

一种可调耦合度型高功率输入耦合器的设计^{*}

郇 丰^{1,2}, 潘卫民^{1,2}, 黄彤明², 马 强², 杨际森^{1,2}

(1. 中国科学院大学 物理学院, 北京 100049; 2. 中国科学院 高能物理研究所 加速器中心, 北京 100049)

摘 要: 旨在设计一支新型、耦合度可调、连续波型高功率输入耦合器, 外部品质因数的调节范围为 $1.5 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$, 以适应先进光源技术研发与测试平台超导电子直线加速器束流试验装置不同束流模式下的需要。这是国内首次开展耦合度可调式连续波型高功率输入耦合器的研制。采用 HFSS 三维电磁仿真软件完成了耦合器的高频结构设计, 对耦合器的微波传输、场分布进行了计算; 同时采用 CST 微波工作室对不同内导体天线插入深度下耦合器的外部品质因数进行了仿真计算, 结合 650 MHz 2 单元超导腔进行了耦合度调节实验, 仿真计算与实验测试结果基本一致。

关键词: 高功率输入耦合器; 可调耦合度; 传输计算; 场分布; 外部品质因数测量

中图分类号: TL503.2 **文献标志码:** A **doi:**10.11884/HPLPB201931.180258

Design of variable fundamental power coupler

Bing Feng^{1,2}, Pan Weimin^{1,2}, Huang Tongming², Ma Qiang², Yang Jisen^{1,2}

(1. Department of Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Department of Accelerator, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper aims to design a new 650MHz variable fundamental power coupler. The external quality factor Q_e ranges from 1.5×10^5 to 2×10^6 to meet the requirements of different current modes of the Beam Test Facility of PAPS (Platform of Advanced Photon Source Technology R&D). This is the first time to develop a variable continuous wave type power coupler in China. In this paper, the RF transmission and field distribution of the coupler are calculated by HFSS three-dimensional electromagnetic software. The external quality factor at different antenna penetration depth is simulated by CST microwave studio. The penetration depth adjusting experiment is carried out by integrating with a 650 MHz 2-cell superconducting cavity. The simulated and measured results of Q_e agree well with each other.

Key words: fundamental power coupler; variable; transmission calculation; field distribution; external quality factor measurement

PACS: 28.52. Av; 28.52. Lf; 29.20. Ej

功率输入耦合器通常在功率源与腔-束流系统之间扮演着功率输送的角色, 因而其必须实现功率源阻抗与腔-束流系统阻抗的匹配功能, 从而提高功率传输效率。束流流强的变化将导致腔-束流系统的阻抗改变。为了实现阻抗匹配, 减少反射功率, 提出了可调耦合度型耦合器的设计要求。目前国际上各大加速器实验室开展了相关研究, 如德国 DESY 实验室研制了 TTF-III 1.3 GHz 可调耦合度、双圆柱窗耦合器, 可通过脉冲峰值功率 1.5 MW, 是典型的脉冲式可调耦合器^[1]; LHC 400 MHz 可调耦合度、单圆柱窗耦合器, 可通过连续波 500 kW, 是典型的连续波式可调耦合器^[2]。耦合度可调的设计要求使耦合器的结构更加复杂, 并对耦合器的机械设计、洁净组装、功率容量等提出了更高的要求^[3-6]。先进光源技术研发与测试平台(PAPS)的束流测试系统计划建设以光阴极电子枪和 650 MHz 超导组元为核心的超导电子直线加速器束流试验装置, 用于先进加速器技术中关键设备的研发和带束流试验。加速组元采用工作在 650 MHz 连续波模式下的 2 单元超导腔。每个超导腔配备一支连续波功率达 100 kW 的输入耦合器, 为了适应不同束流模式的工作, 要求耦合器对应的外部品

