

多单元超导腔场平滑度调谐器的设计与测试

张新荣¹, 薛培培¹, 张力平¹, 孙安²

1. 长安大学道路施工技术装备教育部重点实验室, 西安 710064
2. 南京大学现代工程与应用科学学院, 南京 210034

摘要 为了纠正多单元中 β 射频超导腔在制造过程中由于加工误差和焊接收缩引起的场频率偏移, 参照超导腔特性和场平滑度调谐原理设计了多单元超导腔场平滑度调谐器, 根据超导腔场平滑度的测试要求搭建了测试系统, 并将调谐器用于多单元中 β 射频超导腔场平滑度的调制过程。测试和实验结果表明: 多单元中 β 射频超导腔场平滑度调谐器可以成功用于超导腔场平滑度的调制。

关键词 多单元中 β 射频超导腔; 调谐器; 机械设计; 测试系统

中图分类号 460.20

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.18.008

The Design and Test of the Warm Tuner for Multi-Cell Medium β SRF Cavity

ZHANG Xinrong¹, XUE Peipei¹, ZHANG Liping¹, SUN An²

1. Key Laboratory of Road Construction & Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210034, China

Abstract In order to correct the field frequency deviation caused by the machining error and the welding shrinkage in the manufacturing process of the multi-cell medium β SRF cavity, a regulating mechanism—warm tuner is designed based on the multi-cell medium β SRF cavity's characteristics and the field flatness principle. The tuner contains five parts, which are the activity carriage, the gearbox carriage, the tailstock, the activity tailstock and the bed body. The warm tuner is used in the test of the field flatness and the field frequency of a medium β SRF cavity. Finally, the test system of the RF superconducting cavity field flatness is set, detailed analyses and designs of the bead-pulling system, the network analyzer and the microcomputer control system are carried out. The microcomputer control system uses the virtual instrument Lab VIEW software as the platform to control the other parts in the test system, and to analyze the test results, to present the test results. The results show that the medium β SRF cavity warm tuner can be successfully used for the test and modulation.

Keywords medium β SRF cavity; warm tuner; mechanical design; test system

1964年, 美国斯坦福大学开始对铅镀谐振器中的射频超导粒子加速器进行研究探索, 建立了第一台原型超导腔直线加速器, 电子从80 keV加速到500 keV, 达到3 MeV/m的加速梯度; 中国科技大学国家同步辐射实验室在中国首先在加速器中应用了超导磁体, 北京大学、中国科学院上海应用物理研究所、中国科学院高能物理研究所也在进行超导腔的研

究^[1]。1977年, 中国科学院高能物理研究所完成了可以提供50 MV电压、27 m长的射频加速器, 目前射频超导技术已经成为一个很重要的技术分支^[2]。南京大学计划在其强流质子束应用平台中使用超导加速器, 并成功研制出6单元中 β 射频超导腔(图1), 该超导腔的工作频率为806 MHz, 几何参数 $\beta=0.61$, 材料选用纯度99.99%的金属铌^[3]。

收稿日期: 2014-01-27; 修回日期: 2014-04-09

基金项目: 江苏省重大科技支撑与自主创新项目(BE2012141); 中央高校基本科研业务费专项(CHD2011TD016)

作者简介: 张新荣, 教授, 研究方向为机械系统动力学与控制, 电子信箱: zxr-68@126.com

引用格式: 张新荣, 薛培培, 张力平, 等. 多单元超导腔场平滑度调谐器的设计与测试[J]. 科技导报, 2014, 32(18): 54-57.

