

改进的 TESLA 式高阶模衰减器的实验研究*

徐文灿¹⁾ 王芳 鲁向阳 朱凤 全胜文 张保澄 郝建奎 赵夔

(北京大学物理学院重离子物理研究所 北京 100871)

摘要 讨论了 TESLA 型高阶模耦合器的改进, 对所设计的改进型 TESLA 式高阶模耦合器进行实验, 对理论计算与实验结果进行详细分析, 结果表明改进的高阶模耦合器理论计算和实验结果符合得较好.

关键词 高阶模 TESLA 式高阶模耦合器 改进设计 实验研究

1 引言

带电粒子束经过加速器时一方面受到加速场的加速, 另一方面会激励起加速腔的高阶模. 束团激励的高阶模将损耗粒子束本身的能量, 使束团发射度、能散度变坏, 影响束流的品质. 若束团激励的高阶模不能及时地衰减, 这些高阶模将严重影响后续束团的品质及稳定性, 严重时将会产生 BBU 效应, 特别是在高重复率和 CW 模式的时间结构中, 高阶模是限制粒子束流强的重要因素. 因此, 设计一个能及时有效地抑制高阶模的高阶模耦合器一直是加速器发展的重要内容之一.

2 改进型的 TESLA 高阶模耦合器的设计

TESLA 型高阶模耦合器经过多年的使用与研发, 已成为目前国际上用于超导加速器的主要高阶模耦合器之一, 如德国的 DESY 和 FZR Rossendorf 等均采用的是 TESLA 型超导管, 北京大学 3.5cell 超导型 DC-SC 光阴极注入器也将采用 TESLA 型高阶模耦合器. 国际上超导加速器实验研究结果表明, TESLA 式的高阶模衰减器存在一定的局限性^[1], 即耦合天线提取的信号不够, 以至于一方面影响束流的品质, 另一方面高阶模耦合器上热量积累导致高阶模耦合器失超. 北京大学在对 DC-SC 光阴极注入器 1.5cell 腔进行的高

阶模研究中, 也发现了这样的问题.

对 TESLA 型高阶模耦合器设计的改进, 主要是在高阶模耦合器的耦合天线上的适当位置切一弧面, 以增加耦合电容和耦合面积, 这样耦合出来的位移电流增强, 但对于基模的吸收影响不大. 详细的设计请见参考文献[2—3]. 图1所示是我们设计的用于 1.5cell 超导光阴极注入器的高阶模耦合器的提取天线. 图2是改进型高阶模耦合器的实物图.

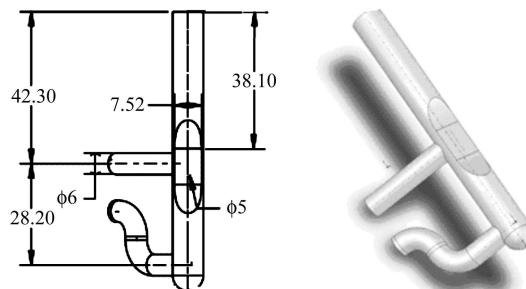


图 1 改进型的高阶模耦合器的提取天线设计



图 2 高阶模耦合器实物图

2006 - 07 - 06 收稿

* 国家自然科学基金(10276001)资助

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

3 改进的 TESLA 型高阶模耦合器的实验

我们对所设计的高阶模耦合器在 1.5cell 铝的 TESALA 模型腔上进行实验. 实验原理图如图 3 所示. 先不考虑高阶模衰减器腔壁和内导体的损耗, 假设微波源由 port1 入射到谐振腔, P_f 是前进功率; P_r 是 port1 端口反射功率; P_{t2} 是高阶模耦合器提取端口 port2 的透射功率; P_{t3} 是模型腔束管透射端口 port3 的透射功率; 谐振模在 1.5cell 腔表面损耗为 P_r . 则有:

$$S_{11}^2 = \frac{P_r}{P_f}, \quad S_{21}^2 = \frac{P_{t2}}{P_f}, \quad S_{31}^2 = \frac{P_{t3}}{P_f}, \quad (1)$$

$$P_c = P_f - P_r - P_{t2} - P_{t3} = (1 - S_{11}^2 - S_{21}^2 - S_{31}^2)P_f, \quad (2)$$

$$Q_e = \frac{P_c}{P_{t2}}Q_0 = \frac{(1 - S_{11}^2 - S_{21}^2 - S_{31}^2)}{S_{21}^2}Q_0, \quad (3)$$

其中 Q_0 , Q_e 分别为特定谐振模式的固有品质因数和高阶模衰减器对该模式的外部品质因数. 因此通过测量超导腔各阶模的固有品质因素 Q_0 以及各端口的 S 参数可以获得高阶模耦合器对各模式的 Q_e . 由 S_{11} 曲线可以判断各模式的谐振频率, 同时计算出该频率下各端口相应的 S 参数, 再由 S 参数曲线可以求出相应谐振模式的 Q_0 (或直接采用本征模式中求出来的各谐振模式的 Q_0). 我们对 1.5cell TESLA 腔的本征模已经作了充分的分析, 请参考文献 [2].

