

矩形波导到微带线的探针过渡结构设计

潘其江

中国电子科技集团公司第十三研究所 河北石家庄 050000

DOI:10.32629/ems.v8i6.20573

[摘要] 矩形波导与微带线是微波射频系统核心传输结构,传输特性和场分布差异显著,探针过渡是实现二者高效互联主流方案,广泛用于微波器件系统。为优化微波传输系统适配性与稳定性,完善信号传输体系,本文开展矩形波导到微带线的探针过渡结构设计研究。文章梳理工作原理与设计逻辑,总结核心优化方向,归纳关键点,提出设计优化策略。研究旨在提升波导-微带探针过渡结构性能,为微波互联器件研发与应用提供参考,助力微波射频系统轻量化、集成化发展。

[关键词] 矩形波导;微带线;探针过渡;结构设计

引言:

现代微波通信技术飞速发展,小型化、集成化、高稳定性的射频传输器件成了主要发展方向。矩形波导有低损耗、大功率传输的优点,微带线体积小、易集成、适合PCB工艺,两者结合使用可以达到微波系统传输性能和集成性的双重目的。探针过渡是两种传输结构连接的关键载体,它的结构设计直接影响到系统的信号传输质量以及器件的匹配程度。因此,本文对矩形波导-微带线探针过渡结构的设计进行研究,整理出设计的关键点,完善优化的设计体系。

一、矩形波导到微带线探针过渡结构设计的设计意义

矩形波导和微带线的场传输机理、结构形态相差较大,直接连接易造成传输模式畸变、信号耦合失衡,探针过渡结构可以实现两种传输模式的平稳转换,搭建起微波系统异构器件的互联桥梁。优化探针过渡结构设计,可以改善微波信号在不同结构间传输的顺畅程度,满足小型化微波设备的应用要求,丰富射频微波器件集成设计体系,扩大矩形波导和微带线的组合应用范围,为通信、探测类微波设备性能提升和结构减小提供重要支持。

二、矩形波导到微带线探针过渡结构设计核心适配要点

矩形波导到微带线的探针过渡本质上是电磁场模式转换和阻抗匹配的综合过程,完整的过渡结构包括矩形波导腔体、金属耦合探针、介质基片、微带传输线和接地结构等主要单元。各个结构单元互相耦合、协同工作,一起完成波导TE₁₀模到微带准TEM模的平稳转换。微波系统集成应用场景下,过渡结构不是独立的器件,需根据整机的尺寸规格、工作频段、集成工艺和工作环境来设计,所以结构设计要兼顾电磁

传输特性、机械结构特性以及工艺量产特性。整体设计以模式匹配、阻抗匹配、结构匹配、工艺匹配为原则,在保证电磁场高效耦合转换的基础上,符合现代微波器件小型化、标准化、集成化的发展方向。下文从模式耦合、阻抗匹配、集成适配三个方面,整理出现阶段结构设计需要重点改进的主要方面,并提出精细化、系统化的结构设计优化策略。

三、矩形波导到微带线探针过渡结构设计的现状

3.1 电磁场模式耦合适配优化

矩形波导的主要传输模式是TE₁₀横电波模式,电磁场在腔体内呈规整的空间分布,电场垂直于波导宽边,磁场沿传输方向横向分布,传输场域封闭且能量集中度高。微带线依靠介质基片来完成信号的传输,传输模式为准TEM模,电磁场分布在介质基片的上下区域,场结构开放且分布弥散。探针是核心耦合单元,它用来拾取波导内部的电磁场能量,然后进行传输模式的转换以及能量的传递。常规结构设计时,两种传输结构的场分布不同会造成模式转换过渡区分布不均,电磁场耦合覆盖范围不匹配,不能满足全工作频段内均匀耦合的要求,必须对模式耦合体系进行精细化适配设计。

3.2 全域阻抗匹配体系构建

阻抗匹配就是使微波信号可以有效地传输,减小信号的反射。矩形波导、耦合探针、介质基片、微带线这些单元的阻抗特性不同,而且阻抗参数还会受到结构尺寸、介质材料、工作频段等诸多要素的影响。完整的探针过渡链路有诸多的阻抗突变界面,各个界面阻抗衔接是否顺畅直接决定信号传输效率的好坏。现有的基础设计方案大多只关注到端口单点阻抗的匹配,忽略了过渡链路全域阻抗梯度的过渡设计,造

