

# 双周期加速结构腔间耦合系数的模拟计算\*

边晓浩<sup>1)</sup> 陈怀璧 郑曙昕

(清华大学工程物理系 北京 100084)

**摘要** 在直线加速器加速管的设计中, 腔间耦合系数是一个关键参量, 它的误差是影响场分布误差的主要因素. 准确计算耦合系数, 对于腔间耦合孔几何参数的设计十分重要. 目前, 采用电磁场计算软件进行数值模拟是计算耦合系数的主要方法. 文献调研发现, 使用 MAFIA 程序计算耦合系数, 对于单周期的盘荷波导结构, 根据 MAFIA 程序内部电(磁)边界条件和周期性边界条件, 对应两者有行波模拟、驻波模拟两种方法计算色散曲线. 本文结合这两种方法, 对计算双周期加速结构耦合系数的方法进行了探索, 它们可得到相近的结果, 与实验测量值的差别小于 15%.

**关键词** 耦合系数 MAFIA 双周期结构 单周期结构

## 1 引言

耦合系数是直线加速器中影响加速管工作状态的一个关键的微波参量, 理论分析指出, 耦合系数  $K$  的误差直接线性变换到加速腔中场的振幅, 是影响场分布误差的主要因素. 在加速管的设计、加工中, 为达到满足要求的场分布, 必须调节腔间耦合孔的耦合系数. 目前经验性的调节过程一般要经历加工—测量—校正—加工—测量等往复循环的多次过程, 费时费力.

随着电磁场计算软件的迅速发展, 可以用计算机来模拟从而解决以上问题, 通过软件, 设计耦合孔的几何参数来得到所要求的耦合系数. MAFIA 是最常用的电磁场计算软件之一. 对于单周期的盘荷波导慢波结构, 使用 MAFIA, 目前有两种方法可以计算其色散特性及耦合系数: 一种是利用该程序的电(磁)边界条件, 模拟腔中的驻波模式<sup>[1]</sup>; 一种是利用该程序的周期性边界条件, 模拟腔中的行波模式<sup>[2, 3]</sup>. 两种方法的计算结果都与实验符合得很好. 双周期结构的一个周期内有两种腔型: 加速腔和耦合腔. 其模拟计算首先存在双腔调谐的问题, 相对于单周期结构比较复杂. 鉴于以上两种计算方法对于单周期结构的有效性, 对双周期结构的模拟计算进行了探索. 结果显示, 调谐

以后, 使用以上两种方法计算双周期结构的 0 模、 $\pi$  模和  $\pi/2$  模色散特性, 可以准确地求得腔间耦合系数, 因此能够很方便地进行耦合孔的设计.

## 2 方法

一个工作在驻波状态的均匀盘荷波导系统, 具有色散曲线(布里渊图), 即角频  $\omega$  与相位常数  $\beta$  之间的关系曲线, 表现为一系列分立的谐振点<sup>[4]</sup>.

谐振点的个数由耦合回路的个数  $N$  决定, 谐振角频为

$$\omega_q = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + K \cos \frac{q}{N}\pi}},$$

式中  $\omega_0$  为单回路(单腔)的谐振频率,  $\frac{q}{N}\pi$  为各谐振点对应的谐振模式,  $q = 0, 1, 2, \dots, N$ . 通频带宽 B.W. 由最大和最小两个谐振点的极限频差所决定:

$$\text{B.W.} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - K}} - \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + K}},$$

当  $K$  远小于 1 时, 可以忽略二次项, 有

$$\frac{\omega_0}{\sqrt{1 - K}} - \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + K}} \approx K\omega_0,$$

由以上可得

$$K = \frac{\text{B.W.}}{\omega_0} \quad (1)$$

2004 - 11 - 17 收稿

\* 国家自然科学基金(10135040)和北京市科技计划项目(D0404004040221)

1) E-mail: bianxiaohao98@mails.tsinghua.edu.cn

## 2.1 单周期结构

对于单周期的均匀盘荷波导加速结构来说, 由于只有一种腔型, 且单腔为圆柱形, 结构简单, 数值模拟的过程也简单. 模拟计算中选用一个所谓“基本单元”进行计算. 基本单元的结构为: 两个半腔中间夹一个整腔. 使用MAFIA软件的特征值计算模块—— $E$ 模块——进行模拟计算.

