

文章编号: 1001-4322(2001)02-0219-04

# 盘荷波导栏片圆弧对频率和尾场的影响\*

王兰法<sup>1</sup>, 候汨<sup>1</sup>, 张闯<sup>1</sup>, 邢庆子<sup>2</sup>, 林郁正<sup>2</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100039; 2. 清华大学工程物理系, 北京 100084)

**摘要:** 利用变分法详尽地研究了 X-波段盘荷波导中栏片圆弧对频率和尾场的影响, 比较了不同栏片形状下加速模和横向模的频率与尾场。研究表明栏片形状对频率的影响较小, 但对尾场的影响较大。在圆弧栏片和直边栏片两种情形下, 最危险 EH<sub>16</sub> 模的尾场相差超过 15%, 因此栏片圆弧的作用是不能忽略的。

**关键词:** 盘荷波导; 栏片; 尾场; 直线加速器; 横向模

**中图分类号:** TL53 **文献标识码:** A

盘荷波导是直线加速器中最常用的加速结构, 国内外加速器工作者都对该结构做了大量的研究。国际上常用 KN7C<sup>[1]</sup>和 TRANSVRS<sup>[2]</sup>两个程序来分别计算纵向模和横向模, 而这两个程序又都是利用模匹配法, 对结构作了近似处理, 即将栏片的圆弧看作直线<sup>[3-6]</sup>, 因此不能考虑真实的结构; 日本的 Masao Nakamura<sup>[7]</sup>和国内叶宣化等<sup>[8]</sup>利用变分法发展了考虑栏片圆弧的程序, 但只能用来计算加速模。随着强流加速器技术的发展, 纵向的束流负载效应和横向不稳定性越来越受到重视。虽然 SUPERFISH<sup>[9]</sup>、URMELT<sup>[10]</sup>和MAFIA<sup>[11]</sup>程序都可考虑栏片的圆弧, 但这些程序在处理周期性结构时都存在一个严重的不足, 即不能给出任意相移对应的电磁场, 要研究各个模式对束流动力学的影响, 如直线对撞机中的束流崩溃效应, 需要研究每个同步模的场, 而同步模式的相移是各种各样的, 因此, 需要程序能够得到任意相移的场。为此作者发展了 LONGTRANSVRS<sup>[12]</sup>程序, 用来精确计算考虑盘荷波导栏片圆弧后任意角向分布和任意相移的所有模式, 并以此来研究栏片圆弧的影响。

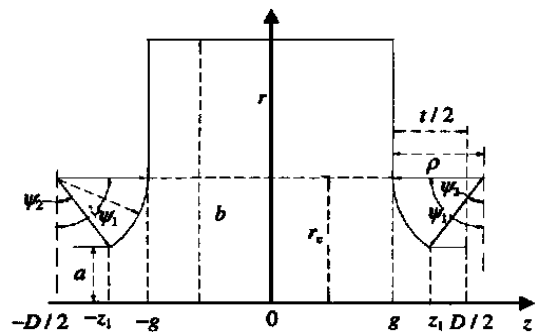
## 1 研究方法

文献[3-6]中将盘荷波导栏片的圆弧当作直边来处理, 这样就可将整个区域分为两个区域, 并利用模匹配法来求解结构电磁场。由于模匹配法本身方法所限制, 栏片的圆弧不能考虑。

为了考虑栏片的影响, 采用了变分法。在盘荷波导这样一个无耗、有界、无源的区域中泛函可选为

$$J(Z_0 H) = jk (Z_0 H)^* \times E \cdot ndS \quad (1)$$

式中,  $k = \omega/c$  是波数,  $\omega$  为角频率,  $Z_0$  为真空中的阻抗,  $H$  和  $E$  分别为磁场和电场。图 1 为盘荷波导剖面结构图, 我们将整个区域分为行波区 ( $r < r_c$ ) 和驻波区 ( $r > r_c$ )。为了快速地获得高精度的解, 我们选取了满足波动方程的解来作为变分问题的试探函数, 并且要求试探函数在行波区必须满足周期结构中的弗洛克条件, 详细推导见参考文献[12]。



