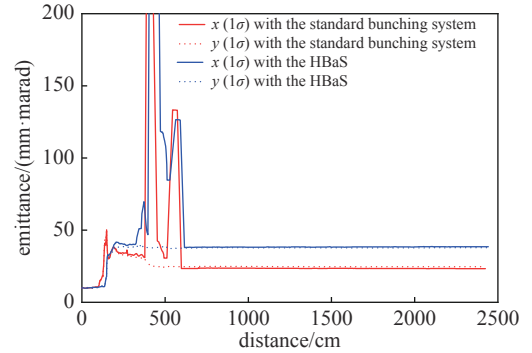


Fig. 2 Transverse emittance evolutions along the linac

图 2 横向发射度增长曲线

2 冷测调谐

2.1 调谐原理

基于 IHEP 在研制 Hybrid 聚束器时开发的场分布测试台^[17], 拓展了行波部分局部反射系数计算、 S_{11} 极图功能。局部反射系数的虚部直接反映了单腔的频偏情况, S_{11} 极图直接反映了整根加速管是否处于匹配状态, 对于调谐精确的 $2\pi/3$ 模式行波加速结构, S_{11} 极图应呈现规则的“花瓣”形。

根据 Khbiboulie 提出的线性网络模型^[18], 局部反射系数的计算公式如下

$$S_{11,n} = \frac{B_n - B_{n+1}e^{-j\varphi_n}}{A_n} \quad (2)$$

式中: A_n 是在第 n 号腔中的入射波; B_n 是第 n 号腔中的反射波; φ_n 是腔间相移。

局部反射系数 $S_{11,n}$ 和单腔的频偏 Δf_n 、相移偏差 $\Delta\varphi_n$ 有如下关系

$$\text{Im}(S_{11,n}) \approx \frac{Q'\Delta f_n}{f_n} \propto \Delta\varphi_n \quad (3)$$

式中: Q' 类似于品质因数 Q_0 , 是和腔体形状有关的量。

式(3)表明: (1) 使用非谐振微扰法指导调谐, 是把频偏 Δf_n 转换为测量 $\text{Im}(S_{11,n})$ 。当 $\text{Im}(S_{11,n})$ 为负数时, 频率偏低, 当 $\text{Im}(S_{11,n})$ 为正数时, 频率偏高。(2) 使用 SLAC 反射相位法指导调谐, 是把频偏 Δf_n 转换为测量 $\Delta\varphi_n$ 。当 $\Delta\varphi_n$ 为负数时, 频率偏低, 当 $\Delta\varphi_n$ 为正数时, 频率偏高。

2.2 焊后冷测和调配

对变相速段进行冷测并确认加工没有出现重大问题的情况下, 对样机整管进行焊接, 焊后加速结构样机如图 5 所示。

首先进行频率校准。HBaS 实际运行温度为 45 °C, 实验室环境 25.1 °C, 湿度 14%, 根据频率修正公式, 冷测频率修正为 2 855.21 MHz。

使用场分布测试程序控制拉小珠的电机沿轴线匀速运动, LabVIEW 程序通过 RS232 总线高速采集和处理微扰体运动过程中输入端口 S_{11} 的变化, 再由 LabVIEW 算法实时后处理。结果如图 6 所示。图(a)表明在 2 855.21 MHz 下的 S_{11} 为 -6.7 dB, 其附近的反射非常严重, 图(b)中 S_{11} 的极图杂乱, 相移明显, 图(c)电场分布呈现一定的周期性杂乱状态, 表明耦合器可能存在加工问题。图(d)腔间相移最大达到 13°。

使用三频法测得输出耦合器的工作频率低于目标值 6.2 MHz, 通过在腔体圆周多点挤压的方法进行补救。再综合使用非谐振微扰法和反射相位法进行调谐。首先调谐行波部分。测量一次场分布, 后处理程序得到单腔的失