^{*} 收稿日期: 2018-10-08; 修订日期: 2019-02-22

基金项目: 北京市固定资产投资项目; 北京怀柔综合性国家科学中心重点项目

作者简介: 郇 丰(1991—), 女, 博士研究生, 从事加速器功率输入耦合器的研究; bingf@ihep.ac.cn。

质因数 Q_e 在 $1.5 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$ 范围内可调。本文在该项目背景下,探索一种采用同轴、平板窗体结构的耦合度可调的 650 MHz 耦合器的设计,并结合 650 MHz 2 单元超导腔进行了外部品质因数 Q_e 的测量。

1 输入耦合器的结构

耦合器的设计需求源于 BEPCII 500 MHz 超导腔功率输入耦合器,该耦合器在行波状态下的传输功率高达 420 kW^[7-8],并已经成功用于 BEPCII 的载束运行超过 2 年。在此基础上进行了二次设计,实现耦合度可调节,该耦合器的设计参数见表 1。采用三维电磁仿真软件 HFSS 对高频模型的关键参数进行优化分析,从而实现耦合器各处的阻抗匹配,保证功率的有效传输。耦合器的基本结构为 WR1500 波导-同轴转换器,包含扼流结构的陶瓷窗体,以及特性阻抗为 50 Ω 同轴传输线,如图 1 所示。

表 1 耦合器的设计参数
Table 1 Parameters of the fundamental power coupler (FPC)

frequency	power	Q_e	coupling type	window type	impedance
650 MHz	100 kW, CW, TW	$1.5 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$	antenna E-coupling	single, coaxial disk	50 Ω

陶瓷窗是耦合器的关键部件,也是最为脆弱易损的部件。650 MHz 可调耦合器的陶瓷窗体采用包含扼流结构的同轴平板窗型,并且采用英国摩根公司生产的 AL300 陶瓷片(Al_2O_3 质量分数为 97.6%,外直径为 170 mm)。窗体的设计在满足高效传输的基础上,还要尽量减少陶瓷片大气侧附近的电场强度,使得瓷片表面的电场分布更为均匀。采用扼流结构可有效减小焊缝处的功率密度,并且实现阻抗匹配^[9]。在输入功率为 200 kW 时,窗体的电场和磁场强度分布如图 2 所示,内导体焊缝处的电场强度为 0.1 MV/m,外导体焊缝处的电场强度为 0.026 MV/m,远小于空气的击穿场强 3 MV/m。

