

X波段加速管中高阶模电场分布的测试*

肖利苓 梁宇中 童德春 张化一

(清华大学工程物理系 北京 100084)

摘要 介绍了一种用于测试 X 波段加速管中高阶模电场分布的笼子式微扰体的研制与标定. 该微型扰动体通过专门设计加工的固定装置, 在尼龙线表面平行沉积溅射数根金属丝膜制成. 利用一标准圆柱腔, 对笼子式扰动体的扰动因子进行了定标, 证实金属丝笼子式扰动体与同外形尺寸的金属圆筒相比, 具有高分辨率、高灵敏度的优点. 采用笼子式扰动体测试了一根长 30cm 的 X 波段加速管中 TM_{110} 模的纵向电场分布.

关键词 电子直线对撞机 高阶模 X 波段加速结构 微扰体 微扰法

1 引言

在 高能强流电子直线加速器中, 高阶模对束流品质的影响越来越引起人们的重视. 尤其对于 TeV 级的下一代电子直线对撞机(NLC)而言, 为追求高加速梯度, 主直线加速结构工作在 X 波段; 为达到实验物理所需的高亮度, 采用了多束团工作方式, 因而研究并抑制 X 波段 NLC 加速管中的高阶模就显得更为迫切^[1]. 其中对束团影响最大的是第一双极子模 TM_{110} . 近年来已发展了多种抑制高阶模尾场的加速结构, 如阻尼结构、失谐结构、阻尼失谐结构及扼流模结构等^[2]. 同时发展了多种计算加速结构中高阶模尾势的方法. 除此之外, 因为加速结构中高阶模产生的尾势与其 R/Q 成正比, 而 R/Q 由高阶模在加速管中的纵向电场分布决定, 所以也寄希望于用实验方法测试加速结构中高阶模的电参量. 本文拟研究 X 波段加速管中高阶模纵向电场分布的测试方法.

Slater 的谐振扰动法^[3]是测试加速管中电磁场分布的最基本方法: 即在加速管中插入一个线度远小于波长的微扰体, 那么谐振频率将发生改变, 其改变量与扰动点处的电磁场有关. 与主模不同, 在被测点高次模的场分量不止一个, 有时要测的纵向电场分量与其他电、磁场分量相比又较弱, 这样就要求微扰体一方面有足够的扰动量, 使测量不被噪声淹没(高灵敏度); 另一方面又要求微扰体对其他场分量的扰动尽可能小(高分辨率). 显然, 常规的金属针在高灵敏度和高分辨率两方面是相互矛盾的. 文献[4]采用 Ag_2O_3 介质

2000-01-17 收稿

* 国家自然科学基金资助(19775030)

筒为微扰体,测试 S 波段 36 个腔失谐加速结构中 TM_{110} 模的纵向电场分量. 介质扰动体不对磁场产生影响,但需选择很细的介质筒,以减小其对横向电场 E_{ϕ} 的扰动. 文献[5]采用不同形状的微扰体,如细金属丝、金属小球及薄金属圆片等沿相同路径分别扰动加速管中高阶模,用多次测量结果联立方程组求解各测试点的电磁场分量. 采用该法测试了 C 波段 28 个腔失谐加速结构中 TM_{110} 模的纵向电场分量. 该法对各微扰体的扰动因子要求精确定标,还要保证每次测量同步,这在 X 波段实现更为困难.

作者之一曾于 1987 年在 DESY 提出了金属丝笼子式扰动体^[6]. 笼子上的细金属丝只扰动 E_z 分量,而对 E_{ϕ} , E_r , H 影响很小,因此其分辨率很好;当笼子上的细金属丝密度增加到一定程度后,其对 E_z 的扰动量可提高到接近相同外形尺寸的空心金属管的水平,因而它兼具有高的分辨率及高的灵敏性. 该种扰动体已于 1987 年及 1994 年分别在 L 波段和 S 波段上得以实现,并精确测试了 L 波段超导腔和 S 波段圆柱腔中高阶模的电场分布^[7,8]. 本文拟制作适用于 X 波段的金属丝笼子式微扰体,并用其测试 X 波段加速管中最危险的第一双极子模 TM_{110} 的纵向电场分布.

