

1.3GHz 新结构超导实用 单胞腔物理设计*

俎 栋 林

(北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

1995-11-02 收稿

摘 要

报道了一个新设计的单胞腔, 其表面电场峰值与加速梯度之比值 E_p/E_{acc} 小于 1.8. 把它做为 9 胞腔的半端胞时, 其中间胞 π 模的 E_p/E_{acc} 可以低到 2.024, 胞-胞间耦合系数 k 可高达 1.95%. 并用阻带模型计算了单胞腔的高次模特性; 阐述了超导驻波腔腔形的概念、腔几何参数定义、腔胞和束管设计原则、加速模和高次模计算方法, 并讨论了程序计算的可靠性条件.

关键词 超导 RF, 超导加速腔, 单胞腔, 加速模, 高次模.

1 引 言

美、欧、日等发达国家对 RF 超导腔的研究已近 30 年. 六、七十年代用 Maffin 形腔, 其内发生的 Multipacting 效应一直把加速梯度 E_{acc} 限制在 1MV/m 左右. 七、八十年代用圆形腔^[1]和椭圆形腔^[2]克服 Multipacting^[3,4]后, E_{acc} 有了突破性提高, 发展了第一代实用 RF 超导加速腔. 例如美国 Cornell / CEBAF 腔, CERN 的 LEP II 腔, 德国 DESY 的 HERA 腔, 日本 KEK 的 Tristan 腔. 这些腔运行的 E_{acc} 都是 5MV/m. 其空载 E_{acc} 为 7.5MV 到 15MV 不等. 八、九十年代提出了基于 RF 超导腔的 TeV 量级电子超导直线加速器 (TESLA) 对撞机^[5,6] 概念, 要求把加速梯度提高到 20—40 MeV/m. 目前限制加速梯度进一步提高的主要障碍是电子场致发射 (FE) 效应. 为了逾越这一障碍, 一方面适当提高铌材纯度, 以提高 RRR (residual resistivity ratio) 值改善热导, 克服热致、磁致失超. 考虑到屈服强度, RRR 也不宜过高 (300 左右为宜). 另一方面对铌腔内表面进行特殊清洁处理, 以期尽可能提高场致发射阈值 E_p . 用化学抛光法处理得好, E_p 可达 30MV/m^[7] 以上; 在超高真空炉内钛保护退火处理表面, 可把 E_p 提高到 60MV/m^[8]; 用 RF 高峰功率处理, E_p 可提高到 100MV/m (世界纪录)^[9]. 第三, 则是通过选择最佳几何形状, 把 E_p/E_{acc} 尽量降低, 以获得尽可能高的加速梯度 E_{acc} . TESLA 腔追求的目标是在不损害其它物理指标的前提下把 E_p/E_{acc} 降到 2.

在腔设计中最强有力的工具是 URMEL^[10]、URMEL-T^[11] 程序, 经过上千次程序运

* 国家自然科学基金资助.

行, 我们得到了三个腔形, 分别称做 BSC1、BSC2 和 BSC3. BSC1 是在分析比较现已运行的腔(Cornell / CEBAF 和 LEP)和其它实验室已设计好的腔(Cornell 的 B-Factory 和 Milan 的 ARES)的基础上发展的. BSC2 和 BSC3 都是我们研究的 9 胞 TESLA 形加速腔^[12]的端半胞. 只是因调谐方法不同得到两种不同的端半胞.

2 超导腔几何结构参数定义

通常取轴对称超导腔纵剖面的 1/4 来描述腔的结构参数. 其中的“胞”(cell)是腔的基本单元. 半胞壁由几段曲线连接而成, 如圆弧—直线段—圆弧或椭圆弧—直线段—椭圆弧构成. 因此胞形可分为 CSC 型和 ESE 型. CSC 型如图 1(a)所示, 主要参数有胞半径 OR , 赤道圆弧半径 R_2 , 束管半径 IR , 鼻圆弧半径 R_1 , 两圆公切直线段对腔轴倾角 TD 和半胞长度 L . 在运行 URMEL、URMEL-T 和 SUPERFISH^[13] 程序时需用这六个参数作成一输入文件. 在机械加工时还需要知道两个圆心的位置及两个切点 P_1 和 P_2 的座标. SHAPE 程序只需要五个参数, 即 OR 、 IR 、 R_1 、 TD 和 L . 运行 SHAPE 程序可以得到 R_2 , 圆心位置及切点 P_1 和 P_2 的座标. 同时可以得到输入文件.

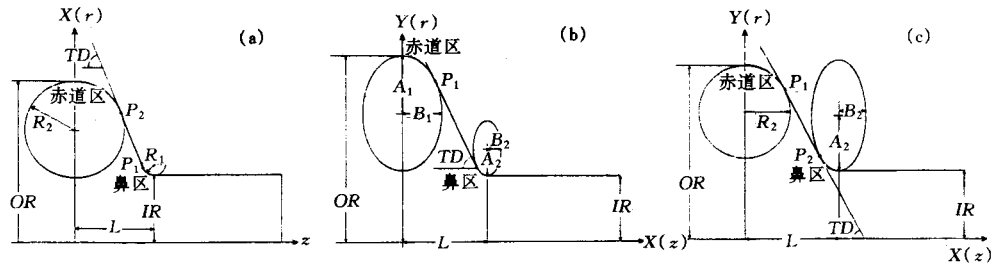


图1 超导腔的半胞形几何结构参数定义

(a)圆形腔; (b)椭圆形腔; (c)圆—椭圆形腔.

