

微波组件机电热耦合建模 与影响机理分析

王从思 王 璐 王志海 编著



科学出版社

微波组件机电热耦合建模 与影响机理分析

王从思 王璐 王志海 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书内容包含了近年来微波组件机电热耦合的主要进展与研究成果,介绍了微波组件机电热耦合的特点和发展现状,总结了耦合建模中涉及的微波电路基础以及振动环境模拟方法与散热技术,给出了微波组件机电热性能仿真软件的关键技术,着重论述了模块拼缝、金丝键合、钎焊连接和螺栓连接四种典型连接工艺的影响机理,详细阐述了多通道腔体耦合效应机理与散热冷板集成优化方法。

本书可作为微波组件设计和制造工程人员的参考书,也可作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的参考书,同时对从事相关科技研究的工作人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

微波组件机电热耦合建模与影响机理分析/王从思,王璐,王志海编著.
—北京:科学出版社,2018.6

ISBN 978-7-03-057320-9

I. ①微… II. ①王… ②王… ③王… III. ①微波元件-组件-研究
IV. ①TN61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 084676 号

责任编辑:李 萍/责任校对:郭瑞芝

责任印制:张克忠/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

艺堂印刷(天津)有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年6月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:312 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

微波组件是包括有源相控阵天线在内的电子信息系统关键部件之一,通过装在盒体内的微波器件来实现微波信号的功率放大、低噪声放大和变频等功能。微波组件的结构与散热设计、制造工艺以及复杂工作环境都会影响高频段电子信息系统的性能和功能,对互联工艺参数的科学调控则是微波组件传输性能稳健可靠的重要保障。随着组件集成化、轻量化、小型化的发展需求,微波组件机电热耦合理论与影响机理分析方法在高频段、高性能电子信息系统的设计、制造与服务过程中将发挥更加重要的作用。

目前由于微波组件制造互联工艺中各参数与传输性能的耦合理论不清、影响机理不明,组件制造过程中工艺对性能影响的关键点无法有效控制,缺乏微波组件制造工艺及性能的精准预测模型,在转实际产品时,微波组件性能与设计模型仿真性能偏差较大,导致产品调试工作难度很大、周期较长,并存在盲目性,从而增加了研制成本,甚至产品性能始终无法达标。因此,开展微波组件机械制造因素、散热参数与电磁性能的耦合建模与机理探究是一个非常具有挑战性和强烈工程背景的应用基础课题。随着微波组件工作频段、功率、带宽等性能指标的提高,微波组件机电热耦合技术在组件精巧工艺设计、精密高效加工、稳定可靠服役中将发挥更加重要的作用。

本书是关于微波组件制造互联工艺因素与性能调控方面的专著,从场路耦合的角度论述构建耦合传输模型和揭示工艺影响机理等方面涉及的仿真、实验、测试理论与关键技术,以说明近十年来微波组件机电热耦合的主要进展与研究成果,希望成为一本集先进性和实用性为一体的微波组件结构设计工具书。本书定性、定量地给出了制造互联工艺参数对电路传输性能的影响规律,并开展了相关实例验证,为实际工程中互联工艺手段改善与结构布局方案提供了理论基础与数据支持,以使高频微波组件互联工艺参数的设计更量化、更精密化;同时依据组件性能指标准确给出焊接工艺参数的定量精度,以实现微波射频组件设计理念与制造手段的重大创新,从而使微波组件的制造方法与工艺流程更高效,产品质量更优良。

本书是在作者多年研究微波组件机电热耦合技术的基础上整理、补充并完善而成的,在长期研究工作中,得到了中国空间技术研究院西安分院周澄、任联锋、刘菁、张乐、赵慧敏、李刚、张晓阳等,中国电子科技集团公司第三十八研究所李明荣、邱颖霞、朱大春、于坤鹏、胡骏、闵志先等,中国电子科技集团公司第十四研究所唐宝富、钟剑锋、张轶群、彭雪林、李斌、徐文华等,西安电子科技大学段