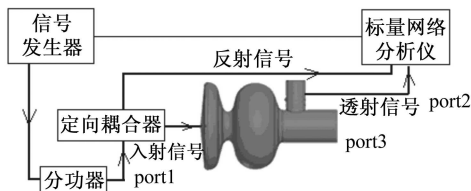


图 3 高阶模衰减器测量原理图

实验装置用 HP8350B 扫频仪产生 1—3GHz 的扫频信号, 用 HP8757D 标量网络分析仪测量电压投射系数. 在模型腔上测量高阶模衰减器对 1—3GHz 频率范围的整体效果, 并不研究对特殊模式的吸收问题. 这样在实验时随机改变高阶模耦合器与束管的夹角, 同时改变激励天线和腔体的耦合状态, 取得最大的样本进行比较. 最重要的是测量高阶模衰减器对各模式的 Q_e 变化. 改进后的高阶模耦合器实验测量结果如表 1.

为了比较改进与未改进的高阶模耦合器的高阶模吸收效果, 表 2 给出改进前的高阶模耦合器在同样 1.5cell 腔上的实验结果, 关于未改进测量的细节请见参考文献 [4].

表 1 改进型高阶模衰减器对各模式的衰减

frequency/GHz	Q_0	Q_e	mode
1.29846	4914.58	噪声	TM ₀₁₀ ⁺
1.31613	4573.9	噪声	TM ₀₁₀
1.82560	6469.3	2036.25	TM ₁₁ like
1.89712	10223.0	1218.23	TM ₁₁ ⁺ like
2.36250	10146.7	1689.66	TM ₁₁₁ [*]
2.50100	4782.6	2543.3	TM ₀₁₁
2.50650	2146.15	1021.98	TM like
2.67475	2507.02	1567.09	TM ₀₂₀ ⁺
2.77100	5900.89	1605.49	TM ₁₁₁ like
2.77475	11780.3	10425.04	TM ₀₂₀
2.97350	7278.89	3133.6	TM ₁₁₂

* 模式为相应模式的不同极化方向的模, + 为该模式的 $\pi/2$ 模.

表 2 高阶模衰减器对各模式的衰减

谐振频率/GHz	Q_0	Q_e	谐振模式
1.32	6503		TM ₀₁₀
1.30	7316		TM ₀₁₀ ⁺
1.68	2870	2×10^6	TE ₁₁₁
1.83	5640	3×10^5	TM ₁₁ like
1.89	5326	2×10^4	TM ₁₁ ⁺ like
2.36	1508	7×10^5	TM ₁₁₁
2.38	1270	6×10^4	TM ₁₁₁ [*]
2.41	3062	1.3×10^4	TM ₀₁₁
2.51	4217	4×10^5	TM like
2.69	3441	4.5×10^5	TM ₀₂₀ ⁺
2.73	6156	2×10^4	TM ₁₁₁ like
2.76	1430	1.4×10^5	TM ₀₂₀
2.95	5021	2×10^4	TM ₁₁₂

由于测量仪器和测量环境的不一样, 同样 1.5cell 腔测量的模式频率有所漂移, 但是从高阶模耦合吸收效果而言, 改进后的高阶模耦合器吸收效果有显著的提高, 提高一个数量级以上, 有的甚至提高了两个数量级.

同时, 我们用三维软件 HFSS 模拟了高阶模耦合器在 1—3GHz 的吸收效果, 图 4 给出了该高阶模耦合器的理论设计和实验结果比较.

测量结果表明高阶模耦合器对 TM₀₁₀ 的 $\pi/4$ 模和 π 具有很好的截止作用. 不同实验条件下高阶模衰减器对 TM₀₁₀ 模的功率提取 S_{21} 都低于 -40dB , S_{21} 始终都被淹没在本底噪音中. 所以表 1 中 1.29846 和 1.31613GHz 处信号处于噪音水平.

测量结果表明高阶耦合器对高阶谐振模式有较好的吸收效果, 而且随着高阶模衰减器与束管夹角及谐振腔的耦合状态的改变, 衰减器对特定模式的 Q_e 的数量级基本不发生改变, 并且实验结果表明测得的 Q_e 都在 10^3 量级 (只有 TM₀₂₀ 是 10^4 , 但由于这个模式的电场平行于轴线, 因此对束团不会有太大的影响), 相对比较平稳, 说明衰减器有很好的吸收带宽.