disk thickness:  $t = 2(D/2 - g)$

flat land in disk hole:  $2\delta = 2(D/2 - Z_1)$

Fig. 1 Cross-section of one cell of disk-loaded waveguide

图 1 盘荷波导横截面图

## 2 盘片圆弧对加速模的影响

许多计算忽略了栏片的圆弧, 因此, 我们非常有兴趣来比较一下考虑栏片圆弧和不考虑栏片圆弧两

\* 收稿日期: 2000-10-17; 修订日期: 2001-01-10

作者简介: 王兰法(1966-), 男, 1997年于中国科学院高能物理研究所博士毕业, 1997年9月至1999年8月在清华大学博士后流动站从事科研工作, 目前在日本高能加速器研究机构(KEK)作博士后; 北京918信箱。

种情形的区别。以下一代直线对撞机(JLC/NLC)上 X-波段的加速结构为例,一个单元腔的长度为 8.7474mm,加速相位为 120°;加速模的频率为 11.424GHz,对于不同尺寸的盘片孔径、盘片厚度,可以调节腔的内直径 2b 来满足加速模的频率,因此,我们可以设计出很多种尺寸的结构,其加速模频率均为 11.424GHz。我们将束流孔看成直边,并设盘片孔径 a 等于束流管道中心到盘片底部的距离,图 2 给出了用 LONGTRANSVRS 程序计算不同结构尺寸时,盘片圆弧对 2π/3 模频率的影响。从图中可看出:盘片厚度一定时,盘片直边近似后加速模的频率  $f_{flat}$  随着盘片孔径的增大而线性减小,这是由于盘片孔径越大,盘片附近的电场越弱的缘故。同时,盘片越厚(即圆弧半径越大,  $\rho = t/2$ ),频率变化随盘片孔径变化越大,这是由于盘片越厚,这种形状近似引起的扰动也越大。由于盘片处电场较磁场弱,盘片直边近似使加速模频偏小。图 3 比较了不同结构尺寸时,考虑盘片圆弧和盘片圆弧直边近似两种情形下 2π/3 模的损失因子。由图可以看出盘片厚度固定时,随着 a 的增大,两种情形下损失因子间的差别会减小。损失因子的最大差别为 4%。

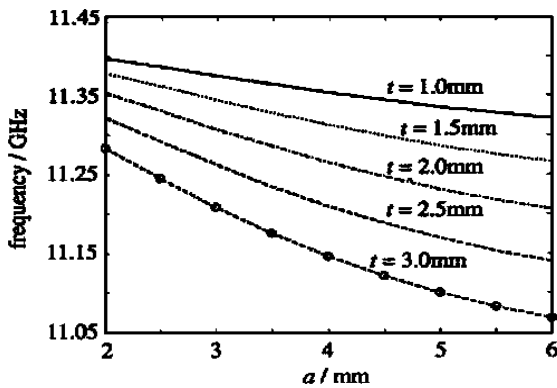


Fig. 2 Frequency of 2π/3 mode with flat edge approximation

图 2 盘片直边近似后 2π/3 模的频率

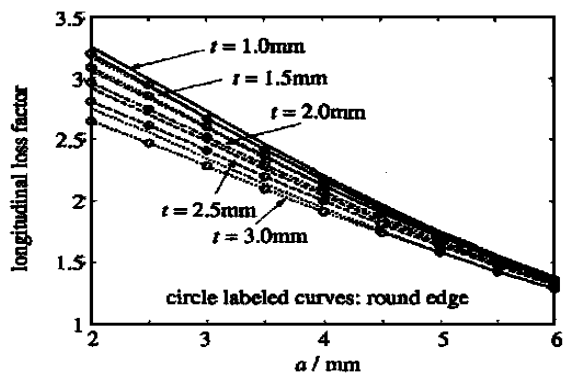


Fig. 3 Comparison of the longitudinal loss factor for round edge and flat edge cases