ESE 型如图 1(b)所示, 主要参数有 OR 、 IR 、 TD 、 A_1 、 B_1 、 A_2 和 B_2 共七个. A_1 和 B_1 分别是赤道椭圆在 $Y(r)$ 方向和 $X(z)$ 方向半长轴; A_2 和 B_2 分别是鼻椭圆在 $Y(r)$ 方向和 $X(z)$ 方向的半长轴. Cornell / CEBAF 腔属于 ESE 型, LEP 腔属于 CSC 型. 我们发展的腔是 CSE 型, 即在赤道是圆弧, 在鼻区是椭圆弧, 如图 1(c)所示. 主要参数有 OR 、 R_2 、 L 、 TD 、 A_2 和 B_2 共六个. 此型不仅兼有上述两型之优点. 而且克服了各自致命的缺点. 图中给出了两套座标, 其中 $r-z$ 用于 URMEL 和 URMEL-T 程序, $Y-X$ 用于 SHAPE 程序.

3 URMFL 和 URMEL-T 程序计算的可靠性问题

用 URMFL 和 URMEL-T 程序计算的结果存在一个可靠性问题. 判断方法之一是核对 URMEL 和 URMEL-T 输出结果的一致性和自治性. 以偶极模的分路阻抗 R 与腔的 Q 值之比 $(R/Q)''$ 为例, 如用 2000 个网格点计算 $(R/Q)''$, 会发现 $(R/Q)''$ 随积分位置 R_0 (即 $r=R_0$) 变化而起伏^[14]. 当用 25000 网格点计算时, $(R/Q)''$ 不再随 R_0

变化. 这说明前者不可信而后者是可信的.

对 E_p/E_{acc} 的准确计算, 难度更大些. 经验告诉我们, 计算的 E_p/E_{acc} 不仅与网格点数有关, 还与网格密度比 D/d 有关, 甚至与程序有关. 计算时所用网格点数越少, E_p/E_{acc} 失真越大; 点数越多, 越准确. 用 URMEL-T 计算出的 E_p/E_{acc} 总是不可信的. 因为 URMEL-T 容许的最大网格点数只有 7000, 而 URMEL 最大容许 25000 点. 对 ARES 腔用 URMEL 程序, 不同的网格点数计算 E_p/E_{acc} 值, 其结果如图 2(a) 所示. URMEL 还允许变网格密度技术. 在束管处让网格稀疏一些, 在 cell 处, 尤其是在最大表面场出现的鼻区及表面上电场 E_p 变化剧烈的区域让网格密集一些, 当然要保持总网

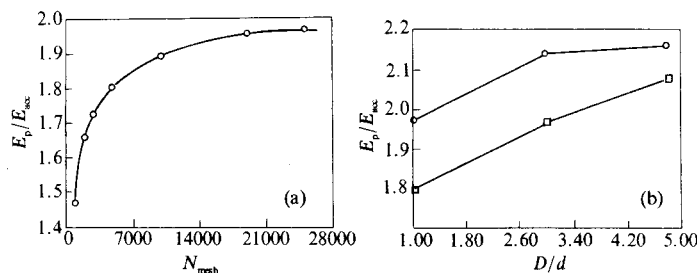


图 2 E_p/E_{acc} 计算值与网格的关系

(a) E_p/E_{acc} 是网格点数 N_{mesh} 的函数. (b) E_p/E_{acc} 是网格密度比 D/d 的函数.

○ 对应 ARES 腔; □ 对应 BSC1 腔.

格点数不超过 25000. 这样捕捉最大 E_p 的几率就可能提高. URMEL 允许的最大密度比为 5. 密度比 $D/d=1$ 意指自动网格(近似均匀划分). 分别用密度比 $D/d=1, 3$ 和 5 计算了 ARES 腔和 BSC1 腔的 E_p/E_{acc} , 结果如图 2(b) 所示. 计算结果与网格点数有关是容易理解的. 图 3 示出程序输入腔形与网格点数的关系, 当用 2000 个网格点(图 3(b))时, 程序输入腔形(图 3(c))与实际腔形(图 3(a))相差太远; 当用 25000 个网格点(图 3(d))时, 程序输入腔形(图 3(e))与实际腔形(图 3(a))很接近. 图 3(d) 中还使用了变网格密度技术. 显然, 后者算出的结果可信度高.

由此看很难计算出绝对准确的 E_p/E_{acc} 值, 其绝对准确并不必要. 在寻找最佳腔形的过程中, 重要的是各种腔形的比较, 只要采用相同的计算条件, 计算结果又是可信的, 就可以把各国各实验室的腔进行比较.

DESY 通常用 1:1 自动网格计算多胞腔 π 模和 3:1 变网格密度计算单胞腔. 本文使用了 1:1 自动网格和 3:1、5:1 两种变网格密度.

