

# Mafia 和 Hfss 对等梯度加速 结构耦合器的数值模拟与比较

汪宝亮<sup>1,2</sup> 娄平<sup>1</sup>, 裴士伦<sup>2</sup>

(1. 安徽大学 物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230039; 2. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100039)

**摘要:**提出的数值模拟过程是关于直线加速器加速结构耦合器的设计的。Mafia 程序和 Hfss 程序分别被用来模拟一截 S-Band 的三腔等梯度加速结构, 其两端分别为输入耦合器和输出耦合器。通过 Mafia 程序和 Hfss 程序模拟了该结构的传输特性, 发现两者的模拟结果能很好吻合。

**关键词:**数值模拟; 耦合器; Mafia 程序; Hfss 程序; 传输特性

**中图分类号:** O572 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2162(2004)05-0028-04

在行波直线加速器中, 加速结构耦合器是其中重要的组成部分。实际上, 功率从功率源有效的传输到直线加速器就依赖于耦合器, 这也就是功率从速调管传输到盘荷波导的过程。对于这样的一个耦合器必须满足如下几点要求: (1) 它必须与输入波导很好的匹配, 以利于耦合进最大的功率, 来达到最大的加速梯度; (2) 它必须工作在谐振频率, 且要求功率是以恰当的相位在结构中前进; (3) 它对束流必须要有最小的负作用; (4) 耦合器的表面场不能高于内部场。除了上述以外, 还要考虑到结构是三维的。

以前, 盘荷波导加速结构耦合器在设计中是通过基于 Kyhl 方法<sup>[1,2]</sup>的系统过程来实现的。它通过一系列实验来决定是否匹配和调谐。这一工作要重复多次才能获得理想的效果, 而且也会花费大量的时间。在本文中, 研究了一种可供参考的方法——数值模拟。这里用 Mafia 和 Hfss 分别建立一个相同的计算机模型, 它非常接近于实际的耦合腔。因为在计算机上可以很方便的改变它的尺寸, 所以这种方法相比于实验是很有优势的。在本文中首先用 Mafia 程序<sup>[3]</sup>模拟了这一结构。该结构由输入耦合腔, 三节加速腔及输出耦合腔组成, 两端是截止的。接着在 Hfss 程序中模拟了同一结构; 然后把两个程序模拟出来的结果进行了比较并进行了误差分析; 最后是结论部分。

## 1 Mafia 程序模拟

先用 Mafia 程序画出了一截加速结构, 该结构由输入耦合腔, 三节加速腔及输出耦合腔组成。必须注意的是, 这里只是画出了整个结构的真空部分, Mafia 程序中真空部分外部自动为理想导体。这里不画出整个一截加速管的 84 个加速腔而只画出其中的 3 个腔, 因为这

收稿日期: 2003-11-18

作者简介: 汪宝亮(1979-), 男, 安徽黟县人, 安徽大学硕士研究生;

娄平(1957-), 男, 安徽安庆人, 安徽大学教授, 博士, 硕士生导师。

已经足够用来做耦合器的数值模拟。图 1 是用 Mafia 画出的该结构的计算机模型。从图 1 中可以看到输入耦合器与输出耦合器都通过耦合窗连接一段斜方波导。把耦合器的端面都定义为截止状态。为了计算方便与节省时间,才把整个结构设为真空,这并不是必需的。如果计算机性能好,就可以把外部设为铜,把内部设为空气。耦合器的尺寸都储存在变量中是可调的,这样可以很方便的及时调整,以满足匹配和调谐的要求。



图 1 Mafia 中画出的结构模型

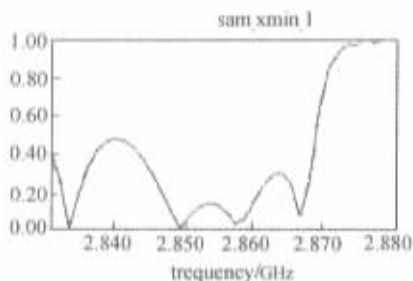


图 2 Mafia 画出的反射系数变化图

只要给出了耦合器的几何尺寸,就可以在 Mafia 中画出它的模拟图形。2856MHz 的 TE<sub>10</sub> 模式的电磁波通过输入波导连续不断的把功率输入进来。该功率通过输入耦合器的耦合窗耦合进来,在结构中传输后,再从输出耦合器中耦出。重复多次模拟后,直到结构中出现稳定的行波。在运算结束后,可以得到输入波导端口处的反射系数和相位随频率的变化曲线。在 Mafia 中计算这一问题时,是用程序中的 Advanced S-Parameter Wizard 模块来计算的。

