

文章编号: 1001-4322(2008)10-1671-04

# 横向行波偏转结构中电磁场分布 及腔间耦合系数的理论研究\*

张敬如<sup>1,2</sup>, 戴建枰<sup>1</sup>, 侯 汨<sup>1</sup>, 裴国玺<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 模拟分析了横向行波偏转结构中传播的  $HEM_{11}$  波的特性, 并与加速模式  $TM_{01}$  进行了比较。设计并加工完成了该偏转结构的实验腔, 用谐振微扰法测出了中间腔的横向场分布曲线, 并与 HFSS 模拟结果进行了比较, 模拟结果和测试结果一致, 其横向场的最大值在偏离轴心径向的中间位置。用 HFSS 模拟了腔的色散特性, 对有稳定孔和没有稳定孔的情况进行了比较, 用谐振法对实验腔的色散特性进行了测试, 测试结果和模拟结果一致。通过对等梯度偏转结构等效电路的简化, 给出了等阻抗结构的等效电路, 定性分析了此偏转结构的腔间耦合情况, 计算了腔间耦合系数, 模拟结果和测试结果一致。

**关键词:** 高功率微波; 横向场分布; 横向偏转结构; 等效电路模型; 耦合系数

**中图分类号:** TN816; TN015 **文献标志码:** A

短脉冲束团长度的测量传统上采用时间分析的方法<sup>[1]</sup>, 但随着自由电子激光(FEL)、能量回收型光源(ERL)以及国际直线对撞机(ILC)的发展, 束团长度被压缩到了 fs 量级, 这使得超短电子束团长度的测量成为新的技术难点, 也成为当前国际加速器领域的研究热点。对于超短束团而言, 这种时域的测量方法由于测量原理和观察机制的限制, 已远远不能满足实时、快速、多参数测量的要求。横向偏转腔法是被实验证实了的可靠的测量超短束团长度的一种测量方法<sup>[2-3]</sup>。在这种测量方法中, 横向偏转结构是其中的一个重要器件, 其加工调试的优劣将直接影响束流的偏转效率及测量精度。本文模拟分析了横向行波偏转结构中电磁场的分布及其腔间耦合情况。

## 1 横向偏转结构中的场分布及其色散特性

本文所研究偏转结构的工作频率选择为国内直线加速器的常用频率 2 856 MHz, 它是工作于行波状态的返波型盘荷波导结构, 腔间相移为  $2\pi/3$ , 结构中的工作模式是  $HEM_{11}$  模。

### 1.1 $HEM_{11}$ 波

$HEM_{11}$ <sup>[4]</sup> 是一种混合模式电磁波, 在束流的传播方向上, 既有电场又有磁场的存在。它是在盘荷波导结构中激励起的非旋转对称波, 它的场与辐角有关。 $HEM_{11}$  实际上是  $TE_{11}$  和  $TM_{11}$  两种波的混合波, 因此有时又称作  $EH_{11}$  波。 $HEM_{11}$  波虽然是由  $TE_{11}$  和  $TM_{11}$  波叠加构成, 但它们之间是互相耦合的, 在盘荷波导中不能单独激励、单独传播<sup>[5]</sup>。为了使粒子与  $HEM_{11}$  波能够有效的作用,  $HEM_{11}$  波的相速  $v_p$  应接近光速  $c$ 。当  $v_p = c$  时, 它的基波场分量在圆柱坐标系中的表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} E_z = E_0 kr \cos\theta \\ E_r = E_0 \left[ \left( \frac{kr}{2} \right)^2 + \left( \frac{ka}{2} \right)^2 \right] \cos\theta \\ E_\theta = E_0 \left[ \left( \frac{kr}{2} \right)^2 - \left( \frac{ka}{2} \right)^2 \right] \sin\theta \\ Z_0 H_z = -E_0 kr \sin\theta \\ Z_0 H_r = -E_0 \left[ \left( \frac{kr}{2} \right)^2 - \left( \frac{ka}{2} \right)^2 + 1 \right] \sin\theta \\ Z_0 H_\theta = E_0 \left[ \left( \frac{kr}{2} \right)^2 + \left( \frac{ka}{2} \right)^2 - 1 \right] \cos\theta \end{array} \right. \quad (1)$$

\* 收稿日期: 2008-02-06; 修订日期: 2008-07-29

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB713606)

作者简介: 张敬如(1973—), 女, 博士, 主要从事加速器技术、微波技术领域研究; zhangjr@ihep.ac.cn。

式中:  $E_r, E_\theta, E_z$  表示电场矢量的分量;  $H_r, H_\theta, H_z$  表示磁场矢量的分量;  $Z_0$  为自由空间波阻抗;  $E_0$  为等效的横向偏转场,  $E_0 = (1/k)(\partial E_z / \partial x)$ ,  $k$  为自由空间波数;  $a$  为束流孔径。表达式中省略了时间因子  $\exp[j(\beta_0 z - \omega t)]$ 。

