

直线对撞机用的 RF 超导多胞 加速腔和陷阱模研究*

俎栋林 陈佳洱

(北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

1996-01-17 收稿

摘 要

为下世纪直线对撞机设计了一个9胞RF超导加速腔,其加速模的 $E_{pk}/E_{acc}=2.024$.胞-胞间耦合系数高达1.95%.高次模通带分布均匀合理,带间无重叠,不存在陷阱模.CSE新形胞结构也保证了加速腔的机械强度.根据目前可实现的铯腔表面处理技术,束载加速梯度达到25-30MeV/m是可能的.

关键词 直线对撞机, RF 超导, 多胞加速腔, 加速梯度, 陷阱模.

1 引 言

储存环对撞机由于同步辐射损失按能量四次方增加,从而限制了最高能量难以超过0.1TeV.直线对撞机无同步辐射损失,其造价只随能量线性增长^[1].因此,要实现质心系能量TeV量级正负电子对撞只可能用直线对撞机.目前国际高能加速器界有一个共识:质心能量 $2\times 0.5\text{TeV}$,亮度为 $10^{33}-10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的超级正负电子直线对撞机(SLC)应是SSC/LHC之后的下一代加速器.这样一个对撞机可产生顶夸克 $t-\bar{t}$ 以进行分析,同时也有发现Higgs等质量在350GeV以下粒子的潜在可能性.

超导直线对撞机的优点是可降低RF峰功率(用长RF脉冲)和平均功率(用多bunch).但关键问题是目前加速梯度尚不够高,需要有一个实质性提高.同时,加速结构本身造价也需要进一步降低.在预期的造价上要使超导腔方案胜过常温腔方案,超导腔加速梯度必须达到20MeV/m以上.目前已运行的超导腔束载平均加速梯度仅为6.7MV/m,腔的造价典型地为200k¥/m或40k¥/MV.CEBAF使用了360个5胞腔.假如加速梯度提高到25MV/m, $2\times 0.5\text{TeV}$ 直线对撞机物理长度也将长达 $2\times 20\text{km}$.一个1.3GHz 9胞腔物理长度约1m,这种对撞机将需要 2×10000 个加速腔.本文正是对这种加速腔进行了设计研究.

* 国家自然科学基金资助.

目前超导加速腔的梯度被两个现象所限制. 其一是电子场致发射(FE); 其二是热击穿. FE限制了铌腔内表面场强 E_{pk} 到一定值, 用 RF 高峰功率处理可把 E_{pk} 提高到 100MV/m. 用同样铌材, 同样处理方法, 在同样加工条件下生产的一批加速腔, 其 E_{pk} 有离散性, 即使用同样的 RF 峰功率处理, 其 E_{pk} 不可能都达到 100MV/m. 其下限达 75MV/m 是实际可实现的. 由于空载梯度取决于 E_{pk}/E_{acc} 比值, 如果能找到一个好的腔形, 其 E_{pk}/E_{acc} 最低(比如说等于 2.0), 如 $E_{pk}=75\text{MV/m}$, 则空载加速梯度可达 37.5MV/m. 载束时加速梯度下降到无束载梯度的三分之二, 于是束载梯度可达 25MV/m. 由于 E_{pk}/E_{acc} 受到胞-胞间耦合系数 k 的强烈制约, 让 $E_{pk}/E_{acc}<2.0$ 是困难的. 折衷考虑, E_{pk}/E_{acc} 趋近于 2, $k>1.8\%$ 是需要的, 也是可能的.

热击穿要求 H_{pk}/E_{acc} 达到最小. 不过此参数尚有较大余地, 不是主要矛盾. 总之, E_{pk}/E_{acc} 、 k 和 H_{pk}/E_{acc} 皆取决于腔胞的形状, 其中 FE 是主要限制因素.