宝岩院士、黄进、保宏、王伟、李申、李鹏、宋立伟、贾建援、朱敏波等专家与老师的支持与帮助，在此一并表示感谢。

在本书编撰过程中，作者实验室的全体博士和硕士研究生在书稿整理、图表绘制、程序编制、数据收集等方面都给予了大力帮助，在此表示感谢。

由于作者的水平和能力有限，书中难免存在不足之处，真诚希望读者批评指正。

作 者

2018 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 微波组件典型连接工艺及特点分析	2
1.3 微波组件机电热耦合研究现状	3
1.3.1 微波组件的路耦合分析	3
1.3.2 组件互联工艺形态表征与建模	5
1.3.3 互联参数与传输性能的关联方法	7
1.3.4 面向组件传输性能的预测与调控	8
1.3.5 高频高性能微波组件发展需求	9
1.4 本书内容安排	10
参考文献	11
第 2 章 微波电路基础与环境分析	16
2.1 微波传输线	16
2.1.1 传输线类型	17
2.1.2 传输线电路模型	17
2.1.3 相位速度和特征阻抗	18
2.1.4 传输线阻抗变换	18
2.1.5 集肤效应	19
2.2 微波网络基本参数	20
2.2.1 反射系数	20
2.2.2 电压驻波比	22
2.2.3 回波损耗	23
2.2.4 单端口散射系数	23
2.2.5 插入损耗	24
2.2.6 正向传输系数	24
2.3 微波网络的阻抗匹配	25
2.4 Smith 圆图	26
2.4.1 Smith 阻抗圆图	26
2.4.2 Smith 导纳圆图	27

2.4.3 Smith 阻抗导纳圆图	28
2.4.4 Smith 圆图与传输线	28
2.4.5 Smith 圆图与网络 Q 值	28
2.5 振动环境对微波组件的影响	29
2.6 微波组件常用散热方法	30
参考文献	32
第 3 章 组件机电热性能仿真软件关键技术	34
3.1 机电热仿真软件概述	34
3.1.1 开发软件特点分析	34
3.1.2 有限元分析软件的选择	35
3.1.3 数值计算和图形显示软件的选择	37
3.1.4 电磁仿真软件的选择	38
3.2 仿真软件应用关键技术	39
3.2.1 ANSYS 软件的二次开发	39
3.2.2 指定节点信息数据提取技术	42
3.2.3 参数化建模技术	43
3.2.4 多模块系统集成技术	43
3.3 机电热仿真软件的主要功能	44
3.3.1 结构性能分析功能	44
3.3.2 温度分析功能	45
3.3.3 电性能分析功能	46
3.4 微波组件结构与热分析软件	46
3.4.1 微波组件结构特性	46
3.4.2 微波组件热特性	46
3.4.3 软件总体设计	47
3.4.4 软件功能模块	49
3.4.5 软件应用案例	51
参考文献	55
第 4 章 模块拼缝工艺对组件传输性能的影响机理	57
4.1 模块拼缝结构形式与结构参数	57
4.2 模块拼缝的等效电路模型	58
4.3 模块拼缝电磁模型及边界条件	60
4.4 不同频率下缝隙宽度对传输性能的影响	61
4.4.1 S 波段缝隙宽度	61
4.4.2 X 波段缝隙宽度	63

