

TESLA式高阶模衰减器的改进与设计研究^{*}

王桂梅 吴文忠 鲁向阳¹⁾ 张保澄 全胜文 朱凤 林林 焦飞 赵夔

(北京大学重离子物理研究所射频超导加速器实验室 北京 100871)

摘要 为了消除超导加速腔中高阶模场对加速粒子的影响,在DESY的高阶模耦合器结构的基础上本文提出了改进的耦合器.用HFSS程序针对1.5cell腔设计优化了高阶模耦合器,得到高阶模耦合器对几种主要模式的吸收.研究表明,采用新型结构后,衰减器对主要有害模的衰减由-40dB提高到-15dB,使原有高阶模衰减器的性能明显提高.该高阶模衰减器也适用于国产2cell超导电腔的使用.

关键词 同轴型高阶模耦合器 高阶模 超导加速腔 HFSS

1 引言

带电束团进入加速腔进行加速的同时,在束团运动方向上会激励起加速腔的很多谐振模式.这些谐振模式不仅损耗掉束团的部分能量^[1],而且在连续波模式或高重复频率脉冲加速模式下(PKU DC-SC光阴极超导注入器束团重复频率为81.25MHz),将影响后续的加速束流,影响束团的品质及稳定性,同时在超导腔上的功耗还会加重了制冷系统的负担,增加了系统的运行费用,这些是我们所不希望的.高阶模衰减器是专门用以吸收谐振腔内的高阶模场能的装置,国际上常用的衰减器主要有3种类型:波导型(如TJNAF),束管型(如CESR-III和KEKB)和同轴型(如DESY和KEK).

TESLA腔型经过多年的使用与研发,其技术已经趋于成熟,成为目前国际上L波段超导加速器的主流腔型,如德国的DESY和FZR Rossendorf以及美国的费米实验室均采用的是TESLA型超导电腔,北京大学的1.5cell超导电腔和承担的863课题所研制的2cell超导电腔,也采用的是TESLA腔型参数.特别是2004年在日本召开的第一届国际对撞机(ILC)研讨会上,与会的世界专家推荐未来的超导对撞机将采用以TESLA技术为基础的超导电腔.正是由于TESLA腔型的重要性,要求人们对TESLA型超导电腔的加工、使用以及性能提高等各方面问题,进行进一步深入研究.国际

上超导加速器实验研究结果经验表明, TESLA式的高阶模衰减器存在一定的局限性^[2-5]. 北京大学的1+1/2 cell DC-SC光阴极注入器及NSAF联合基金课题——对2cell TESLA型超导加速腔的高阶模研究中,也发现了这样的问题.为此,开展了改进TESLA式高阶模衰减器的研究.

本文的研究内容为对TESLA式的高阶模衰减器进行改进,以现有的1.5cell纯铌超导电腔为例,用HFSS^[6, 7]程序进行相应的模拟计算和模型腔的实验,验证设计的可行性.最后给出了高阶模衰减器的优化设计.

2 同轴型高阶模衰减器结构设计

从原理上说,对高阶模衰减器的要求就是:它应该对除加速腔的工作频率 f_0 以外其他各种频率成分,均能够有效衰减.这就要求高阶模衰减器是个带通滤波器,而且要使滤波器的带宽 Δf_0 足够的窄,使与基频相近的谐振频率都能足够的衰减.因此高阶模衰减器设计可以看作一个类似的带通滤波器设计.

图1(a)为同轴高阶模衰减器的示意图,它由同轴谐振腔、耦合天线和负载回路构成,其等效电路如图1(b)所示. Port1与加速腔的束管连接,同轴腔的内导体探入束管中吸收谐振模的场能,天线B将射频场能耦合到高阶模衰减器内,经天线A耦合到吸收回路中,

2005-07-19 收稿

^{*}国家自然科学基金(10276001)资助

1) E-mail: xylyu@pku.edu.cn

通常利用同轴线加载吸收负载 R 从 port2 吸收能量完成对高阶模的衰减. 耦合天线 B 和耦合电容构成电流源; l_1, l_2 为导体, 之间是长度为 d 、特性阻抗 Z_0 同轴传输线, 它们作为短路面连接同轴腔的内外导体, 还起支撑内导体的作用; T_1 面右侧等效为谐振腔, 调谐天线长度 l 和电容间隙 g 可改变谐振腔的谐振频率. 简单说来就是让天线 B 要把腔内场最大限度的耦合出来, 天线 A 是把高阶模场能最大限度的衰减.

