

多层低温共烧陶瓷 无源器件技术

邢孟江 李小珍 王 维 著

世界图书出版公司

多层低温共烧陶瓷 无源器件技术

邢孟江 李小珍 王 维 著

世界图书出版公司

上海·西安·北京·广州

图书在版编目(CIP)数据

多层低温共烧陶瓷无源器件技术/邢孟江,李小珍,
王维著. —上海:上海世界图书出版公司,2017.6
ISBN 978-7-5192-2860-6

I. ①多… II. ①邢… ②李… ③王… III. ①陶瓷—
无源滤波器 IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 094132 号

书 名	多层低温共烧陶瓷无源器件技术 Duoceng Diwen Gongshao Taoci Wuyuan Qijian Jishu
著 者	邢孟江 李小珍 王 维
责任编辑	李 晶
出版发行	上海世界图书出版公司
地 址	上海市广中路 88 号 9-10 楼
邮 编	200083
网 址	http://www.wpcsh.com
经 销	新华书店
印 刷	上海景条印刷有限公司印刷
开 本	787 mm×1092 mm 1/16
印 张	28.25
字 数	400 千字
版 次	2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5192-2860-6/T·224
定 价	45.00 元

版权所有 翻印必究

如发现印装质量问题,请与印刷厂联系
(质检科电话:021-59815621)

作者简介

邢孟江,男,1981年,浙江绍兴人。昆明理工大学信息工程与自动化学院,副教授,硕士生导师,电工电子中心副主任。2011年获西安电子科技大学博士学位,2017年入选国家科技部创新人才推进计划。主持国家自然科学基金1项,省级科研项目1项,企业合作项目1项。发表论文35篇,其中发表SCI期刊论文13篇,EI期刊论文5篇,SCI会议论文9篇。申请发明专利28项,授权发明专利9项,实用新型4项。

李小珍,女,1983年,陕西商洛人。昆明学院信息技术学院,讲师,2015年获西安电子科技大学博士学位。主要从事LTCC器件、硅基IPD器件研究,发表论文5篇,申请发明专利4项。2010年,创立西安瓷芯电子科技有限公司。

王维,女,1990年,山东临沂人。昆明理工大学信息工程与自动化学院研究生。主要从事LTCC器件研究,发表EI论文2篇。

内容简介

本书作为初学者的入门教程,使用 HFSS 软件,将相关基础理论知识结合实际器件设计,浅显易懂地将 LTCC 技术和器件设计过程进行详细介绍,使读者在了解 HFSS 软件操作过程的同时能够专业地学习 LTCC 无源器件的设计,了解目前无源器件设计的新结构和新理念,全书理论和实际相结合,内容全面,讲解详细。

全书理论和实际相结合,既适合 HFSS 初学者入门学习,也适用于从事 LTCC 器件设计的工程师参考,同时还适用于高等院校相关专业的教学。

未经许可,不得以任何方式复制和抄袭本书部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

序 | PREFACE

近几年,无源器件以其集成度高、成本低、易使用等特点迅速发展,低温共烧陶瓷技术(LTCC)作为无源器件的主要技术支持,是一种新型的封装技术,有着良好的高频特性和高速传输特性,易于实现多层布线、内埋置元器件、形成多种空腔、器件的小型化、降低成本、提高可靠性等,以三维多层电路结构的形式实现小型化贴片产品,同时可与有源器件相结合用于研制各种高集成度、低成本的小功率射频与微波功能模块。掩埋在介质基板内的滤波器、耦合器、双工器等三维射频无源器件不同于常规的微带板无源器件,它们更能充分利用三维空间,这给小型化三维射频无源器件的发展开拓了新的研究方向。由于低温共陶瓷技术(LTCC)自身具有的这些独特优点,应用于研制无线通信系统中的无源元器件,必将显现出巨大的优越性。

集成电路发展到目前的 7 nm,其发展已经很成熟将接近极限,技术水平与制造成本将制约它继续朝前发展。而基于无源器件的封装技术几十年来并未得到充分发展,与集成电路的发展极为不同步。近几年,纳米材料、薄膜工艺及激光技术的发展给无源器件的封装技术注入了新的发展动力。随着信息时代的快速发展,无线技术的普及,无源器件得到广泛的应用,在现代社会中,无源器件无处不在并起着极其重要的作用,这为无源器件的发展提供了良好的条件。

无源器件的不断发展,无源器件应用场合不同,所需要的指标不同,则需要重新进行设计,这给快速发展的无线通讯系统带来了阻碍,所以有

必要去研究各种三维射频无源器件的电路、结构与布局,建立通用的三维电磁场器件仿真模型库,缩短产品开发周期,提高成品率。这就促使更多专业学者和工程师对其进行研究和开发,但以实例讲解无源器件的指导书较少,这就对我们的学习和研究产生了阻碍,昆明理工大学的邢孟江教授及其同事们编写的这本指导书解决了这个问题,此本教材适用于高校电子工程等专业和射频研发的工程师,应用三维电磁仿真软件的基础操作,以具体的实例来详细地讲解无源器件的设计、建模和仿真,能够详细地讲解每一个器件的设计和建模过程,并希望广大的读者能够通过相应的实例了解相应器件的建模过程,学习三维电磁仿真软件的基本操作,即使对自己不了解的无源器件,也能够根据所给的建模步骤,完成模型的建立,并在建模过程中进行分析学习和总结,进而对今后自己的研究产生指导和启发。