2 微扰体的研制

2.1 微扰体的制作

X 波段 NLC 加速管采用盘荷波导加速结构,主直线段 $TM_{010}-2\pi/3$ 模的工作频率为 11.424GHz,最危险的第一双极子模是 TM_{110} ,其通带频率在 15GHz 到 16GHz 间,导波波长相 λ_g 不到 2cm. 微扰体的尺寸应远小于 λ_g ,使得微扰体的扰动近似于点的扰动. 鉴于 SLAC 的 NLC 及 KEK 的 JLC 加速管每段加速结构由多达 150—208 个加速腔组成,本文将 X 波段笼子式扰动体的尺寸初步定为笼子直径 D 在 0.5mm 左右,长度 l 约 2mm,金属丝直径 d 小于 0.1mm.

在尼龙拉线上平行地镀数根金属丝膜,制成 X 波段的笼子扰动体. 由于是在拉线柱面上直接成型的,故微扰体不存在为支撑金属丝而带来的附加扰动量,如图 1 所示. 文献[9]曾采用镀膜法制作金属筒扰动体,用于测试 X 波段加速管中主模 TM_{010} 的电场分布. 为了测量高阶模,用镀膜法制作笼子式扰动体,这对制作工艺提出更高的要求,金属丝需粗细一致,间隔均匀且与柱面中心轴线严格平行. 为此专门设计了一个固定装置,如图 2 所示. 将尼龙拉线绷紧固定在转动装置上. 转动装置的主体是一个金属圆柱,中心打孔作穿线用. 中部铣出一个平台,安放用于固定尼龙线并限定金属丝尺寸的定位模板. 镀膜时将掩膜板与待镀面靠紧,掩膜口与待镀柱面的中心轴线保持平行,掩膜宽度与长度分别为所镀金属丝的宽度 d 和长度 l . 主体两边各配有一个转盘和一个拉线定位套. 转动拉杆可带动两边的转盘和定位套同步转动,也即带动绷紧的尼龙线同步转动. 每镀一根丝,尼龙线均匀转动一个角度. 该装置可保证所镀的每根丝粗细

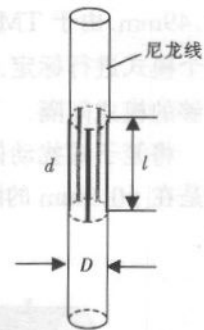


图 1 笼子示意图

相同,相互间平行且间距相等. 利用该装置,现已可以制出精度较高,重复性较好的笼子扰动体.

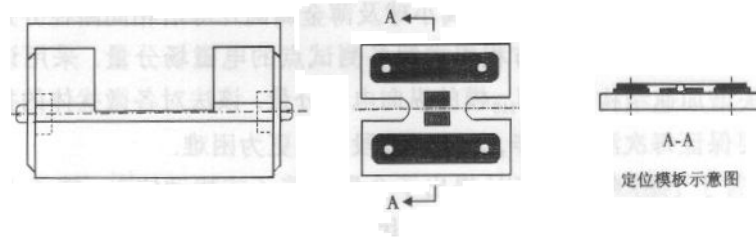


图 2 镀膜装置示意图

尼龙拉线选用美国进口的钓鱼线,直径为 0.52mm. 在目前能找到的同尺寸的拉线材料中,该钓鱼线表面光滑、均匀、易于镀膜,而且韧性强,损耗较小. 实际测量时,拉线所引起的扰动是均匀的,可作为一种本底被减去. 金属膜材料选用银,其导电率高、常温下在大气中性能稳定. 由于尼龙线不耐高温,选用了磁控溅射的方法进行镀膜. 每根金属丝的溅射时间约 3 分钟,银膜厚度约为 7000Å.