在超导腔的工作模式下, 改变 l 和 g , 使谐振腔在工作频率谐振 f_0 , 此时天线 A 被短路, 没有能量损耗在吸收负载 R 上, 从而对工作模式没有损耗. 金属杆 l_1 的感抗和衰减器分布电容 C_s 形成并联谐振, 调节这两个参数使其在某特定有害模的频率下形成谐振, 最大的衰减掉该模式. 为了增强高阶模的衰减减少对基模的影响, 采用了非中心轴对称结构. DESY 在设计衰减器时做了以下改进: 改变 l_1 的形状和位置, 使金属臂成弯曲状, 探入超导腔束管内, 目的是增强高阶模衰减器的天线 B 的磁耦合作用; 为了使外负载电路的提取天线 A 提取功率增强, 使天线置于腔体电场较强处, 并与电场平行, 同轴腔内电场是对内导体成辐射状分布的, 故天线 A 和同轴谐振腔的内导体轴线垂直并与其成辐射状.

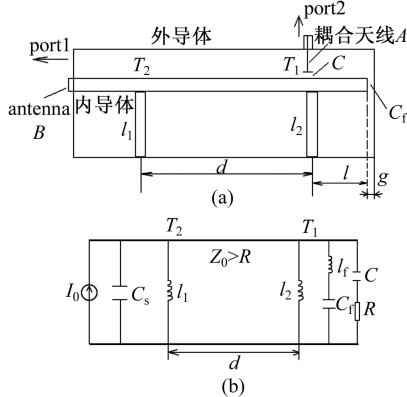


图 1 (a) 同轴高阶模衰减器示意图; (b) 高阶模耦合器的等效电路

参考 DESY 的高阶模衰减器^[2], 进行 1.5cell 腔的高阶模衰减器的设计, 结构如图 2. 模拟过程中调整电容间隙 g 、内导体偏离中心轴的距离 Z 、衰减器与同轴线的角度等参数, 结果表明: 衰减器虽然在谐振频率 f_0 附近吸收很小, 但在其他频率下吸收平均值也只有 -40dB , 衰减器的效果不是很好, DESY 进行的高阶模衰减器实验^[3]中也显示了这种设计的不足. 因此必须重新调整负载天线的耦合能力, 尽可能的提高非 f_0 下的衰减量.

天线 A 与衰减器的耦合为电场耦合, 因此提高天

线 A 表面电场强度可以提高其提取能力. 减小天线 A 与内导体之间的距离, 可以提高天线 A 表面电场强度, 但是计算结果显示改进效果并不明显. 进一步的分析表明, 在提高天线 A 表面电场的同时, 增加耦合电容 C , 即增大天线的耦合面积, 可以明显提高耦合能力. 改进后的结构如图 3 所示, 在内导体上挖进一个弧面, 电场局部聚焦, 这样使得天线末端的耦合小盘处电场强度增加, 耦合出来的位移电流增强, 但对 f_0 天线处于短路状态, 对 f_0 的吸收影响不会很大, 衰减器与同轴线平行放置.