通过这种方法就可以达到匹配和调谐耦合器的目的。具体步骤如下:先要考虑匹配问题,这就要寻找结构的最小驻波比(VSWR)。在模拟中,这和寻找输入波导端口处的最小反射系数是一致的。图 2 是 Mafia 画出的反射系数随频率的变化曲线。图 3 中画出相位随频率变化的曲线。可以看到,在某一特定的频率 2849.8MHz 时,反射系数是非常小的,为 0.02(此时 VSWR=1.04)。当然,反射系数 0.02 是从一系列边界条件的设置及各项设置的细化中得出的。至此,可以看出数值模拟的好处。

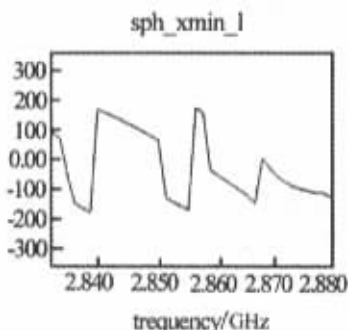


图 3 Mafia 中相位随频率变化图

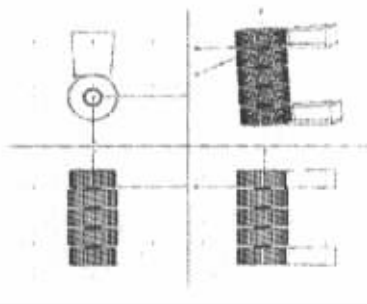


图 4 Hfss 中画出的结构模型

## 2 Hfss 程序模拟

同样,在 Hfss 中画出相同的结构。图 4 是 Hfss 中画出的该结构的计算机模型。结构

同样由输入耦合腔,三节加速腔及输出耦合腔组成。对比两个程序中结构的形状,发现只有一点不同,那就是输出耦合器的位置不同。在 Mafia 中,输入耦合器和输出耦合器在异侧,而在 Hfss 中,输入耦合器与输出耦合器在同一侧。这是因为在 Mafia 程序中用 Advanced S-Parameter Wizard 模块来计算传输系数问题时,X 方向必须要有最大值与最小值,这样在模拟中才可以激励出相应的模式。而在 Hfss 中,不存在这一问题,很方便的就可以画出结构的计算机模型。设置好各个参数之后,就可以在该程序中计算出输入耦合器的反射系数等。图 5 是 Hfss 得到的反射系数随频率变化图。图 6 是 Hfss 得到的相位随频率变化图。从图 5 可以看出在 2847.0MHz 时反射系数最小为 0.01(此时 VSWR=1.02)。当然,这里的反射系数 0.01 也是从一系列各项设置条件的改变中得出的。同样比实验得出这一结果简单。

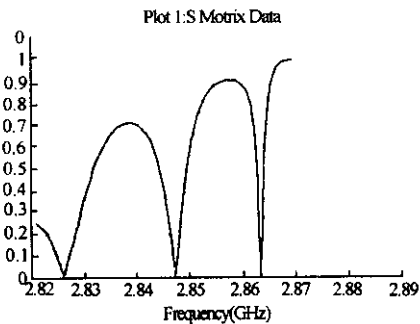


图 5 Hfss 中反射系数随频率变化图

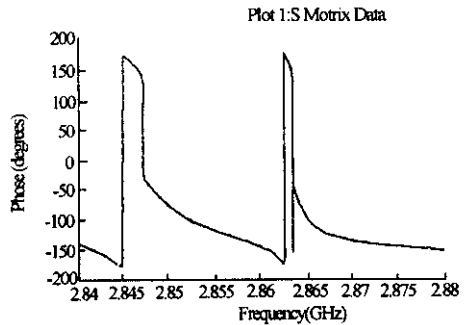


图 6 Hfss 中相位随频率变化图

### 3 两个数值模拟结果的比较与误差分析

已经知道,要使整个微波通道(包括输入、输出耦合器和加速管)正常工作,就要求其驻波比在小于 1.3 的频带在工作频率附近有几个兆周的带宽,在工作频率附近驻波比要小于 1.1<sup>[4]</sup>。在理论上是 2856 MHz 时,输入耦合腔才处于谐振状态。可以看到,Mafia 的运算结果中,谐振频率为 2849.8 MHz,这与 2856 MHz 误差为 0.217%,此时的驻波比为 1.04,这当然是在误差许可范围内的。而在 Hfss 的运算结果中,谐振频率为 2847.0 MHz,这与 2856 MHz 误差为 0.315%,其驻波比为 1.02,这也在误差许可范围之内。这就意味着可以用这两种软件来设计直线加速结构耦合器,并使其达到调谐的目的。

下面进行误差分析。首先,进行 Mafia 程序的误差分析。这是因为 Mafia 程序对结构进行模拟的时候是通过网格划分进行模拟的,从图 1 中也可以看到,Mafia 把结构分成了一个网格。在网格划分的时候必然会把一些本该在结构中有的部分舍弃掉了,这就使得结构的真空部分缩小了。当然网格划分得越细越好,划分得越细就越准确,误差也就越小。但是也要注意到自己计算机的计算能力。在计算前的设置参数过程中,计算精度与计算时间的确定,都会对结果的准确度产生影响。在模拟中还用到了一些近似条件,比如:将外部导体设为理想导体,将结构内部设为真空。但是,计算结果中的频率误差并不是很大,还是在可以接受的范围内,只有 0.217%。驻波比为 1.04 也在可接受的范围内。