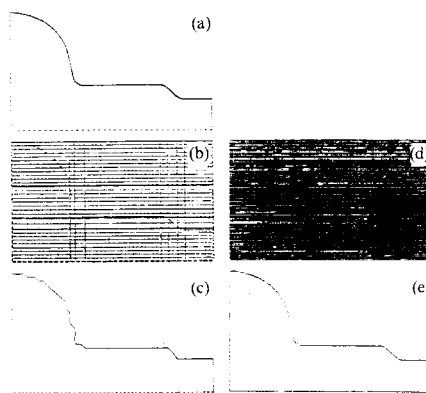


图 3 URMEL 对腔进行网格划分的结果

(a) 是待网格划分的对象; (b) 自动划分网格, 网格密度比 $D/d=1:1$, 网格点 2000; (c) 由 (b) 产生的输入腔形; (d) 变网格密度比 $D/d=3:1$, 25000 网格点, (e) 由 (d) 产生的输入腔形.

4 CELL 设计及加速模计算

试设计的单胞腔 BSC1 是在参考 LEP 4 胞腔、ARES 4 胞腔以及 Cornell B-Factory^[15] (CBF) 单胞腔的基础上对鼻曲线作修改得到的。即把圆弧改为椭圆弧，把 CSC 型改为 CSE 型。LEP 腔是 352 MHz 腔，ARES 腔和 CBF 腔都是 500MHz 腔。把不同频率(对应不同尺寸)都折合到 1.3GHz，可以比较其形状和物理参数，见表 1。

表 1 腔的结构参数和加速模参数的比较

		CBF	LEP	ARES	BSC1
OR(mm)		105.60	102.16	102.30	102.4
R_2 (mm)		31.64	45.27	45.20	45.27
TD		75°	79.48°	79.36°	79.36°
R_1 (mm) 或 A_2 (mm) B_2 (mm)		7.673	7.697	7.710	50.80 10.25
IR (mm)		46.00	38.86	38.53	38.78
L (mm)		46.00	55.79	55.88	54.81
E_p / E_{acc} (NP_{max} =25000)	$D / d = 1:1$	2.06	1.97	1.97	1.80
	$D / d = 3:1$	—	2.167	2.14	1.97
	$D / d = 5:1$	—	—	2.16	2.08
H_p / E_{acc} ((A / m) / (MV / m))		3334.3	3222.9	3207.0	3151.3
R / Q (Ω)		89.0	108.3	109.5	107.5
几何因子 G		230	264	261	267

注：— 表示未算； H_p ——最大表面磁场； NP_{max} ——网格点数； R / Q ——加速模的分路阻抗与 Q 值之比。

表 2 新设计的三个单胞腔几何参数和物理参数的比较

	BSC1	BSC2	BSC3
OR (mm)	102.4	103.3	103.6
$A_1 = B_1 = R_2$ (mm)	46.27	39.01	35.54
TD	79.36°	79.0°	79.0°
A_2 (mm)	50.80	32.0	32.0
B_2 (mm)	10.25	16.0	16.0
IR (mm)	38.780	39.0	39.0
L (mm)	54.81	55.6	52.8

续表 2

		BSC1	BSC2	BSC3
f (MHz)	$D/d=1:1$	1297.786	1299.082	1297.802
$(NP_{\max} = 25000)$	$D/d=3:1$	1297.536	1299.265	—
	$D/d=5:1$	1297.153	1299.504	—
	E_p/E_{acc}	1.80	1.729	1.696
$(NP_{\max} = 25000)$	$D/d=1:1$	1.80	1.729	1.696
	$D/d=3:1$	1.97	1.795	—
	$D/d=5:1$	2.08	1.782	—
$H_p/E_{\text{acc}} ((A/m)/(MV/m))$		3151.3	3461.6	3517.3
$R/Q (\Omega)$		107.5	106.3	106.0
几何因子 G		267.0	247.5	235.0
基波损失因子 $k_0 (V/PC)$		0.219	0.216	0.215

把 cell 和束流管焊接构成完整的单胞腔, 作为整腔用 URMEL, 25000 网格点计算得到表 1 数据. 按照 DESY 的标准(25000 网格点, $D/d=3:1$) 计算, BSC1 腔的 E_p/E_{acc} 值已降到 2.0. 但是实用加速腔都是用多胞腔(Factory 除外), 其中间胞 π 模的 E_p/E_{acc} 要比端胞中的 E_p/E_{acc} 高 10%. 要求中间胞 π 模 $E_p/E_{\text{acc}}=2$, 那么端胞中 E_p/E_{acc} 就应降到 1.8 才行. 为此开展了 TESLA 加速腔研究^[12], 得到端胞, 由端胞构成 BSC2 和 BSC3, 其几何参数和物理参数列在表 2 中并和 BSC1 作了对比, 显然 BSC2 和 BSC3 已完全满足要求. 可以说十分理想.

5 束管设计

设计束管从物理上说需要考虑几个问题. 首先是束管半径 IR 直接影响腔的若干物理参数, 如表 3 所示.

