

1+1/2 Cell 超导加速腔的本征高阶模场分布研究^{*}

王桂梅¹⁾ 吴文忠 鲁向阳 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 为实现高平均流强加速, 需要有效地消除超导加速腔中的高阶模场. 为研制有效的高阶模耦合器, 本文对北京大学 DC-SC 光阴极超导注入器的核心部件——1+1/2 cell 超导加速腔中高阶模场进行了分析研究, 用 HFSS 程序计算给出前 31 个高阶模场参数, 与实验测量较为符合. HFSS 计算与 Superfish 计算结果比较符合很好, 验证用 HFSS 计算可靠, 为以后超导腔的升级研究提供有效的手段.

关键词 高平均流强 高阶模 超导加速腔 HFSS

1 引言

超导加速器较之常规加速器的突出优势之一在于其极低的电功率损耗, 但是在超导腔中电磁场的建立与衰减时间也相应地明显增加, 通常这个时间常数在 ms 量级. 由于电磁感应作用, 带电粒子进入加速腔后, 会在加速腔中激励起电磁振荡. 这样的电磁场对束流的加速与传输是有害的^[1]. 对于常规加速器, 由于腔壁损耗较大, 感应电磁场衰减较快, 不会产生明显的影响, 但是对超导加速器, 这就成为不可忽略的问题, 特别是当进行高平均流强加速时(这是超导加速器较之常规加速器的又一优势), 束流脉冲的重复频率通常高达几十兆赫兹, 相应的束团时间间隔在 10^{-8} s 以下, 如果感应电磁场得不到及时有效地消除, 就会明显影响束流的加速与传输, 严重时还会导致 BBU(束流崩溃)效应. 另外, 高阶模场在腔壁上的损耗还会造成额外的低温功率消耗, 增加了系统的运行费用. 因此, 对超导加速腔的高阶模性质的研究, 是超导加速器技术研究中必须的一项专门内容.

在对超导加速腔的高阶模性质的研究中, 主要对各个本征高阶模、对应于各本征高阶模的性能参数(如 R/Q)、以及场分布和模式的因闭性(mode trapping possibilities)等进行分析. 同时, 各高阶模的功率分配也是研究的重要内容之一, 但是它与束流负

载条件(如束团的长度、束团的重复频率、单束团的电荷量及束团能量等)是密切联系的, 作者另做讨论.

加速腔的结构复杂, 很难得到它的解析解, 通常人们采用数值模拟计算的方法对其本征特性进行研究. 国际上用 MAFIA, HFSS^[2]等计算三维场分布, 可以较好模拟计算出 1.5 cell 谐振腔的高阶模, 两程序计算结果相互比较接近. 本文采用 ANSOFT HFSS 计算程序, 它主要用于微波元器件参数的计算.

2 1.5 cell 模型腔的谐振模模拟与判断

1.5 cell 超导加速腔是轴对称结构的, 因此它的谐振模式场分布和圆柱谐振腔特点很相似. 可以通过对圆柱形谐振腔的电磁场分布^[3]进行分析, 结合超导腔的模拟计算结果, 很好地判断出超导腔的各谐振模式.

粒子在加速腔中运动时会激励腔的很多谐振模式^[4]. 考虑高阶模的场对束团加速的影响和实际束团的几何大小, 重点研究在轴线上存在 E_r , E_y 分量的场. 圆柱型腔, 对于 TM 模, 当 $m=0$ 时, 轴线上有纵向电场分量的存在; $m=1$ 时, 轴线上会有横向电场分量的存在. 对于 TE 模, 虽然在轴线上没有电场分量, 但是当 $m=1$, $E_r \neq 0 (r \rightarrow 0)$. 所以需要主要考虑的谐振模式包括: TM_{0np} , TM_{1np} , TE_{1np} , 其他高阶模相对不是特别严重.