成不同工作频段下的阻抗适配稳定性不足,不能实现宽频域、全链路的阻抗平衡,从而影响过渡结构整体传输性能的提高,需要建立全域一体化的阻抗匹配设计体系。

3.3 集成结构工艺兼容升级

目前微波射频系统向着微型化、一体化、量产化的方向发展,过渡结构不再只看重电磁传输性能,还要适应 PCB 集成工艺、设备整机装配结构和标准化量产流程。探针过渡结构包括金属探针加工、基片蚀刻、腔体装配等多道工序,各个加工装配环节的结构参数偏差都会影响到器件的一致性。另外,传统分立式过渡结构体积大、结构不规整,不能满足高密度集成微波模组的设计要求。因此要依靠集成化设计思维,改善结构形态和加工工艺,从而达成传输性能和集成适配性能的同步改善。

四、矩形波导到微带线探针过渡结构设计的五项优化策略

4.1 调控电磁场分布优化模式耦合

根据电磁场模式耦合适配优化的要求,可以对结构参数进行精细化调节来改善模式耦合。首先根据电磁传输理论,对矩形波导 TE₁₀ 模和微带准 TEM 模的场分布进行准确分析,找出两类模式能量耦合区间以及转换规律。根据工作频段的要求来调整耦合探针的插入深度、径向位置以及形态结构,使它能够有效地对应到波导内部电场最强的地方,从而最大限度地拾取电磁场的能量。同时采用微带渐变结构,使模式在变换过程中更加平滑,减弱了由于场结构突然变化而产生的传输波动,使不同频段的电磁场模式可以平稳、均匀地转换,提高全频段模式耦合的适应性,保证跨结构信号传输的稳定。整体结构布局设计时,可以按照波导腔体截面尺寸来确定探针的布置方式,利用场分布对称性原则来避免由于耦合探针偏移、结构不对称造成的场耦合偏移问题。根据微波系统宽带工作要求,采用渐变过渡微带枝节结构来填补模式转换过程中场能量的空白区,使波导封闭场的能量可以平稳地过渡到微带开放场结构中。除此之外,还可以通过改善接地金属面的布置方式来限制电磁场的散射范围,抑制杂散电磁场的产生,从而规范模式转换的过程,在各种频率的工作场景下保证过渡结构有较高的耦合效果。

4.2 构建梯度链路优化阻抗匹配

根据全域阻抗匹配体系构建的需求,创建梯度化的、全

链路的阻抗适配设计方案。抛弃单点阻抗匹配的思想,将波导端口、探针过渡段、微带端口作为一个完整的传输链路来考虑,整理出各个结构单元的阻抗特性规律。通过调节介质基片厚度、微带线宽度、探针直径等结构参数来形成连续的阻抗梯度,消除传输链路路上的阻抗突变节点。结合频段特性做阻抗参数动态适配设计,保证过渡结构在宽带工作区间内保持稳定的阻抗匹配状态,降低信号反射损耗,提高微波信号的传输效率和传输一致性。在整体设计时要考虑到低频和高频频段的阻抗特性差别,防止高频工况下结构尺寸的电磁效应加重造成阻抗偏移的情况出现。采用多级微带渐变阻抗变换结构,将整体阻抗差值分为若干个分段,用平滑的梯度过渡代替突变式的阻抗转换,满足宽频工作要求。同时根据波导端口的标准阻抗参数来校准探针过渡段的阻抗基准,平衡各个结构单元间的阻抗差值,有效地减小回波损耗,使全域阻抗匹配体系适应复杂的工况下微波信号的传输需求。

4.3 一体化结构提升集成性能

按照结构集成工艺兼容升级的要求,实行一体化集成结构设计。将波导腔体、耦合探针、微带传输结构的空間位置进行合理规划,去除多余的结构,缩小器件的整体尺寸,满足微型化微波模组的装配要求。统一过渡结构同 PCB 电路板、微波整机设备的装配标准相衔接,改良接口形状及安装构造,加强器件通用适配性。优化结构布局的规整度,减小分立装配结构造成的装配误差,提高器件整体结构的稳定性,达到电磁传输性能和空间集成性能的双优化,满足高密度、一体化微波系统集成需求。结构集成设计时可以采用探针和接地结构一体化成型的方式代替传统的分立焊接装配工艺,从而避免由于焊接虚焊、位置偏差、形变造成的问题,提高器件的加工一致性。与此同时贴合现代微波模组平面化集成趋势,对腔体开槽尺寸和微带基片装配间隙进行优化,减小整个结构所占空间,适合机载、车载等小型化微波设备安装,保证器件结构强度、装配方便性、通用性。

通过一体化结构设计,还能减少过渡结构中额外的连接环节,降低额外的接触损耗与传输损耗,进一步保障信号传输的稳定性。同时,一体化设计简化了加工装配流程,减少了人工装配环节的工作量,在批量生产时能够有效降低制造成本、提升生产效率,更适配当前微波器件量产化