## 1.2 腔内场的形态及其横向场分布模拟和测试值的比较

图 1 所示为偏转结构中  $TM_{01}$  和  $HEM_{11}$  波横截面的电场分布图, 可以看到由于  $TM_{01}$  模是旋转对称的, 在轴心处横向场梯度为零, 所以要用  $TM_{01}$  模式进行偏转只能让粒子偏离轴心, 但是使用这种模式偏转的同时还会给粒子带来加速或减速。  $HEM_{11}$  模具有极化特性, 纵向电场的大小和径向距离成正比, 可以产生很强的近似一致的偏转, 这也是选取  $HEM_{11}$  模作为偏转模式的主要原因。在  $HEM_{11}$  模工作在 2 856 MHz 的偏转结构中, 工作在腔间相移  $120^\circ$  的  $TM_{01}$  模的本征频率为 1 400 MHz。腔内  $HEM_{11}$  波  $2\pi/3$  模场的形态如图 2 所示, 可以看到一个周期内, 在某个腔内可以产生横向偏转场的最大值, 紧接着在下一个腔中产生符号相反的最大横向偏转场, 而在第 3 个腔中只有纵向场。结合式(1)可以看到, 其纵向场分量从轴心开始与径向位置成正比, 跨过轴时改变符号, 并且在轴上的值为 0。

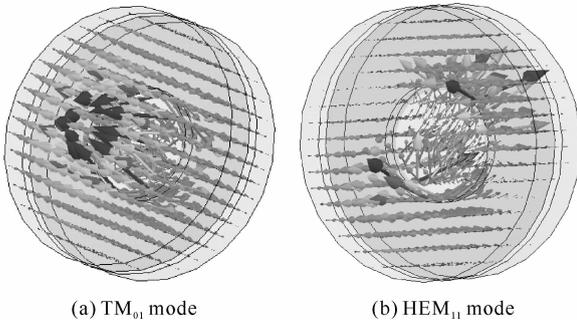


Fig. 1 Electric field distribution of  $TM_{01}$  and  $HEM_{11}$  mode at the cross section of the deflector

图 1 偏转结构中  $TM_{01}$  和  $HEM_{11}$  模式的横截面电场分布图

在设计并加工了该结构的实验腔后, 我们对其中的横向场分布进行了测试。横向场分布的测试方法采用谐振微扰技术, 测试示意图如图 3 所示, 中间有 5 个整腔, 两端各有一个半腔, 在中间腔的横向中心打孔。通过实验选取了适当的介质球作为扰体。扰体选取的原则是既保证能看到频率的变化, 又保证只对场产生微扰。图 4 分别给出了在  $0^\circ$  ( $180^\circ$ ),  $45^\circ$  ( $225^\circ$ ),  $90^\circ$  ( $270^\circ$ ) (见图 3) 3 个方向场分布测试值和模拟值的比较结果。图中横坐标是径向归一化值, 模拟结果的纵坐标为场强平方的归一化值, 测试结果为微扰引起频偏的归一化值, 其中, 由微扰引起的频偏与场强的平方是成正比的, 两者都归一化后应该得到相同的结果, 这与图 4 得到的结果完全一致。

## 1.3 横向偏转结构的色散特性

由于  $HEM_{11}$  模式具有极化简并现象, 在  $HEM_{11}$  波的传输过程中, 波导中小的不均匀性可能导致场极化方向的旋转, 使偏转效率降低, 所以在设计偏转结构的过程中必须设计模式稳定器来稳定其中的一个模式。在此偏转结构中, 采用开孔的方式来达到模式稳定的目的。在  $\theta=0^\circ$  的方向,  $E_\theta=0$ , 在相同  $r$  处  $E_r$  最大, 横向电场合成的方向在径向, 将这个方向 ( $\theta=0^\circ$ ) 定义为场极化方向。通过波导轴和  $\theta=0^\circ$  方向的平面定义为场极化平面。将稳定孔连线和极化方向相同的波定义为水平极化波, 稳定孔连线和极化方向垂直的波定义为垂直极化波。通过调整输入耦合器和两个稳定孔连线的方向, 将平行极化波抑制掉, 使此偏转结构工作在  $HEM_{11}$  的垂直极化模式。对垂直极化模式模拟和测试得到的色散特性如表 1 所示, 同时, 表 1 中还给出了没有稳定孔时, 在其它结构尺寸相同的情况下的色散特性的模拟值。可以看到, 在腔间相移为  $2\pi/3$  时, 有抑制孔和没有抑制孔的频率相差 11.6 MHz。