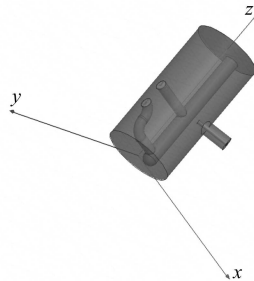


图 2 高阶模耦合器三维结构

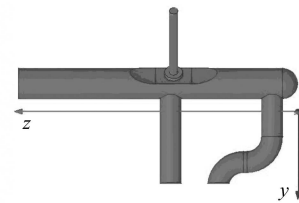


图 3 耦合天线 A 的改进

用改进的结构进行计算, 当衰减器与同轴线垂直和平行放置时, 提取天线 A 对不同频率的吸收效果不同. 计算结果表明: 衰减器与同轴线垂直放置时其他频率段的衰减明显提高了, 由原来的 -40dB 提升到 -15dB 左右, 虽然对 f_0 的衰减变大了, 但是可以忽略不计 (-60dB).

3 高阶模衰减器对高阶模的衰减

以上讨论的高阶模衰减器设计和参数调节反映的是衰减器自身的特性, 本节讨论该耦合器安装到 1.5cell 谐振腔上对高阶模的衰减情况, 如图 4 所示. 模拟计算中 1.5cell 腔为常温腔, 表面材料定义为铝. 利

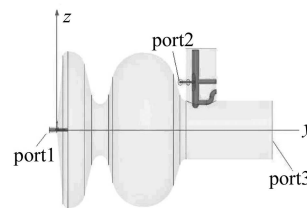


图 4 1.5cell 高阶模衰减器模拟激励端口设置

用扫频法, 设置 port1 为信号馈入端, 由 port1 传向谐振腔和耦合系统的功率 P_f , 端口反射功率 P_r ; port2 为高阶模衰减器的衰减引出端面, 该端口透射功率 P_{t2} ; port3 是束管端面, 该端口透射功率 P_{t3} . 相应各端口输出信号 $S_{11} = P_r/P_f$, $S_{21} = P_{t2}/P_f$, $S_{31} = P_{t3}/P_f$, 谐

振模在1.5cell腔表面损耗为 $P_0 = P_t - P_r - P_{t2} - P_{t3}$. 由 S_{11} , S_{21} , S_{31} 曲线来判断各谐振模式及高阶模衰减器的工作状态. 高阶模衰减器对各谐振模式的外部品质因数^[8]

$$Q_e = Q_0 \cdot (1 - S_{11}^2 - S_{21}^2 - S_{31}^2) / S_{21}^2,$$

式中 Q_0 为该谐振模式的固有品质因数. 因此, 判断衰减器的效果主要是比较各高阶模的外部 Q_e .

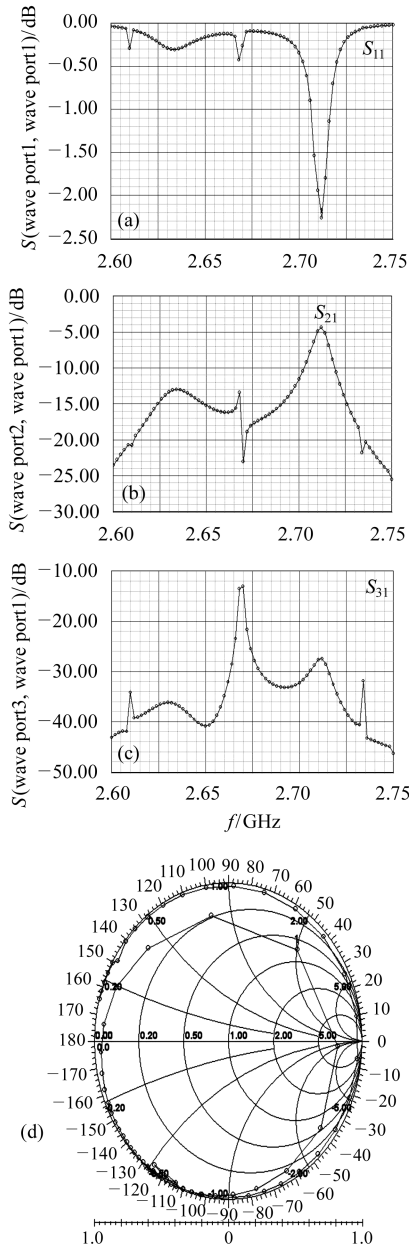


图5 (a) S_{11} 曲线; (b) S_{21} 曲线; (c) S_{31} 曲线; (d) port1的Smith图

在参考文献[6]给出的各高阶模基础上, 对特定的模式进行小范围扫频. 1.5cell腔工作模式: TM_{010} (π 模), 在1.294—1.3GHz扫频, 发现 S_{21} 很小, 几乎没有