表 3 束管半径增加会引起一些物理量增大(多)或减小(少)

IR	E_p/E_{acc}	H_p/E_{acc}	$R(\Omega)$	$(R/Q)_{\text{基模}}(\Omega)$	$(R/Q)_{\text{高次模}}(\Omega)$	寄生模个数
↑	↑	↓	↓	↓	↓	减少

注: ↑ 表示增大; ↓ 表示减小.

LEP 腔、ARES 腔和 BSC 腔都使用了变束管半径技术. 即把粗束管经一定距离后缓变成细束管. 以 ARES 腔为例, 假如变束管腔称为 ARES1, 不变束管腔称为 ARES2, 用 URMEL, 25000 自动网格计算的结果列在表 4 中以进行比较. 由表 4 可看出对束管半径变化最敏感的参数是 E_p/E_{acc} 、寄生模个数及对基模的衰减量. 圆波导 TM₀₁ 波的截止波长 λ_c 可用下式表示:

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{u_{01}} a = 2.62a, \quad (1)$$

表4 变束管半径 ARES1 腔和直束管 ARES2 腔物理参数比较

	总长 (mm)	半径 (mm)	E_p / E_{acc}	H_p / E_{acc} ((A/m)/(MV/m))	R / Q (Ω)	单极寄生 模个数	几何 因子 G	对 TM010 的 衰减量(db)
ARES1	98	$a_1 = 38.53$ $a_2 = 22.0$	2.14	3207.0	109.5	11	261	60.0
ARES2	98	$a = 38.53$	2.26	3191.1	109.0	2	260	47.3

式中 u_{01} 是零阶 Bessel 函数的第一个零点, a 是束管半径. 显然, a 越大, λ_c 越长, 寄生模个数越少, 相应地传输模个数增多. Cornell 的 B-Factory 腔特意设计的束管半径很大, 能使所有单极高次模成为传输模, 然后用高导磁率材料在低温恒温器外面吸收. 束管半径越小, 寄生模个数越多, 就需要在靠近 cell 的束管上安装高次模 (HOM) 耦合器进行提取衰减. 其次, 束管长度也直接影响物理参数. 设 BSC1 和 BSC1' 完全相同, 唯束管长度有差别, 对此用 URMEL 程序, 25000 网格点计算基模 TM010, 其结果列在表 5 中. 由表 5 可见束管长度对 E_p / E_{acc} 也略有影响, 束管长度主要影响对基模的衰减量. 综合来看, 束管半径和束管长度共同决定了基波在束管中的截止深度. 束管对消逝波的衰减可用下式表示:

$$L = 54.5 \frac{l}{\lambda_c} \left[1 - \left(\frac{\lambda_c}{\lambda} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

式中 l 是束管长度, λ 是某驻波模的真空波长. 截止波长可由 (1) 式计算. 对变半径束管分段计算, 对缓过渡区可分段用平均半径, 然后把各段束管的衰减相加可得到总衰减量.

表5 不同束管长度的腔物理参数的比较

		B S C 1	B S C 1'
粗束管长 + 过渡 + 细束管长度(cm)		6.1+2+2.4	6.1+2+6.4
基模 TM010 频率 f (MHz)		1297.153	1296.800
E_p / E_{acc} ($NP_{MAX} = 25000$)	$D / d = 1:1$	1.80	1.803
	$D / d = 4.6:1$	2.08	2.02
H_p / E_{acc} ((A/m)/(MV/m))		3153.3	3153.3
R / Q (Ω)		108.0	107.6
束管对基波 TM010 的衰减量(db)		60	90

根据国外超导腔运行经验, 要使 TM010 加速模工作在 $Q_0 = (1.5 - 3) \times 10^9$, 束管对基模的衰减量需达到 55 — 60 db 左右. 这是一个基本要求. 如果不用变管径技术, 要满足同样的衰减量, 管长需要增加, 这就要求增加恒温器尺寸, 从而增加建造费用和运行费用.

另外, 对于各个个别的腔, 有时还有些特殊考虑, 比如使某个难衰减的高次模在束

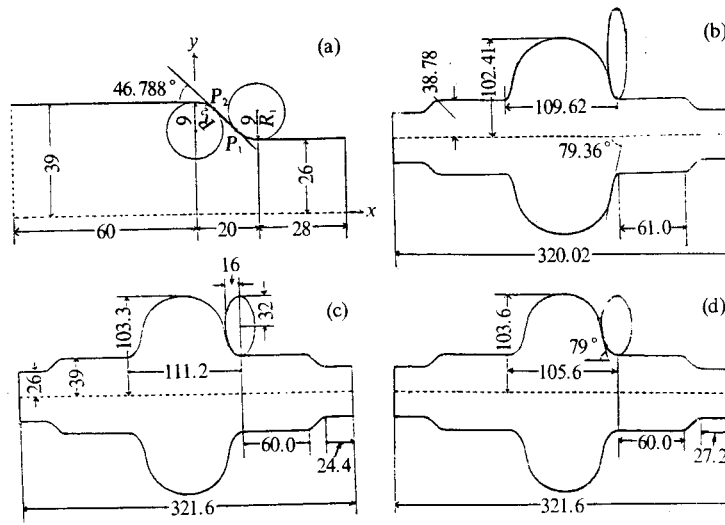


图 4 BSC 腔几何结构

(a)束管几何结构及尺寸; (b)BSC1腔形状及几何尺寸;
(c)BSC2腔形状及几何尺寸; (d) BSC3腔形状及其几何尺寸.

