

文章编号: 1007-4627(2015)01-0054-05

$f = 325$ MHz, $\beta = 0.52$ 双柱超导 Spoke 腔电磁设计

蒋天才^{1, 2}, 何源¹, 张生虎¹, 鲁向阳³

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 北京大学核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 中国科学院近代物理研究所设计的工作频率为 325 MHz、最优 β 为 0.52 的双柱超导 Spoke 腔的电磁设计已经完成。详细地描述了 Spoke 基部横截面形状和大小对腔体射频性能的影响, 采用了跑道形来取代通常的圆形 Spoke 基部截面。从归一化峰值电磁场和分路阻抗两方面出发, 比较了横截面为横向跑道和纵向跑道的 Spoke 基部。Spoke 基部横截面的形状为横向跑道时能得到较好的射频参数, 满足中国 ADS(C-ADS) 的工程需求。最后利用 CST 粒子工作室对得到的腔体进行了二次电子倍增分析, 在工作电压附近不存在二次电子倍增, 验证了该腔体形状的可行性。

关键词: 超导谐振器; Spoke 腔; 中低 β ; 直线加速器; C-ADS

中图分类号: TL53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.01.054

1 引言

目前用于强流质子束加速的超导加速腔研究比较活跃, 对于不同频率段及不同加速能区的多种腔型的研究都比较多, 尤其是在中低能段的质子加速器中, 对中低 β 超导 Spoke 腔的研究更是一个热门课题。超导 Spoke 腔是一种基于一个或者多个 Spoke 芯棒组成的同轴线型超导谐振器, 其工作模式是横电磁波 TEM 模式。目前, 几个应用于中低 β 的超导 Spoke 腔已经进行了测试^[1], 同时人们也在寻求用超导 Spoke 腔来加速高 β 粒子^[2]。虽然目前世界上并没有在线运行的超导 Spoke 腔, 但是很多项目都将使用超导 Spoke 腔。美国费米国家实验室(Fermilab)的 Project X 项目在其直线加速器驱动装置中计划使用多个类型的超导 Spoke 腔^[3], 欧洲的散裂中子源项目也准备使用超导 Spoke 腔^[4]。用于嬗变核废料和产生氙的加速器驱动系统(ADS)同样计划使用超导 Spoke 腔来加速强流质子束^[5]。根据中国 ADS(C-ADS)的主路线图^[6], 我们设计了一种最优 β 为 0.52 的双柱超导 Spoke 腔。

2 电磁设计

超导腔电磁设计的主要目标是获得高的加速梯度和低的制冷热负载, 前者由低的归一化峰值

场(E_p/E_{acc} 和 B_p/E_{acc})决定, 后者是由高的归一化分路阻抗 $G \times R/Q_0$ (其中 G 是几何因子, R 是分路阻抗, Q_0 是品质因素)决定。根据目前的腔体后处理的工艺水平, 要求峰值表面电场和磁场要分别低于 32 MV/m 和 64 mT。C-ADS 要求该 Spoke 腔的加速梯度是 7.36 MV/m, 故对应的归一化峰值电场 E_p/E_{acc} 和归一化峰值磁场 B_p/E_{acc} 分别不高于 4.35 和 8.70 [mT/(MV/m)]。

该项工作是利用三维电磁场计算软件 CST Microwave Studio(MWS)完成的。图 1 是三间隙 Spoke 腔 MWS 模型的剖视图, 图中这些参数是用于腔体优化的主要参数。

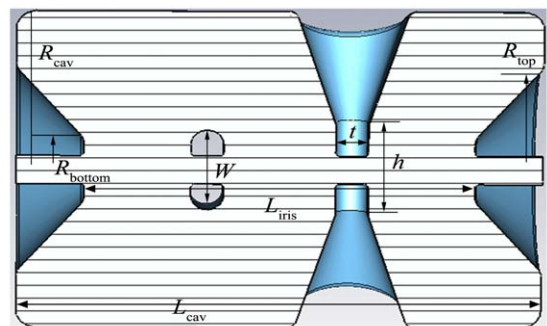


图 1 (在线彩图) 双柱超导 Spoke 腔 MWS 模型剖视图

收稿日期: 2014-03-21; 修改日期: 2014-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91026001)

作者简介: 蒋天才(1987-), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 从事加速器技术及应用研究; E-mail: jiangtiancai@impcas.ac.cn.