射频超导腔的场平滑度不仅影响超导腔的最大加速电压和最小表面电场峰值,而且对洛伦兹力调谐系数 K_L 和质量系数 Q_{ext} 也有很大影响。在射频超导腔的生产过程中,加工误差和焊接收缩引起场频率的改变,使超导腔的场平滑度变差^[4]。为了使超导腔的加速性能达到最优,超导腔场平滑度的测试与调制就显得尤为重要。一般来讲,单元模块储能改变会对超导腔的场平滑度产生影响。场平滑度调谐器通过对超导腔的单元模块拉伸或压缩来改变单元模块的场储能,从而调节超导腔的场平滑度。在射频测试之前,为了纠正频率和场的分布以及TM010 π 模场平滑度的偏移^[5],设计了一套场平滑度调节系统,该系统包含多单元超导腔场平滑度调谐器、微扰牵引系统、网络分析仪和测试控制系统。测试系统采用Lab VIEW虚拟仪器测试平台结合微机测试系统,不仅能提高测试效率,而且具有精确度高、兼容性强和成本低等特点^[6,7]。



图1 6单元中 β 射频超导腔

Fig. 1 Six cell medium- β RF superconducting cavity

1 超导腔调谐器的机械结构设计

多单元中 β 超导腔调谐器的机械结构根据南京大学多单元射频超导腔材料特性和机械结构特性进行设计。南京大学超导腔为6单元椭球形腔,材料选用高纯铌。

1.1 超导腔场平滑度调谐器设计原理

调谐器对射频超导腔的场平滑度起调节作用,如图2所示,采用颚板对超导腔单元模块进行拉伸或压缩达到调制的目的。

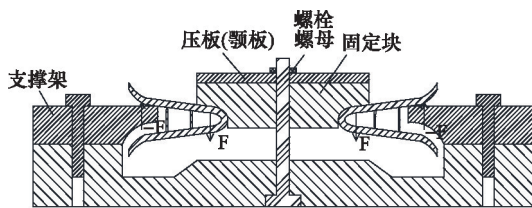


图2 超导腔单元模块调制简图

Fig. 2 Diagram of the tuning of the individual cells

超导腔调谐器根据单元模块的调制方法进行设计,由于调制时需要对超导腔单元模块进行拉伸或者压缩,因此选择高精度滑轨来满足调制需求,整个调制过程在滑轨上完成。超导腔调谐器的尾座和活动尾座法兰配合超导腔两端的法兰(场强探头法兰和基波功率耦合器法兰)固定超导腔。齿

轮箱座体和活动座体是颚板的载体,颚板开合距离的控制由颚致动器完成,使颚板卡住单元模块束管位置。活动座体和齿轮箱座体可以在轴向方向移动,由驱动丝杠连接,控制二者的距离,实现对单元模块的拉伸和压缩。

1.2 整体设计

根据超导腔调谐器的工作原理对调谐器进行机械结构设计。超导腔调谐器包括活动座体、齿轮箱座体、活动尾座、尾座和床架5个部分(图3)。活动座体和齿轮箱座体是颚板的载体(图4),由齿轮箱、驱动丝杠连接在一起。活动尾座和尾座分别与超导腔两端法兰配合,固定超导腔。床架是活动尾座、尾座、活动座体及座体的载体,调谐器对超导腔的调制过程在床架上完成。

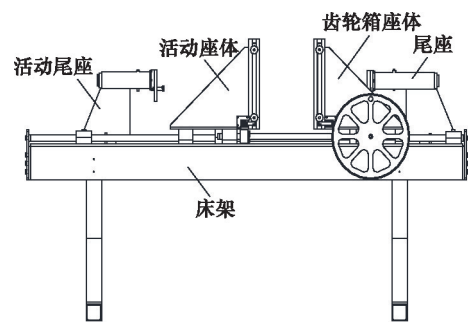


图3 超导腔调谐器

Fig. 3 SRF cavity warm tuner

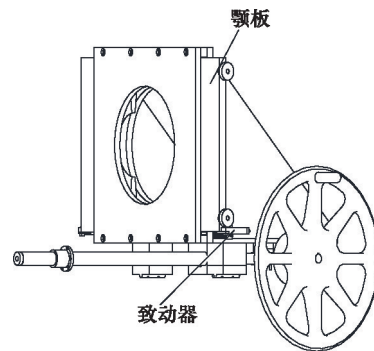


图4 齿轮箱座体

Fig. 4 Gearbox carriage

1.3 活动座体和齿轮箱座体设计

根据中 β 超导腔的结构和尺寸设计调谐器各部分尺寸,由于中 β 超导腔的焊后尺寸为1069.5 mm,设计超导腔调谐器的活动座体和齿轮箱座体开合空间为1.5 m。由于超导腔的外形为椭球形,颚板作用于单元模块的束管位置,因此设计了颚板致动器控制颚板的开合距离。