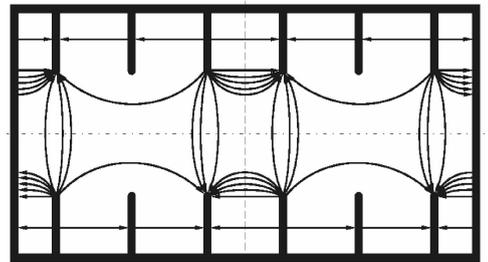


Fig. 2 Time snap-shot of the field distribution of the  $HEM_{11}$  mode with a  $2\pi/3$  cell length

图 2 腔内  $HEM_{11}$  波  $2\pi/3$  模场的瞬态图

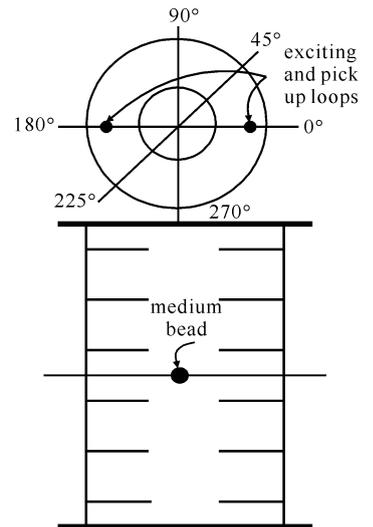


Fig. 3 Schematic diagram of transverse field distribution measurement based on the Slater perturbation method

图 3 谐振微扰法测横向场分布的示意图

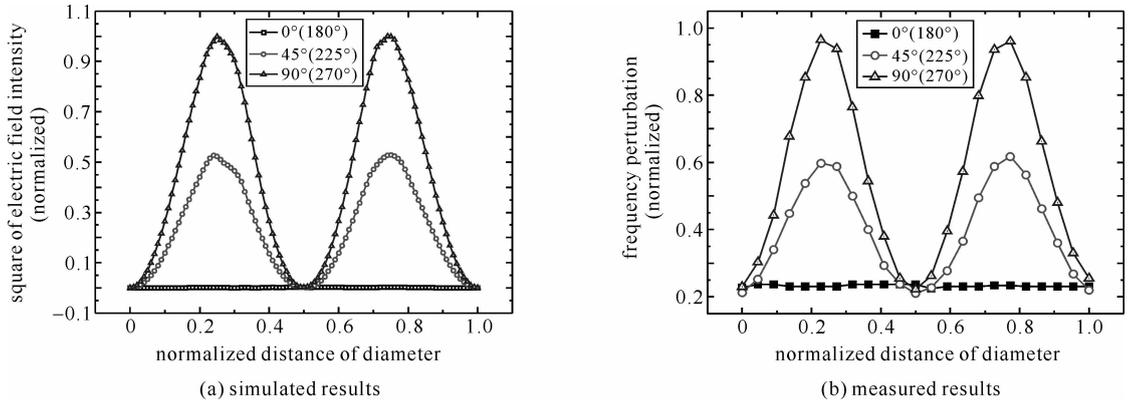


Fig. 4 Simulated results and measured ones of the transverse field distribution

图 4 横向场分布的模拟结果和测试结果

表 1 偏转结构的色散特性

Table 1 Dispersive characteristic of the deflector

operation mode	frequency/MHz		
	simulated		measured
	with suppressing holes	without suppressing holes	with suppressing holes
0	3 103.3	3 106.1	3 103.60
$\pi/6$	2 992.2	3 001.5	2 991.62
$\pi/3$	2 918.2	2 928.2	2 918.80
$\pi/2$	2 876.2	2 887.9	2 878.20
$2\pi/3$	2 855.9	2 867.5	2 857.32
$5\pi/6$	2 845.9	2 858.4	2 848.01
$\pi$	2 843.3	2 855.9	2 845.30

## 2 横向偏转结构的腔间耦合分析

文献[6]给出了等梯度偏转结构耦合腔链的等效电路,等阻抗结构是等梯度结构的简化,简化后偏转结构耦合腔链的等效电路如图 5 所示。在等效电路中,耦合腔链的每个腔都可以等效为一个 LC 串联谐振回路,串联支路( $L_1, C_1, r_1$ )代表  $TM_{11}$  电磁场。一方面,由磁场引起的腔间耦合由互感  $M$  表示;另一方面,由  $TE_{11}$  电磁场引起的谐振式耦合由并联支路( $L_2, C_2, r_2$ )表示。腔间的激励由串联支路中的复数  $\dot{E}$  表示, $\dot{I}$  是以复数表示的回路电流。通过以上分析,可以看到偏转结构的腔间耦合比较复杂,它与加速结构不同,加速结构的腔间耦合主要是电耦合,偏转结构中既有电耦合,又有磁耦合,并且磁耦合占主导地位,因此,此结构中场的相速和群速相反,偏转结构工作于返波状态。