2.2 微扰体的标定

微扰体在腔中引起的频偏与谐振腔场强的关系式为

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{W} \left[\epsilon_0 (K_1 E_{\parallel}^2 + K_2 E_{\perp}^2) - \frac{1}{2} \mu_0 (K_3 H_{\perp}^2 + K_4 H_{\parallel}^2) \right], \quad (1)$$

式中 f 是微扰前谐振腔的频率, Δf 是扰动后谐振腔的频偏 ($f - f'$); W 是谐振腔的储能; E_{\parallel} (E_{\perp}), H_{\parallel} (H_{\perp}) 分别是微扰点处平行(垂直)于扰动体轴线的电场和磁场; K_i [$i = 1, 2, 3, 4$] 是微扰体的扰动因子,与微扰体的形状、尺寸及材料特性有关. 定义 K_i/K_1 [$i = 2, 3, 4$] 为微扰体的分辨率. 如果微扰体的分辨率足够高,即 K_i/K_1 [$i = 2, 3, 4$] 足够小,则该微扰体对频率的扰动主要是由纵向电场引起.

这样加速管中模式的纵向电场很容易被测出. 笼子式微扰体的分辨率是用实验方法标定,为此,设计了一个 X 波段定标腔,其直径及长度分别为 $2R = 21.64\text{mm}$, $L = 17.49\text{mm}$. 由于 TM_{010} 和 TE_{111} 在某些特定位置只存在电场或磁场的某个分量,故选用这两个模式进行标定. 定标腔 TM_{010} 和 TE_{111} 的谐振频率分别为 13GHz 和 12.23GHz,具有足够的模式间隔.

将笼子式扰动体和一个标准金属小球分别按图 3 所示位置放置在定标腔中. 金属小球是在 $\phi 0.9\text{mm}$ 的陶磁球上镀金属膜制成,以避免直接选用金属球造成微扰体重力下垂.

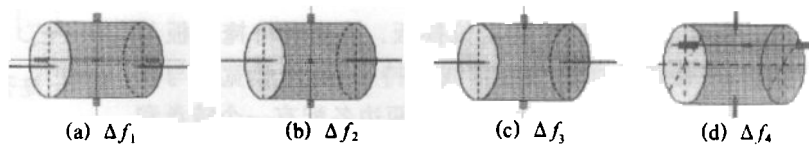


图 3 微扰体标定时激励及拉线方式示意图

假设金属丝笼子与金属球的扰动因子分别是 K_i 和 K_{0i} ;各自仅扰动一个场分量 $E_{\perp}, H_{\parallel}, H_{\perp}$ 时,它们在腔中引起的频偏分别为 $\Delta f_i, \Delta f_{0i}$;微扰前相应腔的谐振频率为 f_i, f_{0i} (由于牵动两个微扰体的拉线可能不同,扰动不同场分量时牵动微扰体的拉线在腔中的摆放位置不同,故 f_i 与 f_{0i} 之间均可能不相同).标准金属小球的扰动因子具有 $K_{01} = K_{02} = K_{03} = K_{04}$ 的关系,且采用同一定标腔,腔中储能是固定的.忽略微扰体对腔中场的影响,则笼子式扰动体的分辨率 K_i/K_1 可由下式计算:

$$\frac{K_i}{K_1} = \frac{\Delta f_i}{\Delta f_1} \cdot \frac{\Delta f_{01}}{\Delta f_{0i}} \cdot \frac{f_1}{f_i} \cdot \frac{f_{0i}}{f_{01}}, \quad i = 2, 3, 4 \quad (2)$$

实验得知:当金属丝的根数大于6时,其扰动量接近饱和.为比较,在同样的尼龙拉线上镀了2mm长的圆筒.金属丝笼子与金属圆筒相比,其对横向电场(主要是 E_{\perp})的扰动大大减小.当金属丝直径小于0.1mm时,其分辨率 $K_2/K_1 < 0.5\%$;而同尺寸的金属圆筒其相应的分辨率 K_2/K_1 约为2.5%.表1给出一典型尺寸的金属丝笼子及同外形尺寸的金属圆筒分辨率的测试结果.同组数据的测试中温度认为不变.