2.1 基本参数

腔体的半径和 iris-to-iris 之间的距离由腔体的运行频率和最优 β 决定。所有的优化数据都是在固定的频率和最优 β 的前提下得到的, 这意味着在优化过程中需要改变腔体的半径 R_{cav} 和 iris-to-iris 之间的距离 L_{iris} 以满足要求。根据束流动力学的需求, 束流孔径选择为 50.0 mm。在优化过程中, 只改变一个参数, 其它参数固定, 以找到不同参数对腔体射频参数的影响。

2.2 优化过程

超导 Spoke 腔的加速基模磁场主要集中在 Spoke 芯棒与外导体圆筒连接处, 因此 Spoke 芯棒基部横截面的形状和大小对腔体的归一化峰值场和归一化分路阻抗有很大的影响。Spoke 基部横截面的形状由常规的圆形和椭圆形改为跑道形。

定义跑道的长轴方向与束流方向垂直为横向, 相反, 与束流方向平行为纵向, 并且定义长轴为长, 短轴

为宽, 如图2所示。

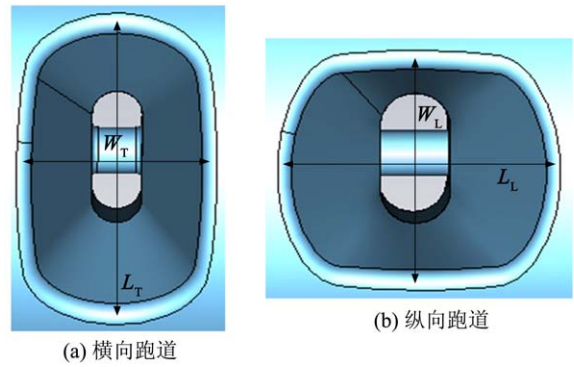


图 2 (在线彩图) 跑道形 Spoke 基部

如图3(a)所示, 归一化峰值磁场随着横向跑道宽的增大而降低, 而归一化峰值电场随之则先减小后增大。归一化分路阻抗随着横向跑道宽的增大而降低, 如图3(b)所示。

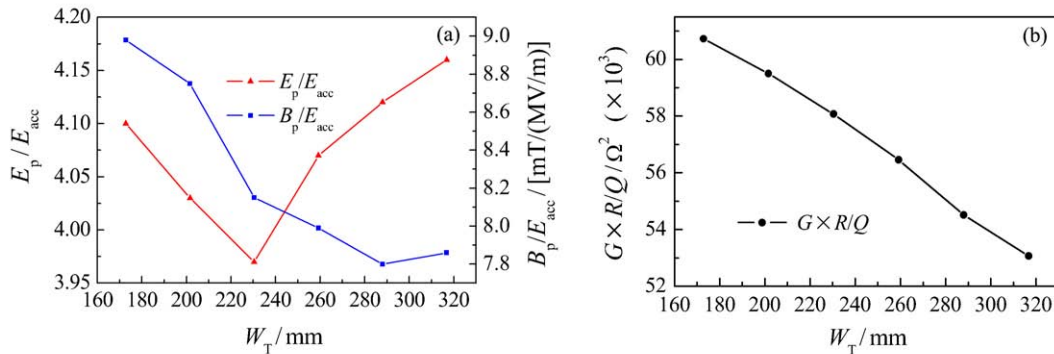


图 3 (在线彩图) 归一化峰值场(a)和归一化分路阻抗(b)随横向跑道宽 W_T 的变化趋势

固定 Spoke 基部横截面横向跑道形宽, 改变纵向跑道长, 得到相应的物理参数变化如图4所示。跑道的长 L_T 在 360.0 到 380.0 mm 之间, E_p/E_{acc} 存在最小值。随着 L_T 变大, B_p/E_{acc} 随之减小, $G \times R/Q$ 随之增大。说明, 在几何优化设计研究的考虑范围内,

Spoke 基部横向跑道长的尺寸越大, 就可以得到越好的超导性能。但长度增大, 会减小 Spoke 芯棒的机械强度, 增加机械设计的难度; 同时会增加 Spoke 芯棒过渡段成形的拉伸比, 增加制造难度和造价。因此在选择合适的 Spoke 基部横向跑道长 L_T 时, 需要综合考虑物理和