能量被高阶模衰减器提取出来, 并且 S_{21} 相对 S_{31} 来说也是微不足道的, 相对腔壁的损耗为其 e^{-11} 倍, 而 Q_e 值达到 10^{15} . 因此, 加速腔工作时可以忽略高阶模衰减器及其负载电路的影响.

下面以高阶模 TM_{020} (π 模) 为例, 分析衰减器对该模式的衰减. 扫描频率在2.6—2.75GHz, step为2MHz, 输出曲线如图5所示. 由Smith圆图知, Smith曲线过横轴3次, 扫频中有3个谐振频率, 分别在2.65GHz, 2.67GHz, 2.712GHz, 结合文献[6]给出的高阶模频谱, 分别对应 TM_{020} ($\pi/2$ 模), TM_{111} Like模, TM_{020} (π 模). 图中最明显的 TM_{020} 的 π 模: $S_{11} = 0.77166$, $S_{21} = 0.60605$, $S_{31} = 0.04266$, $Q_e = Q_0 \cdot 0.0354$. S_{21} 远大于 S_{31} , 衰减器相对束管提取信号强很多, TM_{020} (π 模) 的谐振场能强烈的被衰减器吸收, 并且衰减器的提取功率约为腔壁本身损耗的30倍, 使该模式迅速得到衰减, 这正是我们设计高阶模衰减器的目的. 谐振频率在2.67GHz的 TM_{111} Like模, 谐振时 S_{11} 曲线很平滑, 但 S_{31} 曲线却非常尖锐, 谐振点上 S_{31} 与 S_{21} 数值差不多, 说明该模式很强一部分能量可以从束管传播出去, 结合该模式的场行分布, 该模在束管处场强很大, 并且表现得像TE模, 束管对它衰减相对较小, 故port3处提取功率相对很强.

用同样的办法研究高阶模衰减器对其他有害模式的吸收, 表1给出port1在中心轴和偏轴上的电激励结果. 结果表明: 高阶模衰减器的 Q_e 除了 TM_{010} 模, 对其他大部分都在 10^3 — 10^4 之间. 虽然 Q_e 对常温腔 Q_0 并不是很低, 但是在超导加速器(常温腔与超导腔几何形状大小一样且在相同的加速梯度下), Q_e 几乎保持不变, 比超导腔本身的 Q_0 ($> 10^9$) 低很多. 因此, 可以直接在常温的模型腔上测量高阶模衰减器的参数进行相关研究. 在超导状态下衰减器对高阶模 Q_t 与 Q_e 近似相等, 高阶谐振模有很低的有载品质因数 Q_t , 表明这种改进的高阶模耦合器效果很好.

表1 高阶模衰减器对部分模式的衰减

谐振频率 /GHz	模式	S_{11}	S_{21}	S_{31}	P_0/P_t	Q_e ($\times 10^3$)
2.699	TM_{111} Like	0.544	0.29376	0.777	0.156	3.12
2.402	TM_{011}	0.88401	0.34478	0.25018	0.310	6.2
1.280	$TM_{010} \pi/4$	0.91828	0.004	0.00034	9.8 $\times 10^3$	1.96 $\times 10^4$
1.295	$TM_{010} \pi$	0.92221	0.000805	0.0007	2.3 $\times 10^5$	4.6 $\times 10^6$
1.674	TE_{111}	0.90397	0.30913	0.22839	0.37	7.4
1.784	TM_{111} Like	0.5176	0.83166	0.08809	0.047	0.94
2.385	TM_{111}	0.78385	0.44977	0.41719	0.046	0.92
2.646	$TM_{020} \pi/4$	0.54461	0.65384	0.38721	0.295	5.9

注: 表中都以 $Q_0 = 20000$ 来计算 Q_e .