目 录

CONTENTS

第一章	绪论	1
1.1	低温共烧陶瓷技术	1
1.2	无源器件制作工艺	1
1.3	多层无源器件设计流程	1
1.4	本书主要内容	3
第二章	低通滤波器的设计与建模	4
2.1	引言	4
2.2	低通滤波器基础理论	6
2.3	设计案例	8
2.4	小结	92
第三章	SIR 耦合谐振带通滤波器的设计与建模	94
3.1	引言	94
3.2	带通滤波器基础理论	96
3.3	设计案例	97
3.4	小结	136
第四章	双工器的设计与建模	138
4.1	引言	138
4.2	双工器基础理论	139
4.3	设计案例	140
4.4	小结	218

第五章	功率分配器的设计与建模	220
5.1	引言	220
5.2	功率分配器基础理论	221
5.3	设计案例	224
5.4	小结	263
第六章	宽带电桥的设计与建模	265
6.1	引言	265
6.2	电桥基础理论	266
6.3	设计案例	268
6.4	小结	316
第七章	巴伦的设计与建模	318
7.1	引言	318
7.2	巴伦基础理论	319
7.3	设计案例	322
7.4	小结	394
第八章	加工排版与规范检查	395
8.1	加工工艺基本流程	395
8.2	CAD 排版案例	399
第九章	多层低温共烧陶瓷无源器件的未来	422
9.1	引言	422
9.2	工艺技术展望	422
9.3	小结	427
附录一	LPF_3GHZ 低通滤波器(加工规范书)	429
附录二	宽带耦合器设计参考表	436

第一章 绪 论

1.1 低温共烧陶瓷技术

低温共烧陶瓷(LTCC, low-temperature cofired ceramics)技术,是由休斯公司于 1982 年开发的一种多层电路印制板技术。最初目的,主要是用于制作军用高频、高速线路板和封装基板。随着技术成熟和成本的降低,20 世纪 90 年代后期,TDK、Murata 等企业开始将这种技术用于制作高频电感、电容。2000 年后,Mini-circuits、TDK、Murata 等企业将电容和电阻进行集成,通过电路设计,加工制造出滤波器、双工器、耦合器、电桥、天线等常用高频无源器件。

1.2 无源器件制作工艺

低温共烧陶瓷器件制作的主要工艺过程如下:第一步,将 LTCC 陶瓷粉和有机浆料混合在一起,制成陶瓷浆料。第二步,将配制好的陶瓷浆料通过流延制成厚度均匀、致密且有韧性的生瓷带。第三步,将流延好的生瓷带,切割成 8 英寸(20.3 cm)或 12 英寸(30.4 cm)的生瓷片。第四步,将切成一定尺寸后的生瓷片用机械或激光打孔机,在需要通孔的位置打孔。第五步,采用填孔设备,把通孔灌满银浆,可以采用填的方式,也可以采用印刷的方式,目前这个工艺最为复杂,直接影响成品率。第六步,把设计好的电子线路图形印刷在陶瓷生带上。第七步,将这些印刷有银浆图形的生带对位后叠加在一起,采用等静压设备将多层生瓷片进行叠压。第八步,采用生瓷切割机,将压好的膜片切割成单个器件。第九步,将切割好的器件或者模块进行一次性低温排胶(800~900℃)烧结。第十步,对器件进行倒角后印制端电极和侧边电极。第十一步,烧银和测试。图 1.1 为 LTCC 基本工艺流程图。