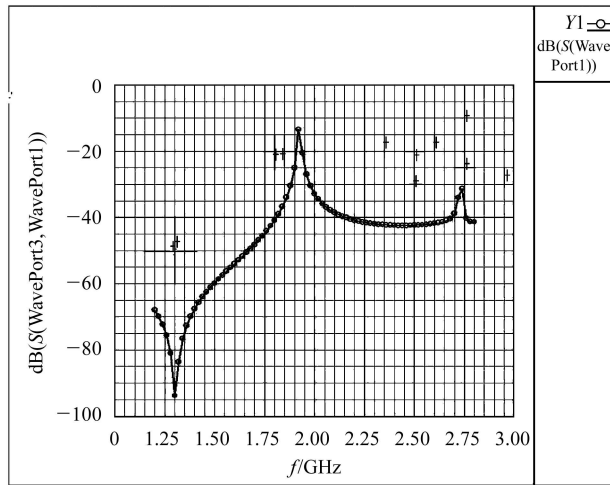


图 4 高阶模耦合器吸收系数 S_{21} 的频谱图
曲线是用 HFSS 模拟计算的结果, “+” 是实际测量的结果.

Q_e 的实验结果比理论计算结果差一个量级, 主要原因有: 加工精度造成实验所用高阶模衰减器与模拟计算的耦合器的差异; 传输线、接头引起的信号衰减, 实验仪器等引起的实验误差; 还有, 实验中谐振腔加载衰减器会造成腔壁的射频电流在衰减器腔内的额外损耗 P_e , 而这部分能损在实验上很难测量出来. 此时谐振腔壁损耗 $P'_0 = P_0 + P_e$, 这里实验计算 Q_e :

$$Q_e = (P'_0/p_t)Q_0. \quad (4)$$

模拟计算时假设了衰减器为理想导体材料, 不计损耗. 正确的应该是把谐振模式在衰减器表壁的损耗作为衰减器的吸收功率,

$$Q_e = \frac{P_0}{p_t + P_e}Q_0. \quad (5)$$

对很多高阶模来说, 在衰减器腔壁的射频电流损耗不可忽略. 所以实际的 Q_e 应该比计算结果更低.

同时在加载高阶模衰减器后, 衰减器破坏了 1.5cell 腔的轴对称性, 使得多极模式有特定的极化方向. 在测得的 S_{21} 曲线上, 会出现不同极化方向的模, 对应有一定的频率分裂. 模式的极化频率分裂一般比较小, 却增加了一定的测量误差.

4 总结

TESLA 式高阶模耦合器存在提取信号不够的局限性, 我们通过增加耦合电容和耦合面积改进了设计. 在理论优化的指导下, 成功设计并实验了改进型的 TESLA 式高阶模耦合器, 理论和实验符合得很好. 本文还详细分析了实验与理论误差的来源.

衷心感谢美国 Jefferson Lab 的吴根法博士 (Dr. G.F Wu) 在高阶模耦合器设计和实验过程中与作者的讨论及宝贵的建议.

参考文献 (References)

- 1 Hasan Padamsee et al. RF Superconductivity for Accelerators. New York: John Wiley & Sons, 1998
- 2 WANG Gui-Mei, WU Wen-Zhong et al. HEP & NP, 2006, **30**(3): 242 (in Chinese)
(王桂梅, 吴文忠等. 高能物理与核物理, 2006, **30**(3): 242)
- 3 WANG Gui-Mei, WU Wen-Zhong et al. HEP & NP, 2005,

25(11): 1077 (in Chinese)

(王桂梅, 吴文忠等. 高能物理与核物理, 2005, **25**(11): 1077)

- 4 WU Wen-Zhong. Theory and Experiment Study on HOMs and HOMs' Coupler for Superconducting Accelerator. Master Thesis, Peking University, 2004 (in Chinese)
(吴文忠. 超导加速器高阶模及其耦合器的理论与实验研究. 硕士论文, 北京大学, 2004)

Experiment Study of Improved TESLA Style HOM Coupler*

XU Wen-Can¹⁾ WANG Fang LU Xiang-Yang ZHU Feng QUAN Shen-Wen

ZHANG Bao-Cheng HAO Jan-Kui ZHAO Kui

(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The improved design of the higher order modes(HOMs) couplers with TESLA style has been discussed, and the experiment study on the improved coupler has been done. Comparison of the experimental result with the simulation result shows that the improvement of the HOMs Coupler is successful in HOMs damping.

Key words HOM coupler, TESLA high order coupler, improved design, experiment study

Received 6 July 2006

* Supported by NSFC (10276001)

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