2 多胞加速腔概念和理论

不论驻波模还是行波模, 多胞腔行为很像弱耦合振荡器. 当从单胞腔演变成具有 N 个胞的多胞腔时, 一个单胞模式便分裂为 N 个不同的多胞模式. 它们具有稍微不同的频率, 形成一个“通带”, 且在不同胞中有不同的相移. 设在一个通带中第 q 个模本征圆频率为 ω_q , 在第 n 个胞中纵向电场为 $E_n(q, t)$, 可分别用下面公式表示:

$$\omega_q = \omega_0 [1 + k(1 - \cos\varphi_q)]^{1/2}, \quad (q=1, 2, \dots, N), \quad (1)$$

$$E_n(q, t) = E_0 \sin\left(\frac{2n-1}{2} \varphi_q\right) \cos \omega_q t, \quad (n, q=1, 2, \dots, N), \quad (2)$$

式中 k 是胞-胞间耦合系数, E_0 是纵向电场最大值, φ_q 是相移角,

$$\varphi_q = q \cdot \frac{\pi}{N}, \quad (q=1, 2, \dots, N). \quad (3)$$

当 $q=N$ 时, $\varphi_N=\pi$, 即在 N 胞腔中相邻胞中振荡相位差为 π , 称为 π 模, 基带 TM010 中的 π 模就是超导加速模. 当 $q=1$ 时, $\varphi_1=\pi/N$, 即相邻胞中振荡相位相差 π/N . 当 $N \rightarrow \infty$ 时, $\varphi_1 \rightarrow 0$, 故此模称为“同相模”. 所谓调谐就是根据(2)式机械调整各胞谐振在 ω_N 频率上, 且使各胞中纵向电场强度 $E_n(N, t)$ 峰值相等. 胞-胞间耦合系数 k 可表示为:

$$k = \frac{f_\pi^2 - f_{\pi/N}^2}{2f_{\pi/N}^2 - \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{N}\right)\right] f_\pi^2}, \quad (4)$$

式中 f_π 是 π 模频率, $f_{\pi/N}$ 是“同相模”频率. 随胞数增加, k 有下降趋势, 当把 4 胞和 5 胞现役腔增加到 9 胞时, 其 k 值会下降到不可容许的程度. 更严重的是, 随胞数增加, 各通带内模式密度增加, 各通带还会出现重叠, 通带重叠的后果会形成所谓“陷阱模”, 陷阱模出现会完全破坏超导加速腔的正常工作, 陷阱模是在计算机上发现的^[2], 其产生

的物理机制、条件尚未完全弄清楚. 在腔设计中, 陷阱模是令人十分头痛的问题. 因此寻找一种无陷阱模的新腔形是势在必行的.

多胞腔的另一参数 $\Delta f/f$ 表示通带色散的大小, 其定义为:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{2(f_{\pi} - f_{\pi/N})}{(f_{\pi} + f_{\pi/N})}, \quad (5)$$

由于基带 N 个振荡模中只有一个模(π 模)是加速模, 其余($N-1$)个模都是无用的, 需要用基带耦合器提取出来. 因此希望基带色散大一些为好, 同时高次带色散小一些为好, 以避免通带太宽发生重叠. 并且希望通带分布合理、均匀.

3 搜索新腔形

根据现役 RF 超导加速腔运行经验和 RF 超导体表面处理技术发展的最新水平及未来直线对撞机造价考虑, 新加速结构应满足以下条件:

- (1) 腔的胞数应增加一倍到 9 胞, 可节省昂贵的 RF 耦合器, 并节省空间, 使对撞机总长度缩短;
- (2) 胞-胞间基带 TM₀₁₀ 的耦合系数 k 必须大于 1.8%, 越高越好;
- (3) E_{pk}/E_{acc} 须降低到 2.0, 以获得尽可能高的加速梯度;
- (4) 装在束管上的高次模(HOMs)耦合器能有效提取高次驻波模的能量, 使外观 Q_{ext} 降低到可容许的程度;
- (5) 所有行波高次模能传输到束管中, 腔中不允许有陷阱模存在;
- (6) 结构合理, 有足够屈服强度, 允许机械拉伸以实现调谐.

“CSC”型胞形有五个独立参数^[3], 分别为胞半径 OR 、束管半径 IR 、鼻圆弧半径 R_1 、两圆公切直线对腔轴倾角 TD 和半胞长度 L . 其中 L 由加速模频率确定. 因为被加速电子必须与 RF 振荡保持同步, 既然频率已定, 所以 L 不允许变化. 考虑机械稳定性, 取 $TD=79^\circ$. 那么允许调变的只是其余三个参数, 即 OR 、 IR 和 R_1 . 因为每个参数变化都会影响基带 π 模频率, 我们的策略是对应一定的 OR , 同时调整 IR 和 R_1 以得到正确的频率 1.3GHz.

