

上海光源 2998 MHz 加速管波导耦合器的设计

汪宝亮¹ 裴士伦² 赵明华¹ 侯 汨²

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 上海同步辐射光源(SSRF, Shanghai Synchrotron Radiation Facility)直线加速器采用 2998 MHz 的加速管, 这种加速管在结构形式上虽然与 SLAC 型 2856 MHz 加速管相似, 但在尺寸上略有差异, 需要重新计算。本文采用与实际调试加速管时相同的三频法、有限差分分析软件 Superfish 和 HFSS 对 2998 MHz 加速管耦合器进行物理设计, 为实际工程设计提供指导。物理设计与实验测试结果非常吻合。

关键词 加速管, 耦合器, 三频法, 物理设计

中图分类号 TN124

上海光源(SSRF)的直线加速器采用 2998 MHz 盘荷波导行波加速管^[1]。耦合器是此类加速管的重要组成部分, 用以实现标准矩形波导与标准加速腔间的阻抗匹配, 以及所传输电磁场的波形转换, 使微波功率能以尽可能小的反射馈入加速管, 或将加速管的剩余功率耦合到与输出波导相连接的干负载

中。耦合腔(图 1)为一个带有偏心的圆柱形腔体, 半径 b , 偏心距 e , 耦合孔的宽度为 w , 厚度为 t 。调整 b 、 w 与 t , 可获得耦合器的匹配。然而, 设计 SSRF 直线加速器加速管耦合器时, t 已确定, 因此模拟计算时主要由调整 b 和 w 来完成耦合器的调配。

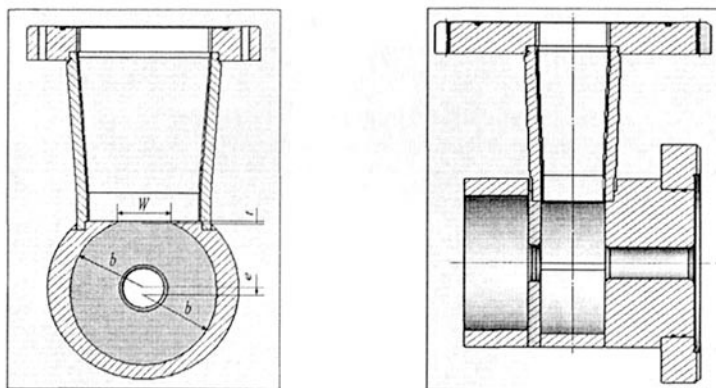


图 1 行波加速管耦合器的示意图
Fig.1 Schematic of traveling wave accelerating tube coupler

1 三频率法简介^[2,3]

三频率法(也称 Kyhl 方法)系在 1963 年由美国 SLAC 的 Westbrook 提出^[2], 当时主要用来调配电耦合的 $2\pi/3$ 模行波加速管耦合器。该方法要求事先已知加速腔链的色散频率 $f_{\pi/2}$ 、 $f_{2\pi/3}$ 及 $f_{\text{mean}}=(f_{\pi/2}+f_{2\pi/3})/2$, 还要求耦合器后连接一小段加速腔链, 且这一小段腔链可是未完全调配好的腔链。用该方法调配耦合器主要遵循如下步骤^[2,3]:

1) 使用短路活塞失谐耦合腔, 确定输入波导中与相应频率 $f_{\pi/2}$ 、 $f_{2\pi/3}$ (加速管的工作频率)以及 f_{mean} 对应的失谐短路参考面。

2) 将短路活塞移动到与耦合腔相邻的腔中心面, 使该腔失谐。

3) 调整耦合腔的腔体尺寸, 以使与频率 f_{mean} 对应的反射相位在 Smith 圆图上相对于失谐短路参考面顺时针移动 $1/4$ 个波长, 即 180° 。如果移动的

上海光源工程项目子课题资助

第一作者: 汪宝亮, 男, 1979 年出生, 2004 年 7 月于安徽大学物理系获硕士学位, 现为中国科学院上海应用物理研究所在职博士研究生

收稿日期: 2008-12-20, 修回日期: 2009-06-10

距离小于 $1/4$ 个波长, 则表明耦合腔的谐振频率低于 $f_{2\pi/3}$, 反之, 则偏高于 $f_{2\pi/3}$ 。

4) 保持短路活塞的位置不变, 测量与频率 $f_{\pi/2}$ 和 $f_{2\pi/3}$ 对应的反射相位在 Smith 圆图上的位置。如果耦合度 β 为 1, 则此时各个数据点在 Smith 圆图