的发展需求。

4.4 优选基材提升传输稳定性

基材特性是决定过渡结构的传输性能和使用寿命的主要因素,也是结构优化的一种辅助手段。根据器件的工作频率、工作环境以及传输功率的要求,选择合适的介质基片、金属探针、波导腔体的制作基材。优先选择介电常数稳定、损耗角小的介质材料,削弱介质损耗对信号传输的干扰;选用导电性好、抗氧化能力强的金属材料制作探针和腔体,保证电磁耦合效率和结构耐久性。匹配基材特性微调结构尺寸参数,使基材性能和结构形态得到最好的适应性匹配,从而提高过渡结构在复杂工况、宽频工作环境下传输的稳定性。高温、高湿的工作环境下,可加装耐高温、防潮的基材及表面镀层工艺,抑制基材介质参数受环境温度、湿度的影响而发生变化,避免由于环境因素引起传输性能的改变。同时根据大功率传输场景的需求选择高热稳定性的基材,避免由于大功率电磁场的发热造成结构形变和参数漂移,从各方面提高过渡结构的环境适应性及工作可靠性。

针对高频工作场景,还可以选用低粗糙度的基材表面加工工艺,降低导体表面粗糙度带来的导体损耗,进一步减小过渡结构的传输插损,提升信号传输的纯净度;在兼顾性能的同时,也可结合量产加工的可行性,优先选择易加工、良品率高的成熟基材,平衡性能需求与批量制造成本,保障优化后的结构具备工程落地的实际价值。

4.5 仿真迭代完善标准化设计

为提高过渡结构设计的精度和量产的一致性,用三维电磁仿真来完成迭代优化设计。根据微波传输的基础理论来建立准确的结构仿真模型,完整地再现电磁场耦合、阻抗传输、结构装配全过程的特点。采用多维参数扫描、迭代仿真的方式,选择出最优的结构参数组合来避免人工设计经验偏差。同时结合量产工艺特性对仿真模型进行优化,满足加工、装配工艺公差要求,提出性能、工艺、通用性三者兼顾的标准化设计方案,减少器件量产误差,促进探针过渡结构的标准化、规模化工程应用。在仿真设计时可以增加公差仿真分析,模拟加工尺寸偏差、装配间隙误差等量产常见的问题,提前预判结构性能波动的规律,在设计阶段留出工艺容错的空间。同时可以搭建出各种工作频段、环境温度、传输功率工况的

多场景仿真模型,验证结构的通用性以及稳定性,形成完整的、规范的、可以落地的器件设计体系。

通过全流程仿真迭代,还能梳理出不同频段下探针长度、插入深度、匹配块尺寸等核心参数的变化规律,整理形成可供设计参考的参数关系曲线,降低不同应用场景下的重复设计成本,使探针过渡结构设计从依赖经验的定制化开发转向可复制推广的标准化设计,进一步缩短研发周期,提升设计效率与工程落地可靠性。

五、结论

矩形波导-微带线探针过渡结构是异构微波传输系统互联核心器件,其设计质量影响微波设备传输精度与集成水平。本文分析了探针过渡结构传输原理与设计意义,明确模式耦合、阻抗匹配、集成适配三大优化方向,提出五项适配性强的结构优化策略。通过精细化模式耦合调控、全域阻抗梯度匹配、一体化集成设计等方案,可提升过渡结构传输稳定性、集成通用性与工艺适配性。研究梳理的设计思路与优化体系,能适配多场景微波系统需求,为高性能波导-微带过渡器件研发与工程落地提供理论支撑。

[参考文献]

- [1]龚建成,陈春红,廖芊芊.高隔离度带状线-矩形波导双工过渡[C]//中国电子学会微波分会,南京理工大学,南京师范大学.第十五届全国毫米波亚毫米波学术会议论文集.南京理工大学电子工程与光电技术学院;,2025:299-302.
- [2]王亚松.微带线馈电的介质集成波导介电常数近零超材料天线[D].山东大学,2025.
- [3]叶欣茹,张宇驰,丰益年,等.基于矩形波导D波段高抑制度E面短截线带通滤波器设计[C]//中国电子学会.2025年全国微波毫米波会议报告集-TP2T.电子科技大学;电子科技大学(深圳)高等研究院;,2025:11-13.
- [4]祝思雨,朱华利,张月肖,等.W波段全频带微带探针过渡结构设计[J].微波学报,2024,40(S1):167-170.
- [5]曹屹,刘勇,蔡宗棋,等.一种W波段微带-超薄腔体滤波器-微带结构设计[C]//中国电子学会.2024年全国微波毫米波会议论文汇编(上册).电子科技大学,电子科学与工程学院;,2024:379-381.