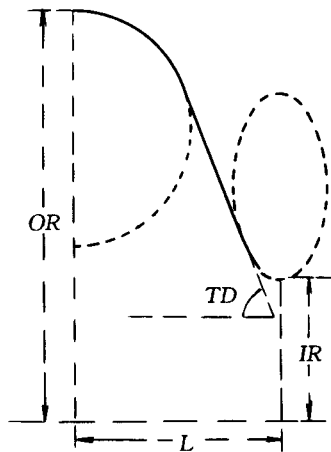


图1 北京 TESLA (BT) 胞形

如果把 500MHz 腔和 1.5GHz 腔按比例都折合成到 1.3GHz, 那么, LEP 4 胞的 OR 、 IR 和 R_1 最小(4 胞腔中无陷阱模); 而 Cornell TESLA 10 胞的 OR 、 IR 和 R_1 最大(6 胞腔中已出现陷阱模). 我们试图在这两组极端参数之间寻找一个满足要求的胞形. 在搜索过程中, 所有试探性胞形均保持谐振在 1.3GHz 频率上至关重要. 否则, 所计算的 E_{pk}/E_{acc} 将失真. 运行 URMEL^[4], 所用网格点数如果少于 25000 时, E_{pk}/E_{acc} 也会失真^[3].

对于“CSC”型胞结构, 反复搜索, 结果失败了. 不得不尝试一个“CSE”型新结构

胞形. 终于找到了一个胞形如图 1 所示, 命名为北京胞形 (BT), 用此胞建造 9 胞加速腔时, 其加速模的 $E_{pk} / E_{acc} = 2.024$, $k = 1.95\%$. 此加速腔几何结构如图 2 所示.

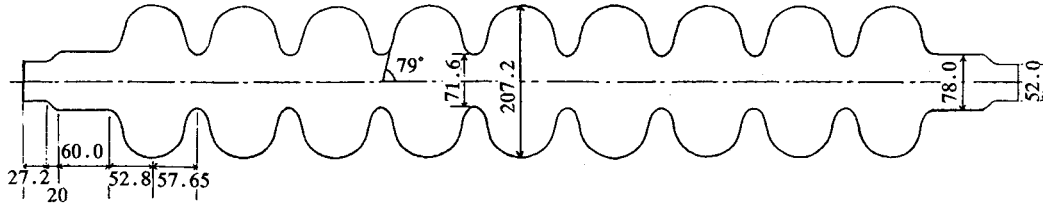


图 2 直线对撞机超导 9 胞加速腔 (BT 形) 几何结构 (所标尺寸与 1.3GHz 相对应)

4 BT 胞形的加速模特性

为了把握 BT 胞形计算的准确性和可靠性, 对 Cornell TESLA、KEK TESLA 和非 TESLA 的 LEP 4 胞的胞形进行了复算, 计算结果和他们公布的数据是吻合的. 数据比较列在表 1 中. 表 1 中列出了腔的胞数、几何参数 (2 个)、计算时所用网格点数、物理参数 (4 个)、胞结构类型及陷阱模. 其中 E_{pk} / E_{acc} 和 k 是两个关键参数, E_{pk} / E_{acc} 越小, 可获得的加速梯度越高; k 越大, 加速腔的运行调整、调谐、控制越容易, 其间有强制约束关系. 从表中可见, 只就这两个参数来说只有北京和 DESY 的胞形满足要求, 而且前者全面优于后者. 后者正是 TTF 预演计划所使用的加速腔. 而更致命的参数是陷阱模, 将在下面讨论.