1.4 活动尾座和尾座的设计

活动尾座和尾座法兰分别与超导腔的两端部法兰配合,用来固定和支撑中 β 超导腔。考虑与超导腔的安装配合,设计活动尾座和尾座的最大活动距离为2.03 m。

1.5 床架设计

床架是活动尾座、尾座、活动座体及座体的载体。床体上安装高精度直线导轨,活动尾座、尾座、活动座体和座体安装滑块与直线导轨配合,在导轨上运动;支撑架用来支撑床体和其它部分。

1.6 超导腔调谐器材料选择

中 β 超导腔调谐器设计过程中,各部分零件材料的选择必须达到性能技术要求、工作中的主要性能要求以及工艺性能的要求^[8]。如选择超导腔单元模块进行拉伸或压缩的颧板应是具有很好韧性和耐磨性的玻纤增强尼龙材料;致动器中齿轮和齿条材料选择耐磨性较强且极不易生锈的1212不锈钢材料。

2 调谐器测试系统的设计

调谐器对超导腔的场平滑度起调节作用,测试结果是调节的依据。

2.1 测试原理

场平滑度表达1个 N 单元超导腔的场几何平滑程度^[9]。如果使用 V_i 表示第 i 个单元腔的加速电压, V_{\max} , V_{\min} 表示整个腔中的最大和最小的单元腔电压。则场平滑度的计算表达式为

$$\eta = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i} \times 100\% \quad (1)$$

V_i 不能直接计算出来,这里使用小金属球对单元的轴向电磁场进行干扰(微扰),得到单元模块频率的偏移 Δf_i 。根据索尔特(salter)扰动理论^[10],可以得到超导腔场平滑度 η_f 。

$$\eta_f = \frac{\sqrt{\Delta f_{\max}} - \sqrt{\Delta f_{\min}}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\Delta f_i}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, Δf_i 为第 i 单元模块的最大频率偏移量。 Δf_{\min} 和 Δf_{\max} 分别表示 N 个单元模块中 Δf_i 的最大值和最小值。测试实验中,场频率的偏移量 Δf_i 不能被直接测量出来,故使用网络分析仪来测量透射系数 S_{21} 的相位角 β_{21} 。微扰以一定的速度通过超导腔的中心轴线时,会使单元模块透射参数 S_{21} 的相位角 β_{21} 发生微小改变。使用 $\beta_{21\min}$ 和 $\beta_{21\max}$ 表示超导腔透射系数的最小和最大相位角, β_{21i} 表示第 i 个单元模块的透射系数相位角,则多单元腔场平滑度 η_{ff} 表达式为

$$\eta_{ff} = \frac{\sqrt{-\beta_{21\max}} - \sqrt{-\beta_{21\min}}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{-\beta_{21i}}} \times 100\% \quad (3)$$

2.2 测试系统设置

根据场平滑度调制的原理,设计了超导腔场平滑度测试系统控制流程图(图5),可以用于任何超导腔(低、中、高 β 超导腔)的调制与测试。

根据流程图搭建测试控制系统,如图6所示。其中,微扰牵引系统和网络分析仪是核心部件。微扰牵引系统使用步进电机驱动微扰通过超导腔的中心轴线,扰动超导腔的轴向

场分布。网络分析仪通过NI GPIB卡与电脑连接,测量由微扰引起的透射系数相位角 β_{21} 的改变量。Lab VIEW作为测试系统的上层监控软件,控制步进电机驱动微扰以一定的速度通过超导腔中心轴线,控制网络分析仪同步测量超导腔的场相位偏移量,然后将测量数据以图像的形式呈现给实验者,上层监控系统Lab VIEW界面如图7所示。