4.4.3 Ku 波段缝隙宽度	64
4.4.4 Ka 波段缝隙宽度	64
4.4.5 结果讨论	66
4.5 导线高度对传输性能的影响	66
4.6 模块拼缝样件测试验证	68
4.6.1 测试方法与测试流程	68
4.6.2 散射参数测试	69
4.6.3 验证结论	74
4.7 拼缝连接工艺影响机理分析软件	75
4.7.1 软件总体设计	75
4.7.2 组成模块设计	76
4.7.3 软件功能设计	77
4.7.4 软件操作方法	79
4.7.5 工程案例应用	81
参考文献	84
第 5 章 金丝键合互联工艺对组件传输性能的影响机理	86
5.1 金丝键合互联工艺的发展	86
5.2 金丝键合互联工艺特性分析	87
5.2.1 金丝键合互联工艺分类	87
5.2.2 金丝键合互联分析方法	89
5.3 金丝键合路耦合建模方法	93
5.3.1 金丝键合结构形式	93
5.3.2 金丝键合路耦合建模思路	94
5.3.3 金丝键合等效电路模型	95
5.3.4 金丝键合路耦合模型	97
5.4 金丝键合路耦合模型验证	99
5.5 金丝键合工艺参数对传输性能的影响	102
5.5.1 单根金丝键合工艺	103
5.5.2 双根金丝键合工艺	106
5.5.3 影响机理对比分析	111
5.6 不同频段下金丝键合工艺参数对传输性能的影响	111
5.6.1 X、Ku、Ka 频段单根金丝键合	111
5.6.2 X、Ku、Ka 频段双根金丝键合	113
5.6.3 影响机理对比分析	116
5.7 基于路耦合的金丝键合工艺参数设计软件	116

5.7.1	软件总体设计	116
5.7.2	组成模块设计	117
5.7.3	软件功能设计	118
5.7.4	软件操作方法	119
5.7.5	工程案例应用	121
参考文献		123
第 6 章	钎焊连接工艺对组件传输性能的影响机理	126
6.1	钎焊连接空洞特性分析	126
6.2	钎焊空洞结构形式与参数	127
6.3	钎焊空洞分析方法与计算模型	128
6.4	钎焊空洞特征对传输性能的影响	129
6.4.1	空洞位置	129
6.4.2	空洞大小	132
6.4.3	空洞数目	133
6.4.4	钎透率	135
6.5	钎焊空洞样件测试与验证	137
6.5.1	测试方法与测试流程	137
6.5.2	两频段性能测试	138
6.5.3	验证结论	139
6.6	钎焊连接工艺影响机理分析软件	139
6.6.1	软件总体设计	139
6.6.2	组成模块设计	140
6.6.3	软件功能设计	141
6.6.4	软件操作方法	143
6.6.5	工程案例应用	145
参考文献		148
第 7 章	螺栓连接工艺对组件传输性能的影响机理	150
7.1	螺栓连接组件结构模型	150
7.2	螺栓连接组件振动变形分析	151
7.3	螺栓连接组件电磁模型	155
7.3.1	变形介质板形面拟合方法	155
7.3.2	变形曲面拟合过程	156
7.3.3	变形前后的组件电磁模型	157
7.4	螺栓连接组件传输性能分析	158
7.5	螺栓位置改进与传输性能改善	160

7.5.1 螺栓分布位置调优	160
7.5.2 改进后的组件传输性能	161
7.5.3 位置调优结论	161
参考文献	162
第 8 章 微波组件多通道腔体耦合效应与机理分析	164
8.1 微波组件腔体结构模型	164
8.2 腔体电磁特性分析	166
8.2.1 腔体内电场分布仿真	166
8.2.2 腔体谐振频率仿真分析	167
8.3 腔体结构尺寸对隔离度的影响	169
8.3.1 腔体高度 H	170
8.3.2 隔板厚度 T_1	170
8.3.3 隔板厚度 T_2	171
8.3.4 开口位置 S	171
8.4 网孔结构对隔离度的影响	172
8.4.1 横纵向网孔	172
8.4.2 开孔高度 HH	174
8.4.3 开孔宽度 HW	175
8.5 腔体耦合影响机理分析	176
8.6 多通道腔体耦合效应分析软件	177
8.6.1 软件总体设计	177
8.6.2 组成模块设计	178
8.6.3 软件功能设计	180
8.6.4 软件操作方法	184
8.6.5 工程案例应用	186
参考文献	189
第 9 章 微波组件散热冷板集成优化设计	191
9.1 散热冷板结构模型简化与特性分析	191
9.1.1 散热冷板结构模型	191
9.1.2 散热冷板结构简化	192
9.1.3 散热冷板特性分析	196
9.2 散热冷板流体参数优化设计	202
9.2.1 热源特点与流道结构	202
9.2.2 冷却液入口位置与类型分析	204
9.2.3 冷板流道和流体参数影响机理	207