表 1 直线对撞机超导加速腔比较

	LEP*	CORNELL	KEK 1	KEK 2	北京	SACLAY	DESY
每腔胞数	4	10	9	9	9	9	9
OR(mm)	102.20	109.00	104.15	103.30	103.60	102.20	103.30
IR(mm)	32.67	40.90	40.00	38.00	35.80	32.31	35.00
网格点数	20000	20000	20000	25000	25000	25000	25000
H_{pk} / E_{acc} ((A/m) / (MV/m))	3129.8	4321.1	3967.7	3429.8	3414.7	3159.2	3318.4
k (%)	2.00	1.80	1.22	2.66	1.95	1.42	1.85
每胞 R / Q (Ω)	121.48	90.96	112.92	108.00	110.87	124.33	115.22
E_{pk} / E_{acc}	2.359	2.054	2.039	2.220	2.024	2.000	2.070
结构类型	CSC	CSC	SCSCS	CSC	CSE	CSC	CSC
单极陷阱模	无	有	有	?	无	?	?

* LEP 不是直线对撞机加速腔, 作为参照腔引入.

5 高次模通带和陷阱模问题

1989年 Cornell 率先试设计了一个直线对撞机用的 10 胞超导加速结构, 其胞结构为“CSC”型, 其 $E_{pk}/E_{acc}=2.10$, $k=1.8\%$. 由于认识到从实验上提高 E_{pk} 毕竟有限, 从腔胞几何结构上挖潜力, 降低 E_{pk}/E_{acc} 成为必要. 鼻区由于电力线比较集中, E_{pk} 最大值就出现在此区有限面积上, 如图 3 所示. 如果把鼻区曲率半径 R_1 加大, 会使电力线分散开, E_{pk} 就会降低. 对加速模来说, 效果确实很明显. Cornell / CEBAF 胞的 $E_{pk}/E_{acc}=2.56$, TESLA 胞的 E_{pk}/E_{acc} 已降到 $E_{pk}/E_{acc}=2.10$. 然而对高次模来说, 却增加了胞-胞间耦合传输的困难, 用此胞形制成的 6 胞腔, 在 3 倍基频之下已经出现 TM021 带和 TM030 带重叠, 并出现陷阱模, 导致失败. 鉴于这一教训, 我们改用 CSE 型, 鼻区椭圆弧面即可达到分散电力线, 降低 E_{pk} 的目的, 同时又压缩了鼻区物理宽度, 便于高次模通带分散错开, 也便于胞-胞间高次模的耦合传输. 这样既降低了 E_{pk}/E_{acc} 比值, 又提高了胞-胞间耦合系数 k , 并且避免了陷阱模的产生. Cornell TESLA 胞形的另一缺点是与赤道圆和鼻圆相切的直线倾斜角偏小, $TD=70^\circ$, 腔的机械强度变差, 抽真空曾经抽瘪过. 而实践证明 Cornell / CEBAF 腔的 ESE 胞型机械强度相当好, LEP 腔也很好, 而 LEP 腔胞的 $TD=79.09^\circ$, 因此在 CSE 胞形中取 $TD=79^\circ$, 相信 CSE 胞形的机械强度也会很好.

采用 CSE 胞型, 仍需要大范围仔细搜索才可能找到一个好的实用胞形. BT 胞形已

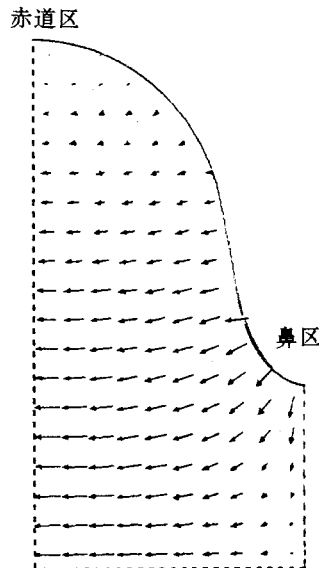


图 3 BT 胞中 TM010 带 π 模的电场分布
箭头方向指示场方向, 箭头长度正比于场强度.
 E_{pk} 最大出现在鼻区.