1.3 多层无源器件设计流程

微带无源器件设计技术已经相对成熟,基于 LTCC 多层工艺的无源器件设计技术还在不断提高中,其中最有待提高的关键技术是如何构建合适的电路结构和建立有效的三

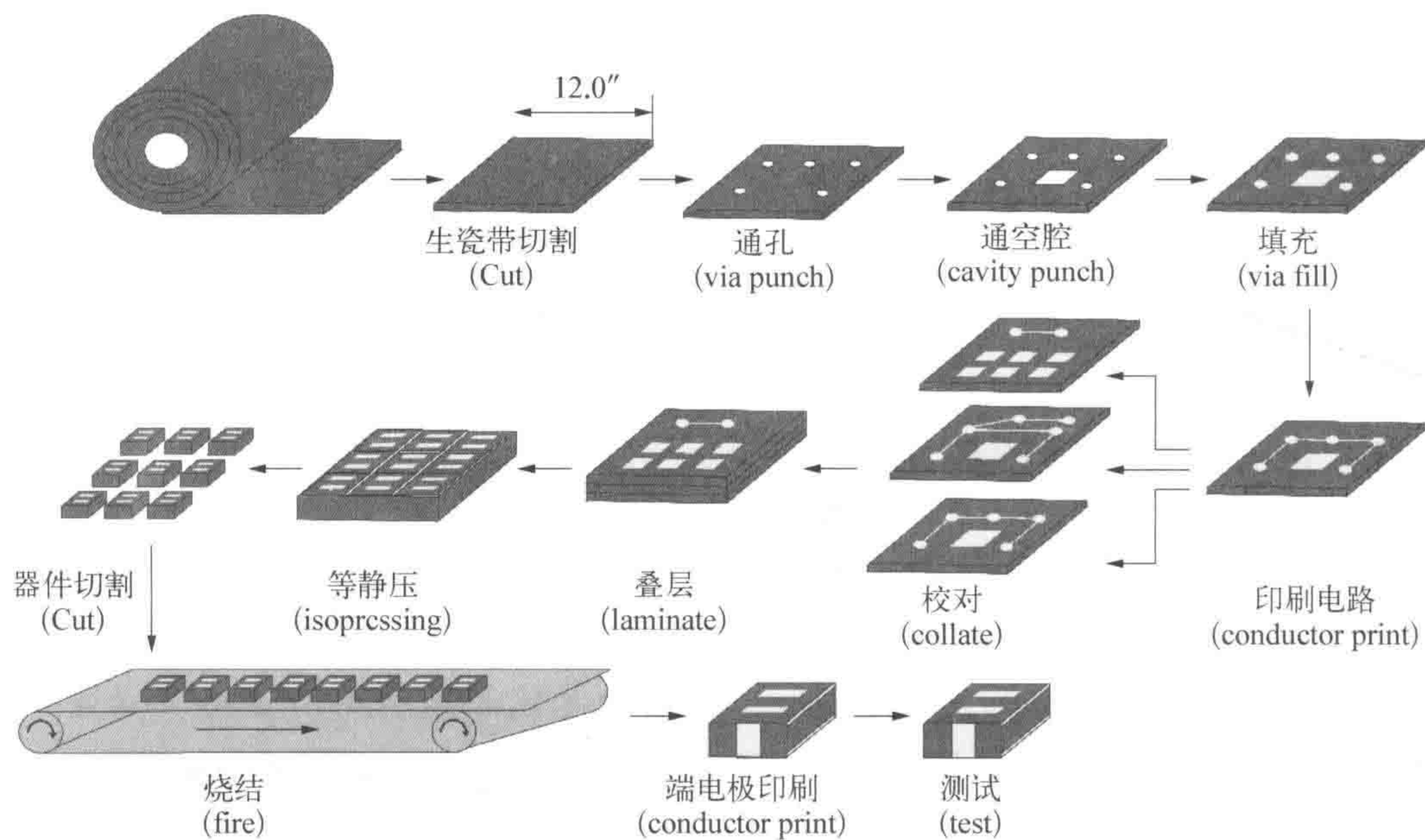


图 1.1 LTCC 基本工艺流程图

维电磁场器件模型。

对于多层无源器件设计流程,可以分为以下几个步骤: 第一步,选择电路模型。这一步很关键,比如有些带通滤波器的电路结构只适合做窄带滤波器,通带范围在 3%~20% 以内,假设要设计的为 40%带宽的带通滤波器,若还是采用窄带结构,必定失败。第二步,根据要求设计电路,这一步理论已经很成熟,可采用软件进行辅助设计。但要注意的是,

我们最终的产品形式为表贴器件,有侧边电极和在使用过程中存在接地不良的必然情况,所以在设计中,我们要考虑接地寄生电感的影响。有些电路结构敏感,有些不敏感,需要提前进行仿真。第三步,设计布局,这一步是多层无源器件的核心,若已有研究人员把三维电磁场器件模型建立,后续的设计就相对简单,只要调节软件中的参数变量就可以得到各种不同频点、带宽的器件。若模型没有建立,需要重新建立,需要注意的是耦合,一种方式是消除耦合,一种方式是利用耦合,我们推荐的方式是利用耦合。当耦合产生的时候,对我们原先的电路结构模型就会改变。这时,我们需要提取耦合,将耦合效果通过等效电路的形式提取,重新建立电路结构,