管内的场局部增强, 以增大提取衰减, 或使基模馈入耦合增大等等.

本文设计的 BSC 腔的束管分三段, 分别称为粗管、过渡段和细管. 粗管半径足够大, 大部分高次模容易从 cell 进入束管以便 HOM 耦合器提取; 细管则使基模有锐的衰减; 过渡段尽量连续、光滑、缓慢, 可以避免尾场效应和弱 Multipacting 效应, 这里运用了“CSC”连结技术, 只不过两圆弧半径相等如图 4(a) 所示. 设计的完整腔形 BSC1、BSC2 和 BSC3 分别如图 4(b) — (d) 所示.

6 高次模计算

6.1 基本概念

谐振腔中有无穷多谐振模式, 根据场型可分类为横磁 TM_{mnl} 型和横电 TE_{mnl} 型; 根据角向参数又可进一步分类为单极模、偶极模和四极模等等. 在单极模中, 因为 TE_0 型波无纵向电场 ($E_z=0$), 故与束流无能量交换, 可不予考虑, 那么只剩下 TM_0 型波. TM_{010} 是加速模, TM_{011} 或 TM_{020} 及以上的模式称为单极高次模, 偶极模、四极模等都是高次高次模. 在偶极模中最低模式是 TM_{110} 和 TE_{111} .

高次模一般说都是有害无益的危险模, Crab 腔^[6]是个例外. 单极 HOM 倾向于引起能散(在束团内部及束团与束团之间), 高次高次模倾向于引起束流横向发射度增长. 对于高次模总是设法衰减掉.

对开腔来说, 高次模又分为驻波模和行波模, 行波模可以在束管中传输, 当在低温器外遇到高电导或高磁导等耗散材料管壁时就可被吸收掉, 可见束管应使用低 RRR (50 — 100) 铌材. 对于多胞腔, 行波模在一定条件下会形成陷阱模, 这是个致命的问题,

也是十分棘手的问题. 对于单胞腔一般说不存在这个问题. 对于束管截止频率以下的寄生模, 需要用 HOM 耦合器把 HOM 功率提取出来.

衡量纵向 HOM 行为强弱的一个物理量是分路阻抗 R 与品质因数 Q 的比值即 R/Q ; 衡量横向 HOM 行为强弱的物理量是横向 $(R/Q)''$, 其定义为:

$$\left(\frac{R}{Q}\right)'' = \frac{R/Q}{(K \cdot R_0)^2}, \quad (3)$$

式中波数 $K = \frac{\omega}{\beta_c}$, ω 是模式圆频率, β_c 是粒子速度, R_0 是离开腔轴的距离.

各种各样的随机扰动都有可能激励一个、两个或多个高次模振荡. 而固定的周期性起作用的是束团 (bunch). 束团具有相当宽的频谱, 它可以激励起一系列高次模振荡. 单极 HOM 的 R/Q , 高阶 HOM 的 $(R/Q)''$ 是束团在该模中储积能量多少的一个度量. (R/Q) 和 $(R/Q)''$ 越高的高次模就是危险性越大的高次模. 对这些模应特别加以注意. 必须使其有足够的衰减. 所谓衰减就是把它的能量取走或消耗掉. 全部取走或全部消耗掉是不可能的, 只能取走或消耗掉一部分. 衡量有效衰减程度的物理量是外观 Q 值, 用 Q_{ext} 表示, 其定义为

$$Q_{\text{ext}} = \frac{\omega U}{\Delta P_{\text{diss}}}, \quad (4)$$

式中 ω 是某模圆频率, U 是储存在该模中的能量, ΔP_{diss} 是被 HOM 耦合器提取的功率.

6.2 HOM 负载模型

欧洲发展了若干种同轴型 HOM 耦合器, 美国康乃尔大学发展了波导型 HOM 耦合器, 对同轴型 HOM 耦合器可以用 URMFL 程序直接计算 Q_{ext} , 并且可以和实验测量直接比较, 当然需要采用适当的数学模型. 对于波导型 HOM 耦合器, 对 Q_{ext} 的计算需要用 MAFIA 程序^[17]. 这里用“阻带模型”计算了高次模的 Q_{ext} .

URMEL, URMEL-T 及 SUPERFISH 程序不允许耗散边界条件, 在“阻带模型”中是把靠近胞的一段铜束管换成铝束管, 如图 5(a), (b) 所示. 铝的电导比铜略小, 但仍然是良导体, 基本满足 URMEL-T 要求的条件, 故计算出的频率和场改变不大. 这里用的铝管长 2.54 cm, 始端距 cell 末端为 3.18mm. 各个模在铝带上消耗的功率比在原来铜带上消耗的功率要大一些, 其差为

$$\Delta P_{\text{diss}} = \frac{1}{2} [R_s(\text{Al}) - R_s(\text{Cu})] \int_{\text{band}} H_\phi^2 dA, \quad (5)$$

把(5)代入(4)可得到外观 Q_{ext} 的计算公式为

$$Q_{\text{ext}} = \frac{\omega U}{\frac{1}{2} [R_s(\text{Al}) - R_s(\text{Cu})] \int_{\text{band}} H_\phi^2 dA}, \quad (6)$$

式中 H_ϕ 为表面磁场, $R_s(\text{Al})$, $R_s(\text{Cu})$ 分别是铝和铜的表面电阻, 其定义为

$$R_s = \frac{1}{\sigma\delta}, \quad (7)$$

式中 σ 是金属电导率, δ 是趋肤深度.