上的位置将如图 2(a)所示。由于耦合器的耦合腔在调配前一般处于欠耦合状态(主要是为了保留余量, 以方便对耦合孔的尺寸进行调整), 各个数据点在 Smith 圆图上的实际位置将如图 2(b)所示。

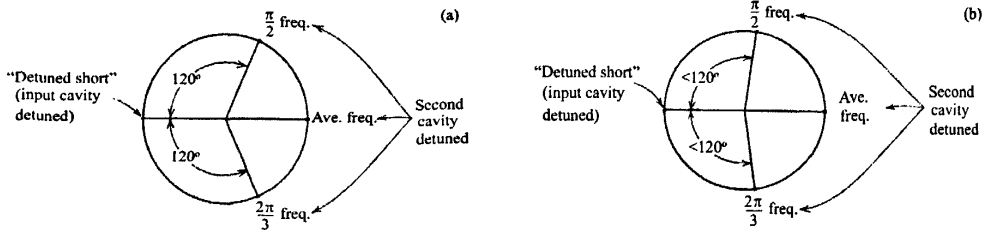


图 2 使用三频率法调配耦合器时的 Smith 圆图

(a)耦合腔频率及耦合度调配好($\beta=1$)时的 Smith 圆图; (b)耦合腔频率调好但耦合为欠耦合($\beta<1$)时的 Smith 圆图

Fig.2 Smith chart of deploying the coupler with three-frequency mode: (a) coupled-cavity frequency, at a good deployment ($\beta=1$); (b) coupled-cavity frequency, good, but undercoupling ($\beta<1$).

5) 调整耦合孔的尺寸, 对其进行修整后, 测量并记录修整好的尺寸。调整耦合孔的尺寸将会对耦合腔的频率有所影响。

6) 重复步骤 3)、4)、5), 直到耦合度 $\beta=1$ 为止, 此时, 对耦合器的调配即告完成。

1993 年, 法国的 Chanudet 把三频率法推广到

任意模式的电耦合或磁耦合的行波加速结构, 其结论为: 失谐耦合腔并假设所有频率的输入反射相角都为 0° , 则移动活塞到相邻腔的中心面, 并测量输入波导中三频率 $f_{\pi/2}$ 、 f_θ (加速管的工作频率) 以及 f_{mean} 对应的反射相位 $\phi_{\pi/2}$ 、 ϕ_θ 以及 ϕ_{mean} , 则当耦合器匹配时, 满足表 1 所示关系。

表 1 使用不同软件对预聚束器进行模拟计算得到的结果

Table 1 Pre-buncher the simulation results obtained by using different software.

工作模式 Mode	反射相位 Reflection phase	电耦合结构 Electro-coupling structure	磁耦合结构 Magnetic coupling structure
$0 \leq \theta \leq \pi/2$	ϕ_{mean}	180°	180°
	ϕ_θ	-2θ	2θ
	$\phi_{\pi/2}$	2θ	-2θ
$\pi/2 \leq \theta \leq \pi$	ϕ_{mean}	180°	180°
	ϕ_θ	$2(\pi - \theta)$	$-2(\pi - \theta)$
	$\phi_{\pi/2}$	$-2(\pi - \theta)$	$2(\pi - \theta)$

上述三频率法都只能定性判断耦合器频率偏差 Δf (耦合腔的实测频率与设计频率的差) 的高低及输入耦合度 β 的强弱, 不能定量地计算 Δf 以及 β 值。郑署昕等^[2]在 Chanudet 的基础上对三频率法测量耦合器做了定量分析, 给出了定量判断 Δf 以及 β 值的方法。用该方法, 只需要知道任意两个频率的测量数据(频率 f 、反射相位 ϕ), 就可近似计算耦合器在工作模式处的耦合度和频偏 Δf , 其计算公式为

$$\Delta f = \sqrt{f_1 f_2} \sqrt{\frac{\tan \frac{\phi_2}{2} f_2 - \tan \frac{\phi_1}{2} f_1}{f_1 \tan \frac{\phi_2}{2} - f_2 \tan \frac{\phi_1}{2}}} - f_{\pi/2} \left(1 - \frac{k}{4} \cos \theta_0 \right) \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{\frac{k}{2} \omega_{\pi/2} \sin \theta_0} \frac{\tan \frac{\phi_1}{2} \tan \frac{\phi_2}{2} (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\tan \frac{\phi_2}{2} \omega_1 - \tan \frac{\phi_1}{2} \omega_2} \quad (2)$$