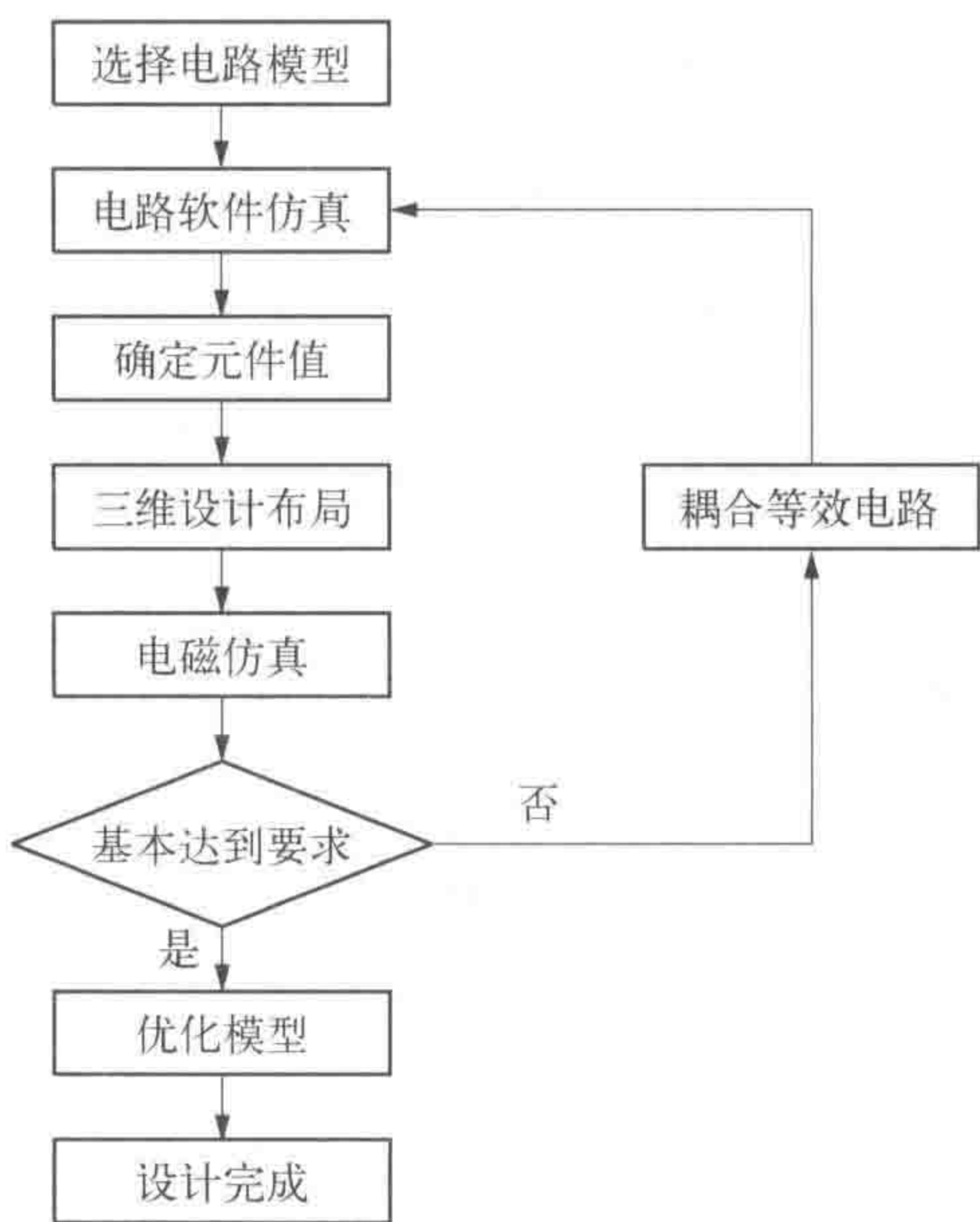


图 1.2 多层无源器件设计流程

进行仿真,从电路上看仿真结果的影响,若有利,整个布局合适,若效果差,改变器件三维电磁场模型结构,重新布局,直到初步符合要求,能够判断出,这个三维电磁场模型能够设计出需要的指标。第四步,优化仿真,这部主要是微调,直到满足要求。第五步,工艺容差分析,判断需要的加工条件。第六步,提取版图,制作加工文件。第七步,测试,若不正确,检查错误,若有偏差,检查材料和工艺。目前电磁场仿真已经非常正确,偏差主要由工艺条件引起。有时检查发现是材料厚度等引起,也可修正模型。图 1.2 为多层无源器件设计流程。

1.4 本书主要内容

基于低温共烧陶瓷技术和三维电磁场仿真软件 HFSS,本书总结了国内外 LTCC 低通滤波器、SIR 带通滤波器、双工器、功率分配器、电桥、巴伦的技术现状。重点介绍了多款不同功能的射频无源器件的基本理论、设计方法和建模案例。介绍了三维无源器件的加工文件的制作过程与制作方法。

第一章,主要介绍了 LTCC 基本工艺流程和 LTCC 多层无源器件设计流程。第二章,介绍了 LTCC 低通滤波器的国内技术现状;低通滤波器主要类型和技术指标;在分析低通滤波器等效电路类型与特点的基础上,建立了 7 阶并联谐振低通滤波器三维电磁场模型,并进行了仿真分析。该模型具有通用性,读者可通过改变参数变量设计出 3 000~4 000 MHz 范围内的低通滤波器,读者也可改变螺旋电感层数和电容层数,设计出 800 MHz~6 GHz 的低通滤波器,指标和 Mini-circuits 公司一致。第三章,在分析带通滤波器等效电路类型与特点的基础上,研究了具有传输零点 SIR 谐振带通滤波器的设计与建模,有效解决了低介电常数多芯片组件(MCM)集成带通滤波器的性能与面积的问题。第四章对双工器进行了详细分析与设计。第五章研究了 LTCC 小型化功率分配器三维层叠结构的实现方法,通过三维建模、仿真、分析,最终建立了小型化威尔金森功率分配器。第六章采用两条相互靠近的带状线结构建立了 90°宽带电桥。由于 Marhand 巴伦有较好的输出等幅值和输出 180°相移,制作容易而且能实现宽频特性,所以被广泛地应用于微波和毫米波电路中,第七章对 Marhand 巴伦进行了详细的设计与仿真。第八章根据前面章节所建的几款不同的模型,给出提取、排版和加工等技术性流程的说明与分析,第九章根据不同工艺技术的无源器件设计和功能模块化来展望多层低温共烧陶瓷无源器件的未来。

第二章 低通滤波器的设计与建模

2.1 引言

近几年,随着 LTCC 技术的不断发展,滤波器作为电子电路基本元器件之一,广泛地应用于卫星通信、卫星定位、微波通信、雷达导航、电子电路,其性能的好坏直接影响整个通信系统的质量。随着电子系统向小型化、轻量化发展,滤波器的小型化、轻量化、集成化日益受到广泛的应用。传统的低通滤波器一般采用 LC 分立元件实现,体积大、可靠性低(电感、电容元件的一致性差,每个滤波器都要进行人工调试)、成本高。LTCC 技术可将所有的无源元件都埋入在几毫米的空间中,通过类似集成电路工艺一次加工完成。采用 LTCC 技术实现的低通滤波器具有体积小、可靠性高、成本低等优势。因为所有的元件都埋入在几毫米的空间中,元件与元件之间会相互影响,同时外部环境微弱的变化也影响着器件性能,这就需要专门针对低通滤波器进行设计研究,开发体积更小、矩形度更高、远端抑制更强、成本更低的低通滤波器模型。对于滤波器的 LTCC 多层片式研究已经开始,2006 年 7 月电子科技大学微电子与固体电子学院的苏宏、杨邦朝、杜晓松和深圳振华富电子有限公司丁晓鸿,设计了一款带有衰减极点的集总参数层叠式 LTCC 低通滤波器,通过引入一个衰减零点,提高阻带的衰减性能,同时获得陡峭的过渡带,电感采用三维螺旋(3D helical)结构来获得更高的自谐振频率和品质因数,电容采用垂直交指型(VIC),大大减小端电极面积,从而有效地减少了滤波器尺寸,最终设计出了一款陶瓷介质材料 $\epsilon_r = 7.8$, $\tan\delta = 0.0047$, 介质材料厚度 $36\ \mu\text{m}$, 金属银材料厚度 $15\ \mu\text{m}$, 通带最大插入损耗 $0.8\ \text{dB}$, $450 \sim 1\ 000\ \text{MHz}$ 阻带抑制大于 $25\ \text{dB}$ 、 $1\ 000 \sim 1\ 200\ \text{MHz}$ 阻带抑制大于 $40\ \text{dB}$ 、 $1\ 200 \sim 1\ 400\ \text{MHz}$ 阻带抑制大于 $50\ \text{dB}$, 截止频率 $f_c = 300\ \text{MHz}$ 的低通滤波器^[1]。2005 年 10 月上海大学通信工程与信息学院的墨晶岩和马哲旺提出了一个结构紧凑,具有两个传输零点的四级 LTCC 低通滤波器,并用场路结合的方法完成其设计,在经典切比雪夫四级低通滤波器的并联电容支路中增加一个电感,并进一步在 1、3 级串联电感支路之间引入交叉耦合,成功地在滤波器的通带附近产生了两个传输零点,形成了陡峭的衰减曲线,实现了通常需要五级椭圆函数低通滤波器才能达到的频响特性,所提出的电路结构减少了电路元件的个数和复杂性,降低了滤波器的插入损耗,最终设计出了一款陶瓷介质材