2005-02-24 收稿

* 国家自然科学基金(10276001)资助

1) E-mail: wangguimeigqz@yahoo.com

超导腔的束管对微波的截止频率是我们考虑高阶模的依据. 超导腔中激励的高于截止频率的谐振模式的场, 束管对其是可传导的, 这些模式的场都能以行波方式沿着束管直接传出去, 能量得以迅速衰减. 只有谐振频率低于束管截止频率的谐振模式, 会在谐振腔内形成一定强度的电磁场. 但是有些谐振模式, 特别是在多 cell 加速腔的结构中, 虽然模式的谐振频率高于束管对其的截止频率, 但是在尾腔内(与束管连接的腔)场能几乎为 0, 这种模式的场能被束缚在中间的加速腔中. 一旦粒子激励这种模式, 能量不能有效地进入尾腔通过束管或被高阶模衰减器衰减, 这种模式称为 Trap model. 虽然这种模式不一定有很高的 R_a/Q_0 , 但是 Trap 模能量始终不容易得到衰减, 在 CW 模式下其场能因为不断的累积得到增强, 其结果是很严重的. 这种模式只能通过改变腔形的设计参数来改变它的场能在尾腔内的分布, 使其在尾腔内有一定的能量, 提高束管对其传导能力.

HFSS 模拟计算时建模使用北京大学 DC-SC 注入器的腔体形状和尺寸, 腔体材料选为铝, 与实验测量的模型腔一致, 用其 Eigenmodel 模式对 1.5 cell 腔进行谐振模式的模拟计算. 1.5 cell 腔是中心轴对称的, 模拟中以 y 轴为腔的中心对称轴, 采用直角坐标系.

超导腔的每个 cell 都可以看成一个变形的圆柱形谐振腔, 而且各 cell 的连接边界并不会影响对腔内谐振模式的判断, 因此判断 1.5 cell 腔谐振模式主要观察其整 cell 腔内的电磁场分布, 为了方便讨论, 约定如图 1 所示的路径. T_{y1} 为 y 轴上从原点到 1.5 cell 腔束管最右端面中心线; T_{y2} 为在 zy 平面上离 y 轴 1.5cm 处, 贯穿整 cell 的参考线; 同时在 zy 平面上由整 cell 的中心点引出 T_z 贯穿整个 cell 腔, 在 zy 平面上 E_z 就是相应的 E_r ; 在 xy 平面偏离中心点引类似 T_z 的路径线 T_x .

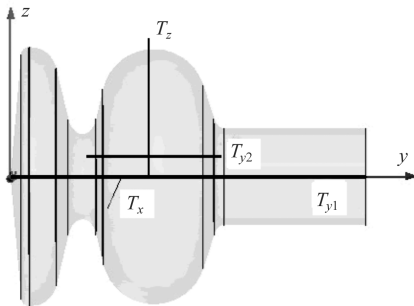


图 1 1.5 cell 谐振腔示意图

下面是 HFSS 模拟计算的结果. Model2 给出了北京大学 DC-SC 高平均流强超导注入器的加速腔工作模式(TM₀₁₀ 的 π 模)的场分析过程.

Model2: 图 2 给出该模式下的电场分布, 图中电场强度是相对于谐振腔内出现的最强电场强度归一化的强度, 距离是对考察路径归一化的, 所以对于 T_{y1} 路径, 整 cell 腔起点位置在 0.2 左右, 腔中心点在 0.38 处, 0.60 是束管的起始点. 电场有 E_y 分量, 且对 y 轴旋转对称, 即 E_y 不随 φ 改变而变化, 所以 $m=0$, 是 TM 模. 我们再观察 E_y 与 y 坐标之间的关系(沿 T_{y1} 路径)及 E_y 在 T_z 路径上的变化. 如图 2(c) 所示, E_y 在 T_{y1} 路径上整 cell 腔内不存在零点, 故 $p=0$; 图 2(d) 中 E_y 在 T_z 上只出现一个零点, 零阶贝塞尔函数 $J_0(x)$ 有一个根, 所以 $n=1$. Model2 是 TM₀₁₀ 模, 由电场分布图可看出来半腔与整腔的电场方向总是相反的, 为 TM₀₁₀ 的 π 模. 两腔的电场均匀性很好, 这就是我们所选择的加速电子的工作模式, 电场在半腔的入口处相对很强.