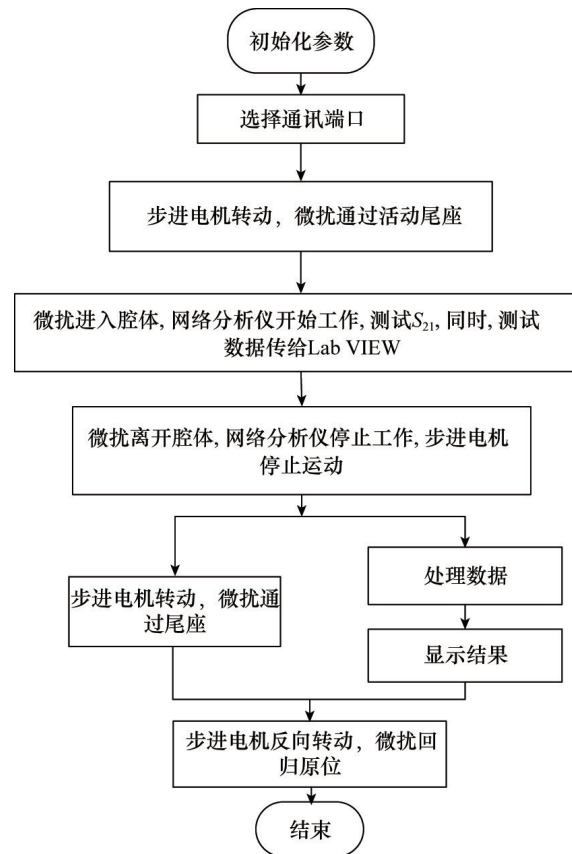


图5 测试控制流程

Fig. 5 Control flow chart for the cavity field flatness tuning

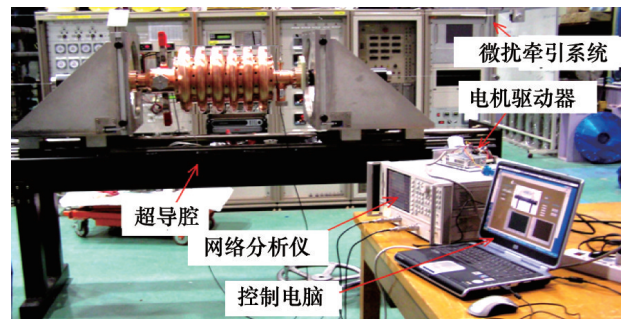


图6 测试系统

Fig. 6 Cavity's flatness test system

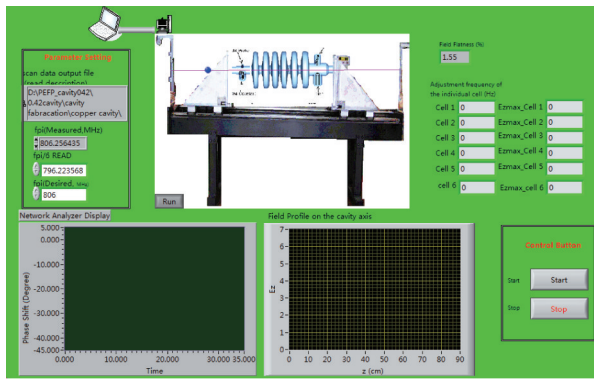
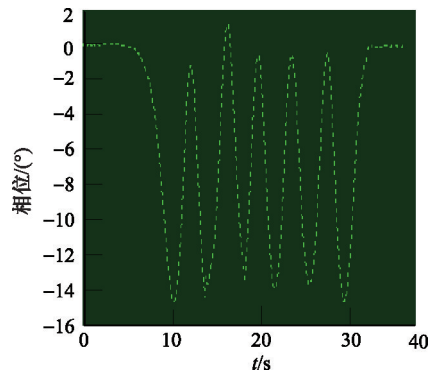