料 $\epsilon_r = 27$, $\tan\delta = 0.001$, 通带最大插入损耗 0.5 dB, 1 480~1 500 MHz 阻带抑制大于 20 dB、1 600~2 000 MHz 阻带抑制大于 25 dB、2 000~2 290 MHz 阻带抑制大于 20 dB, 电压驻波比小于 1.6, 截止频率 $f_c = 960$ MHz 的低通滤波器^[2]。2009 年 7 月电子科技大学微电子与固体电子学院的李元勋、边丽菲、刘颖力等人利用集总参数元件进行了叠层片式低通滤波器的设计, 并使用 ULF140 材料经低温共烧陶瓷(LTCC)工艺制作出符合 0805 封装尺寸要求, 陶瓷介质材料 $\epsilon_r = 14$, $\tan\delta = 0.0015$, 介质材料厚度 25 μm , 金属银材料厚度 6 μm , 500~750 MHz 时带外抑制大于 40 dB、750~1 750 MHz 阻带抑制大于 60 dB、1 750~2 000 MHz 阻带抑制大于 70 dB, 截止频率 $f_c = 200$ MHz 的低通滤波器^[3], 2008 年 4 月许阳等人利用 LTCC<CCF(低温共烧陶瓷和低温共烧铁氧体)技术设计和制作了陶瓷介质材料 $\epsilon_r = 14$, $\tan\delta = 0.0015$, 介质材料厚度 30 μm , 金属银材料厚度 4/6 μm , 500~1 050 MHz 时带外抑制大于 20 dB, 截止频率 $f_c = 220$ MHz 的具有标准封装型号 0805 型 3 阶低通叠层片式滤波器^[4]。2014 年 1 月华进半导体封装先导研发中心有限公司的秦舒基于 LTCC 技术设计了陶瓷介质材料 $\epsilon_r = 7.8$, $\tan\delta = 0.002$, 金属银材料厚度 10 μm , 通带内最大插入损耗 0.6 dB, 回波损耗 -11.5 dB, 1 650~3 000 MHz 时阻带抑制大于 40 dB、3 000~5 000 MHz 时阻带抑制大于 35 dB、5 000~7 000 MHz 时阻带抑制大于 20 dB, 截止频率 $f_c = 1 350$ MHz 的一款高性能小型化椭圆函数 7 阶低通滤波器, 滤波器的等效电路包括串联支路中的 4 个电感和并联支路中的 3 个 LC 谐振腔, 通过对滤波器模型物理结构的优化, 减小了滤波器内部元件间的寄生耦合效应, 并在阻带中成功引入了传输零点, 改善了滤波器的性能^[5]。2011 年 2 月电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室的胡嵩松、刘颖力、张怀武, 在对 LTCC 多层结构电感和电容元件研究的基础上, 由对 L、c 的参数控制, 通过三维场仿真软件 HFSS 对 LTCC 滤波器三维结构模型进行仿真模拟和参数提取, 设计制作了一款采用 FerroUFL101 陶瓷介质材料 $\epsilon_r = 100$, 介质材料厚度 20 μm , 金属银材料厚度 6 μm , 400~600 MHz 阻带抑制大于 30 dB、650~1 000 MHz 阻带抑制大于 28 dB、1 000~2 000 MHz 阻带抑制大于 30 dB, 截止频率 $f_c = 200$ MHz 的 0805 尺寸无源集成低通 LC 型滤波器^[6]。2009 年 2 月电子科技大学微电子与固体电子学院的覃荣震、刘颖力、燕文琴和张怀武采用低温共烧陶瓷(LTCC)工艺设计了一款 400 MHz 时阻带抑制大于 20 dB, 截止频率 $f_c = 230$ MHz 的抗电磁干扰(EMI)低通滤波器^[7]。2013 年 3 月中国电子科技集团公司第 2 研究所的王颖麟、薛耀平, 设计了一种采用杜邦 951 生瓷片介质材料 $\epsilon_r = 7.8$, $\tan\delta = 0.006$, 金属银材料厚度 1.4 mm, 通带插入损耗小于 1 dB, 通带内端口驻波小于 1.5, 在 1 500~2 000 MHz 时阻带抑制大于 37.5 dB、2 000~2 500 MHz 时阻带抑制大于 50 dB、2 500~4 000 MHz 时阻带抑制大于 25 dB, 截止频率 $f_c = 900$ MHz 的小型化 LTCC 低通滤波器, 采用 LC 集总元件完成原理图的设计与仿真, 使用 HFSS 完成滤波器结构的三维电磁场仿真, 最终在 LTCC 工艺线上完成加工制作, 达到小型化的目的, 可应用于移动通信等领域^[8]。2007