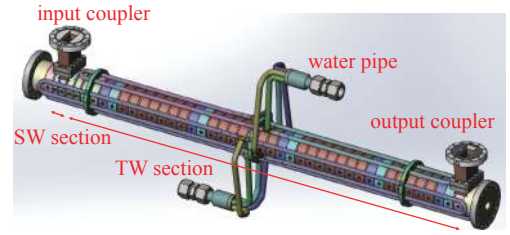


Fig. 4 Mechanical design for the hybrid bunching-accelerating structure

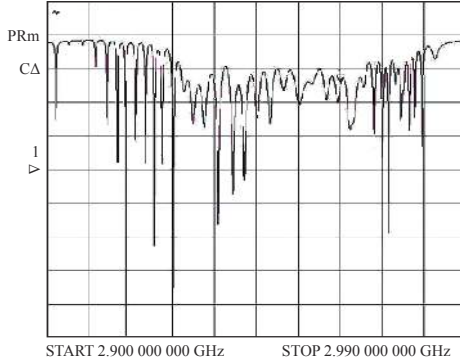
图 4 Hybrid 聚束-加速结构机械设计模型



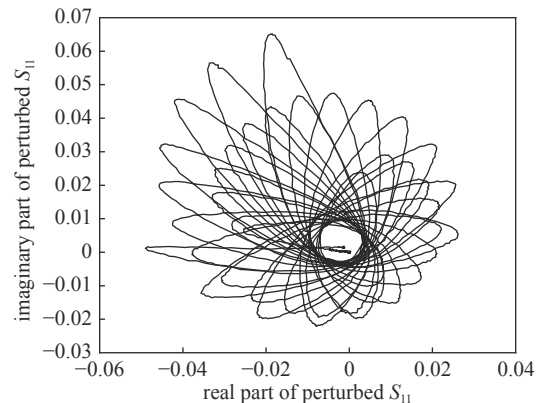
Fig. 5 Hybrid bunching-accelerating structure prototype after welding