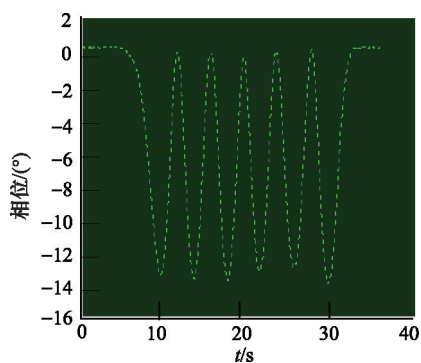
图7 Lab VIEW 上层监控系统
Fig. 7 Lab VIEW control interface

2.3 测试结果

为了使测试数据更准确,要求微扰到达腔体时,网络分析仪同步进行数据采集。首先计算微扰到达腔体及微扰在超导腔中心轴线运动时步进电机的步数,然后在上层监控系统中采用时序结构程序控制网络分析仪与微扰同步。测试结果如图8(a)所示,根据网络分析仪显示结果,超导腔的第2个单元模块相位角偏移较为严重,需要对超导腔左边第2单元模块进行调节。



(a) 调制前测试



(b) 调制后测试

图8 调制前后测试结果
Fig. 8 Results before/after tuning

使用超导腔调谐器对超导腔左边第2单元模块的束口位置进行拉伸,微调后测试结果如图8(b)所示,根据网络分析仪显示结果,调制后超导腔场平滑度已经达到调制目标。实验结果表明超导腔场平滑度调谐器可以用于超导腔场平滑度的调制。

3 结论

根据超导腔特性进行了中 β 超导腔场平滑度调谐器机械结构的设计与分析并用于超导腔场平滑度的测试与调制实验。超导腔场平滑度测试系统可以对超导腔频率和场分布的偏移量进行准确测量,调谐器对超导腔场平滑度进行有效调制。结果表明,多单元超导腔场平滑度测试系统和调谐器可以成功用于6单元超导腔的场平滑度测试与调制。

参考文献(References)

- [1] 温华明, 严陆光, 林良真. 超导在加速器中的应用概况[J]. 低温与超导, 2005, 33(1): 46-49.
Wen Huaming, Yan Luguang, Lin Liangzhen. Superconducting application in the accelerator[J]. Cryogenic and Superconducting, 2005, 33(1): 46-49.
- [2] Gao C Y. PEPF SRF low-beta elliptical cavity tuning[D]. Korea: Korea University of Science and Technology, 2008.
- [3] 孙安. 中 β 质子超导射频腔腔形研究[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2002.
Sun An. The research of the medium β RF superconducting cavity's shape[D]. Beijing: Beijing Academy of Sciences Institute of High Energy Physics, 2002.
- [4] Sun A, Wang H P, Wu G F. Effect of the tuner on the field flatness of SNS superconducting RF cavities[J]. Proceedings of LINAC, 2004, 815.
- [5] Zhang L P, Sun A, Li Y M, et al. Control and measurement system for the tuning of a PEPF low-beta superconducting RF cavity[J]. Journal of the Korean Society, 2009, 54(5): 2025-2030.
- [6] 王立新. 软件测试数据的高效生成及测试方法研究[D]. 上海: 东华大学, 2011.
Wang Lixin. Study on the method of software test data efficiently generate and test[D]. Shanghai: Donghua University, 2011.
- [7] 孙伟. 软件测试技术发展模式探讨[J]. 长春理工大学学报, 2012, 7(4): 235-236.
Sun Wei. Software testing technology development model[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2012, 7(4): 235-236.
- [8] 王杰, 程明远, 李士晓. 浅谈机械设计加工中应注意的几个问题[J]. 机械与电子, 2011(11): 512-513.
Wang Jie, Cheng Mingyuan, Li Shixiao. Discussion on several problems of mechanical design process[J]. Mechanical and Electronic, 2011(11): 512-513.
- [9] 朱凤, 全胜文, 徐文灿, 等. 北京大学光阴极注入器3+1/2超导腔机械性能[J]. 强激光与离子束, 2007, 19(8): 1361-1364.
Zhu Feng, Quan Shengwen, Xu Wencan, et al. Mechanical properties of 3+1/2 cavity of PKU photo-injector[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(8): 1361-1364.
- [10] Ginzton E L. Microwave measurements[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1957.

(责任编辑 赵业玲)