

利用 HFSS 对六端口微波器件的 仿真分析及优化设计

屠秀平, 张淑红

(山东德州科技职业学院, 山东 德州 251200)

Simulated Analysis and Optimum Design of Six-Ports Microwave Parts Using HFSS

TU Xiu-ping, ZHANG Shu-hong

(Shandong Dezhou Science and Technology Professional College, Dezhou 251200, China)

Abstract: High-Frequency Structure Simulator (HFSS) is used for microwave components design, which has friendly interface and can reduce debugging workload through simulated calculation. In this paper, three six-port waveguide parts is simulation designed and analysis by using HFSS, it's S parameters have been got. Base on them, the optimum design method is suggested. Favorable match have been got in all waveguide parts.

Key words: HFSS; Six-port waveguide parts; S parameters; Field distribution

摘要: 利用高频结构仿真器仿真设计了三种六端口微波器件, 且进行了优化分析, 得到了该器件的 S 参数, 使各个微波器件均达到了良好的匹配。

关键词: 高频结构仿真器; 六端口器件; 反射系数; 仿真设计

中图分类号: TN407 文献标识码: A 文章编号: 1002-8935(2008)02-0026-04

在微波自动测量技术领域, 微波六端口技术在保持宽频带、高精度、自动化的前提下, 可以采用任意的微波网络^[1], 并用幅度测量代替相位测量, 极大降低了网络分析仪的成本, 因而得到越来越多的重视。六端口技术的核心器件是六端口结, 所以, 匹配性能良好的六端口结一直是射频器件设计人员所追求的目标。

六端口结传统设计方法是^[2]: 首先手工计算, 然后调节匹配元件的尺寸和位置, 最后进行实验调整, 确定它们的尺寸及最后位置。此方法费时费力, 费用大造价高。自上世纪 70 年代以来, CAD 工具在微波工程领域得到越来越广泛的应用, 它为人们提供了一种设计微波器件的新途径。经过多年的发展, 目前国内外已有多种微波 CAD 软件, 以 Ansoft 公司的 HFSS 效果较佳。Ansoft 公司的 HFSS V9 高频结构仿真器(HFSS)就是其中的一种。

Ansoft 公司的 HFSS 是一个采用有限元法的

三维电磁场仿真软件^[3], 可以处理任意形状的微波电路和元件结构, 并可考虑电介质材料、磁性材料、薄膜电阻材料和有损导体材料。用户通过交互式界面, 可输入高频元件或电路的几何结构、材料类型、端口位置、端口特性阻抗等参数进行仿真设计。该软件强大的参数化三维建模能力和高性能的图形能力, 大大节省了设计时间。本文利用 HFSS 对两个 H 面六端口结进行仿真设计和优化分析, 匹配元件的形状分别采用了金属圆柱体和金属六面体, 通过调节其半径, 均达到了良好的性能。其次, 仿真结果表明金属六面体的性能优于金属圆柱体。另外, 本文设计了一种 E 面六端口结, 通过调节匹配金属圆柱体的半径, 达到了 E 面六端口结的良好匹配和较宽的频带。

1 六端口结的理论

对称六端口结的网络散射参数矩阵为^[4]:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于无耗、匹配、对称、互易的六端口结,其散射矩阵简化为:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{13} & S_{12} \\ S_{12} & 0 & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{13} \\ S_{13} & S_{12} & 0 & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{14} & S_{13} & S_{12} & 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{13} & S_{14} & S_{13} & S_{12} & 0 & S_{12} \\ S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{13} & S_{12} & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由此可以看出,对称的六端口结只有四个独立变量,即 S_{11}, S_{12}, S_{13} 和 S_{14} ,网络无耗时,由 S 矩阵的一元性得:

$$2|S_{12}|^2 + 2|S_{13}|^2 + |S_{14}|^2 = 1 \quad (3)$$

$$S_{12}S_{13}^* + S_{13}S_{12}^* + S_{14}S_{13}^* + S_{14}S_{13} = 0 \quad (4)$$

$$S_{14}S_{12}^* + S_{12}S_{14}^* + |S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 0 \quad (5)$$

$$2S_{12}S_{13}^* + 2S_{13}S_{12}^* = 0 \quad (6)$$

可得 $S_{13} = 0$ 。取 $|S_{12}| = |S_{14}|$,则有 $|S_{12}| = 1/\sqrt{3}$, $\varphi_{12} - \varphi_{14} = \pi$ 。