电(磁)边界条件方法:

边界采用电(磁)边界, 整个结构在边界处是镜像对称的, 基本单元内产生驻波场. 因为是3个回路, 根据以上理论, 可以得到0模、 $\pi$ 模和 $\pi/2$ 模3个模式的频率 $\omega_0$ ,  $\omega_\pi$ 和 $\omega_{\pi/2}$ . 其耦合系数可以用公式(1)求得. 其中 $B.W. = \omega_0 - \omega_\pi$ ,  $\omega_0 = \omega_{\pi/2}$ , 所以,

$$K = \frac{\omega_0 - \omega_\pi}{\omega_{\pi/2}}. \quad (2)$$

周期性边界条件方法:

对于单周期结构, 用单腔作为“基本单元”. 该条件将单腔作为无穷长行波腔链中的一个回路, 会按照预设的单腔每周期结构上的相移 $\phi$ 来计算该相移下的模式频率<sup>[5]</sup>. 当单腔的相移是 $\pi/2$ 的时候, 则腔内行波为 $\pi/2$ 模. 当单腔的相移是 $\pi$ 的时候, 则腔内行波为 $\pi$ 模. 当单腔的相移是 $2\pi$ 的时候, 则腔内行波为0模. 这样就可以正确模拟加速管腔链, 计算腔链的模式频率. 用 $\pi/2$ ,  $\pi$ 和 $2\pi$ 相移条件分别计算出3个模式的频率 $\omega_{\pi/2}$ ,  $\omega_\pi$ ,  $\omega_0$ , 即可由公式(2)得到耦合系数 $K$ .

## 2.2 双周期结构

对于磁轴耦合的双周期加速结构(如图1), 首要的工作是调整加速腔与耦合腔的尺寸将它们调谐到工作频率上.

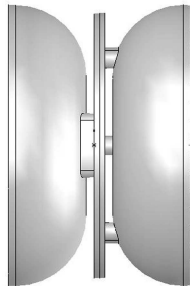


图1 双周期结构基本单元三维图

电(磁)边界条件方法:

首先分别调谐两腔的单频. 对于两个加速半腔中间夹一个耦合整腔的“基本单元”, 采用磁边界, 可以得到耦合单腔的频率. 对于两个耦合半腔中间夹一个加速整腔的“基本单元”, 采用磁边界, 可以得到加速单腔的频率.

加速腔和耦合腔的单频都调至工作频率以后, 与单周期一样, 用电边界条件进行计算, 结果如图2—图4, 求得耦合系数 $K$ .

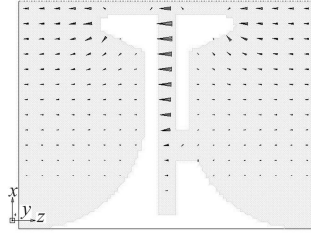


图2 0模时轴向电场分布图(电边界)



图3  $\pi/2$ 模时轴向电场分布图(电边界)

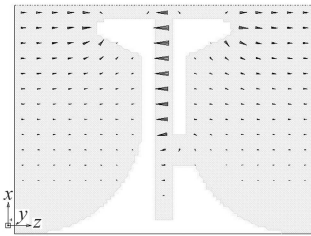


图4  $\pi$ 模时轴向电场分布图(电边界)

周期性边界条件方法:

当“基本单元”的相移是 $\pi$ 的时候, 则相邻两腔间相移是 $\pi/2$ 模. 此时可以得到相位差为 $\pi/2$ 的两个模式, 分别对应加速腔和耦合腔内存在场的模式, 利用这两个模式可以分别调谐两腔至工作频率.

加速腔和耦合腔的单频都调至工作频率以后, 对基本单元应用周期性边界条件进行计算. 当基本单元的相移是 $\pi$ 的时候, 则相邻两腔间相移是 $\pi/2$ . 当基本单元的相移是 $2\pi$ 的时候, 则腔间相移是 $\pi$ 和0. 用 $\pi$ 相移条件计算出 $\pi/2$ 模的频率 $\omega_{\pi/2}$ , 用 $2\pi$ 相移条件计算出 $\pi$ 模的频率 $\omega_\pi$ , 0模的频率 $\omega_0$ . 即可由公式(2)得到耦合系数 $K$ .

## 3 数值计算结果

刘安东对耦合系数与耦合孔张角的关系进行了实验测量<sup>[6]</sup>. 本文使用以上计算方法, 对刘安东做过实验的光速段加速腔进行了模拟计算.