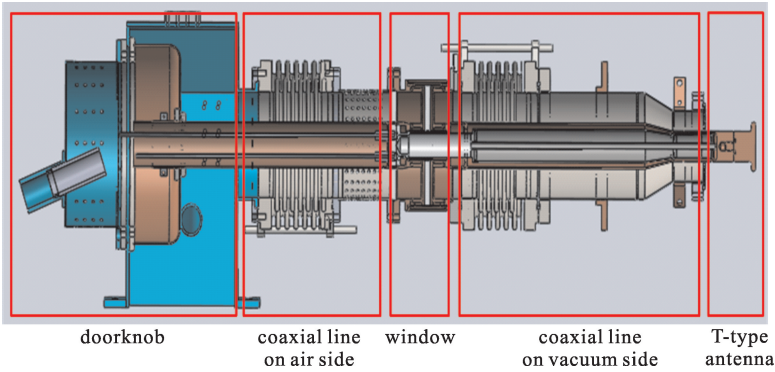


Fig. 1 Layout of the adjustable FPC
图 1 可调耦合器概貌

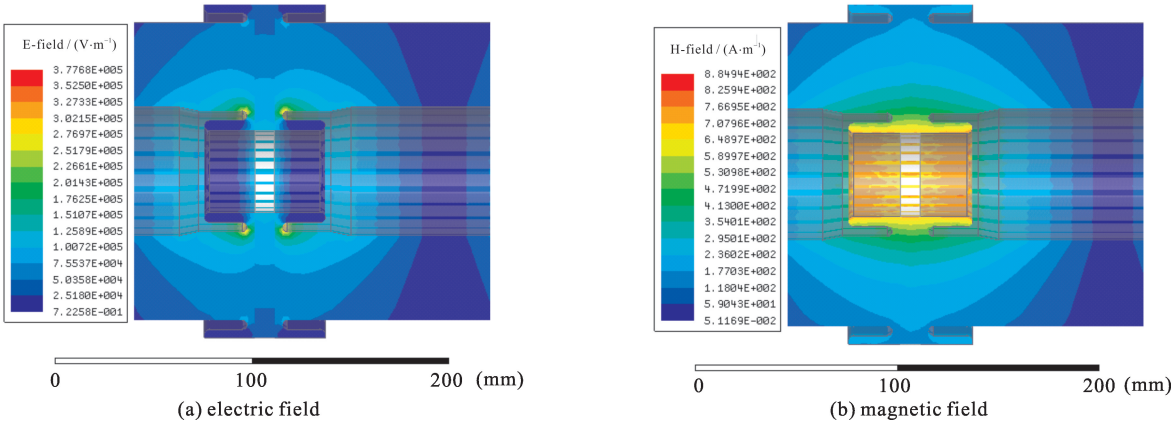


Fig. 2 Window electric field contour and magnetic field contour at power level 200 kW
图 2 200 kW 功率下陶瓷窗的电场强度和磁场强度分布

为了实现天线插入深度的变化,在耦合器的设计中引入波纹管结构,使得窗体可以随着插入深度的变化沿着轴向移动。考虑到耦合器的工作环境,窗体两侧波纹管应具有长度补偿的功能。采用不锈钢 316L 材质、壁厚 0.25 mm 的液压波纹管以满足机械强度的需求,但是其过高的欧姆损耗以及其薄壁结构的特性导致散热困难。为了避免内导体上的高场强导致更多的欧姆损耗,大气侧的内导体采用可松紧的卡箍式结构取代波纹管调节长度。在主同轴段的外导体上嵌入镀铜的波纹管以减少欧姆损耗。真空侧的外导体与超导腔的耦合端口连接,为了适应超导腔接口的尺寸,外导体直径收缩,在调节天线的插入深度时,内外导体的锥形结构会发生相

对位移,导致反射功率增大,在调节过程中耦合器整体的传输如图 3 所示。工作在压缩状态下的波纹管的两个相邻波纹结构间的间隙极小,考虑到其安全性,采用 HFSS 计算了极限压缩状态下的波纹管内的场分布,在 200 kW 的输入功率下,压缩波纹管内的电场和磁场强度如图 4 所示,电场强度小于 3 MV/m,满足安全需求。

2 外部品质因数 Q_e 的测量方法及结果

束流测试系统可以工作在不同的束流负载状态下,那么针对某一特定的束流负载,存在一个最佳的外部品质因数 Q_e 。使得主耦合器端口的反射功率为零。通过 CST 微波工作室模拟超导腔与耦合器的耦合情况,并且

