

Research on Processing Technology Methods for High-Frequency Electrical Connectors

Peipei Ren

AVIC Xifly, Xi'an, Shaanxi, 710089, China

Abstract

To address engineering challenges in high-frequency electrical connectors such as low machining accuracy, inconsistent electrical performance, and poor service reliability during precision manufacturing processes, this study systematically investigates precision machining techniques for critical components including conductors, elastic contact elements, and high-frequency dielectric materials. Grounded in the coupling relationship between high-frequency transmission mechanisms and manufacturing accuracy, the research optimizes key processes such as coaxial alignment assembly, residual stress elimination, precision welding, and selective coating. A multidimensional process validation system was established, incorporating orthogonal experiments and variance analysis to derive optimized key process parameters and high-frequency electrical performance evaluation results. This leads to comprehensive process optimization strategies and engineering application guidelines for the entire manufacturing workflow. The optimized solutions provide theoretical foundations and practical guidance for large-scale precision manufacturing of high-frequency electrical connectors.

Keywords

high-frequency electrical connector; manufacturing process; process method

关于高频电连接器加工工艺方法的研究

任培培

中航西飞, 中国·陕西 西安 710089

摘 要

为了克服高频电连接器在精密制造过程中加工精度低、电性能一致性差、服役可靠性低等工程问题, 文章以高频传输机理和制造精度耦合关系为理论依据, 系统研究中心导体、弹性接触件、高频介质体等关键零部件的精密加工工艺, 优化同轴对位装配、残余应力消除、精密焊接和选择性镀覆等关键工序。建立多维度工艺验证体系, 做正交试验和方差分析, 得到关键工艺参数的优化方案以及高频电性能测试评定结果, 得到全流程工艺全局优化方案和工程应用准则。优化之后可以给高频电连接器的规模化精密制造提供理论依据和工程指导。

关键词

高频电连接器; 加工工艺; 工艺方法

1 引言

高频电连接器是射频通信、雷达、航空航天等装备系统里完成信号高效传输的重要基础元件, 加工精度、装配质量、工艺稳定性都会影响到特性阻抗、插入损耗、驻波比等主要的电性能指标。随着工作频率向毫米波频段提高、应用场景向高可靠极端环境扩展, 传统的加工工艺已经不能满足尺寸精度、形位公差和电性能一致性高的要求了。目前行业内普遍存在着一些问题, 因此文章从四个方面出发, 对高频电连接器加工工艺方法进行系统的研究, 建立一个标准化、可量化、可推广的精密制造体系, 以提高国产高频连接器的质量水平和工程应用能力。

【作者简介】任培培(1992-), 女, 中国陕西西安人, 本科, 工程师, 从事电缆制造与电连接器装配工艺研究。

2 高频电连接器核心特性与加工工艺基础

2.1 高频传输机理与制造精度耦合效应

根据高频电磁场传输和微波传输线理论, 对连接器内部信号传输、反射、辐射、衰减等进行分析, 找到驻波比、插入损耗、回波损耗等主要电性能指标与加工精度之间的关系^[1]。重点阐述中心导体同轴度、端面间隙、表面粗糙度、径向跳动等制造误差对高频信号完整性的机理分析, 建立加工误差和电性能退化的定量耦合模型, 给精密加工精度分配和工艺参数设计提供理论依据和约束边界。

2.2 结构几何参数对电性能的影响机制

系统研究中心导体直径、介质支撑结构尺寸、接触对配合长度、内外导体同心度、壁厚均匀性等关键几何参量, 分析其对特性阻抗稳定性、相位一致性、屏蔽效能、信号时延的影响规律。利用多物理场仿真和试验对比来确定各个结

构参数公差和电性能指标的定量约束关系,确定关键尺寸的精度控制阈值和公差带,给结构设计和工艺控制提供量化的依据。

2.3 精密加工工艺体系及质量控制准则

建立包含切削、冲压、注塑、模压、选择性镀覆、精密装配、激光焊接等全部精密加工工艺的体系,并确定各个工序的质量控制点和检测项目。以尺寸精度、形位公差、表面质量、镀层性能、装配同轴度、高频电性能为主要控制对象,确定过程能力指数(CPK)、批次一致性、可靠性验收和失效判定标准,使工艺过程标准化、可控化、可追溯化。