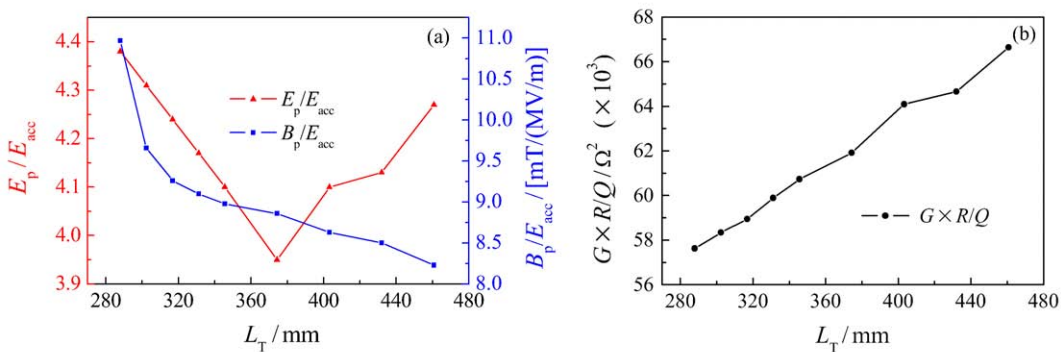


图 4 (在线彩图) 归一化峰值场(a)和归一化分路阻抗(b)随纵向跑道长 L_T 的变化趋势

制造上的因素。

图 5 给出了腔体的射频参数随 Spoke 基部横截面纵向跑道宽 W_L 的变化趋势。从图中可看出，随着几何参

数 W_L 变大，归一化峰值磁场减小，分路阻抗增大，而归一化峰值电场先减小后增大，与横向跑道长 L_T 的变化趋势相同。

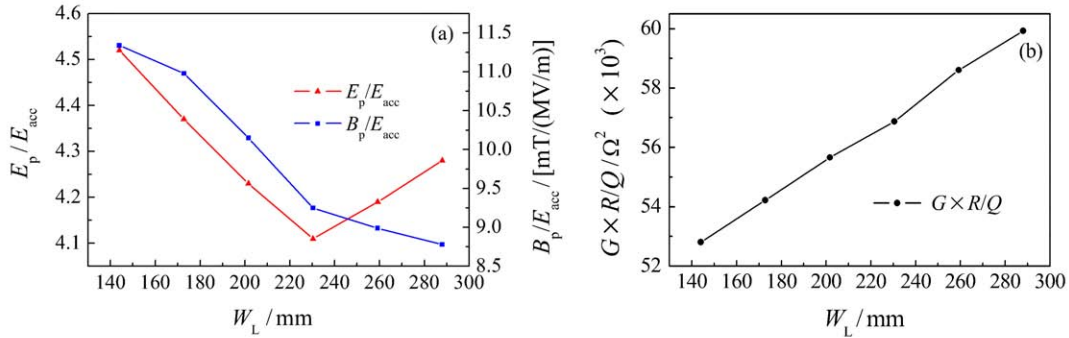


图 5 (在线彩图) 归一化峰值场(a)和归一化分路阻抗(b)随纵向跑道宽 W_L 的变化趋势

固定 Spoke 基部横截面纵向跑道宽，改变纵向跑道长，得到相应的物理参数变化如图 6 所示。随着纵向

跑道长 L_L 的增大， E_p/E_{acc} 、 B_p/E_{acc} 先减小后增大， $G \times R/Q$ 随之减小。

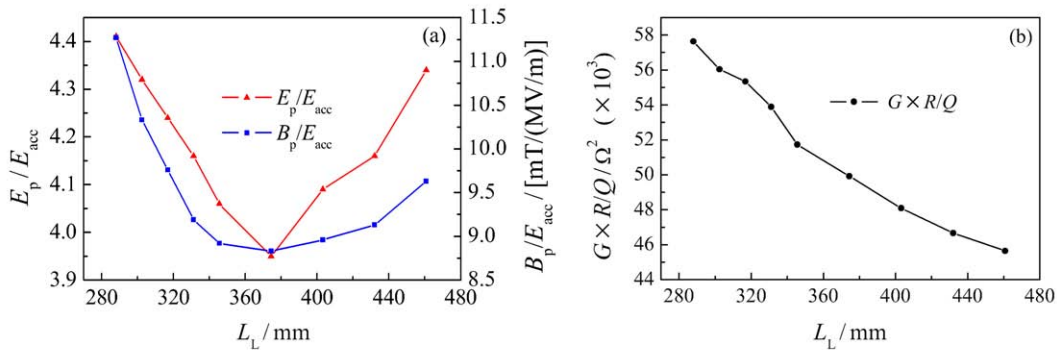


图 6 (在线彩图) 归一化峰值场(a)和归一化分路阻抗(b)随纵向跑道长 W_L 的变化趋势

比较两种方向的 Spoke 基部横截面跑道形发现归一化峰值电场基本相同，但是归一化峰值磁场和分路阻抗则有较大的差别，横向跑道的最大分路阻抗比纵向跑道的大很多，最小归一化峰值磁场比纵向跑道也要小。这主要是与纵向方向的腔体长度的限制比横向方向腔体圆筒圆周的限制要大有关系。为了获得更低的归一化峰值磁场和更高的分路阻抗，我们选择了横向跑道。

2.3 优化结果

对图 1 中所示模型的参数进行扫描，得出射频参数的变化趋势，进而实现对腔体射频参数的优化。腔的初步设计完成之后，在腔体上增加直径分别为 80.0 mm 的耦合器端口、28.0 mm 的信号提取端口和超纯水清洗端口。表 1 列出了最终腔体的射频参数，其中加速梯度对应的有效长度定义为 $L_{eff} = 3 \times \beta_0 \times \lambda/2$ ，其中 β_0 为最