9.2.4 流体冷却参数设计	213
9.3 散热冷板结构轻量化设计	219
9.3.1 冷板结构动力学分析	219
9.3.2 冷板结构特性分析	224
9.3.3 冷板结构质量优化设计	227
9.4 散热冷板结构-热集成优化设计	230
9.4.1 结构-热集成优化设计流程	231
9.4.2 结构-热集成优化设计模型	232
9.4.3 集成优化过程及结果分析	233
参考文献	236

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着微波组件的发展日趋轻量化与小型化,电子元器件的排布变得更加密集,这就对微波组件在体积、电性能和可靠性方面提出了更苛刻的要求,同时对微波射频电路的加工工艺也提出了更高的标准^[1-4]。多芯片组件以其自身可实现高密度、高可靠性的优点,被迅速应用于微波组件的设计、加工与组装过程中。多芯片组件技术是在高密度的多层互联基板上,采用微焊接与封装工艺把构成微波组件的各微波器件组装起来,形成高密度、高可靠性和高性能的微电子产品的技术^[5-7]。在高速互联系统中,微波信号流经芯片内部连线、芯片封装引脚、PCB 板布线通道、过孔等,信号本身的电气特性使得其在任何传输路径上都有可能存在信号完整性问题。因此,微波组件内部的多芯片互联工艺手段显得极为重要,一方面保证了各器件间的级联;另一方面作为电气通道,保证了电磁信号的传输^[8-10]。而互联工艺自身特点所导致的误差因素直接影响组件的微波传输性能,制约整个电子信息系统性能和功能的实现。

微波组件的工作性能在很大程度上也会受到工作环境的影响。在振动环境下,由于振动的疲劳效应和共振现象,可能出现组件性能下降、零部件失效、疲劳损伤甚至破坏的现象。另外,由于搭载平台运动导致微波组件发生随机振动,进而引起结构发生变形,最终必然导致组件性能发生变化,因此必须进行微波组件性能振动响应评估。同时,微波组件通常还是大功率的电子设备,其功率损失都是以热能形式散发出来,会造成设备温升。由于要满足小体积、高机动性、高灵敏度和宽频段的要求,微波组件已经进入了超高热流密度范围,因此考虑传输性能的微波组件散热和减重设计是一个严峻的技术问题^[11-14]。

为此,本书针对微波组件内部机电热耦合特点和典型互联工艺,开展微波组件机电热耦合建模与互联工艺对传输性能影响机理研究,通过结构特征提取、电磁建模、仿真分析、优化设计和数据挖掘等过程,定性、定量地确定典型互联工艺参数对微波组件传输性能的影响规律。这些研究可为微波组件设计与制造提供理论方案和关键技术指导,具有重要的工程应用价值。

1.2 微波组件典型连接工艺及特点分析

图 1.1 是在电子信息系统常用的微波组件, 存在三种典型的连接工艺方式, 即模块拼缝、钎焊连接和螺栓连接。在实际工程生产制造过程中, 这些连接工艺的相关结构参数更多是靠技术人员的经验数据, 缺乏相关的定量指导。而互联工艺参数对信号的传输性能影响很大, 会产生严重的信号完整性问题。下面分别说明三种典型连接工艺的作用和存在的机电热耦合问题^[15,16]。