其中, k 为相邻腔间的耦合系数, 可以由加速腔链的色散方程 $f_\theta = f_{\pi/2}(1 - k \cos \theta/2)$ 计算得到。

2 正式腔的模拟计算

对 2998 MHz 加速管耦合器的模拟计算使用了二维有限差分软件 Superfish^[4]和三维有限元软件 HFSS^[5]。先用 Superfish 计算与耦合腔相邻腔色散频率 $f_{\pi/2}$ 、 $f_{2\pi/3}$ 以及 f_{mean} , 再用 HFSS 计算耦合腔的半

径 b 以及耦合孔的宽度 w ，以使耦合器的频率和耦合度均达到最佳状态。

用 Superfish 计算可得，对于输入耦合器， $f_{\pi/2}$ 、 $f_{2\pi/3}$ 以及 f_{mean} 的频率分别为 2978.42、2997.92、2988.17 MHz；对于输出耦合器， $f_{\pi/2}$ 、 $f_{2\pi/3}$ 以及 f_{mean} 的频率分别为 2991.34、2997.92、2994.63 MHz。图 3 为 HFSS 计算所用模型，其中，(a)为耦合腔失谐时的模型，(b)为耦合腔相邻腔失谐时的模型。经模拟计算最终在正式加速管上采用的基本加工尺寸与模拟计算结果见表 2、表 3。表 3 数据表明，模拟计算得到的结果基本使输入耦合器和输出耦合器达到匹配状态。由于模拟计算和实际测量存在一定的差别，在实际调配中，还需对耦合器的相关尺寸进行一些小调整。尽管如此，模拟计算使实际对耦合器的尺寸调整范围大幅缩小，从而达到了理论计算为实际工程设计提供指导的目的。

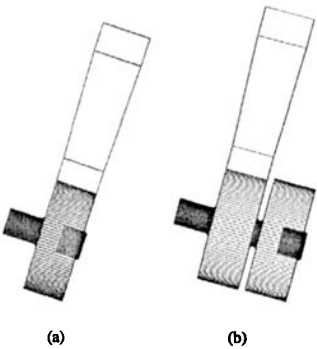


图 3 用 HFSS 进行模拟时的计算模型
Fig.3 Calculation model in HFSS.

表 2 模拟计算得到的正式腔基本尺寸 (mm)
Table 2 Sizes (in mm) of the simulated cavity.

耦合器 Coupler	b	e	w	t
输入 Input	37.551	2.75	28.35	0.75
输出 Output	37.776	1.92	22.82	0.71

表 3 模拟计算得到的结果
Table 3 The final simulation results.

耦合器 Coupler	频率 Frequency /MHz	相位 I Phase I /°	相位 II Phase II /°	相位旋转 Phase rotation /°	$\Delta f^*/\text{MHz}$	β^*
输入 Input	2978.42	-5.7030	-129.967	+124.264	-0.492	1.038
	2988.17	-10.014	+166.500	+183.486		
	2997.92	-14.281	+105.232	+240.487		
输出 Output	2991.34	-2.7380	-130.835	+128.097	-0.529	0.996
	2994.63	-4.1360	+165.154	+190.710		
	2997.92	-5.5320	+106.618	+247.850		

* Δf 和 β 由式(1)和(2)得到，计算时所使用的频率和相位均是 $\pi/2$ 模和 $2\pi/3$ 模对应的频率和相位
 Δf and β were calculated by Eqs. (1) and (2) with the frequency and phase corresponding to that of $\pi/2$ -mode and $2\pi/3$ -mode.

获得输入耦合器和输出耦合器的尺寸后，保持耦合器尺寸不变，对具有反对称特性的 4 加速单元结构(与输入或输出耦合器对应，如图 4)进行计算，主要研究耦合器在工作模式 $2\pi/3$ 模频率 2997.36 MHz 下的反射、传输特性，以验证此种方法所得耦合系数与表 3 中解析公式计算的一致性。最终结果是两个耦合器和中间两个加速腔的尺寸完全一样。

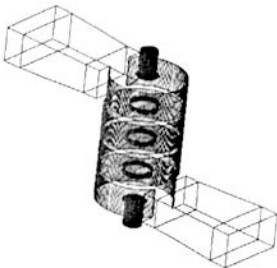


图 4 具有反对称特性的 4 加速单元结构
Fig.4 The 4-acceleration-units structure with anti-symmetric properties.