但实际制作过程中,由于接头处的不连续,在接头处出现的反射波造成了各个端口的不匹配,要消除这些反射波使各个端口都达到匹配,须在接头处植入电抗性元件进行匹配。本文对三种六端口器件进行了仿真设计。

2 利用 HFSS 对六端口结的仿真设计及其优化分析

2.1 圆柱匹配的波导 H 面六端口结^[5]

采用 X 波段的波导,波导尺寸为国家标准尺寸 $a=2.29 \text{ cm}, b=1.02 \text{ cm}$ 。

(1)波导 H 面六端口结的三维图形如图 1 所示。

(2)对匹配元件的变量进行优化设计与分析

原始尺寸如下:对称 H 臂六端口结,圆柱波导段半径为 4.06 cm ,高度为 1.02 cm 。六分支矩形波导 $a=2.29 \text{ cm}, b=1.02 \text{ cm}$,长为 3.05 cm ,匹配圆柱体的原始半径为 1.27 cm ,高度为 1.02 cm 。以圆柱体的半径为变量进行仿真,结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,圆柱半径为 1.27 cm 时,反射

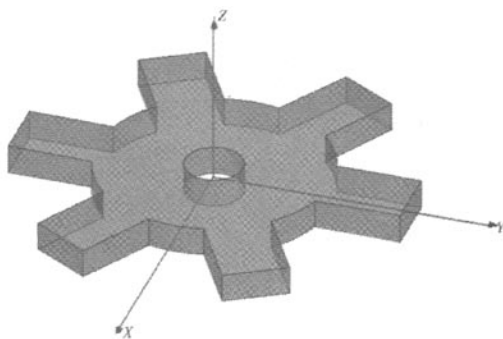


图 1 波导 H 面六端口结的三维图形

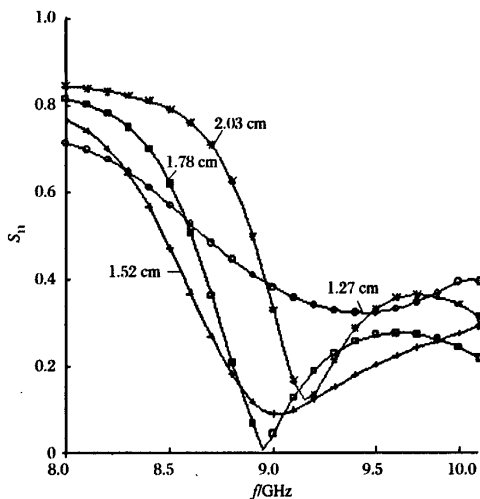


图 2 S_{11} 随圆柱半径和频率的变化曲线

系数较大,匹配性能差;圆柱半径为 1.52 cm 时,反射系数减小,但反射系数的模小于 0.1 时频带较窄;圆柱半径为 1.78 cm 时,中心频率为 8.95 GHz ,对应的反射系数已经接近为 0 ,反射系数的模为 0.1 时,对应的频带是 0.2 GHz ,性能较好;圆柱半径为 2.03 cm ,反射系数增大,匹配性能变差。

结论:圆柱匹配的六端口结,当匹配圆柱体的半径是 1.78 cm 时,中心频率为 8.95 GHz ,对应的反射系数已经接近为 0 。反射系数的模为 0.1 时,所对应的频带是 0.2 GHz 。性能良好。圆柱体半径的增加和减小均造成反射系数的增加,使匹配性能变差。

2.2 六面体匹配的波导 H 面六端口结^[6]