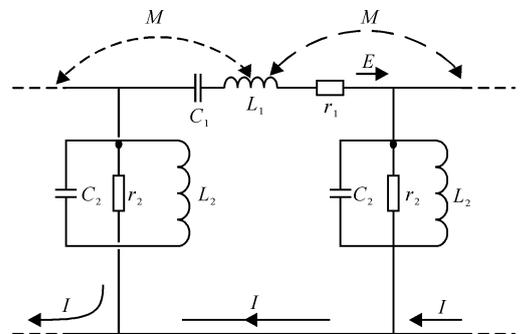


Fig. 5 Equivalent circuit model of the deflector

图 5 等阻抗偏转结构的等效电路

工作在驻波状态的均匀盘和波导系统,其腔间耦合系数  $K$  可表示为<sup>[7]</sup>

$$K = \omega_{B.W.} / \omega \tag{2}$$

式中: $\omega_{B.W.}$  指 0 模和  $\pi$  模的频率差; $\omega$  表示工作频率。可以通过色散特性得到其腔间耦合系数,结合表 1 计算得到偏转结构的腔间耦合系数,如表 2 所示。

可以看到,模拟和实验测试结果是一致的,且偏转结构腔与腔之间的耦合较强。盘片上的抑制孔增加了腔间的耦合,结合场分布图可以知道,抑制孔主要增加

表 2 偏转结构腔间耦合系数

Table 2 Coupling factor of the deflector

	coupling factor	
	simulated	measured
with suppressing holes	0.091 00	0.090 40
without suppressing holes	0.086 94	

的是磁耦合。

### 3 结 论

通过横向场分布的测量可以看到垂直偏转场的最大值在和抑制孔连线的垂直方向,为保证偏转效率的最高,可以将耦合器的方向调整到和小孔连线方向垂直的位置。通过对偏转腔腔间耦合的等效电路分析及腔间耦合系数的计算,得到了偏转结构的腔间耦合系数,为偏转结构的调配起到了参考作用。

#### 参考文献:

- [1] 崔艳艳,赵风利,耿哲峤,等. 倍频腔法测 BEPCII 直线加速器的束团长度[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(12):1901-1904. (Cui Y Y, Zhao F L, Geng Z Q, et al. Bunch length measurement in BEPCII linac by harmonic method. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(12):1901-1904)
- [2] Akre R, Bentson L, Emma P, et al. Bunch length measurements using a transverse RF deflecting structure in the SLAC linac[R]. SLAC-PUB-9241, 2002.
- [3] Bolzmann A. Investigation of the longitudinal charge distribution of electron bunches at the VUV-FEL using the transverse deflecting cavity LOLA[D]. Department of Physics of Bayerische Julius-Maximilians University Wurzburg. 2005.
- [4] 姚充国. 电子直线加速器[M]. 北京:科学出版社, 1986. (Yao C G. Electron linac. Beijing: Science Press, 1986)
- [5] 姚充国,罗应雄. 混合模式电磁波色散特性的计算[J]. 原子能科学技术, 1984, (5):602-611. (Yao C G, Luo Y X. Calculation the dispersion characteristic of hybrid mode electromagnetic. *Atomic Energy Science and Technology*, 1984, (5):602-611)
- [6] Kaljuzhny V E, Sobenin N P, Milovanov O S. Equivalent scheme and parameters of disk loaded waveguide at dipole mode[C]//Proc of the fifth European Particle Accelerator Conference (EPAC'96). 1996, **3**:2044-2046.
- [7] 边晓浩,陈怀璧,郑署昕. 双周期加速结构腔间耦合系数的模拟计算[J]. 高能物理与核物理, 2005, **29**(9):900-901. (Bian X H, Chen H B, Zheng S X. Calculation of coupling factor for double-period accelerating structure. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2005, **29**(9):900-901)

## Theoretical research on field distribution and coupling between cavities of RF deflector

ZHANG Jing-ru<sup>1,2</sup>, DAI Jian-ping<sup>1</sup>, HOU Mi<sup>1</sup>, PEI Guo-xi<sup>1</sup>

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** HEM<sub>11</sub> mode in a transverse deflecting structure was simulated, analyzed and compared with TM<sub>01</sub> mode. A prototype of this deflecting structure has been made, whose transverse field distribution is simulated with Ansoft HFSS. Perturbation method is used to measure the transverse field distribution with six cavities. The test results accord with the simulated ones. Dispersion curve is also simulated with Ansoft HFSS and it is consistent with the measured one. The equivalent circuit model of the deflector is given. The intercell coupling factors are calculated and the measured results accord with the simulated ones.

**Key words:** High power microwave; Transverse field distribution; RF deflector; Equivalent circuit model; Coupling factor