在模拟过程中，发现在耦合腔尺寸保持不变时，中间两个腔对工作模式下的反射特性和传输特性影响较大，须对它们进行调整以使反射系数尽可能小、传输系数尽可能大，这时的计算结果才能与表 3 中给出的结果相比较。最终，在工作频率 2997.92 MHz 下，使用此法计得输入腔和输出腔的功率反射系数分别为 -42 dB、-41 dB，耦合系数分别为 1.016、0.983，与表 3 结果基本一致。

图 5、图 6 分别为与输入、输出耦合器相对应的 4 加速单元结构中轴向电场幅度和相位的分布曲线。它们的轴向电场幅度的分布形式都是周期性的。对于与输入耦合器对应的 4 加速单元结构，中间两个腔内的单腔相移均为 120.6°(理想情况为 120°)，耦合腔内的单腔相移为 60.3°(理想情况为 60°)。对于与输出耦合器对应的 4 加速单元结构，中间两个腔内的单腔相移均为 122.8°，耦合腔内的单腔相移为 61.4°。

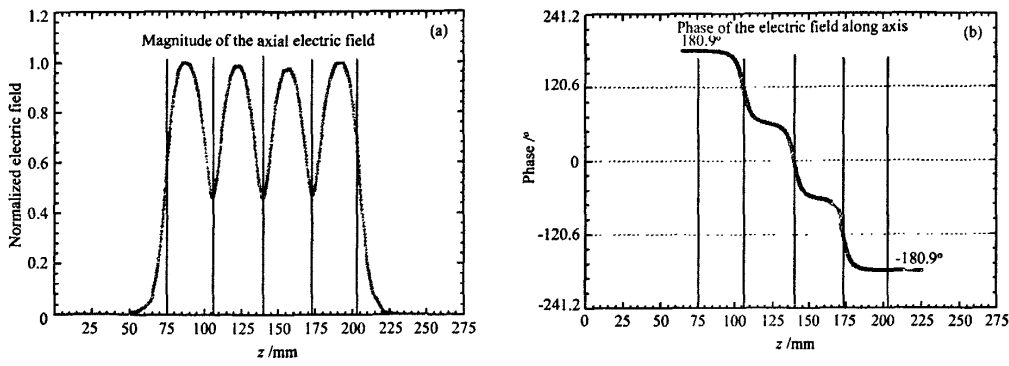


图 5 输入耦合器 4 加速单元结构中轴向电场的幅度和相位分布
Fig.5 Axial electric field amplitude and phase distribution of 4-acceleration-units in the input coupler.

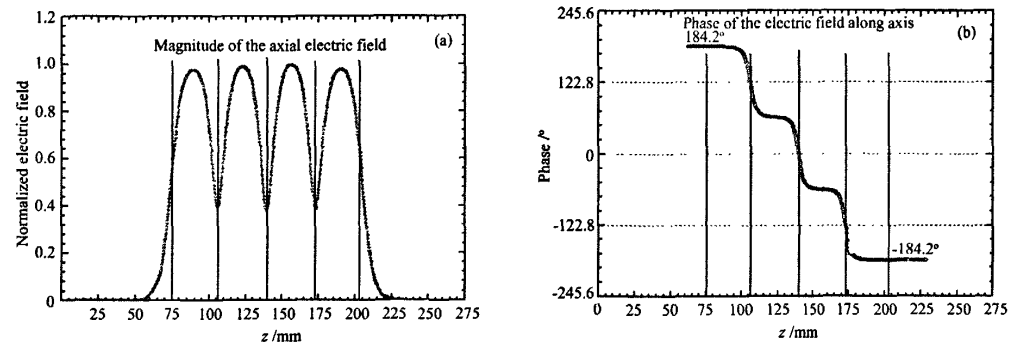


图 6 输出耦合器 4 加速单元结构中轴向电场的幅度和相位分布
Fig.6 Axial electric field amplitude and phase distribution of 4-acceleration-units in the output coupler.

3 关于实验腔的计算和测试

在确定实验腔加工尺寸的时，实际采用的是另一套尺寸，见表 4 (表 2 的尺寸是实验腔加工后根据实验测量结果和模拟计算结果最终选定的正式腔尺寸)。最初确定实验腔尺寸时，模拟计算使用的计算机性能有限，只能进行粗略的设计，且当时在确定尺寸时还不了解计算和实验有多大差别，所以未完全采用模拟得到的尺寸，对其做了一些修正，使得

实际加工出来的实验腔与匹配状态的差别比较大。表 5 是输入耦合器的实验腔加工后且未修整的测量结果，以及重新用精确模拟计算得到的结果。

表 4 制作实验腔时采用的基本尺寸(mm)
Table 4 Sizes (in mm) of the experimental cavity for manufacturing.