表1 银笼子与银圆筒分辨率的测试结果($\phi 0.52\text{mm}, L = 2\text{mm}$)

i	金属小球($\phi 0.9\text{mm}$)		银笼子($d = 0.09\text{mm}, N = 7$)			银圆筒		K_i/K_1
	f_{0i}/GHz	$\Delta f_{0i}/\text{MHz}$	f_i/GHz	$\Delta f_i/\text{MHz}$	K_i/K_1	f_i/GHz	$\Delta f_i/\text{MHz}$	
1	12.9843	5.57	12.9356	43.6	—	12.9426	43.0	—
2	12.9803	5.35	12.9713	0.2	0.48%	12.9656	1.1	2.7%
3	12.9803	0.50	12.9713	<0.1	<2.6%	12.9656	<0.	<2.6%
4	12.1846	0.90	12.1811	<0.1	<1.4%	12.1855	<0.1	<1.4%

测量仪器采用 HP83620A 扫频源和 HP8757D 标量网络分析仪.仪器的频率最小分辨率是1kHz,测试装置的系统频率误差在100kHz内.两种微扰体对磁场的扰动均非常小,很难精确测出相应的 H_{\parallel}, H_{\perp} 的扰动频偏.因此,表中给出估算值<100kHz.

另外,同外形尺寸的金屬薄圆筒对电场的纵向扰动略小于相应的金属丝笼子,可能的原因是后者实际长度稍短于前者,但明显的是笼子式扰动体对电场的横向扰动量大大降低,这主要是金属丝切断 E_{\perp} ,使之不受扰动.

3 场分布的测试

3.1 不同分辨率的微扰体测试结果

制得的笼子式扰动体用于测试 X 波段加速管中 TM_{110} 模的纵向电场分布.加速管由日本 KEK 提供,是一根常阻抗均匀加速管, $\text{TM}_{010} - 2\pi/3$ 模的工作频率为 11.424GHz.管长 30cm,含 32 个均匀腔和输入输出耦合器.腔半径 10.802mm,束流孔半径为 4.1987mm,腔长 8.7474mm,膜片厚 2mm.为比较不同分辨率的微扰体对测试结果的影响,首先测试 4 个整腔电壁结尾时 TM_{110} 模的纵向电场分布,采用探针偏心激励和检测.微扰体距腔中心轴线 3.2mm.测量系统见图 4.利用网络分析仪自动寻峰功能,记录微扰

体在不同位置时,模式的谐振频率. 系统的测量噪声约 100kHz. 测量步长 0.1mm. 但实际移动距离是计算机中标称距离的 1.62 倍.

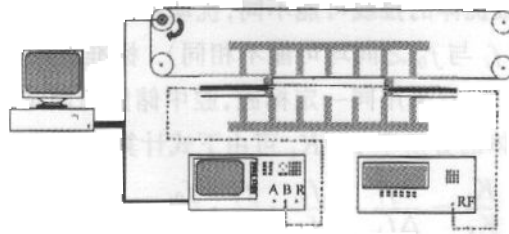


图 4 测量系统示意图

图 5 给出 4 个整腔电壁结尾时 TM_{110} 模的纵向电场分布的曲线. 图 5(a)是由 UR-MELT 计算得到的曲线. 图 5(b)是低分辨率的微扰体测得的结果, 由于未加限位模板, 所镀的金属丝较宽, 而且数根金属丝重叠, 制作的笼子近似于圆筒. 图 5(c)是表 1 所列的高分辨率的微扰体测试结果. 显然, 所制的高分辨率的笼子式扰动体的测试结果更能反映管中的真实场型, 因为它对其它场分量的扰动可忽略.