两种方法的计算值与实验值对比如图5.

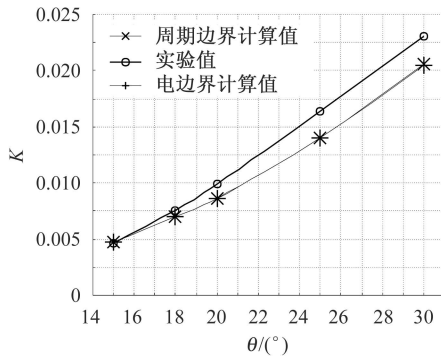


图 5 耦合系数  $K$  与耦合孔张角  $\theta$  的关系

由图 5 可看出, 周期性边界条件计算结果与电边界条件计算结果基本相等, 这是因为电边界中驻波场与周期性边界里的 3 个模式的行波场一一对应, 且计算模型中腔间次临界耦合影响很小. 所以两种情况下 MAFIA 的模拟值一致, 模式频率数值计算结果基本相同, 所以求得的耦合系数  $K$  的值基本相同.

实验值与计算值之间的差值最大不到 15%, 最小仅 3%. 误差来源有两个, 首先是由于 MAFIA 程序对

于计算结构进行了空间上的离散, 这种网格划分可以逼近原几何结构但不能与之完全相同, 尤其是耦合孔的划分, 对计算结果影响甚大. 其次是由于加工尺寸偏差, 微波测量等所导致的实验过程中的误差. 不过, 这样的模拟结果已经达到了实际工作的要求.

在设计耦合孔的几何参数时, 可以根据以上曲线的耦合系数值, 在误差范围内直接确定所需的尺寸, 这就缩短了调节耦合的时间周期. 在改动耦合孔几何参数时, 也可根据此曲线知道耦合系数的变化量. 这极大提高了耦合腔加工的效率.

## 4 结论

利用 MAFIA 程序 E 模块中的电(磁)边界条件和周期性边界条件, 可以准确地进行双周期加速结构腔间耦合系数的计算以及耦合孔几何参数的设计. 数值模拟结果与实验值符合得很好. 这两种模拟方法能有效提高耦合腔加工的效率.

## 参考文献(References)

- ZHANG Guo-Xing et al. Acta Electronica Sinica, 1997, **25**(6): 1 (in Chinese)  
(张国兴等. 电子学报, 1997, **25**(6): 1)
- ZHANG Yong et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(5): 655 (in Chinese)  
(张勇等. 强激光与粒子束, 2004, **16**(5): 655)
- LEI Wen-Qiang et al. Journal of UEST of China, 2002, **31**(5): 470 (in Chinese)
- GUI Wei-Xie. Theory of Particle Accelerators. Beijing: Tsinghua University Press, 1994 (in Chinese)  
(桂伟燮. 荷电粒子加速器原理. 北京: 清华大学出版社, 1994)
- CST Collaboration. MAFIA help, 2000
- LIU An-Dong. Master Thesis. Engineering Physics of Tsinghua University, 1980 (in Chinese)  
(刘安东. 硕士毕业论文. 清华大学工程物理系, 1980)

# Calculation of Coupling Factor for Double-Period Accelerating Structure\*

BIAN Xiao-Hao<sup>1)</sup> CHEN Huai-Bi ZHENG Shu-Xin

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

**Abstract** In the design of the linear accelerating structure, the coupling factor between cavities is a crucial parameter. The error of coupling factor accounts for the electric or magnetic field error mainly. To accurately design the coupling iris, the accurate calculation of coupling factor is essential. The numerical simulation is widely used to calculate the coupling factor now. By using MAFIA code, two methods have been applied to calculate the dispersion characteristics of the single-period structure, one method is to simulate the traveling wave mode by the period boundary condition; another method is to simulate the standing wave mode by the electrical boundary condition. In this work, we develop the two methods to calculate the coupling factor of double-period accelerating structure. Compared to experiment, the results for both methods are very similar, and in agreement with measurement within 15% deviation.

**Key words** coupling factor, MAFIA, double-period accelerating structure, single-period accelerating structure

Received 17 November 2004

\*Supported by NSFC(10135040) and Beijing Science and Technology Plan Project(D0404004040221)

1) E-mail: bianxiaohao98@mails.tsinghua.edu.cn