图 3 盘片取圆弧和直边两种情形下损失因子的比较

### 3 盘荷波导中栏片圆弧对横向尾场的影响

直线加速器中,为了克服束团横向发射度增长,要求加速结构的横向尾场要限制在一定的范围内,因此设计加速结构时,要精确计算结构的横向尾场,例如,下一代直线对撞机上 EH<sub>11</sub> 模的误差要求小于 4%。腔中横向尾场可以写作腔中所有模的总和

$$W_m(s) = \sum_n 2k_{mn} e^{-\frac{\omega_{mn}s}{2Q_{mn}c}} \sin\left(\frac{\omega_{mn}s}{c}\right) \quad (2)$$

表 1 盘片直边近似和考虑盘片圆弧两种情形下横向同步模频率与损失因子的比较

Table 1 Comparison of synchrotron frequency and transverse wakefield between flat edge and round beam hole structure

Mode	f /GHz		k / (V · pC <sup>-1</sup> · m)	
	flat edge	round edge	flat edge	round edge
HEM 11	17.78347	17.72507	737.8003	730.2723
HEM 12	21.02584	20.97909	7.8858	9.6676
HEM 13	25.86010	25.72866	466.4324	465.1911
HEM 14	31.10338	30.98147	39.8033	38.3565
HEM 15	32.83308	32.83792	68.3329	56.6132
HEM 16	36.48405	36.29512	1020.0518	886.4703
HEM 17	39.10258	38.98092	1.5527	3.2689
HEM 18	41.52120	41.39898	89.4264	65.6624

$$k_{mn} = \frac{m k_{mn}}{\omega_{mn} a^{2n}} \frac{|V_{mn}|^2}{4U_{mn}} = E_z(z, r = a) e^{ikz} dz \quad (3)$$

$U_{mn}$ 是腔的储能,  $\omega_{mn}$ 是第  $n$  个模的频率,  $Q_{mn}$ 是模品质因数,  $k_{mn}$ 是在  $r = a$  时计算的横向损失因子。

表 1 给出了盘荷波导栏片直边近似和考虑栏片圆弧后每个单元腔中前 8 个横向模的频率和损失因子。结构尺寸为  $t = 1\text{mm}$ ,  $D = 8\ 7474\text{mm}$ ,  $b = 10.1412\text{mm}$ ,  $a = 2\text{mm}$ ,  $\rho = 0.5\text{mm}$ ,  $\delta = 0\text{mm}$ 。由表 1 可看出:

(1) 在我们所研究的结构中, 最危险的横向模是  $\text{EH}_{16}$  模, 而不是通常人们认为的  $\text{EH}_{11}$  模, 这是最近在研究下一代直线对撞机的加速结构时, 人们才发现的, 因此, 在研究盘荷波导的横向动力学时, 至少要考虑  $\text{EH}_{11}$  和  $\text{EH}_{16}$  两个模。

(2) 盘片圆弧对最危险的横向  $\text{EH}_{16}$  模损失因子的影响为 15%, 这远远超过下一代直线对撞机对横向模精度 4% 的要求。图 4 给出了相应于表 1 的尾场, 由图可看出: 盘片的直边近似使尾场偏大。

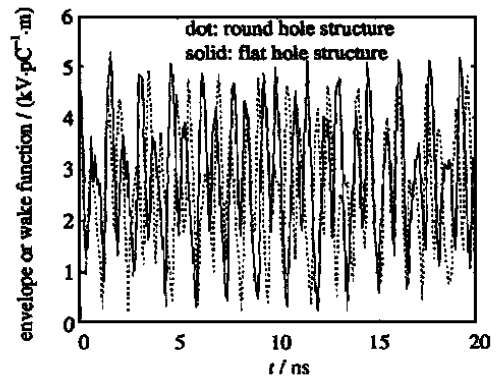


Fig. 4 Transverse wakefield of flat edge and round beam hole structure

图 4 盘片直边近似和考虑盘片圆弧两种情形下横向尾场

表 2 是盘片圆弧半径  $\rho$  取不同值时, 最危险的  $\text{HEM}_{11}$  和  $\text{HEM}_{16}$  模的相位、频率和损失因子。结构尺寸为  $t = 1\text{mm}$ ,  $D = 8\ 7474\text{mm}$ ,  $b = 10.1412\text{mm}$ ,  $a = 2\text{mm}$ ,  $\delta = 0.05\text{mm}$ 。盘片圆弧半径  $\rho$  对  $\text{HEM}_{11}$  模的影响不大, 而对  $\text{HEM}_{16}$  模的影响较大,  $\rho$  从 0.5mm 到 1.0mm, 损失因子变化了约 20%, 因此盘片圆弧的影响还是不能忽略的。