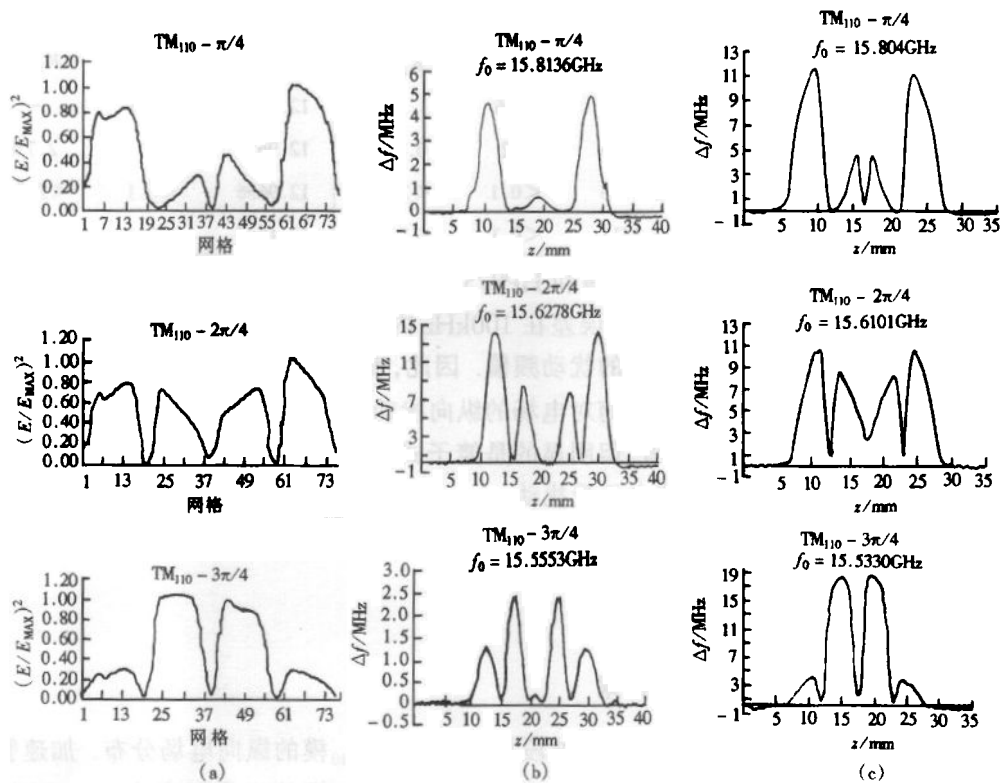


图 5 4 个整腔电壁结尾 TM_{110} 模的场分布

(a) URMELT 计算结果; (b) 低分辨率笼子测试结果 ($T=23^\circ$); (c) 高分辨率笼子测试结果 ($T=26^\circ$)

3.2 30cm长 X波段加速管中 TM_{110} 模的纵向电场分布测试

用表1所列的银笼子微扰体对30cm长X波段加速管中 TM_{110} 模的纵向电场分布进行测试. 为便于比较, 本文对32个整腔电壁结尾时 TM_{110} 模的 $8\pi/32, 16\pi/32, 24\pi/32$ 这3个典型模式的场分布进行测量.

由于所选微扰体的扰动量在32个整腔中约2MHz, 远高于系统的噪声. 测量频宽定为3MHz, 用401个光标点读数, 读数误差约7kHz, 远小于系统噪声. 测量步长0.1mm, 30cm长加速管测试时间为6分钟. 温度变化忽略.

图6是 $8\pi/32, 16\pi/32$ 两个模式的纵向电场分布. 从图6(a)可清楚地看出 $8\pi/32$ 模的场分布以4个腔为一个周期, 共8个周期, 每4个腔的场分布与URMELT计算的 $\pi/4$ 模场分布相符. 图6(b)的 $16\pi/32$ 模的场分布在加速管中间与理论计算的 $2\pi/4$ 模场型相近, 但越向两端场型差异越大. 改善两侧偏心探针的对中及渔线的定位精度, 测试结果无变化, 其中原因还待分析. 而对于 $24\pi/32$ 模, 用同样的银笼子扰动体无法测得其场型. 因为该模式与邻近的 $25\pi/32$ 模的模式间隔只有4.2MHz, 而扰动量就有2.5MHz, 测试中两个模式重叠. 在实际的X波段NLC和JLC失谐加速结构中, 每段加速管由多达150—208个腔组成, 模式重叠问题更严重. 为精确测试管中 TM_{110} 模, 还需针对待测的模式, 优化微扰体尺寸, 减小扰动量, 提高分辨率, 仪器的测试精度也需提高.