依然采用 X 波段的波导,波导尺寸为国家标准尺寸 $a=2.29 \text{ cm}, b=1.02 \text{ cm}$ 。

(1)六面体匹配的波导 H 面六端口结三维图形如图 3 所示。

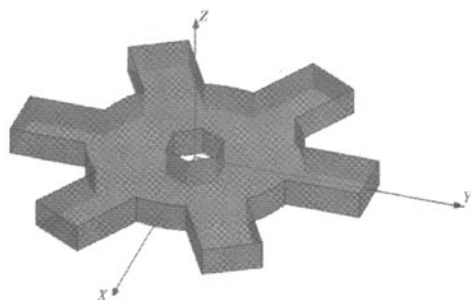


图3 波导 H 面六端口结的三维图形

(2)对匹配元件变量进行优化设计与分析

原始尺寸如下:中间圆波导半径为 4.06 cm,高度为 1.02 cm。6 分支矩形波导的 $a=2.29$ cm, $b=1.02$ cm。中间匹配的六面体高度为 1.02 cm,初始半径为 1.78 cm。以六面体的半径为变量,进行优化分析结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,六面体的半径为 1.02 cm 时,中心频率为 9.7 GHz,对应的反射系数较小,但带内反射系数的规律不规则;六面体的半径为 1.19 cm 时,中心频率为 9.4 GHz,对应的反射系数的模约为 0.01,反射系数的模为 0.1 时的频带宽度为 0.43 GHz。性能较好;六面体的半径为 1.32 cm 时,中心频率为 9.1 GHz,对应的反射系数为 0.05,频带基本未变,匹配效果略差。

因此对称、互易的六端口微波器件,中间匹配元件是一六面体,六面体的高度与矩形波导的窄臂相同,当匹配六面体的半径是 1.19 cm 时,六端口微波器件达到了良好的匹配,此时中心频率为 9.4 GHz,对应的反射系数约为 0.01。反射系数的模为 0.1 时,对应的频带为 0.43 GHz。

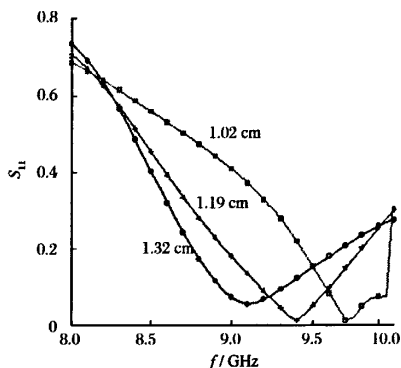


图4 S_{11} 随六面体半径和频率的变化曲线

对于尺寸相同的六端口微波器件,中间的匹配元件为圆柱体和六面体时,均可使六端口微波器件达到良好的匹配,但后一种效果要好一些。

对于对称、互易的、六端口结,中间的匹配元件

可以是圆柱体,也可以是小六面体,通过对匹配元件尺寸的选择均可以使六端口结达到良好的匹配,但后一种效果要好一些,因为六面体的六个平面和棱角一定程度上可以抵消六个接头处的反射。

2.3 圆柱匹配的波导 E 臂六端口结

依然采用 X 波段的波导,波导尺寸为国家标准尺寸 $a=2.29$ cm, $b=1.02$ cm。

(1)波导 E 面六端口结的三维图形如图 5 所示。

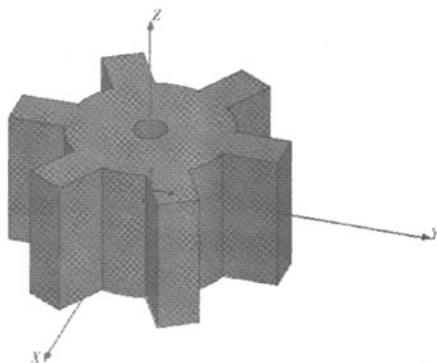


图5 波导 E 臂六端口结的三维图形

(2)对匹配元件变量进行优化设计与分析

波导 E 面六端口结的初始尺寸如下:圆波导段的半径为 4.06 cm,高度为 1.02 cm。6 个矩形波导的 $a=2.29$ cm, $b=1.02$ cm。中间匹配的圆柱体,高度为 1.02 cm,初始半径为 0.25 cm,位置在(0,0,0)坐标中心。以圆柱体的半径为变量进行优化分析。结果如图 6 所示。由图 6 可知,圆柱体的半径