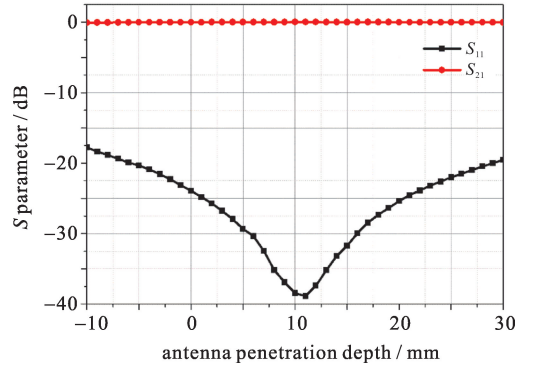


Fig. 3 S parameter vs antenna penetration depth

图 3 改变天线插入深度对应的 S 参数的变化范围

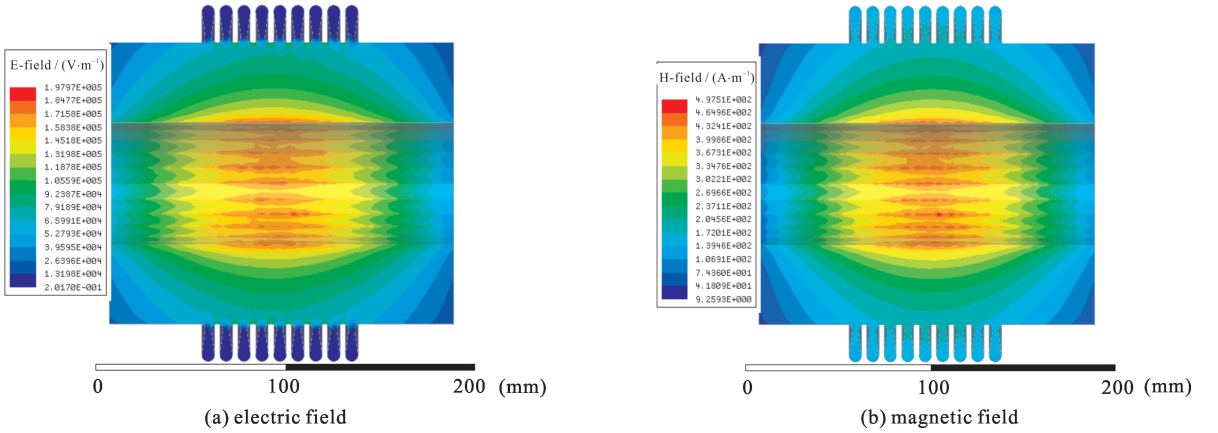


Fig. 4 Electric field and magnetic field of compressed bellows at power level 200 kW

图 4 200 kW 功率下压缩波纹管的电场强度和磁场强度分布

根据 Q_e 的仿真结果确定天线插入束流管道的深度。为了增强耦合,内导体末端采用了 T 型设计。

采用矢量网络分析仪测量改变天线插入深度的情况下 Q_e 的变化范围,并与仿真结果进行比较。矢量网络分析仪给出的信号经过端口 1、超导腔、主耦合器(FPC)到达端口 2,如图 5 所示。其中的功率关系为

$$P_f - P_r = P_c + P_e \quad (1)$$

$$P_r = \left(\frac{\beta_1 - 1}{\beta_1 + 1} \right)^2 P_f \quad (2)$$

$$\frac{P_c}{P_f} = |S_{21}|^2 \quad (3)$$

$$\frac{P_c}{P_e} = \frac{1}{\beta_2} \quad (4)$$

式中: P_f 即前向功率; P_r 为反射功率; P_c 为腔壁损耗的功率; P_e 为通过主耦合器耦合出的功率; β_1 为端口 1 耦合器的耦合系数, β_2 为主耦合器端口的耦合系数。由公式(1)~(4)可以推出

$$\beta_2 = \frac{|S_{21}|^2}{\frac{4\beta_1}{(\beta_1 - 1)^2} - |S_{21}|^2} \quad (5)$$

$$Q_0 = Q_L (1 + \beta_1 + \beta_2) \quad (6)$$

式中: Q_0 代表超导腔的品质因数; Q_L 代表超导腔的有载品质因数。那么主耦合器的外部品质因数可表示为^[10]

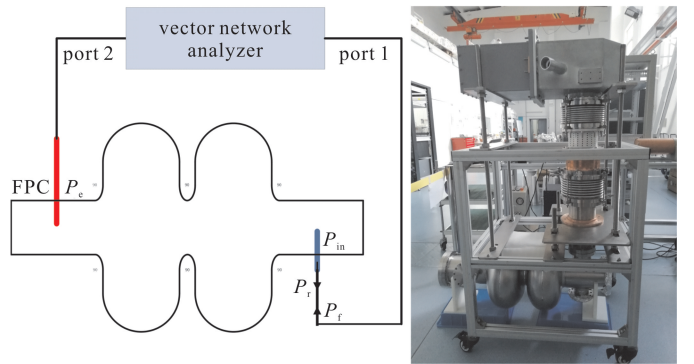


Fig. 5 Schematic diagram and photo of external quality factor measurement system

图 5 外部品质因数测试系统的框图

$$Q_e = Q_0 / \beta_2$$

(7)