优 β ， λ 为工作频率所对应的波长。图 7 为优化后腔体表面电磁场分布图，电磁场密度较高区域颜色较深。由图可见电场集中分布在束管处，加速束流的效率高；磁场主要分布在 Spoke 芯棒上，密度比较均匀，相对降低了峰值磁场。

表 1 三间隙超导 Spoke 腔的射频参数 ($f = 325 \text{ MHz}$, $\beta = 0.52$)

参数	数值
腔长/mm	800.0
腔体半径/mm	493.0
E_p/E_{acc}	4.34
$B_p/E_{acc} / [\text{mT}/(\text{MV}/\text{m})]$	7.95
$R/Q_0/\Omega$	505.9
G/Ω	132.6

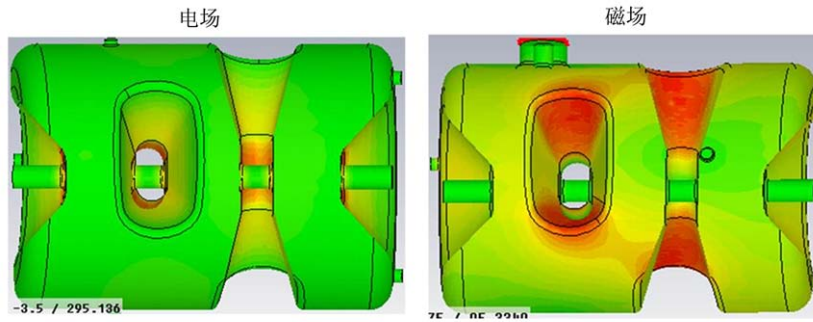


图 7 (在线彩图) 腔体表面电磁场分布

3 二次电子倍增分析

完成电磁设计后, 使用了 CST Particle Studio(PS) 软件的 TRK 求解器对该超导 Spoke 腔进行了二次电子倍增的计算分析。首先在 CST MWS 中计算腔内电磁场, 然后利用 Furman 粒子发射模型^[7], 在腔体内表面发射电子, 利用所计算的电磁场驱动发射的电子, 进行电子运动轨迹和能量的计算。二次电子倍增的形成需要满足: (1) 产生的二次电子与腔内电磁场形成共振; (2) 二次电子的碰撞能量范围落在二次电子发射系数 SEY (发射的二次电子数与入射的电子数之比) 小于 1 这两个条件。需要指出的是, 不同的材料具有不同的二次电子发射系数, 而且相同的材料在不同的处理条件下也有不同的二次电子发射系数。模拟计算中采用经 300 °C 烘烤处理的铌材这种具有典型的二次电子发射曲线的材料作为仿真材料。