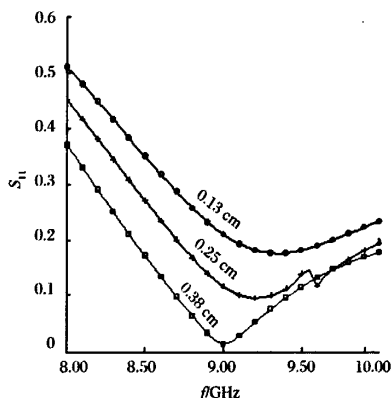


图6 S_{11} 随圆柱半径和频率的变化曲线

是 0.13 cm 时,中心频率为 9.3 GHz,对应的反射系数较大,匹配效果差;圆柱体的半径是 0.25 cm 时,中心频率为 9.2 GHz,对应的反射系数降低,但在 9.6 GHz 处出现了波动,匹配效果较差;圆柱体的

半径是 0.38 cm 时,中心频率为 9 GHz,对应的反射系数很小,对应于反射系数的模为 0.1 时的频带为 0.75 GHz,频带较宽,匹配效果良好。

结论:对于中间匹配元件为圆柱体的波导 E 面六端口结,匹配圆柱体的半径是 0.38 cm,此时中心频率为 9 GHz,对应的反射系数为 0.015,反射系数的模为 0.1 时的频带宽度是 0.75 GHz,频带较宽,匹配效果良好。半径的增大和减小均造成反射系数的增大,使匹配变差。

3 结束语

在微波技术中,六端口技术的应用非常广泛。本文用两种匹配元件使设计的六端口结达到了良好的匹配和较宽的带宽。第一种匹配元件是一个金属圆棒,第二种匹配元件是一个金属六面体,后者的匹配效果比前者要好。因为小六面体各个面和棱可以在一定程度上抵消六个矩形波导在接头处产生的反射。最后,本文设计了一个新型的六端口结,通过对加入其中匹配圆柱体半径大小的调节,同样使六端口结达到了良好的匹配。从以上过程可以看出,

HFSS 软件用来设计微波器件,具有快捷、方便、直观的优势,并且通过仿真设计,根据其 S 参数、可对微波器件进行优化设计,所以 HFSS 软件在微波器件的仿真及优化设计方面具有极大优势。

参 考 文 献

- [1] 王新稳,李 萍. 微波技术与天线[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [2] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1995.
- [3] 李嗣范. 微波元件原理与设计[M]. 北京:人民邮电出版社,1982.
- [4] ENGEN G F. Calibrating the Six-Port Reflectometer by Means of Sliding Terminations[J]. IEEE Trans MTT, 1978, MTT-26:951-957.
- [5] RIAZIAT M, GZDASIUK G. Waveguide Star Junction Used in Ka-Band Dual Six Port Measurements[J]. Proceedings of IEEE International Microwave Symposium, 1995. 593-594.

收稿日期:2007-11-15

理事单位信息

南京三乐电子信息产业集团有限公司

地址:南京市中山北路 215 号

邮政编码:210009

电话:025-83318514,025-83730063

传真:025-83318414,025-83715057

网址:<http://www.sanle.com>

联系人:钱新荣,付中桥

E-mail:qxr@sanle.com, etube@sanle.com

单位简介

南京三乐电子信息产业集团有限公司的前身是南京电子管厂(国营第七七二厂),是在 1935 年成立的原国民政府资源委员会电气研究室基础上建立的新中国第一家真空电子器件设计制造企业。

从研制第一只电子管—高压整流管开始,经过五十多年的开拓与发展,企业形成了真空电子类、绿色照明类及微波能技术、激光技术、真空设备等应用整机类三大类产品体系。在真空电子器件、微波能应用、激光技术及应用、电光源和家用电器等领域创造出诸多个全国第一。目前真空电子类产品有行波管、磁控管、速调管、开关管、充氢闸流管、发射管、脉冲调制管和整流管等八大系列近二百个品种在产,拥有行波管、磁控管和发射管等六条生产线,企业还设有电子器件研究所和微波管 CAD 中心、环境试验中心,具有完整的真空电子器件设计、制造和试验能力,建立的质量保证体系通过了 ISO9001 认证。

企业以“自强不息,敢为人先”的企业精神,以“三高三严得三乐”(三高:高技术投入、高标准要求、高质量产品;三严:严管理、严控制、严考核;三乐:顾客乐、企业乐、国家乐)的质量方针为指导,愿意与社会各界广泛开展交流合作,愿意为国内外广大客户提供优质产品和服务。

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)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)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),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>