年 10 月华南理工大学电子与信息学院褚庆昕、梁启新针对实际结构中的螺旋传输线的寄生耦合效应,设计出了一种采用杜邦 951 生瓷片介质材料 $\epsilon_r = 9.1$, 金属银材料厚度 10 mm, 通带内最大插入损耗 0.5 dB, 4 800~4 900 MHz 阻带最小衰减 10 dB、7 200~7 500 MHz 阻带最小衰减 20 dB、9 600~10 000 MHz 阻带最小衰减 20 dB, 截止频率 $f_c = 2\,450$ MHz 的新型 2.45 GHz 含螺旋传输线结构的准椭圆 LTCC 低通滤波器^[9]。2002 年日本的 T. Ohwada, H. Ikematsu, H. Oh-hash, T. Takagi 和 S. Ishida 设计了一款 Ku 波段低温共烧陶瓷(LTCC)多层微带低通滤波器,在谐振器中通过使用一个低阻抗线作为一个电感元件,可以得到的复数个传输零点附近的通带,所提出的低通滤波器实现良好的衰减特性,尽管少量的谐振器。LPF 具有极低的插入损耗和紧凑的尺寸,特别是薄型,适用于射频模块^[10]。2012 年中国电子科技大学的 Xiaoshi Huo、Peng Wang 基于经典的滤波器设计理论和 LTCC 技术设计了一款低通滤波器,其通带插入损耗小于 0.5 dB,在 3.3~3.8 GHz 时带外抑制大于 30 dB,输入输出端口的电压驻波比小于 1.2,尺寸为 2.0 mm×1.1 mm×0.5 mm^[11]。2014 年贵州师范大学的 S. Xiaowei、S. YanFeng、M. Jinrong 和 L. Qing 基于 LTCC 技术设计了两种滤波器结构,包括单层阶梯阻抗微带线结构和多层结构,从物理尺寸和性能两个方面分别提出了这两种结构的区别,主要研究了多层结构的低通滤波器,截止频率为 1.7 GHz,在通带 DC~1.7 GHz 时衰减小于 1 dB,在 2.4~3 GHz 时衰减大于 22.3 dB,在 3~6 GHz 时衰减大于 34 dB,尺寸为 15 mm×26.5 mm×0.635 mm^[12]。2015 年 M. Y. Yang、X. Z. Chen 和 Y. S. Dai,基于 LTCC 技术设计了一款小型化的低通滤波器,截止频率 1 000 MHz,插入损耗 0.54 dB,1 500 MHz 时阻带衰减优于 25 dB,2~5.5 GHz 时阻带衰减在 35 dB,电压驻波比小于 1.3,尺寸为 3.2 mm×1.6 mm×0.94 mm^[13]。