耦合器 Coupler	b	e	w	t
输入 Input	37.541	2.75	28.07	0.75
输出 Output	37.795	1.92	22.42	0.71

表 5 模拟计算结果与实验测量结果的比较
Table 5 Comparison between the simulated and measured results.

输入耦合器 Input Coupler	频率 Frequency /MHz	相位 I Phase I /°	相位 II Phase II /°	相位旋转 Phase rotation /°	Δf /MHz	β^*
实际测量 I Measurement I	2978.09	+148.20	+50.5	+97.700	4.399	1.025
	2987.72	+137.50	-5.00	+142.50		
	2997.36	+126.30	-85.8	+212.10		
实际测量 II Measurement II	2978.09	+151.05	+49.9	+101.15	4.787	1.009
	2987.72	+139.00	-5.80	+144.80		
	2997.36	+127.50	-86.5	+214.00		
模拟计算 Simulation	2978.09	-5.1180	-115.407	110.289	1.944	0.998
	2987.72	-9.3450	-176.316	166.971		
	2997.36	-13.555	+116.937	229.508		

分析表 5 可知, 对于相同的尺寸, 模拟计算得到的耦合腔谐振频率偏移 Δf 要低一些, 主要来自三个方面: 一是模拟计算时采用了近似的模型; 二是实际加工时的误差, 三是实测时的测量误差。模拟计算所得频率与两次实际测量所得频率的差别分别约为 $2\pi/3$ 模频率 2997.36 MHz(根据实际加工尺寸计算得到, 与表 3 中给出的频率略有差别)的 0.08% 和 0.09%, 模拟计算所得耦合度与实际测量所得耦合度的差别约为匹配时的 2.7% 和 1.1%。总的说来, 在精细模拟(网格划分较细)的情况下, 模拟计算和实际测量较一致。若模拟时网格划更细些、加工时尺寸控制更严格些, 模拟计算和实际测量的差别会更小。

4 小结

经过大量的模拟计算和实验测量, 最终确定了 2998 MHz 加速管耦合器正式腔的基本尺寸。模拟计算与实际测量结果还是比较一致的, 由此, 模拟计算可以为实际工程设计提供指导。根据所得经验, 当模拟计算得到的腔体频率越接近设计值, 计算结果与实测结果之间的差值越小。正式腔按表 2 给定

的尺寸进行加工, 接下来将进一步研究模拟和实测之间的关系, 从而为以后的耦合器设计积累经验。

参考文献

- 1 赵明华, 林国强, 钟少鹏, 等. 上海光源直线加速器初步设计报告. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2004
ZHAO Minghua, LIN Guoqiang, ZHONG Shaopeng, *et al.* Preliminary design report of SSRF linac. Shanghai: Institute of Applied Physics, CAS. 2004
- 2 郑曙昕, 崔宇鹏, 陈怀璧, 等. 高能物理与核物理, 2001, 25(1): 61–68
ZHENG Shuxin, CUI Yupeng, CHEN Huaibi, *et al.* High Energy Phys Nucl Phys, 2001, 25(1): 61–68
- 3 Westbrook E. Microwave Impedance Matching of Feed Waveguides to the Disk-Loaded Accelerator Structure Operating in the $2\pi/3$ Mode, SLAC-TN-63-103, 1963
- 4 James H B, Lloyd M Y. Possion Superfish. LANL, LA-UR-96-1834. Los Alamos, 2002
- 5 High Frequency Structure Simulator, Ansoft Corporation. <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>

Design of 2998 MHz accelerator coupler for SSRF

WANG Baoliang¹ PEI Shilun² ZHAO Minghua¹ HOU Mi²

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

²(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) adopts a 2998 MHz linac, which is in similar structure of the SLAC linac, but the dimensions are slightly different, hence the need of calculating the coupler dimensions. This paper focused on the simulation of the coupler. The simulation used three-frequency mode just like testing the accelerator in the laboratory. The physics design of 2998 MHz coupler was carried out using the Superfish code with two-dimensional finite difference method, and the HFSS code with the three-dimensional finite element method. The simulation result is greatly agreement with the experiment test.

Key words Accelerator, Coupler, Three-frequency mode, Physics design

CLC TN124