2.4 功能材料优选与预处理工艺规范

根据高频损耗特性、力学强度、耐热性、弹性稳定性、环境适应性等要求来选择铍青铜、锡磷青铜、低介电常数工程塑料(LCP、PTFE)、镀金、镀镍等镀层材料体系。编制材料矫直、去应力退火、表面除油、氧化层去除、晶相控制等预处理工艺规程,消除材料内、外表面残余应力及初始缺陷,减小后期加工变形及性能波动^[2]。

3 高频电连接器关键零部件加工工艺方法

3.1 中心导体精密切削成型工艺

采用多轴数控车削和走心式数控车床复合加工方案,优化刀具路径、切削参数、装夹定位、顶尖顶持方式,严格控制中心导体圆柱度、同轴度、锥度、端面平面度。采用微量润滑冷却、刀具磨损补偿、尺寸在线检测反馈技术,减小切削热变形和装夹变形,提高尺寸一致性、表面质量,保证高频传输界面几何精度和阻抗连续性。

3.2 弹性接触件冲压与精密整形工艺

采用高精度级进冲压成型工艺,调整冲裁间隙、压弯角度、回弹补偿系数、卸料力之间的配合关系来提高接触臂尺寸精度和形状一致性。经由精密校平、整形、滚压并配合电化学去毛刺联合处理,改善接触表面微观形态,改良硬度分布,进而达成接触压力均匀化,削减接触电阻及高频反射损耗,加强插拔寿命与电接触可靠性。

3.3 高频介质构件高精度成型控制

采用精密注塑和模压成型相结合的工艺路线,对模具浇口位置、冷却水路布置、保压压力及冷却曲线进行优化,保证介质构件尺寸精度、同轴度、壁厚均匀性、端面平面度。抑制缩痕、翘曲、气孔、熔接痕、内部残余应力等缺陷,保证材料的介电常数、损耗角正切不变,提高装配定位精度、结构稳定性,降低阻抗失配、信号畸变的风险。

3.4 选择性镀覆工艺与镀层质量控制

利用局部遮蔽、挂具定位、精密电镀技术对接触区域进行选择性镀镍镀金,严格控制镀层厚度、均匀性、孔隙率、表面光洁度和结合强度^[3]。改善电镀电流密度、镀液组成、温度、搅拌速度等来改善镀层的微观结构,提高耐磨性、耐腐蚀性、抗高温氧化能力,防止镀层起泡、脱落、接触电阻漂

移等失效模式,保证长期服役可靠性。

4 高频电连接器装配工艺优化与可靠性保障

4.1 同轴对位装配精度控制技术

使用专用定位工装和视觉对位系统实现内外导体和介质构件同轴装配,准确控制径向跳动、轴向窜动和端面间隙。使用定扭矩锁紧机构以及合适的配合公差来减小装配应力和形变,提高阻抗连续性,提高高频传输性能的一致性,达到多批次装配的稳定性。

4.2 微间隙装配与残余应力消除工艺

严格控制部件配合间隙,防止由于过盈过大而引起的塑性变形以及介质构件开裂。使用时效处理、低温松弛、分步装配等方式消除内部残余应力,控制尺寸波动,接触压力衰减小,延长寿命,抑制结构断裂、性能劣化,提高总结构稳定性。

4.3 精密焊接工艺参数优化

采用激光微焊接、真空汽相焊接工艺改变焊接功率、作用时间、温度曲线及焊料配比来控制焊点形貌、浸润性及热影响区。减少虚焊、漏焊、气孔、热变形缺陷,保证机械连接强度和电气通路连续性,降低焊接引入的阻抗波动,提高高频传输可靠性。

4.4 环境适应性与服役可靠性提升途径

采用密封结构设计、三防涂覆和高低温老化筛选等方式来提高连接器的耐温、耐湿、耐盐雾和抗振动冲击的能力^[4]。对典型失效模式进行分析,找出薄弱环节,改善工艺方案来提高服役寿命和平均无故障工作时间,满足航空航天、通信基站等高可靠场景使用的需要。