图 5 焊后 Hybrid 聚束-加速结构样机

[CHI] S_{11} LDG 5.12 der AEF-20 dB 1:-6.9500 dB 2.855 210 000 GHz



(a) S_{11}



(b) perturbed S_{11} parameter

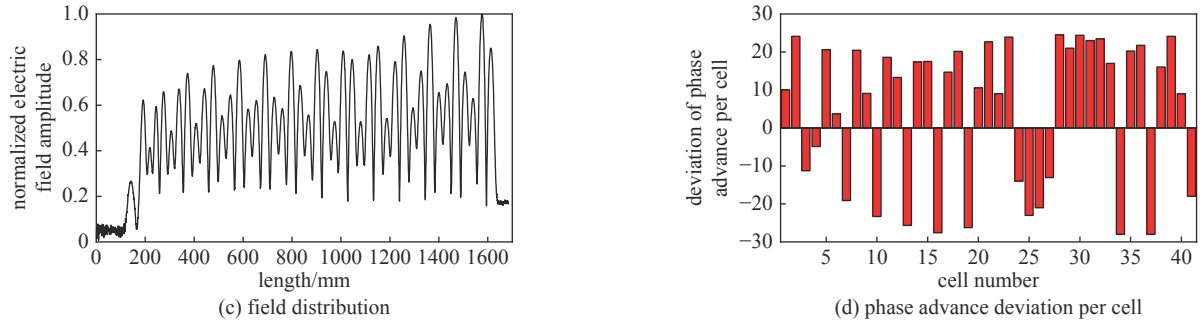


Fig. 6 Bead-pull measurement results before tuning

图 6 调配前 Hybrid 聚束-加速结构的整管微波特性

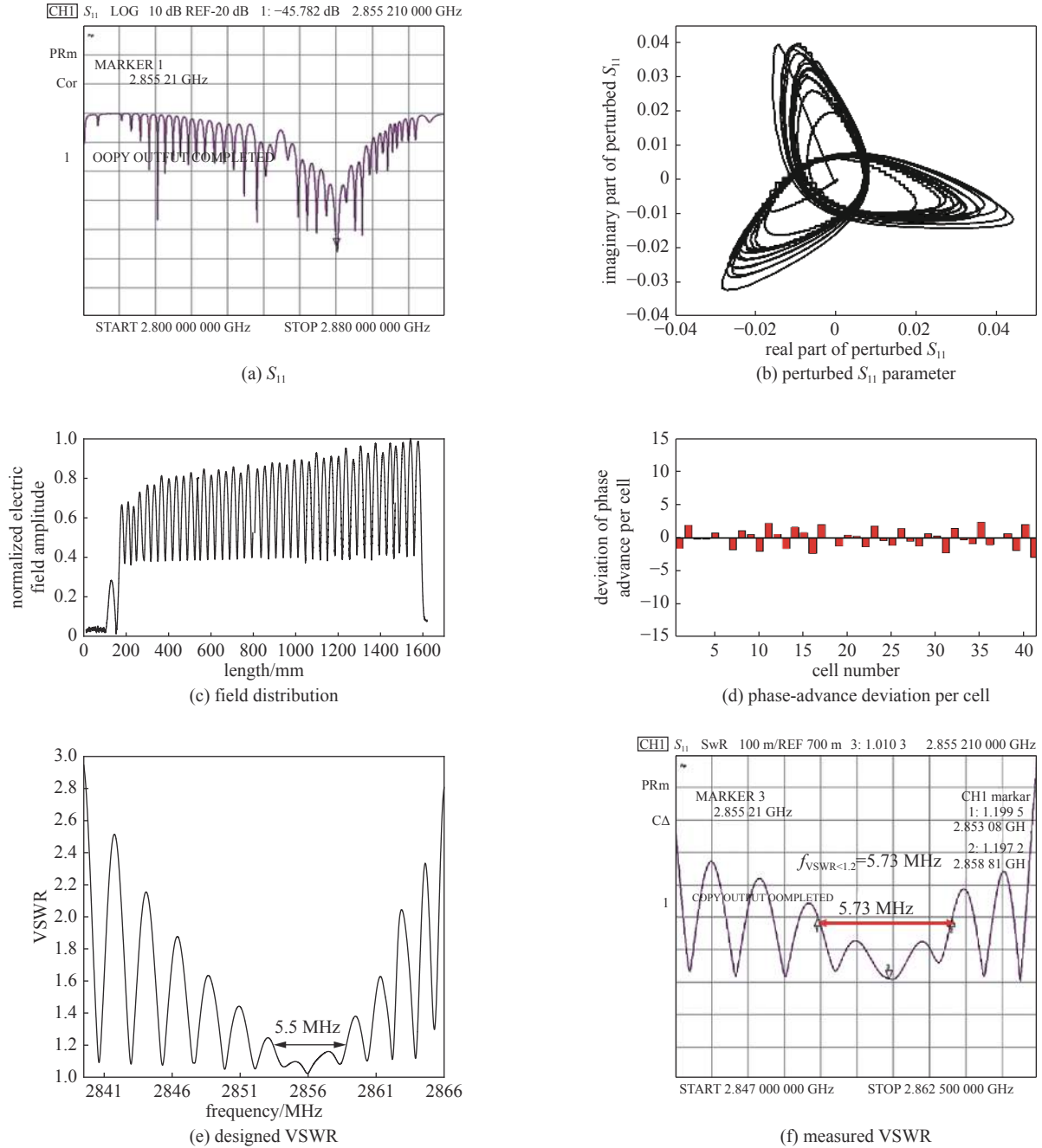


Fig. 7 Bead-pull measurement results after tuning

图 7 调谐后的测量结果

谐量,按此失谐量从尾腔到头腔依次进行调谐。上述过程迭代2~3轮后,单腔失谐量显著降低。再对驻波部分调谐。通过计算 E_{SW}/E_{TW} 指导驻波腔的调谐量。最后调谐输入耦合器,优化全局反射系数。图7给出了样机调谐后的结果。图(a)中在工作点2 855.21 MHz处 S_{11} 为-45 dB,图(b)中 S_{11} 极图呈现规则的“花瓣形”,图(c)中电场下沿的平坦度大于96%, E_{SW}/E_{TW} 和设计值相差0.74%,图(d)中行波腔腔间相移偏差在 $\pm 2^\circ$ 以内。调谐后的带宽($VSWR < 1.2$)是5.73 MHz,和仿真值5.5 MHz基本一致。

把式(2)的算法写入测试平台,得到调谐前后局部反射系数 $S_{11,n}$ 的变化,如图8所示。调谐后局部反射系数绝对值显著降低,此方法指导调谐切实有效。后续可根据式(3)计算单腔的频偏。

3 结 论

本文叙述了Hybrid聚束-加速结构的研制过程。简要回顾了此结构动力学设计、微波设计和冷测调谐的结果。期间综合使用了非谐振微扰法和SLAC反射相位法,调谐结果为在工作点 S_{11} 小于-45 dB,行波部分腔间相移偏差 $\pm 2^\circ$,带宽($VSWR < 1.2$)5.73 MHz,冷测结果符合设计要求。

此次动力学研究发现,预聚束器对于辐照加速器的束流品质,有着至关重要的作用。Hybrid结构中驻波部分发挥了预聚束器的主要功能。和变相速聚束系统相比,加速器出口的束流品质显著改善。虽然由于漂移距离的限制,发射度会有一定恶化。并且由于驻波部分和行波部分相位关系固定,对于初始束流的能量动态范围相对狭窄。但鉴于它节省了预聚束器的一整套功率传输系统成本,在应用型加速器领域,Hybrid结构仍是非常有潜力的选择。

另一个经验是,基于非谐振微扰法的冷测调谐方法值得广泛推广。由于其测量的 S_{11} 是复数,数据的后处理相对繁琐,以前并未被广泛应用。但随着计算机技术、尤其是LabVIEW的广泛应用,数据的高速采集和处理成为可能,上述缺点被克服。因而非谐振微扰法比谐振微扰法和反射相位法体现出更大的优势。它具有高度的适用性:既可用于行波加速结构也可以用于驻波加速结构。同时,它和谐振微扰法测量频偏相比,测量 S_{11} 的变化具有更高的灵敏性。和反射相位法相比,它是非接触式的,不破坏腔体内壁,并且适用于小孔径和变相速的加速结构。