利用 CST PS 中给出的二次电子系数 SEY 来判断是否发生了二次电子倍增, 如果 SEY 大于 1, 那么认为发生了倍增, 反之, 则没有发生。计算不同位置在不同加速梯度下的二次电子系数 SEY, 选取最大的 SEY 值作为此超导 Spoke 腔在该梯度下的二次电子系数。

图 8 为不同加速梯度下对应的二次电子系数, 腔体在 1.5 ~ 6.5 MV/m 的加速梯度下存在二次电子倍增的

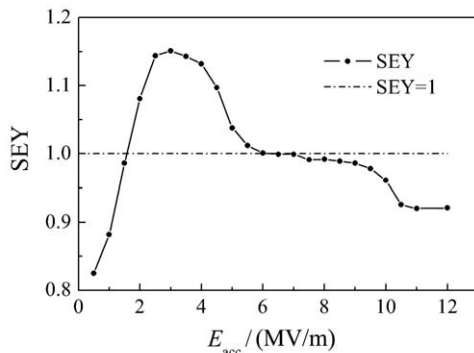


图 8 加速梯度与二次电子系数关系曲线

可能性, 在腔体工作梯度 8 ~ 10 MV/m 区域没有二次电子倍增, 满足 C-ADS 工程需要。

4 总结

通过对超导腔设计过程的研究, 设计了一种频率为 325 MHz, 最优 β 为 0.52 的三间隙超导 Spoke 腔。为了得到较高的分路阻抗和较低的归一化峰值磁场, 选择了一种横向跑道形的 Spoke 基部横截面。在腔体优化的基础上, 并进行了二次电子倍增分析, 发现在低加速梯度区可能存在二次电子倍增, 而在工作区域不存在二次电子倍增。超导腔具有很高的品质因素, 导致其工作带宽很窄, 在实际运行中由于机械振动、氦压波动等影响, 腔体频率很容易失锁, 后续还需要对该腔进行机械稳定性设计, 确保腔体能稳定运行。

参考文献:

- [1] KELLY M. Status of Superconducting Spoke Cavity Development[C]//Proc. 13th International Workshop on RF Superconductivity, China, 2007: 414.
- [2] DELAYEN J R, DE SILVA S U, HOPPER C S. Design of Superconducting Spoke Cavities for High-Velocity Applications[C]//Proc. Particle Accelerator Conference, New York, 2011: 1024.
- [3] NAGAITSEV S. arXiv: 1208.5759, 2012.
- [4] PEGGS S. The European Spallation Source[C]//Proc. PAC 2011 Conference, New York, USA, 2011: 3789.
- [5] KRAWCZYK F L, GARNETT R, LAFAVE R P, *et al.* Design of a Low- β , 2-gap Spoke Resonator for the AAA Project[C]//Proc. Particle Accelerator Conference, USA, 2001: 906.
- [6] WU X, TANKE E, ZHAO Q, *et al.* End-To-End Beam Simulations for C-ADS Injector II[C]//Proc. IPAC 2013 Conference, China, 2013: 1838.
- [7] FUEMAN M A, PIVI M T F. Phys Rev ST Accel Beams, 2002, 5(124404): 124404.

EM Design of a $f = 325$ MHz, $\beta = 0.52$ Double Spoke Superconducting Cavity

JIANG Tiancai^{1, 2, 1)}, HE Yuan¹, ZHANG Shenghu¹, LU Xiangyang³

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: The EM design of a 325 MHz $\beta = 0.52$ superconducting double Spoke cavity has been finished at Institute of Modern Physics (IMP), Chinese Academy of Sciences(CAS). In this paper, the optimization of the Spoke base is described in detail. The goal is to minimize the peak surface field and maximize the shunt impedance. The common cylinder is replaced by the racetrack shape for the Spoke base. The transverse racetrack Spoke base can offer a better RF property than the longitudinal racetrack Spoke base, which meet the requirement of the C-ADS. The simulation of multipactor finished by CST Particle Studio is also presented, which gives a promising result that there is no multipactor around working voltage.

Key words: superconducting resonator; spoke cavity; low and medium β ; linac; C-ADS

Received date: 21 Mar. 2014; **Revised date:** 16 Apr. 2014

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (91026004)

1) E-mail: jiangtiancai@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>