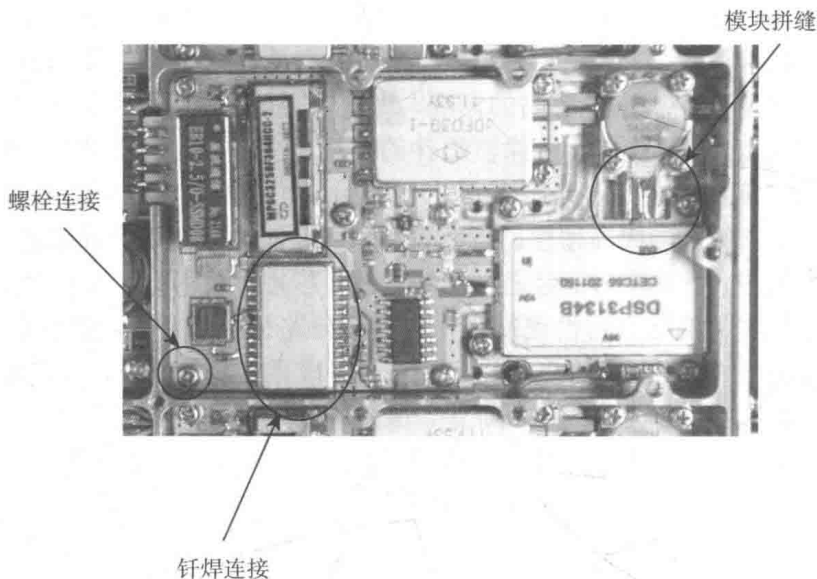


图 1.1 微波组件中的典型连接工艺

(1) 模块拼缝是一种实现电路基板间信号传输的典型连接方式, 通过将跨越基板的铜质连接线焊接到电路基板的微带线上, 实现电信号的传输。然而, 此种跨越基板连接方式的电路特性尚不清楚, 且受到电路基板实际尺寸的限制, 电路基板间通常存在缝隙, 且缝隙的大小和铜质连接线距离基板的高度没有相应的准确的理论指导。

(2) 钎焊连接主要应用在电路基板中芯片中间位置处接地, 实现芯片的接地和信号连接。在芯片中间位置处需要大面积接地连接, 但现有的钎焊工艺在再流焊接过程中, 大量的放气物质在焊层形成时被包裹在焊料里面而没有排除, 这样就会产生空洞, 因此传统的钎焊存在钎焊空洞率的问题。钎焊空洞所处的位置、大小、形状和数目都会对芯片接地特性产生影响, 造成电路信号传输产生误差, 影响电路的传输性能, 但是钎焊空洞的大小、位置和数目均缺乏定量分析手段。

(3) 螺栓连接是整个电路系统基板与承载结构框架的连接方式, 一方面起固定

电路基板的作用；另一方面，用来实现电路系统的地线与承载结构框架的电连接（即接地）。在实际生产装配过程中，螺栓连接的排布更多要靠工人经验，缺乏相应的理论指导。在承载结构受到外来随机振动的影响下，基板和结构框架都会有不同程度的变形。由于基板和结构框架的刚度不同，基板和结构框架会产生分离从而产生缝隙，导致基板的接地性能发生变化。

其他连接工艺也存在类似现象。例如，金丝键合互联的金丝直径、拱高、跨距、根数以及焊点位置都会对微波电路传输性能产生严重的影响。随着微波电路工作频率升高，金丝的集肤深度减小，微波电路的传输性能将严重恶化；在组件金属屏蔽腔体上存在孔缝，外部电磁通过这些孔缝进入屏蔽腔体后会产生谐振，对内部电子信息系统的正常工作造成较大影响，随着工作频率不断提高和器件密度不断增大，微波组件腔体电磁耦合效应逐渐变得严重起来。综上可见，应开展微波组件机电热耦合研究，确定典型互联工艺对组件传输性能的影响机理，给出性能敏感的关键互联工艺结构参数，从而为微波组件中典型互联工艺的设计与调试提供理论保障。