目前,已开始X波段Hybrid结构的相关研究。和传统X波段边耦合、轴耦合器驻波加速结构相比,Hybrid结构最大的优势是包含驻波电磁场的同时,不受到昂贵的X波段隔离器和环形器的限制,成本明显下降。另一方面,小尺寸加速器对束流动力学的优化提出了更高的要求,后续将使用多种优化算法控制动力学软件,以找到最优解。

致 谢 感谢北京高能锐新公司在加工和冷测过程中给予的帮助,感谢上海奔业真空设备有限公司协助制作场分布测试平台。

参考文献:

- [1] Ren W, Liu Y, Wu W, et al. The BEPC R&D Report, Part I: Injector[R]. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences 1989.
- [2] Pisen A, Rinolfi L. A new bunching system for the LEP injector linac[R]. CERN PS90-58 (LP), 1990.
- [3] Zhao Minhua, Lin Guoqiang, Zhong S P, et al. Preliminary design report of SSRF linac[R]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [4] Kulkarni N S, Dhirga R, Kumar V. Physics design of a 10 MeV, 6 kW travelling wave electron linac for industrial applications[J]. *Pramana J Phys*, 2016, 87: 74.
- [5] Spataro B, Valloni A, Alesini D, et al. RF properties of a X-band hybrid photoinjector[J]. *Nuclear Instruments Methods in Physics Research Section A*, 2011, 657: 99-106.
- [6] Rosenzweig J B, Valloni A, Alesini D, et al. Design and application of an X-band hybrid photo injector[J]. *Nuclear Instruments Methods in Physics Research Section A*, 2011, 657: 107-113.
- [7] Fukasawa, Badakov H, O'Shea B D, et al. Beam dynamics and RF cavity design of a standing/traveling-wave hybrid photoinjector for high brightness beam

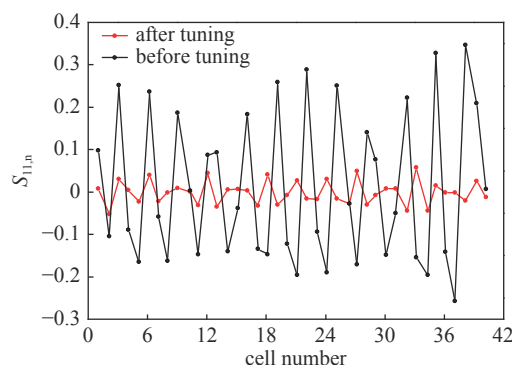


Fig. 8 Local $S_{11,n}$ before/after tuning

图8 调谐前后局部反射系数

- generation[C]// Proc of PAC. 2009: 4434-4436.
- [8] Rosenzweig J B, Alesini D, Boni A, et al. Beam dynamics in a hybrid standing wave[J]. [AIP Conference Proceedings](#), 2006, 877: 635.
- [9] Hüning M, Schmitz M, Libig C. An electron linac injector with a hybrid buncher structure[C]//Proceedings of LINAC. 2010.
- [10] Nie Y C, Liebig C, Hüning M, et al. Tuning of 2.998 GHz S-band hybrid buncher for injector upgrade of LINAC II at DESY[J]. [Nuclear Instruments Methods in Physics Research Section A](#), 2014, 761: 69-78.
- [11] Pei Shilun, Xiao Ouzheng. Studies on an S-band bunching system with hybrid buncher[C]//Proc of IPAC. 2013: 1121-1122.
- [12] Pei Shilun, Gao Bin. Studies on the S-band bunching system with the hybrid bunching-accelerating structure[J]. [Nuclear Instruments Methods in Physics Research Section A](#), 2018, 888: 64-69.
- [13] Chi Yunlong, Pei Shilun, Pei Guoxi, et al. Progress on the construction of the 100 MeV/100 kW electron linac for the NSCKIPT neutron source[J]. [Chinese Physics C](#), 2014, 38: 047005.
- [14] Pei Shilun, Chi Yunlong, Wang Shuhong, et al. Beam dynamics studies on the 100 MeV/100 kW electron linear accelerator for NSCKIPT neutron source[J]. [Chinese Physics C](#), 2012, 36: 653-660.
- [15] Billen J B, Young L M. Poisson SUPERFISH[M]. LA-UR-96-1834, 2006.
- [16] Gao Bin, Pei Shilun, Chi Yunlong. Design studies on an S-band hybrid accelerating structure[C]//13th Symposium on Accelerator Physics. 2017:92-95.
- [17] Zhao Shiqi, Pei Shilun, Gao Bin, et al. Field distribution measurement and tuning of the hybrid buncher[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2017, 29: 065104.
- [18] Holtkamp N, Khabiboulline T, Dohlus M. Tuning of a 50-cell constant gradient S-band traveling wave accelerating structure by using a nonresonant perturbation method[R]. DESY Report M-95-02, 1995.