表 2 盘片圆弧半径取不同值时, 横向同步模相位、频率与损失因子的比较

Table 2 Comparison of synchrotron phase, frequency and transverse wakefield for different edge radius

$\rho/\text{mm}$		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
HEM 11	$\phi/\text{degree}$	186.196	186.061	185.935	185.810	185.685	185.558
	$f/\text{GHz}$	17.726	17.713	17.701	17.689	17.677	17.665
	$k/(\text{V} \cdot \text{pC}^{-1} \cdot \text{m})$	727.150	723.338	719.435	715.385	711.414	707.449
HEM 16	$\phi/\text{degree}$	381.283	380.877	380.489	380.104	379.721	379.345
	$f/\text{GHz}$	36.299	36.260	36.222	36.186	36.149	36.113
	$k/(\text{V} \cdot \text{pC}^{-1} \cdot \text{m})$	883.312	843.261	807.488	773.363	740.785	709.809

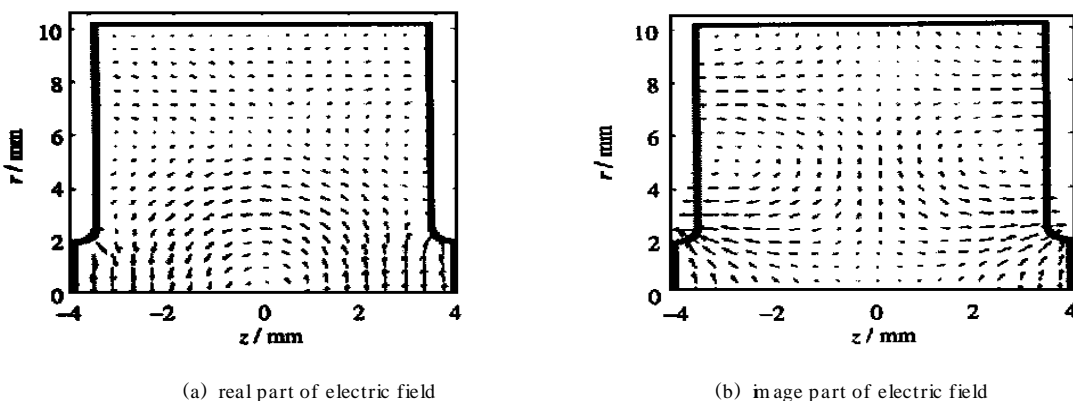


Fig. 5 Electric field of  $\text{EH}_{16}$  mode

图 5  $\text{EH}_{16}$  模的电场分布

图 5 是考虑了盘片圆弧后  $\text{EH}_{16}$  模的电场分布, 由图可见, 两个模的电场都有不为零的实部和虚部。利用 URM EL T 计算  $\text{EH}_{16}$  模的尾场时, 由于不能计算同步模, 只能近似取相移为  $\pi$  来近似, 这种近似会

带来较大的误差。例如,表 1 中考虑圆弧时  $\text{EH}_{16}$  模的同步相位为  $381.24^\circ$ ; 同步频率为  $36.295\text{GHz}$ , 损失因子为  $886.47\text{V}/(\text{pC}/\text{m})$ ; 而当  $\text{EH}_{16}$  模的相位为  $360^\circ$  时, 其频率为  $36.294\text{GHz}$ , 损失因子为  $755.00\text{V}/(\text{pC}/\text{m})$ 。虽然相位近似对频率的影响较小, 但对损失因子的影响却比较大, 误差达  $17.4\%$ 。