1.3 微波组件机电热耦合研究现状

微波组件机电热耦合问题是一个涉及面很广泛的基础理论问题，也是制约微波组件高性能、研究周期与成本的核心技术问题之一。长期以来，发达国家在微波组件机电热耦合问题的处理方面有一定的理论和方法作为指导，实际研制中也存在一定的经验调试环节，但远比国内调节环节少得多。国内关于微波组件由于研究技术薄弱、测试与试验手段落后等多方面因素，在组件性能影响机理方面所开展的研究既不系统也不够深入^[17,18]。同时，国内一些工程技术人员，尤其是机械结构设计人员与工艺人员，从工程实践中发现了许多问题和矛盾：第一，虽然用尽各种方法、加工设备和手段，但仍难以满足电讯设计人员对组件工艺精度的要求；第二，在最终调试时不断发现，付出高昂代价而达到精度要求的组件并不一定能保证满足传输性能指标，而一些未达到精度要求的组件却可以满足。尽管机械结构设计与工艺人员开始思考这一问题，并从实践中归纳出一些经验，但缺乏一般指导意义。随着微波组件工作频段、带宽、功率等性能指标的提高，上述问题日趋突出。为此，近年来，国内外研究者从不同的角度与不同的层次对微波组件制造中的工艺控制与性能保障技术开展了一系列深入的研究。

1.3.1 微波组件的路耦合分析

对于微波组件电路的结构布局和机电热耦合问题（结构工艺、环境热因素和电路性能），多数学者通过对电路结构的布局、形状和尺寸进行电路等效，尝试构建

微波组件的路耦合理论关系,挖掘结构尺寸因素对等效器件性能参数的影响机理,并与前后端进行级联与串联,研究整个组件电路的传输特性,从而得到电路结构性误差、工艺参数与微波组件电性能误差间的耦合关系。

本书所提及的路耦合是指微波组件电路结构、热、电性能之间的相互耦合关系,其主要研究内容如图 1.2 所示。路耦合区别于传统的多物理场耦合(机械结构位移场、电磁场、温度场、应力场等),在传输方式上,微波信号在组件电路传输线中传播为路(在空气介质中为场);在影响形式上,微波信号在电路上为传导传输,容易受到电路特性参数扰动的影响;在研究方法上,采用等效电路和等效器件参数的方式,即在微波组件电路结构中,噪声是各种误差的最终体现,阻抗是将结构特性和电路特性互联起来的中间变量,研究方法是将期望的系统性能转化成需要的阻抗和把物理设计转化成阻抗的特性,把物理结构转化为与之等效的电路模型。也就是说,将物理设计中线的长、宽、厚和材料特性转化成集总参数的描述形式,从而研究存在结构误差因素情况下整个电路的传输特性。在组件互联工艺中会使用金丝、金带、铜等金属材料,其物性参数(介电常数、损耗角正切等)也是影响电路性能的关键因素,这里路耦合分析方法是建立等效电路模型,考虑介电常数、损耗角正切等因素的影响,将这些因素等效到集总参数的表达形式,从而作为中间变量推导出物性参数与电性能之间的数学模型。

国际上围绕路耦合建模进行了大量的研究工作,也取得了一定的进展^[19-22]:分析高频下的引线键合特性,并且从场路耦合角度出发,对比电磁仿真软件 HFSS 和电路仿真计算软件 ADS 的计算结果;对 75 ~ 110GHz 矩形波导的表面粗糙度效应进行研究,提出一种新的全波方法,采用相似性变换来导出周期性凹凸区域的特征值方程来模拟波导的表面粗糙度;利用静电场比拟方法作为耦合的边界条件,分析机电耦合中出现的静接触与滞后问题;研究 CMOS 工艺所产生的串扰、延迟等信号完整性问题;对静电-流体-结构全耦合问题采用了五种域边界法进行表述;研究印刷电路板的寄生效应及其对电磁兼容的影响关系,发现印刷电路板的寄生效应比较严重,且在实际制造过程中很难进行控制;研究同步开关噪声对高速数字设计的影响,使用叠加理论来模拟同步开关噪声的高速系统开发的电路模型;对低温共烧陶瓷中的接地通孔阵列进行优化,改善低温共烧陶瓷接地的稳定性;对微波多芯片互联中铜引线 with 金引线在不同温度下进行了应用比较,并给出了工程应用建议。

国内也有一些课题组对微波组件的互联工艺进行了研究探讨^[23,24]:系统研究印制电路板设计过程中信号完整性问题;对电磁耦合、压电问题进行了深入研讨;从电磁能量的角度出发,利用多尺度法研究机电耦合的动力传输系统等;研究矩形波导内表面在粗糙的情况下产生的损耗问题;对微波组件中 BGA 焊点空洞问题进行了分析,探讨空洞特性对微波信号传输性能影响机理。