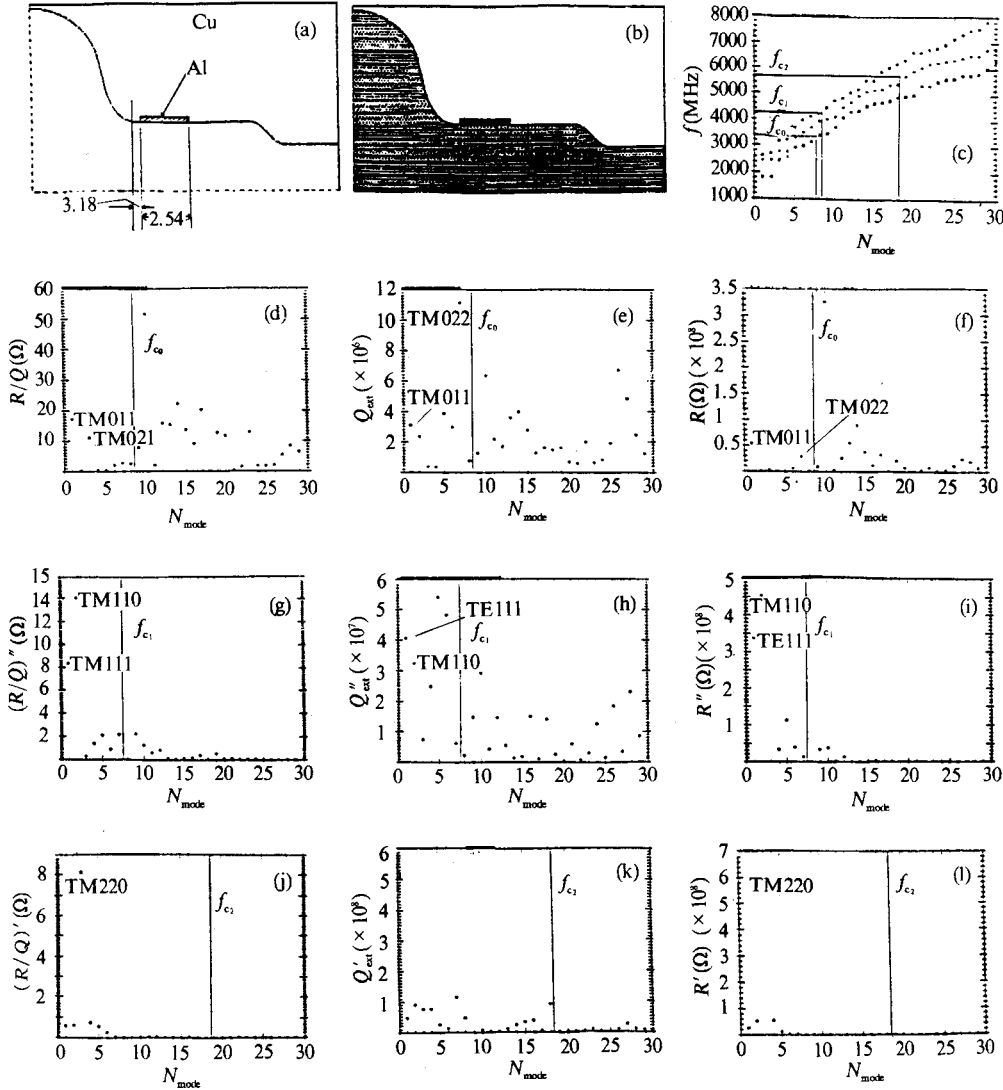


图 5 用 URMEL-T, 7000 网格点, 铝带模型计算的 BSC3 腔的高次模(HOM)特性

(a)计算 HOM 的阻带模型; (b)网格; (c)最低 30 个单极、偶极和四极 HOM 的频率分布,

□ 单极模, ○ 偶极模, ◆ 四极模. f_{c_0} , f_{c_1} 和 f_{c_2} 分别表示单极、偶极和四极模的截止频率, N_{mode} 表示模式序号;

(d), (e) 和 (f) 分别显示最低 30 个单极 HOM 模的 R/Q , Q_{ext} 和 $R = (R/Q) \cdot Q_{ext}$; (g), (h) 和 (i) 分别显示最低 30 个

偶极模的 $(R/Q)'$, Q_{ext}'' 和 $R'' = (R/Q)'' \cdot Q_{ext}''$; (j), (k) 和 (l) 分别显示最低 30 个

四极模的 $(R/Q)'$, Q_{ext}' 和 $R' = (R/Q)' \cdot Q_{ext}'$ 值.