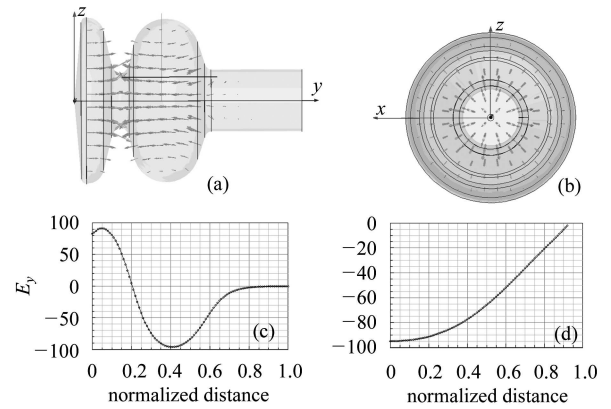


图 2 (a) z - y 电场分布; (b) z - x 电场分布; (c) E_y - T_{y1} ; (d) E_y - T_z

以同样的方法就可以确定其他各个模式, 表 1 列出 HFSS 计算出来的前 31 个模式, 按频率从低到高的顺序排列.

这些高阶模中对束流品质影响最强的是 TM 模, 特别是 TM_{0np}, 其次是偶极模及高阶的四极模、六极模. 另一方面, 束流由于激励起高阶模, 在腔壁上功率损耗为

$$P_c = \frac{I_0^2 R_a}{(1+\beta)} \frac{T_b}{T_d} F_r, \quad (1)$$

$$F_r = \frac{1 - \exp(-2T_b/T_d)}{2[1 - 2\exp(-T_b/T_d)\cos(\Delta\omega T_b) + \exp(-2T_b/T_d)]}, \quad (2)$$

式中, I_0 为束团平均流强, $R_a = \frac{V_c^2}{P_0}$, V_c 为谐振腔的有效加速电压, P_0 为谐振腔的壁损耗, T_b 为束团的重复周期, $T_d = 2Q_i/\omega_n$ 是电压衰减常数, ω_n 为腔的第 n 个本征模的谐振频率, $n=1, 2, \dots$, Q_i 为有载品质因数, $\omega_n = \omega + \Delta\omega$, $\omega = 2\pi h/T_b$, h 是整数.

P_c 的大小决定于 $I_0, R/Q_0, Q_0, T_b/T_d$ 和 $\Delta\omega T_b$. 在 F_r 的表达式中, 当 $\theta = \Delta\omega T_b = 0, 2n\pi(n = 1, 2, \dots)$ 时, F_r 会有一极大值, 这时激发场谐振频率是束流的频谱的整数倍时发生了谐振, 这是在实验中需要尽量避免的. 计算发现 M5—M8, M19, M20 与谐振点的差值在 $\pi/4$ 以内, 并且这些模式对应的 R/Q_0 也很大, 是主要的有害模. 特别是 M19 和 M20, 只要工作频率 $f = 1300\text{MHz}$ 在 $\pm 0.87\text{MHz}$ 范围内变化就会发生谐振, 因此, 该模式必须用高阶模耦合器耦合. 对 M5—M8 这些模式, 要根据 T_b/T_d 和 P_c (低于 1W) 来决定流强的阈值.

表 1 1.5 cell 腔各谐振模式参数

Model	模式	Q_0	$(R/Q_0)/\Omega$	f/GHz
M1	TM ₀₁₀ ($\pi/4$)	14597	44	1.283
M2	TM ₀₁₀ (π)	17154	213	1.299
M3	TE ₁₁₁	18800	0.5	1.677
M4	TE ₁₁₁ *	18720	0.4	1.678
M5	TM ₁₁ like	15631	0.59	1.794
M6	TM ₁₁ *like	15627	0.65	1.796
M7	TM ₁₁ ⁺ like	20412	0.24	1.864
M8	TM ₁₁ ⁺ like	20325	0.21	1.865
M9	TE ₂₁₁	26645	0.02	2.285
M10	TE ₂₁₁ *	26645	0.015	2.285
M11	TM ₁₁₁	19745		2.372
M12	TM ₁₁₁ *	19702		2.372
M13	TM ₀₁₁	24812	66.1	2.406
M14	TM ₂₁ like	15702	0.038	2.414
M15	TM ₂₁ *like	15672	0.025	2.416
M16	TM ₂₁ ⁺ like	27156	0.023	2.471
M17	TM ₂₁ ⁺ like	27159	0.016	2.472
M18	TE ₀₁₁	42599	0.297	2.495
M19	TM like	18808	26.6	2.519
M20	TM*like	18812	26.2	2.519
M21	TM ₀₂₀ ⁺	23131	39	2.652
M22	TM ₁₁₁ like	24497		2.714
M23	TM ₁₁₁ *like	24398		2.714
M24	TM ₀₂₀	26479	12.6	2.722
M25	TE ₃₁₁	28084	0.004	2.75
M26	TE ₃₁₁ *	28109		2.75
M27	TM ₁₁₂	29226		2.964
M28	TM ₁₁₂ *	29185		2.964
M29	TM ₃₁ like	17127		2.988
M30	TM ₃₁ like	17122		3.045
M31	TM ₃₁ like	25655		3.091