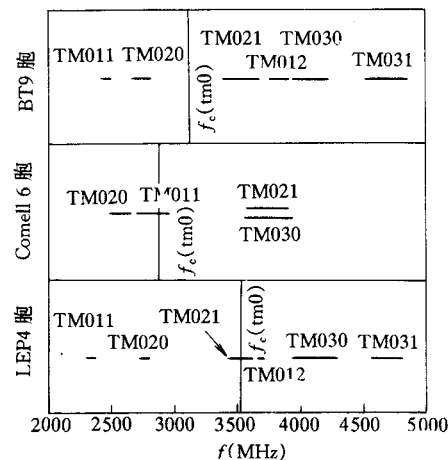


图 4 BT 9 胞、LEP 4 胞及 Cornell 6 胞的纵向
高次模通带分布

$f_c(tm0)$ 是截止频率, 即驻波模和行波模的分界线.

BT 9 胞和 LEP 4 胞一样, 在 3.7 倍基频以下的 6 个通带分布合理、无重叠; Cornell 6 胞在 3 倍基频以下的 4 个通带中已出现重叠.

经得到. 其单极高次模通带分布合理, 如图 4 所示, 并与 Cornell TESLA 6 胞及 LEP 4 胞的高次模通带分布做了比较. 在 Cornell 6 胞腔中出现高次行波通带重叠, 使不同模式出现频率简并, 同频或近似同频模式间就会产生相互作用, 相互牵引, 产生能量交换, 发生“干涉”效应. 其电磁场有的部分增强, 有的部分变小乃至抵消, 从而改变了在胞-胞间的正常耦合传输特性, 结果使该种干涉模到达端胞时, 其电磁场变为零, 如图 5 所示, 电磁场能量不能传输到束管, 这种模像掉在陷阱中一样呆在腔中, 故此得名, 这正是陷阱模产生的物理机制. DESY TESLA 腔在设计中并未考虑陷阱模问题, 理论上未排除陷阱模存在的可能性. BT 9 胞腔和 LEP 4 胞腔一样, 都不存在重叠通带, 所有模式频率分立, 不存在相互干涉条件, 也就不会有陷阱模存在.

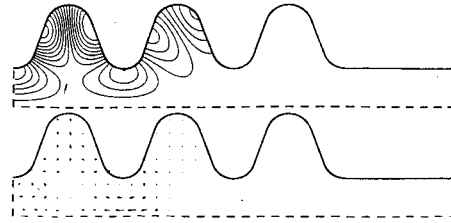


图 5

Cornell 6 胞腔中出现陷阱模, 陷阱模在端胞中的电磁场为零, 其能量不能传输出来.

6 结 论

BT 9 胞腔无陷阱模存在, 其 E_{pk} / E_{acc} 已达 2.024; k 值高达 1.95%. 利用 RF 高峰功率处理, 只要把 FE 阈值 E_{pk} 提高到 75MV/m, 腔空载加速梯度可达到 37.5MV/m, 束载加速梯度可达到 25MV/m. 若 FE 阈值达到 90MV/m, 则束载梯度可达 30MV/m. 而且 CSE 结构合理, 机械强度好. 只要耦合器设计合理, 高次驻波模的 Q_{ext} 降到允许值也是不成问题的. 因此, 对于直线对撞机来说, 该 RF 超导加速腔相当理想, 设计是成功的.

参 考 文 献

- [1] H. Padamsee, *J. of Superconductivity*, **1**(1988)377.
- [2] A. Mosnier, the trapped Modes in a multicell SC Cavity, the 1st TESLA Workshop, 23 — 26 July 1990, Cornell University, Ithaca, New York.
- [3] 郑栋林, 高能物理与核物理, **20**(1996)1041.
- [4] T. Weiland, *NIM*, **216**(1983) 329.

Study on SRF Multicell Accelerating Cavity for Linear Collider and Trapped Modes

Zu Donglin Chen Jiaer

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

Received 17 January 1996

Abstract

This paper designed a 9-cell RF superconducting accelerating cavity for the TeV electron linear accelerator collider in next century. The ratio, E_{pk} / E_{acc} , of the maximal surface electric field to the accelerating gradient has been reduced to 2.024 and the cell to cell coupling keeps high to 1.95%. Distribution of the HOM passbands is reasonable. There is no overlap between the bands, therefore no trapped modes. The CSE type structure guarantees the mechanical hardness. According to present state of the art technique of Niobium surface processing, it is possible to reach 25—30MV/m for the accelerating gradient with beam load.

Key words linear accelerator collider, SRF, SRF multicell accelerating structure, accelerating gradient, trapped modes.