以 BSC3 腔为例, 用铝带模型、URMEL-T 程序、7000 网格点计算了最低 30 个单极模、30 个偶极模和 30 个四极模. 其频率分布示于图 5(c) 中; 各单极 HOM 的 (R/Q) 、 Q_{ext} 及两者之乘积 $R=(R/Q) \cdot Q_{\text{ext}}$ 分别示于图 5(d)、(e) 和 (f) 中; 各偶极模的 $(R/Q)''$ 、 Q_{ext}'' 及两者之乘积 $R''=(R/Q)'' \cdot Q_{\text{ext}}''$ 分别示于图 5(g)、(h) 和 (i) 中; 各四极模的 $(R/Q)'$ 、 Q_{ext}' 及两者之乘积 $R'=(R/Q)' \cdot Q_{\text{ext}}'$ 分别示于图 5(j)、(k) 和 (l) 中.

6.3 对 BSC3 腔的进一步讨论

图 5(c) 示出了 BSC3 腔 90 个高次模的频率. 在单极模截止频率 f_{c_0} 下面的 7 个高次模、在偶极模截止频率 f_{c_1} 下面的 8 个模、在四极模截止频率 f_{c_2} 下面的 18 个模都是寄生的驻波模, 在束管中是消逝波. 其衰减主要靠 HOM 耦合器提取. 图 5(d) 示出 TM011 和 TM021 具有最高的 R/Q , 意味着这两个模是最危险的单极模. 图 5(e) 示出 TM021 的 Q_{ext} 很低, 而 TM022 的 (R/Q) 虽然不是最大, 但很难衰减. 综合考虑, 最危险的模是 TM011 和 TM022, 由乘积 $(R/Q) \cdot Q_{\text{ext}}$ 可以判明其危险程度(见图 5(f)). 图 5(g) 示出 TM110 和 TE111 具有最高的 $(R/Q)''$; 图 5(h) 示出它们也具有较高的 Q_{ext} , 因此这两个模是最危险的偶极模(见图 5(i)); 图 5(j)、(k) 和 (l) 分别示出最危险的四极模是 TM220 (2798.05 MHz).

由此可以得出结论, 对于 BSC3 腔来说, TM011、TM022、TM110、TE111 和 TM220 是最危险的高次模. 在设计和实验 HOM 耦合器时应特别加以注意.

7 结束语

从节省昂贵的耦合器考虑, 单胞腔一般不直接用于加速器, B-Factory 腔除外. 设计加工单胞腔的目的主要是用于腔形实验研究、材料研究、耦合器实验、腔处理及一些物理效应研究等等. 所谓实用单胞腔, 它是由某个多胞加速腔的两端半胞合成的. 它是多胞腔的一个缩影, 可用于腔形研究. 这里报告的单胞腔 BSC2 和 BSC3 正是 9 胞加速腔的缩影, 除耦合器实验外, 还可用于腔形研究. 如果 BT 腔形成熟, 可以用此腔形制造从 2 胞到 9 胞的任意个胞的加速腔.

在多胞腔中, 为了补偿束管的存在, 末端半胞几何尺寸须与中间胞不同. 如果端胞与中间胞尺寸相同, 其调谐曲线将如图 6(a) 所示, 这是很明显的失谐状态, 各胞内加速梯度不均匀. 规范的做法是中间胞确定之后, 利用调谐曲线确定端半胞尺寸. BT 腔中间胞半径 $OR=103.6\text{mm}$, BSC2 是利用缩小 $OR(OR=103.3\text{mm})$ 进行调谐的. URMEL 程序不允许边界突变, 程序计算时把 103.6mm 和 103.3mm 近似取平均后输入一中间值, 算出的调谐曲线如图 6(b) 所示, 可能不够真实. 用 SUPERFISH 可以仔细调谐, 并能得到真实的调谐曲线, 可以定出准确的 OR .

BSC3 腔是利用改变端半胞长度 L 进行调谐得到的. 图 6(c) 和 (d) 分别是对应端半胞长度 $L=52.8\text{mm}$ 和 52.7mm 的调谐曲线, 此时轴向电场 $|E_z|$ 在各胞内分布比较均匀, 也就是说各胞中储能几乎相等. 这正是多胞腔的完全谐振状态.

如果使用 BSC2, 端半胞与中间半胞半径 OR 相差 0.3mm . 使用 $2.5-3\text{mm}$ 铝板造

腔时, 焊接不会引起麻烦. 使用 BSC3 时, 端半胞与中间半胞半径相同, 焊接更方便. 用 URMEL 程序在计算机上调谐也方便.