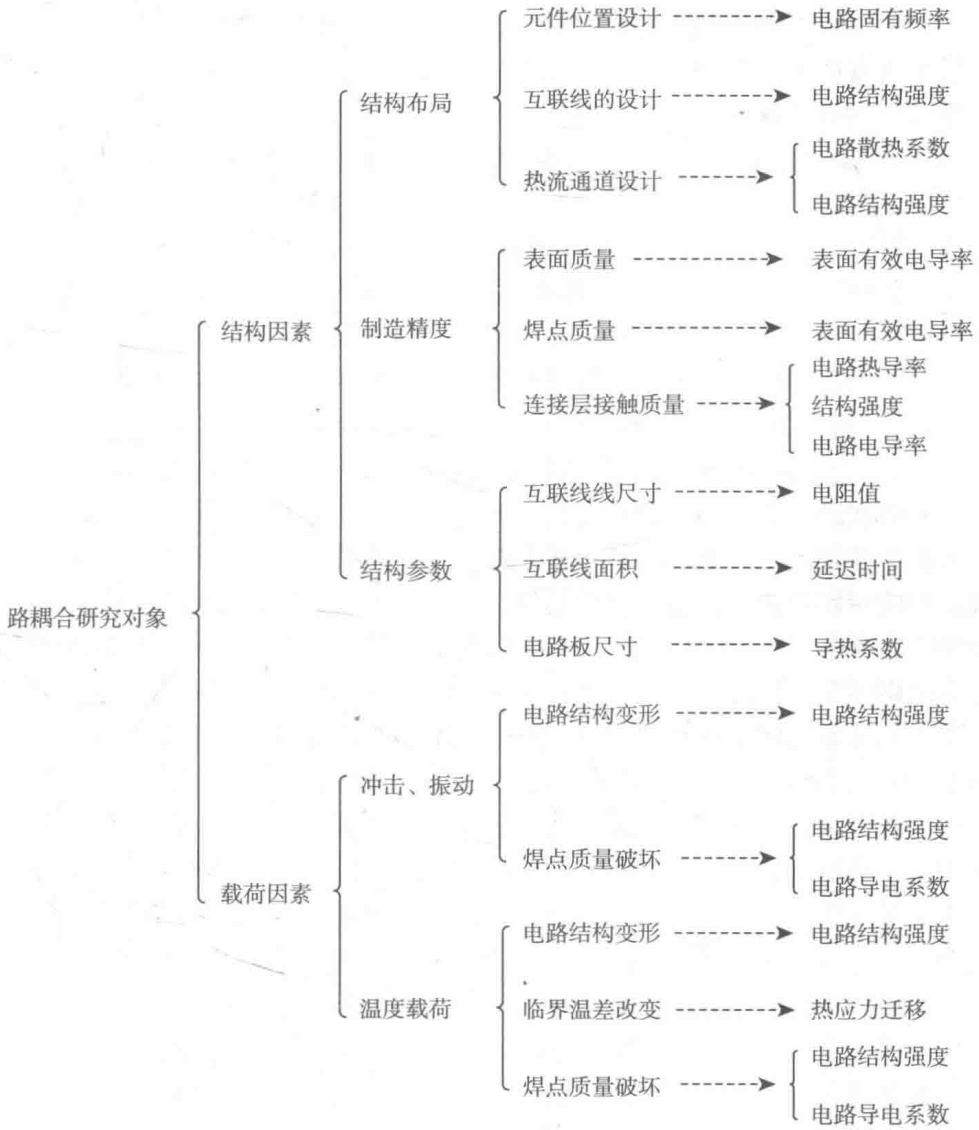


图 1.2 路耦合研究内容

总的来说，在传统技术中，工程人员更多是依靠经验数据进行电路工艺设计，未考虑结构参数与电性能之间的耦合关系，国内外学者目前更多是研究电路加工工艺、电磁兼容和信号完整性等耦合关系，对互联工艺的研究主要是局限于工艺过程与工艺手段，很少有学者采用路耦合思想来开展互联工艺参数对微波组件电路传输性能的影响研究。