在不同的插入深度下, Q_e 测量结果与仿真结果如图 6 所示。天线的行程范围为 $-8 \sim 27$ mm(天线拔出为负, 插入为正, 0 点为束管切面), 对应的 Q_e 的变化范围为 $1.36 \times 10^5 \sim 2.08 \times 10^6$, 仿真结果与测量结果基本一致。实际上, 由于主耦合器、腔体受到加工工艺的影响以及安装和操作过程中引入的误差等因素, 都将导致仿真与测量结果存在差异。

3 结 论

本文结合 650 MHz 2 单元超导体, 自主设计和研制了一支新型可调耦合度型功率输入耦合器, 并将耦合器安装到超导体上, 并进行了耦合度调节实验。通过调节内导体天线的插入深度, 改变耦合器的外部品质因数 Q_e , 这是可调耦合度型耦合器设计和研制的难点。实验结果表明, 650 MHz 可调耦合度耦合器的天线行程达到 35 mm, Q_e 的变化范围为 $1.36 \times 10^5 \sim 2.08 \times 10^6$, 仿真结果与测量结果基本一致。

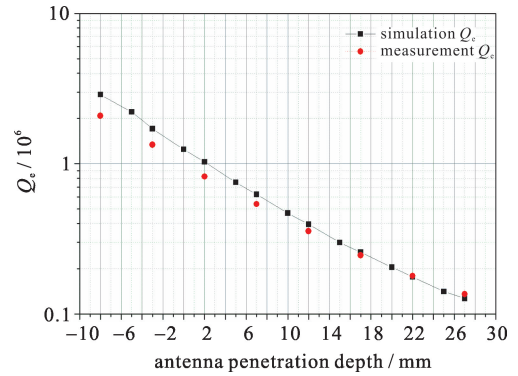


Fig. 6 Simulated and measured Q_e of the FPC for different antenna penetration depth

图 6 在不同的插入深度 Q_e 的仿真结果与测量结果

参考文献:

- [1] Belomestnykh S. Overview of input power coupler developments, pulsed and CW[C]//Proceedings of 13th International Workshop on RF Superconductivity. 2007.
- [2] Kindermann, H P, Stirbet M. The variable power coupler for the LHC superconducting cavity[R]. CERN-SL-99-074-HRF, 2000.
- [3] Belomestnykh S. Review of high power CW couplers for superconducting cavities[C]//Proceedings of the Workshop on High-Power Couplers for Superconducting Accelerators. 2002.
- [4] Knobloch J, Anders W, Martin M, et al. CW operation of the TTF-III input coupler[C]//Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference. 2005:3292-3294.
- [5] Kindermann H P, Veshcherevich V G, Stirbet M, et al. Status of RF power couplers for superconducting cavities at CERN[R]. CERN-SL-96-026-RF.
- [6] Schmierer E N, Haynes W B, Krawczyk F L, et al. Results of the APT RF power coupler development for superconducting linacs[C]//Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference. 2001:1110-1112.
- [7] Huang Tongming, Pan Weimin, Ma Qiang, et al. High power input coupler development for BEPCII 500 MHz superconducting cavity[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, 623(3):895-902.
- [8] 黄彤明. 超导体高功率输入耦合器的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2009:14-61. (Huang Tongming. Study of high power input power coupler for superconducting cavity. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2009:14-61)
- [9] Xu Wencan, Altinbas Z, Belomestnykh S, et al. Design, simulations, and conditioning of 500 kW fundamental power couplers for a superconducting RF gun[J]. Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams, 2012, 15:072001.
- [10] D'Elia A. Design and characterization of the power coupler line for HIE-ISOLDE high beta cavity[R]. HIE-ISOLDE-Project-Note-0011, 2011.