4 讨论

本文通过增强引出天线表面电场及增加极间耦合电容的方法, 来提高高阶模衰减器对高阶模电场的引出能力. 提出了对TESLA式高阶模衰减器的具体改进方案. 采用具有三维电场计算能力的工具软件HFSS进行模拟计算研究. 研究结果表明该方案原理是正确的, 方法是可行的. 在目前的结构参数条件下,

将高阶模衰减器对主要有害模的引出能力, 由原来的 -40dB 提高到 -15dB .

在完成了对高阶模衰减器独立研究以后, 本文将高阶模衰减器与 $1+1/2$ cell腔联合进行计算验证. 确认新型衰减器可以对主要有害模进行有效衰减.

本研究结果需要与实验研究结合以进一步优化系统参数. 本文的研究方法对2cell的高阶模衰减器研究同样适用.

参考文献(References)

- 1 LU Xiang-Yang, JIN Xiao, XIANG Rong et al. High Power Laser and Particle Beams, 2005, **17**(3): 466—468 (in Chinese)
(鲁向阳, 金晓, 向荣等. 强激光与离子束, 2005, **17**(3): 466—468)
- 2 Dohlus M, Kaljuzhny V, Wipf S G. Higher Order Mode Absorption in TTF Modules in the Frequency Range of the 3rd Dipole Band. http://tesla.desy.de/new_pages/TESLA_Reports/2002/pdf_files/tesla2002-05.pdf
- 3 Devanz G, Jablonka M, Magne C et al. HOM Beam Coupling Measurements at the TESLA test Facility (TTF). Proceedings of EPAC 2002. Paris, France. 2002. 230—232
- 4 Sekutowicz J, Beard K, Kneisel P et al. Superstructures for High Current FEL Application. Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference. 2003. 1575—1577
- 5 Lalayan M V, Kostin D V, Sobenin N P. Electromagnetic Fields and Beam Dynamics Simulation for the Superstructure of Tesla Linear Collider Considering Field Asymmetry Caused by HOM and Power Couplers. http://www.kipt.kharkov.ua/conferences/ihepnp/17workshop_res/N3/49_3.pdf. 138—140
- 6 WANG Gui-Mei, WU Wen-Zhong, LU Xiang-Yang et al. HEP & NP, 2005, **25**(11): 1077—1080 (in Chinese)
(王桂梅, 吴文忠, 鲁向阳等. 高能物理与核物理, 2005, **25**(11): 1077—1080)
- 7 Matsuoka M, Nakanishi K, Okubo K. HOM Coupler Development for SC Linac of High Intensity Proton Accelerator. Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan. 2000. 282—284
- 8 Padamsee H, Knobloch J, Hays T. RF Superconductivity for Accelerators [M]. New York: John Wiley & Sons, 1998

Improvement Study of TESLA Style HOM Coupler^{*}

WANG Gui-Mei WU Wen-Zhong LU Xiang-Yang¹⁾ ZHANG Bao-Cheng QUAN Sheng-Wen
ZHU Feng LIN Lin JIAO Fei ZHAO Kui

(RF Superconducting Accelerator Laboratory, Institute of Heavy Ion Physics,
Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract To eliminate the higher order modes (HOMs) in superconducting cavity, an improvement study on HOM coupler has been done. With Code HFSS, the HOM coupler for $1+1/2$ Cell superconducting cavity of the Peking University has been designed and optimized. The improved HOM coupler can absorb main HOMs out to -15dB from -40dB , which proves this HOM coupler to be effective.

Key words coaxial coupler, HOM, superconducting cavity, HFSS

Received 19 July 2005

^{*}Supported by NSFC (10276001)

¹⁾ E-mail: xylu@pku.edu.cn