1.3.2 组件互联工艺形态表征与建模

有源微波组件互联工艺的表征是实现影响机理挖掘和传输性能调控的重要基

础。Horng^[25]利用正形投影图方法推导出了金丝键合等效电路模型。Liang等^[26]建立了用于微波功率晶体管的金属陶瓷封装的等效电路模型,通过实物测试验证了等效电路模型的准确性。Lee^[27]利用全波分析法和矩量法将键合金丝等效为多段传输线,分析任意形状互联线对微波和毫米波集成电路的宽带特性,并且计算键合线的阻抗损耗和辐射损耗。Alimenti^[28]提出了用于分析微带键合线互联特性的准静态方法,使用保角变换来评估键合线高度对微波电路传输性能的影响。Parks等^[29]通过光学显微镜、扫描电子显微镜和电子背散射衍射研究焊料和焊点的组成,检查Sn颗粒状态,研究得出Sn从SnAgCu熔体中固化温度的变化导致Sn晶粒形貌的显著差异。Hong等^[30]提出了一种多屏偏转仪来增加焊点测量的可测量的倾斜角度,并开发了适当的校准方法和形状重建算法。Sidharth等^[31]对将Surface Evolver数据导入基于有限元的可靠性评估的策略进行了概述,对使用Surface Evolver工具的焊锡形状进行了预测并开展实验对其进行验证。Nishimura等^[32]介绍了车辆电子部件中使用的芯片部件上焊点的最差热疲劳寿命,提出了使用实际尺寸的焊点来获得疲劳特性的等温疲劳试验方法,认为在控制故障的过程当中焊接点的形状也应该被考虑在内。Yang等^[33]使用激光和红外回流焊接方法,在印刷电路板上制作表面贴装元件的Sn-Ag共晶焊点,并对焊点的微观结构进行了分析,找出了焊点与工艺参数之间的关联性。Lee等^[34]用纯铜线研究了无铅焊锡系统的焊点黏合强度、剪切强度、界面金属间化合物的形成和分形形态之间的相互关系。Padilla等^[35]使用X射线显微镜来显示无铅焊点的回流孔隙率,并且基于孔的确切几何尺寸构建三维模型,以进行中断剪切试验和断层扫描,以便在变形的几个阶段对焊点接头进行成像。Cugnoni等^[36]讨论了无铅焊点的尺寸和约束效应,提出了依赖关系取决于时间、应变历史和温度,以及影响其微观结构的其他几何和加工参数。

在国内,西安电子科技大学基于焊点虚拟成形技术,对焊点组装质量检测与鉴别技术进行了研究,解决了焊点三维表面形状重构、焊点三维质量信息提取、焊点缺陷智能鉴别和焊点缺陷原因智能分析等问题^[37]。东南大学微电子机械系统教育部重点实验室分析了键合线结构参数对射频电路传输性能的影响,提出了键合线的等效电路模型,通过电磁仿真软件验证了等效电路^[38]。哈尔滨工业大学采用Surface Evolver软件对焊点形态进行电发热、热循环等有限元模拟研究,并对封装焊点进行了应力应变研究^[39]。东南大学利用有限元数值模拟方法对焊点可靠性问题进行了分析,主要利用有限元方法模拟、分析焊点位置和焊点高度变化对焊点可靠性的影响,同时给出了在热循环下焊点的应力应变分布特征^[40]。哈尔滨理工大学以几种典型SAC/Cu焊点为载体,借助纳米压痕技术手段,原位研究了微焊点的塑性及蠕变性能^[41]。桂林电子科技大学基于最小能量原理和焊点形态理论,建立了LCCC器件焊点三维形态预测模型,并对焊点钎料桥连过程进行了模拟^[42]。广东特种设备检测研究院提出了一种基于内聚力模型,可应用于同种钎料不同尺