2.2 低通滤波器基础理论

2.2.1 低通滤波器的基本原理

按照频率通带范围,低通滤波器的理想的频率响应特性如图 2.1 所示。

由图 2.1 中可以看出,理想低通滤波器能够让从零频(即直流)到截止频率之间的所有信号都没有损失地通过,而让高于截止频率的所有信号全部衰减损耗。

目前低通滤波器的设计理论已经相当成熟,国内外已经把各种函数的低通滤波器编译成了设计软

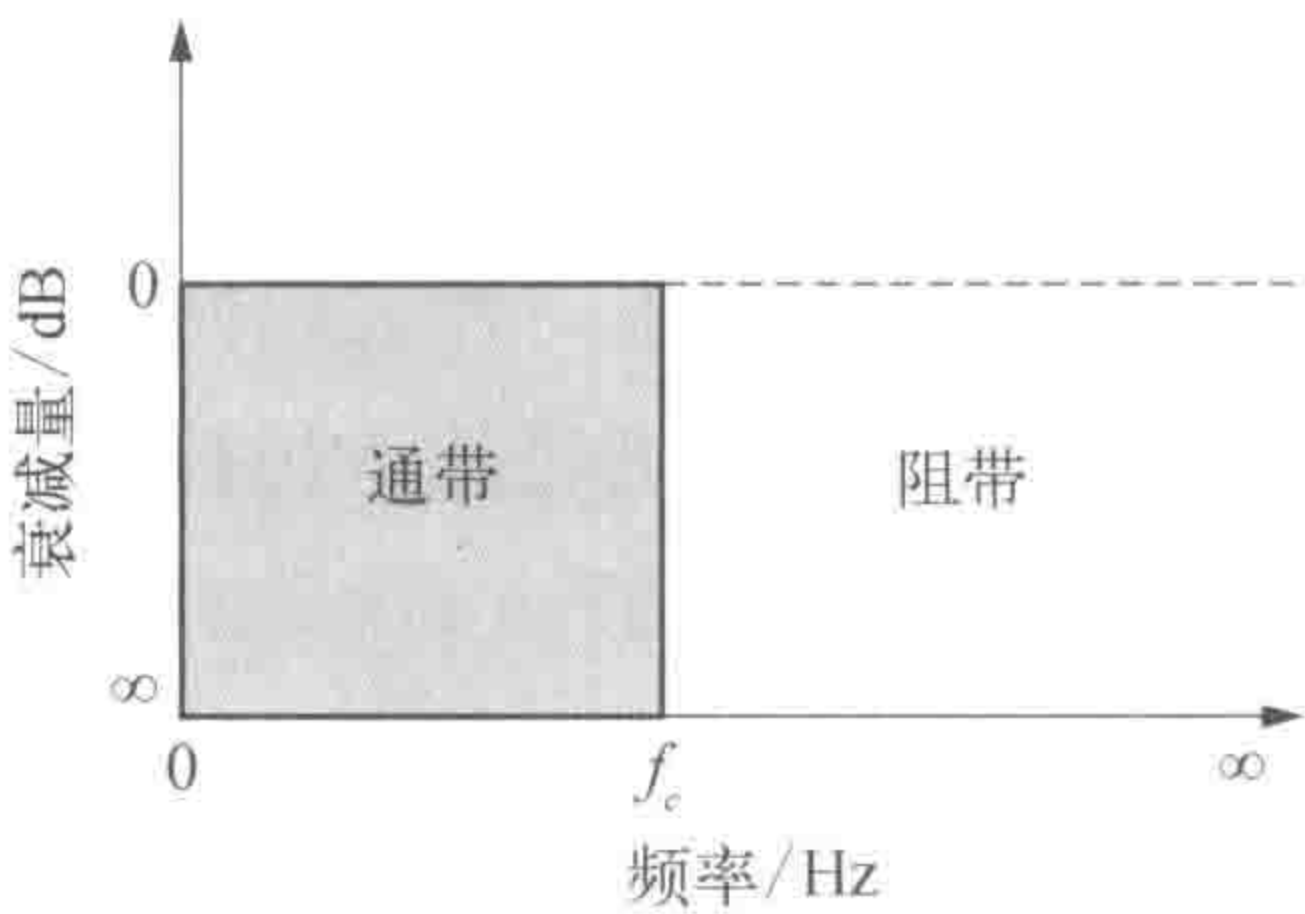


图 2.1 低通滤波器的理想频率响应

件,图 2.2 给出了 Ansoft Designer 对巴特沃兹(Butterworth)低通滤波器、切比雪夫(Chebyshev)低通滤波器以及椭圆函数(Elliptic)低通滤波器在相同阶数、相同截止频率条件下的传输损耗 S21 参数的电路仿真结果,从图中可以看出三类低通滤波器不同的衰减特性。