#### 4 结 论

圆弧对纵向模和横向模的影响, 研究表明盘片圆弧对频率的影响通常小于  $3\%$ , 对最危险  $\text{EH}_{16}$  模的尾场影响为  $15\%$ , 因此其效果是不能忽略的, 我们发展的 LONGTRAN SVRS 程序为精确研究盘荷波导结构提供了有力工具。

#### 参考文献:

- [1] Keil E. Disc-loaded deflecting waveguide[J]. *Nucl Instrum Methods*, 1972, **100**: 419-427.
- [2] Zotter B, Bane K. Transverse modes in periodic cylindrical cavities[R]. CERN ISR-TH, 1980, **80**(25): 1-6
- [3] Takao M, Higo T, Takata K. Evaluation of wake fields of disk loaded structure for Japan linear collider[R]. KEK Report, 1991, **91**(4): 1-23
- [4] Van Rienen U. High order mode analysis of tapered disc-load waveguides using the mode matching technique [J]. *Particle accelerators*, 1993, **41**: 173-201.
- [5] Bane K L F, Gluckstern R L. The transverse wakefield of a detuned X-band accelerator structure[J]. *Particle accelerators*, 1993, **42**(3-4): 123-169
- [6] Heifets S A, Kheifets S A. Longitudinal electromagnetic fields in an aperiodic structure[R]. SLAC-PUB, 1992, **5907**: 1-61.
- [7] Nakamura M. A computational method for disk-loaded waveguides with round disk-hole edges[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1968, **7**(3): 257-271.
- [8] 叶宣化, 周文振, 沈双林, 等. 变分法算电子直线加速器的盘荷波导尺寸及物理量[A]. 粒子加速器及其应用[C], 科学技术文献出版社重庆分社, 1980: 48-52  
[Ye X H, Zhou W Z, et al. Calculation of the rf quantities in disc-loaded waveguides using variational method. Particle accelerator and its application, Science Press in Chongqing, 1980, 48-52 ](in Chinese)
- [9] Menzel M T, Stokes H K. User's Guide for the POISSON/SUPERFISH Group of Codes[R]. LAUR-87-115, 1987.
- [10] Weiland T. URMEL and URMEL-T USER GUIDE[J]. DESY M-82-24, 1982
- [11] Weiland T. On the unique numerical solution of maxwellian eigenvalue problems in three dimensions[J]. DESY 84-111, 1984
- [12] 王兰法. 下一代直线对撞机尾场及其效应的研究[R]. 北京: 清华大学, 1999.  
[Wang L F. Study of the wakefield and its effects in next generation linear collider. Beijing: Tsinghua University, 1999. ](in Chinese)
- [13] 王兰法, 张 闯, 王书鸿, 等. 双束流激发的纵向尾场与纵向不稳定性研究[J]. 强激光与粒子束, 2000, **12**(4): 512-516  
[Wang L F, Zhang C, Wang S H, et al. Study of longitudinal wake field and longitudinal instability for the two counter-rotating beams. High power laser and particle beams, 2000, **12**(4): 512- 516 ](in Chinese)

### Study of the round edge disk hole's effects on the frequency and wakefield in disc structure

WANG Lan-fa<sup>1</sup>, HOU M i<sup>1</sup>, ZHANG Chuang<sup>1</sup>, XING Qing-zhi<sup>2</sup>, LI N Yu-zheng<sup>2</sup>

(1. Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, P. O. BOX 918, Beijing 100039, China;

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** The effects of the round edge beam hole on the frequency and wake field are studied using variational method, which allows for rounded iris disk hole without any approximation in shape treatment. The frequencies and wakefields of accelerating mode and dipole mode are studied for different edge radius cases, including the flat edge shape that is often used to approximately represent the actual structure geometry. The edge hole shape has weak effect on the frequency, but strong effect on the wakefield. The study shows that the amounts of wakefields are not precise enough with the assumption of the flat edge beam hole as of round edge. The shape assumption brings loss factor  $15\%$  error for the most dangerous  $\text{EH}_{16}$  mode.

**Key words** disk-loaded waveguides; iris; wakefield; transverse modes; round edge; loss factor