5 高频电连接器加工工艺试验验证与参数优化

5.1 工艺验证方案与评价指标体系

工艺验证核心是通过多维度、量化的试验设计,科学评定加工工艺的稳定性、精度保障能力及电性能一致性。验证方案严格遵循系统性、可比性、可追溯性原则,通过多组工艺对照及重复试验,全面识别工艺波动源、薄弱环节及潜在失效风险。评价指标体系以制造精度与电性能的耦合关系为理论支撑,将尺寸公差、形位误差、表面微观形貌等机械指标,与特性阻抗、插入损耗、驻波比、相位一致性等高频指标进行关联映射,形成从基础精度到系统性能的递进式评价逻辑,确保工艺验证既能反映单点工序能力,又能体现全流程集成效果。基于GJB681-89与GJB360B-2009的SMP型高频连接器工艺验证方案构建。按照GJB681-89射频同轴连接器总规范、GJB360B-2009电子及电气元件试验方法和GB/T11313系列射频连接器试验标准,用5G通信和机载设备常用的SMP型高频连接器做为验证载体,建立包含尺寸精度、表面质量、装配精度、高频电性能、环境可靠性的工艺验证体系。试验设置传统工艺组、优化工艺组、基准对照组三个批次,每个批次样本量为50件,满足

统计有效性要求。机械尺寸指标依据精密连接器行业通用精度要求,控制内导体同轴度 $\leq 0.01\text{mm}$ 、圆柱度 $\leq 0.008\text{mm}$ 、端面平面度 $\leq 0.005\text{mm}$;镀层指标执行 GJB2446-1995《电连接器镀金层技术条件》,镍底层厚度 $2\sim 3\mu\text{m}$,金层厚度 $1.27\sim 2.5\mu\text{m}$;高频电性能按 GB/T11313.201-2018 要求,控制特性阻抗 $50\Omega \pm 0.5\Omega$ 、18GHz 下插入损耗 $\leq 0.15\text{dB}$ 、电压驻波比 ≤ 1.2 ;环境可靠性按 GJB360B 执行 20g 振动无瞬断、96h 湿热后接触电阻 $\leq 5\text{m}\Omega$ 。

5.2 关键工艺参数正交试验与方差分析

正交试验与方差分析是工艺参数多目标优化、显著性判别及干扰剔除的核心理论方法 [5]。通过合理设计试验因素与水平,可在减少试验次数的前提下,获取具有统计显著性的参数影响规律,规避全面试验带来的成本与效率损耗。极差分析用于判定各因素对评价指标影响的主次顺序,方差分析则通过显著性检验区分显著因素与非显著因素,实现关键工艺参数的精准控制。参数优化以最小加工误差、最小性能离散、最大过程稳定性为目标,遵循最小波动、最大稳健性原则,构建多目标决策模型,确定全局最优参数组合。该过程为工艺稳健性设计及批量生产控制提供理论支撑。

以铍青铜 QBe2.0 中心导体 ($\phi 1.5\text{mm} \times 8\text{mm}$) 为对象,选取主轴转速、进给量、背吃刀量、刀具补偿系数 4 因素 3 水平,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验方案,目标优化同轴度、圆柱度、表面粗糙度 Ra。工艺参数水平取自行业成熟区间,转速 4000/6000/8000r/min,进给量 0.008/0.012/0.016mm/r,背吃刀量 0.05/0.10/0.15mm。经极差分析与方差分析表明,进给量对表面粗糙度影响极显著 ($P < 0.01$),主轴转速对同轴度影响显著 ($P < 0.05$),背吃刀量影响不显著。最优参数组合确定为,6000r/min、0.008mm/r、0.05mm。批量验证结果显示,同轴度由 0.018mm 提升至 0.009mm,表面粗糙度 $\text{Ra} \leq 0.4\mu\text{m}$,过程能力指数 $\text{CPK} \geq 1.33$,满足 IT6 级稳定生产要求。