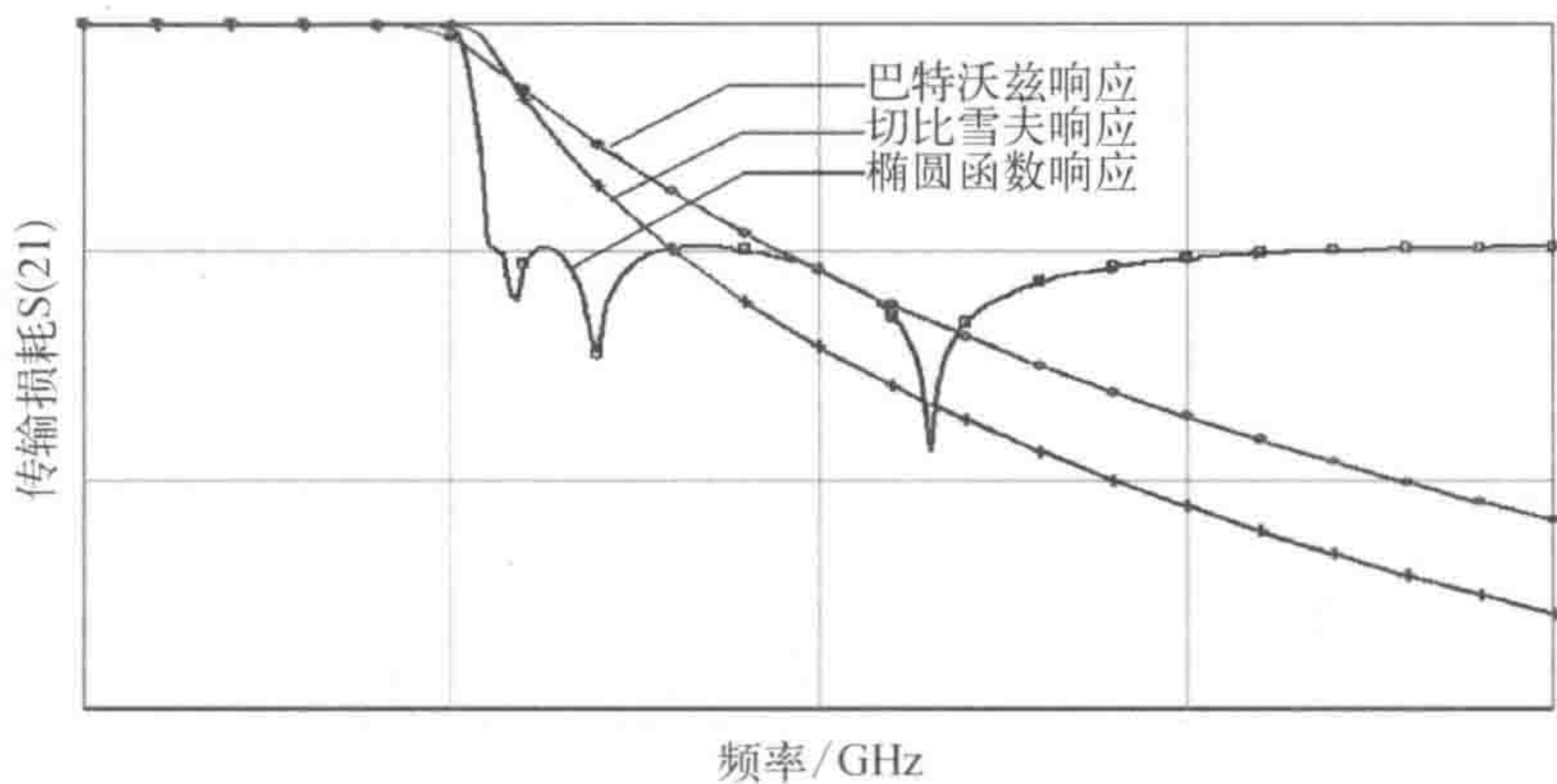


图 2.2 不同函数滤波器的衰减特性响应对比

椭圆函数低通滤波器通带到阻带的矩形度最高,在截止频率外通过很窄的过渡带就能达到很高的衰减,并且在阻带中有传输零点,远端抑制平缓;切比雪夫低通滤波器的衰减率在椭圆函数低通滤波器和巴特沃兹低通滤波器之间;巴特沃兹低通滤波器在通带内有着较好的纹波,但矩形度不甚理想。巴特沃兹低通滤波器和切比雪夫低通滤波器类似,其所有传输零点都位于无限远处。在微波通讯领域,往往需要一定频带内的陡峭衰减,椭圆函数滤波器通带到阻带优良的过渡特性无疑是最佳选择。

2.2.2 滤波器的主要技术指标

滤波器的主要技术指标有：插入损耗、回波损耗、工作带宽、阻带抑制、带内纹波、矩形系数等。

(1) 插入损耗：滤波器在通带内的功率损耗,插入损耗限定了工作频率,也限定了使用场合的两端阻抗,在电路仿真结果图中指的是通带中的 S21,其数学表达式为公式(2-1)。其中, P_L 为滤波器向负载输出的功率, P_{in} 是滤波器从信号源得到的功率, $|\Gamma_{in}|$ 是从信号源向滤波器看进去的反射系数。

$$L_A = -10\log \frac{P_L}{P_{in}} = -10\log(1 - |\Gamma_{in}|^2) \tag{2-1}$$

(2) 回波损耗：回波损耗是描述滤波器性能的一个敏感参数,通常用来表征滤波器的反射特性,在电路仿真结果图中指的是通带中的 S11,其数学表达式为式(2-2),其中 P_r 为反射功率。

$$R_L = -10\log \frac{P_r}{P_{in}} = -10\log \left(\frac{V_{SWR} - 1}{V_{SWR} + 1} \right)^2 = -10\log(|\Gamma_{in}|^2) \tag{2-2}$$

其中 V_{SWR} (电压驻波比) 是沿线合成电压的最大值与最小值之比, 工程上一般对射频电路要求的指标是 $V_{SWR} < 2$, 此时将有 90% 的功率进入负载, 仅有 10% 被反射。驻波比和反射系数的关系为:

$$V_{SWR} = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \tag{2-3}$$

当 $V_{SWR} < 2$ 时, 回波损耗 $R_L = -20\log |\Gamma| = -20\log |S_{11}| = -S_{11} \text{ (dB)} > 10 \text{ dB}$, 反射系数 $|\Gamma| = \frac{V_{SWR} - 1}{V_{SWR} + 1} < \frac{1}{3}$ 。

由公式(2-2)和(2-3)可得到回波损耗(R_L)、电压驻波比(V_{SWR})和反射系数(Γ_{in})三个相关参数的关系。

(3) 工作带宽: 滤波器通带频率范围, 一般有两种定义方式, 一种是 3 dB 带宽, 由通带内的最小插入损耗点向下移动 3 dB 时所得到的通带宽带; 另一种是插入损耗带宽, 它指满足插入损耗时所测得的带宽, 这个定义比较严谨, 在工程中常用。

(4) 阻带抑制: 在理想的情况下, 滤波器在阻带内应该具有无穷大的衰减量, 但是实际上只能得到与滤波器元件数量有关的有限衰减量, 在电路仿真结果图中指的是通带外的 S21。

(5) 带内纹波: 插入损耗的波动范围。一般采用 dB 为单位来表示响应幅度的最大值与最小值的差值。

(6) 矩形系数: 在 LTCC 器件中矩形系数是 40 dB 带宽与 3 dB 带宽的比值, 它描述了滤波器在截止频率附近响应曲线变化的陡峭程度。其数学表达式为公式(2-4), 其中 $f_u^{40 \text{ dB}}$ 和 $f_L^{40 \text{ dB}}$ 分别表示 40 dB 衰减处的较高的频率和较低的频率, $f_u^{3 \text{ dB}}$ 和 $f_L^{3 \text{ dB}}$ 分别表示 3 dB 衰减处的较高的频率和较低的频率。

$$S_F = \frac{B_W^{40 \text{ dB}}}{B_W^{3 \text{ dB}}} = \frac{f_u^{40 \text{ dB}} - f_L^{40 \text{ dB}}}{f_u^{3 \text{ dB}} - f_L^{3 \text{ dB}}} \tag{2-4}$$

2.3 设计案例

本章以一个集总式 LTCC 低通滤波器的仿真设计为例进行说明, 该滤波器的原理为集总式谐振级耦合滤波器, 首先在电路设计软件 Ansoft Designer 中选定低通滤波器的等效电路模型, 这里选取 7 阶并联谐振椭圆低通滤波器原型作为本设计的等效电路, 包括四个接地电容和并联支路的三个 LC 谐振腔, 如图 2.3 所示, 得到的等效电路仿真结果如图 2.4 所示。