注: 带*模式为相应模式的不同极化方向的模, 带+为该模式的 $\pi/4$ 模. 计算偶极、四极场的 R/Q_0 时, 取距轴 5mm 处的纵向电场值, 并且给出的只是 R_a/Q_0 的值

表 1 中给出的模拟结果是常温铝腔的结果, 根据公式^[5]

$$G = \omega_0 \mu_0 \frac{\iiint |\mathbf{H}|^2 dV}{\iint |\mathbf{H}|^2 dS} = Q_0 \cdot R_s, \quad (3)$$

可以求出相应的超导腔的品质因数. 式中, G 为几何因子, 是只与腔体的几何形状有关的常数; Q_0 为腔的品质因数, R_s 为腔的表面电阻. 对于 1.5 cell 超导腔 TM₀₁₀(π) 在 4.2K 温度下腔的品质因数 Q'_0 :

$$Q'_0 = \frac{R_s}{R'_s} Q_0 \approx 2.2 \times 10^4 Q_0 = 3.7 \times 10^8, \quad (4)$$

式中 R_s 为常温腔的表面电阻, R'_s 为超导腔的表面电阻, Q_0 为常温腔的品质因数.

为了验证用 HFSS 程序计算结果的可靠性, 下面给出了它与国际上比较权威的二维程序 superfish 计算 1+1/2 cell 超导腔^[6]的结果比较. 因为 superfish 只能计算轴对称性场, 无法对其他非轴对称结构的高阶谐振模式进行计算, 因此本文只给出一个单极模 ($m = 0$) 的计算结果, TM₀₁₀ π 模参数: $f = 1.300\text{GHz}$, $Q_0 = 2.85 \times 10^8$, $R_a/Q_0 = 182.3\Omega$. 它与 HFSS 的计算结果比较接近.

3 1.5 cell 模型腔高阶模测量实验

标量网络分析仪可以很方便的测量微波网络的 S 参数, 用扫频法来测量模型腔内的谐振模式, 实验原理与反射法测量谐振腔的品质因数类似, 图 3 给出 1.5 cell 模型腔谐振模式测量图. 为了激励出不同的谐振模式我们在半腔的轴线和旁轴处各开了一个小孔, 采用同轴天线进行电激励, 激励天线的电压反射系数为 S_{11} . Pick-up 天线在束管处, 从标量网络分析仪可以获取相应的电压透射系数 S_{21} . 为了和计算结果相比较, 实验测量的扫频范围在 1.2—3.0GHz. 考虑 1.5 cell 超导加速器的高阶模时, 较为关心的是腔内 TM_{0np},

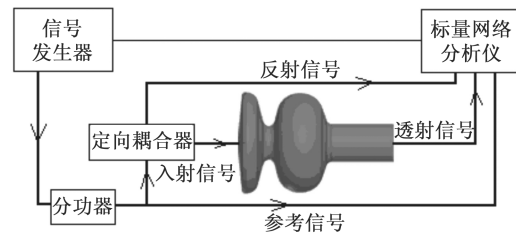


图 3 1.5 cell 模型腔谐振模式测量图

TM_{1np} 的频谱. 实验中激励天线无论在轴线上还是旁轴的小孔处进行激励, 激励天线几乎都平行于 1.5 cell 模型腔的轴线, 只能较好地激励出有纵向电场分量的 TM 模, 实验中根据激励天线角度变化和激励的谐振模强度变化的敏感度可以区分出 TM, TE 模. 区分各模式主要是根据模拟计算的频谱排列来进行初步的判断. 对零阶 TM 运用微扰法测量腔内谐振模式的场分

布, 表 2 给出模型腔各谐振模式的实验测量结果, 与表 1 中相应模式的计算结果相符, 表 1 中其他模式由于计

算的 R/Q_0 较低, 不容易被激励, 因此在实验中很难观察到. 因此 HFSS 计算是正确的.