接着进行 Hfss 程序的误差分析。因为 Hfss 程序对结构进行模拟的时候也是通过网格划分进行模拟的,从图 4 中也可以看到,Hfss 把结构分成了一条条的网格。在网格划分的

时候也必然会把一些本该在结构中有的部分舍弃掉了,这就使得结构的真空部分缩小了。在 Hfss 程序计算过程中,用单频计算时,在使计算结果收敛过程中,与计算设置的精度和计算过程的步骤数目有关,精度越高步骤数目越多越好。在扫频计算时,与设置的扫频过程总步骤数目有关,越多越好,最多为 9999 步。总之,这都视自己计算机性能而定。在模拟中也用到了一些近似条件,比如:将外部导体设为理想导体,将结构内部设为真空。但是,可以看到,带来的频率误差也并不是很大,还是在可以接受的范围内,只有 0.315%。驻波比为 1.02,也在可接受的范围内。

## 4 结 论

用 Mafia 程序和 Hfss 程序模拟了一段等梯度直线加速结构。该结构工作在 S 波段,包括输入耦合器,三节加速腔及输出耦合器。本文中用两种数值模拟方法来达到了耦合器的匹配和调谐,可以说是发展了数值模拟方法设计加速结构的方法。从文中看出该方法是可以用来设计加速结构的。之所以采用这种数值模拟的方法是因为,在计算机上可以很方便的改变各项相关的设置,而在实验中有的条件是很难改变,要花费很大的精力才行。这种方法相比于通过实验测试来达到调谐的目的,可以省时间、人力物力,因而很有优势。同时把两者的模拟结果进行了比较,发现基本相符,而且与理论要求也很吻合。因此,可以说提供了一种数值模拟设计加速结构的可行方法。

### 参考文献:

- [1] R L Kyhl. Impedance matching of disk loaded accelerator structures[J]. Unpublished,1976.
- [2] E Westbrook. Microwave impedance matching of feed waveguides to the disk-loaded accelerator structure operating in the  $2\pi/3$  mode[J]. SLAC-TN-63-103(1963).
- [3] F Ebeling, et al. The Mafia Collaboration[M]. Mafia user Guide,1992.
- [4] 姚充国. 电子直线加速器[M]. 北京:科学出版社,1986.

## Numerical simulations and comparison of constant gradient structure couplers with Mafia code and Hfss code

WANG Bao-liang<sup>1,2</sup>, LOU Ping<sup>1</sup>, PEI Shi-lun<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Material, Anhui University, Hefei 230039, China;

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** We present the numerical procedures involved in the design of couplers for accelerator sections for linear colliders. The Mafia code and Hfss code is used to simulate a s-band accelerator section of constant gradient structure, input coupler and output coupler at each end. The transmission properties of the structure are calculated with the Mafia code and hfss code, the dimensions of the couplers are adjusted until the power coupling is optimized. We find that the simulation results are almost the same.

**Key words:** numerical simulation; coupler; Mafia code; Hfss code; transmission property

## HFSS 视频培训课程推荐

HFSS 软件是当前最流行的微波无源器件和天线设计软件，易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))是国内最专业的微波、射频和天线设计培训机构。

为帮助工程师能够更好、更快地学习掌握 HFSS 的设计应用，易迪拓培训特邀李明洋老师主讲了多套 HFSS 视频培训课程。李明洋老师具有丰富的工程设计经验，曾编著出版了《HFSS 电磁仿真设计应用详解》、《HFSS 天线设计》等多本 HFSS 专业图书。视频课程，专家讲解，直观易学，是您学习 HFSS 的最佳选择。



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程，是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装，可以帮助您从零开始，全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装，更可超值赠送 3 个月免费学习答疑，随时解答您学习过程中遇到的棘手问题，让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>



### 更多 HFSS 视频培训课程:

#### ● 两周学会 HFSS —— 中文视频培训课程

课程从零讲起，通过两周的课程学习，可以帮助您快速入门、自学掌握 HFSS，是 HFSS 初学者的最好课程，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/1.html>

#### ● HFSS 微波器件仿真设计实例 —— 中文视频教程

HFSS 进阶培训课程，通过十个 HFSS 仿真设计实例，带您更深入学习 HFSS 的实际应用，掌握 HFSS 高级设置和应用技巧，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/3.html>

#### ● HFSS 天线设计入门 —— 中文视频教程

HFSS 是天线设计的王者，该教程全面解析了天线的基础知识、HFSS 天线设计流程和详细操作设置，让 HFSS 天线设计不再难，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/4.html>

#### ● 更多 HFSS 培训课程，敬请浏览: <http://www.edatop.com/peixun/hfss>

## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计相关培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>