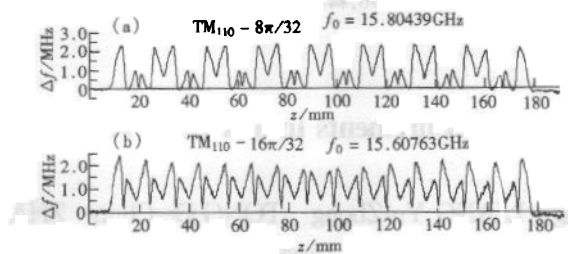


图6 32个整腔电壁结尾 TM_{110} 模的场分布($T=27^\circ$)

4 结语

采用磁控溅射方法在尼龙线上镀银金属膜制作了X波段金属丝笼子微扰体. 通过改进镀膜装置及镀膜材料, 现可制得性能稳定、重复性好、尺寸较准确的金属丝笼子. 典型尺寸是 $D=0.52\text{mm}, l=2\text{mm}, d<0.1\text{mm}, N=7$, 测得的分辨率 $K_2/K_1<3\%$, 其中 $K_2/K_1<0.5\%$. 另外, 在测试中注意拉线装置的设计, 减小其对微扰体的摩擦, 可使微扰体反复使用多次. 利用制成的金属丝笼子作微扰体测得一根X波段加速管中 TM_{110} 模纵向电场的分布, 测试结果与URMELT的计算结果较接近. 从测试结果可看出笼子型扰动体具有高的分辨率及高的灵敏度, 适合测试加速管中的高阶模的纵向电场分布.

本工作尚是开端, 用于实际的NLC/JLC失谐加速结构中高阶模的测试, 笼子的尺寸还需优化, 包括拉线材料的选择. 测试过程中温度控制、拉线的定位装置及探针对中误差

对测试结果的影响也需进一步分析. 我们最终目的是要将其用于 X 波段 NLC/JLC 长腔链中高阶模场分布的测试.

作者对顾若飞在工作初期参与做了许多实验工作、胡绍光和陈德庆帮助加工设计镀膜装置、KEK 为本实验提供 X 波段的加速管及 KEK 的 Toshiyasu Higo 博士的有益讨论表示感谢.

参考文献 (References)

- 1 Siemann R H. Linear Collider Research and Development. In: Proc. of 1994 Int. Linac Conf. Tsukuba Japan, 1994. 24
- 2 Higo T. KEK Preprint 94-88, Sep. 1994
- 3 Maier L C, Slater J C. J. Appl. Phys., 1952, 23:68
- 4 Muller M F O et al. Measurements and Numerical Calculations on Higher-Order-Mode-Dampers within a Stack of 36 Detuned S-Band-Cells. In: Proc. of the XVIIIth Int. Linac Conf. Geneva Switzerland, 1996. 713
- 5 Yamamoto M. KEK Report 94-9, Feb. 1995
- 6 TONG De-Chun. DESY M-87-06
- 7 TONG De-Chun. DESY M-87-05
- 8 TONG De-Chun et al. Atomic Energy Science And Technology, 1994, 28(2):97 (in Chinese)
(童德春等. 原子能科学与技术, 1994, 28(2):97)
- 9 Matthews P J et al. IEEE Trans. on MTT, 1996, 44(8):1401

Higher Order Mode Measurements in a X-Band Accelerating Structure

XIAO Li-Ling LIANG Yu-Zhong TONG De-Chun ZHANG Hua-Yi

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A metallic cage made by sputtering silver film onto a thin nylon thread through a specially designed fixture is used as perturbing object to measure the higher modes in a X-band accelerating structure. The fabrication and calibration of the cage are described in this paper. It is found that this type of perturbation object has the advantages of high sensitivity and high resolution. Using the cage as bead, the longitudinal electric fields of TM_{110} mode in a X-band 30cm structure are obtained with bead pull measurements.

Key words electron linac collider, higher order mode, X-band accelerating structure, perturbing object, bead pull measurements

Received 17 January 2000

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19775030)