表 2 模型腔各谐振模式的频谱

f_0/GHz	1.2994	1.3178	1.6850	1.8250	1.8962	2.3637	2.4012	2.5094	2.6684	2.7597	2.9002
S_{11}/dB	-4.55	-5.01	-6.00	-5.48	-6.65	-2.12	-4.60	-11.00	-2.92	-3.60	-6.36
S_{21}/dB	-35.74	-38.17	-28.2	-37.0	-36.9	-23.45	-19.2	-16.8	-21.75	-11.93	-22.56
$\Delta f/\text{kHz}$	651.0	820.8	2148	363.8	277.7	1293	2148	667.8	4404	4316	505.9
Q_0	7344	9777	3137	6469	10223	2045	6532	5864	4248	3769	7747
模式	TM_{010}^+	$\text{TM}_{010\pi}$	TE_{111}	$\text{TM}_{11}\text{Like}$	$\text{TM}_{11}^*\text{Like}$	TM_{111}	TM_{011}	TM Like	TM_{020}^+	TM_{020}	TM_{112}

注: f_0 的测量误差是 10^{-4} 量级, Δf 的测量误差是 10^{-3} 量级, 精度与扫频信号源的稳定度有关

4 结论

实验测量表明, HFSS 模拟计算的频谱和模型腔的实验测量结果符合得比较好, 计算的各谐振模式的频率和实验测量结果相差一般不会超过 50MHz, 原因包括腔体机械加工的不对称性, 以及耦合天线对腔体谐振频率的微扰及 HFSS 模拟计算本身网格划分的精度问题等. 模型腔的 Q_0 与模拟计算差异的原因主要是实验的模型腔的机械结构, 金属表面性质及测量误

差等原因引起的, 其中最主要是模型腔是铝合金制成, 表面未抛光且由 5 个部件组成, 用螺钉固定, 这种情形造成表面不连续使得表面电阻增加, 根据公式(3)可知, 实际测量相对计算应偏小. 实际装置中激励探针与提取探针的位置也受到一定的限制, 这也是造成测量结果与理论结果偏差的原因之一. HFSS 计算给出各高阶模的参数为下一步设计高阶模耦合器提供基础. 文中用 HFSS 计算与 Superfish 计算结果比较符合很好, 验证用 HFSS 计算是可靠的, 为以后超导腔的升级研究提供有效的手段.

参考文献(References)

- 1 Padamsee H, Knobloch J, Hays T. RF Superconductivity for Accelerators [M]. New York: John Wiley & Sons, 1998, 331
- 2 <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>
- 3 Padamsee H, Knobloch J, Hays T. RF Superconductivity for Accelerators [M]. New York: John Wiley & Sons, 1998, 40
- 4 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)
- 5 Padamsee H, Knobloch J, Hays T. RF Superconductivity for Accelerators [M]. New York: John Wiley & Sons, 1998, 45
- 6 ZHAO Kui, HAO Jian-Kui, HU Yan-Le et al. Nucl. Instrum. Methods, 2001, **A475**: 564—568

Study on HOMs in 1+1/2 Cell Superconducting Cavity*

WANG Gui-Mei¹⁾ WU Wen-Zhong LU Xiang-Yang 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 For achieving high average current electron beams, we need to eliminate charge-induced fields in superconducting cavity. In order to manufacture effective high order modes (HOM) coupler, we study the HOM that are excited possibly in the Peking University 1+1/2 Cell superconducting cavity. With Code HFSS, we have calculated 31 HOMs' parameters, which fit the experimental data very well. We also compared the parameters to the results calculated from Superfish code, and we got a good match, proving HFSS is a reasonable simulation code for superconducting cavity.

Key words high average current, HOM, superconducting cavity, HFSS

Received 24 February 2005

*Supported by NSFC (10276001)

1) E-mail: wangguimeigqz@yahoo.com