5.3 高频电性能测试与一致性评定

高频电性能测试是检验加工工艺对信号传输质量影响的核心手段,其核心目的是定量表征加工误差引发的阻抗失配、反射增强、损耗上升及相位畸变。批次一致性评定依托统计过程控制理论,通过均值、标准差、过程能力指数、控制图等统计工具,分析产品性能分布特征与波动水平,识别异常波动源并判定工艺是否处于稳态。电性能一致性本质是制造过程波动在电性能上的宏观体现,提升一致性的核心在于压缩加工误差链、降低装配累积偏差、抑制材料与工艺的随机扰动,实现电性能从“合格”向“高一一致性、高稳定性”的升级。

依据 GB/T11313.201-2018《射频连接器第 201 部分:电气试验方法》。使用 Agilent E5071C 矢量网络分析仪对 50 件优化工艺的 SMP 连接器做 1MHz 到 18GHz 的扫频测试,

主要检测特性阻抗、插入损耗、回波损耗。实测结果显示,特性阻抗均值 50.2Ω ,标准差 0.28Ω ,批内一致性 96%;18GHz 插入损耗均值 0.12dB ,最大值 0.14dB ,无超标件。与传统的工艺批次相比,阻抗的波动范围由原来的 $\pm 1.2\Omega$ 减小到现在的 $\pm 0.6\Omega$ 。用性能直方图和 SPC 控制图分析可知,波动主要是由介质件装配同轴度引起的。定位工装精度从原来的 0.01mm 提高到 0.005mm 之后,批一致性达到了 98.5%,可以满足批量生产的要求。

5.4 工艺参数全局优化及工程应用准则

工艺全局优化是在单一工序优化的基础上,开展全流程耦合协同、误差传递抑制、多目标平衡的系统集成工作。工程应用准则是将优化结论转化为标准化、可执行、可核查的操作规范,明确工艺参数窗口、质量控制点、检测方法、判定阈值及异常处置机制,实现从试验最优到生产稳态的有效转化。全局优化的最终目标是构建稳健型工艺体系,确保产品在原材料波动、设备磨损、环境变化等干扰条件下,仍能保持高精度与高一一致性,为高频电连接器规模化、高可靠制造提供统一技术基线与工程约束。

根据车削、冲压、注塑、镀覆、装配、焊接等工序的试验结果,按照微波电连接器制造工艺规范、精密注塑成型技术要求等行业规范,建立全流程全局优化参数体系,内导体车削尺寸在线补偿 $\pm 0.003\text{mm}$,弹性接触件冲压回弹补偿 $3^\circ \sim 5^\circ$,LCP 高频介质注塑参数料筒温度 310°C 、保压压力 85MPa 、冷却时间 45s,选择性镀覆镍层 $2.5\mu\text{m}$ 、金层 $2.0\mu\text{m}$ (符合 GJB2446),同轴装配定位精度 0.005mm ,激光微焊接功率 18W、时间 80ms。

文章主要研究高频电连接器精密加工和性能保证的问题,建立了高频传输特性和制造精度的耦合关系,提出了中心导体精密切削、弹性件精密冲压、介质体高精度成型、选择性镀覆、同轴装配和精密焊接等成套工艺方法。经过工艺验证、正交试验、高频性能测试和全流程参数优化,得到具有工程可行性的工艺准则和质量控制方案。未来可以继续对高频段、小体积、恶劣环境下的超精密加工、微组装、智能化检测进行融合技术研究,不断提高高频电连接器的性能极限和工艺稳定性。

参考文献

- [1] 何佳春,王力磊.航空件数控加工工艺方法研究[J].现代制造,2026,(03):26-28.
- [2] 陈健斌,潘锦杰.风电主轴大型数控加工工艺参数优化与加工精度分析[J].南方金属,2026,(01):39-41.
- [3] 陈文华,杨定,陈哲文,等.长贮环境下高频电连接器接触性能退化规律的研究[J].机械工程学报,2025,61(14):344-351.
- [4] 蒋开勇.插接式高转速螺旋钻杆加工工艺技术研究[J].煤矿机械,2025,46(03):109-111.
- [5] 陈亮,曹明俊,胡江航,等.浅谈舰载飞机电连接器打保险工艺方法[J].精密制造与自动化,2024,(02):1-5.