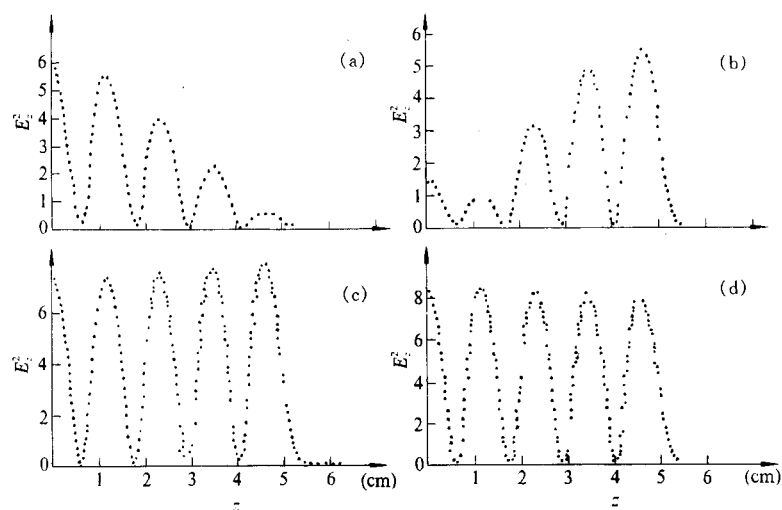


图 6 9 胞 BT 腔的计算机调谐曲线(URMEL, 25000 网格点), 即在腔轴上 E_z^2 沿 z 坐标的分布
(a) 端胞与中间胞尺寸完全相同; (b) L 相同, 端半胞半径比中间胞小 0.3 mm; (c) 半径相同, 端半胞长度 $L=52.7\text{mm}$; (d) 半径相同, 端半胞长度 $L=52.8\text{mm}$. 纵坐标 E_z^2 为任意单位.

用 BSC2 或 BSC3 作端半胞时, BT 腔中间胞 π 模(加速模)的 $E_p/E_{\text{acc}}=2.024$, 对于 9 胞腔来说, 胞-胞间耦合系数 $k=1.95\%$, 十分理想. 胞数越少, k 值越大. 如制造少于 9 胞的加速腔, 其 k 值都大于 2% .

H. Padamsee 教授和 W. Hartung 博士支持了一些计算程序; C. Pagani 教授给予 ARES 腔形作参考; D. Proch 博士给予许多有益的讨论; 计算中使用了宋进虎开发的 URMEL 与 GKS 之间的接口程序; 陈佳洱教授和赵夔教授给予了大力支持. 在此一并表示衷心地感谢.

参 考 文 献

- [1] V. Lagomarsino *et al.*, *IEEE Trans. Mag*-15(1979) 25.
- [2] P. Kneisel *et al.*, *NIM*, **188**(1981) 669.
- [3] C. Lyneis *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **31**(1977) 541.
- [4] H. Padamsee, A. Joshi, *J. Appl. Physics*, **50**(1979) 1112.
- [5] D. L. Rubin, *Linear Collider Applications of Superconducting RF*, the 1st TESLA Workshop, 23 — 26 July 1990, Cornell Univ. USA.
- [6] H. Padamsee *et al.*, *Superconducting RF Activities at Cornell University*, Proc. of the 3rd Workshop on RF Superconductivity, Argonne, Illinois (1988), USA.
- [7] R. M Sundelin, *IEEE Trans. on Nuclear Science*, NS-32(1985) 3570.
- [8] Q. S. Shu *et al.*, *Reducing Field Emission in Superconducting RF Cavities for the Next Generation of*

- Particle Accelerators, CLNS 90 /1020, Cornell Univ., (1990), USA.
- [9] J. Graber *et al*, A Would Record Accelerating Gradient in a Niobium Superconducting Accelerator Cavity, Proc. of the 1993 IEEE PAC, Wash. DC, p892 (1993).
- [10] T. Weiland, *NIM*, **216**(1983) 329.
- [11] U. Laustroer, U. van Rienen, T. Weiland, DESY M-87-03 (1987), Germany.
- [12] Donglin Zu, Jia-erh Chen, Proc. of the 1993 IEEE PAC. Wash. DC, p1095 (1993).
- [13] K. Halbach, R. F. Holsinger, *Part. Accel.*, **7**(1976) 213.
- [14] Donglin Zu, Summary of URMEL(T) calculations on Crab Cavity, CLNS 91-1090, CU, USA.
- [15] H. Padamsee *et al*, Superconducting RF Accelerating and Crab Cavities for the Cornell B-Factory, CESR-B, CLNS90-1039, internal report of laboratory of Nuclear Studies, CU, USA.
- [16] H. Padamsee *et al*, Crab Cavity Development for the Cornell B-Factory, CESR-B, PAC, San Francisco, 1991.
- [17] T. Weiland, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-32 (1985) 2738.

Concept Design of a New Structure of 1.3GHz Single-Cell Superconducting Cavity

Zu Donglin

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

Received 2 November 1995

Abstract

This paper reported a new shape of practicing single-cell superconducting cavities. It consist of the two half end-cell of 9-cell Beijing TESLA shape accelerating cavity. The ratio of the maximal surface electric field to accelerating gradient, E_p / E_{acc} , of the π -mode of the 9-cell cavity is reduced to 2.024. The cell-to-cell coupling k is high to 1.95%. The E_p / E_{acc} in the single-cell cavities is reduced to 1.8. The monopole, dipole and quadrupole high-ordermodes, HOM, was calculated with resistance-band model using URMEL-T. In addition, the concept of the structure parameters of niobium cavity was introduced as well as the condition of calculation reliability with codes, URMEL and URMEL-T, was discussed.

Key words superconducting RF, superconducting cavity, single-cell cavity, accelerating mode, HOM.