

精密绕线工艺质量问题分析与系统性解决方案研究

胡安明

东莞市有励电子有限公司 广东 东莞 523790

摘要: 精密绕线是电机、变压器、传感器等高端电磁元件制造的核心工序,其工艺质量直接决定产品电气性能、机械可靠性与使用寿命。针对精密绕线生产中普遍存在的线径不均、绝缘破损、绕线松动、匝数错误、焊接不良、折弯角度超差等典型质量缺陷,本文采用鱼骨图(5M1E)分析法,从人员、机器、物料、方法、环境、测量六个维度,系统剖析各类质量问题的根本成因。在此基础上,构建“设计源头控制—生产过程管控—质量检测验证—批量生产批准—风险动态防控”的全流程质量管控体系,融入DFMA、设计评审、PPAP、CCD视觉检测、Cp/Cpk过程能力分析等先进技术与管理工具,提出针对性的系统性解决方案。结合通用电机绕线质量改进、0.18mm细铜线精密绕线工艺优化两个实际生产案例,验证方案的可行性与有效性。研究表明,该系统性解决方案可显著降低精密绕线工艺不良率,有效规避批量质量事故发生,大幅提升生产效率、制程稳定性与产品一致性,能够很好适配当前微型化、高精度电磁元器件的生产制造需求,为精密绕线相关制造企业提质降本、工艺升级、质量体系完善提供可靠的理论指导与实践参考。

关键词: 精密绕线; 质量缺陷; 鱼骨图分析; DFMA; PPAP; CCD视觉检测; Cp/Cpk; 制程质量风险管控

引言

随着高端装备、消费电子、医疗设备、航空航天等领域向小型化、精密化、高可靠性方向快速发展,电磁元件作为各类智能装备的核心基础零部件,对制造工艺的精度、稳定性、一致性要求持续攀升。精密绕线工艺作为电磁元件制造的关键核心环节,主要是将绝缘漆包铜线按照预设的匝数、间距、张力、层数等工艺参数,精准缠绕在铁芯、塑胶骨架或专用模具上,其绕制质量直接决定电磁元件的电感、电阻、耐压、绝缘等关键电气参数,同时深刻影响产品的机械强度、抗振性能、老化性能与长期服役稳定性^[1]。

在行业高速发展的背景下,国内精密绕线加工产业逐步向精细化、自动化、智能化转型,但大量中小制造企业仍存在制程管控体系不完善、工艺标准化程度低、智能化检测设备缺失等短板。当前精密绕线生产受设备老化失准、原材料品质参差不齐、工艺参数匹配不合理、人员操作不规范、车间生产环境不稳定、检测体系滞后等多重因素叠加影响,各类质量缺陷频繁发生,不仅大幅提升返工、报废、返修的生产成本,延长产品交付周期,还容易造成终端整机设备运行异常、参数漂移甚至安全故障。传统质量管控模式以事后检验、问题整改为主,缺乏前置预防、过程监控、数据化分析和风险预判能力,无法从根源解决反复性、顽固性质量问题。

尤其是近年来0.18mm及以下超细漆包线在微型传感器、微型电感、精密医疗器械线圈中的广泛应用,超细导线绝缘层极薄、机械强度低、极易拉伤断裂,对张力

控制、排线精度、设备状态、操作手法、环境洁净度提出了极高要求,进一步加大了精密绕线工艺的质量管控难度。基于以上行业现状与生产痛点,本文系统开展质量缺陷识别、全维度成因分析,搭建全链条、闭环式、可落地的质量管控方案,并通过真实生产案例验证优化效果,对推动精密绕线工艺标准化升级、提升企业核心制造能力具有重要的工程应用价值。

1 精密绕线工艺基础与典型质量缺陷识别

1.1 精密绕线工艺基础

精密绕线工艺核心特征为高精度、高稳定性、高一致性,核心工艺环节涵盖绕前准备、绕制成型、后续处理、质量检测四个阶段。绕前准备包括设备精度校准、物料外观与性能检查、工艺参数预设;绕制成型以张力控制、排线定位、转速调节为核心,保证线匝排布均匀、无重叠、无挤压;后续处理包含焊锡固定、引线折弯、绝缘防护;质量检测则从外观、尺寸、电气、机械性能多维度完成全项核验。

工艺质量受多重条件约束:对设备主轴、排线机构、张力控制器精度要求严苛;对漆包线线径、绝缘层性能、骨架尺寸平整度依赖性强;操作人员参数设置、实操手法直接影响批次一致性;车间温湿度、粉尘、振动等环境因素,也会间接干扰绕线工艺稳定性^[2]。精密绕线核心质量要求包含外观质量、尺寸精度、电气性能、机械可靠性四大维度,必须严格遵循行业标准与产品设计规范。在现代化批量生产模式下,单一道工序的微小偏差,都会在大批量生产中被持续放大,最终形成大规模不良品,因

此全过程精细化管控必不可少。

1.2 典型质量缺陷识别与危害

通过现场调研、生产数据统计与不良品复盘，梳理出六类高频典型质量缺陷：

线径不均：导线线径批次波动大，超出工艺允许公差范围，主要源于拉丝精度不足、绝缘涂覆不均或绕线张力波动，易造成绕组电阻、电感参数离散，影响产品电气一致性。

绝缘破损：漆包线绝缘漆层刮伤、剥落、露铜，多由设备锐边摩擦、张力过大、物料品质不佳导致，极易引发匝间短路、对地短路，造成元件烧毁失效。

绕线松动：线匝层间间隙过大、绕组松散，振动后易变形移位，主要因张力、排线间距、绕线速度匹配不合理所致，会降低产品抗振性能与使用寿命。

匝数错误：实际绕制匝数与设计标准不符，出现多绕、少绕、漏绕，源于计数器故障、参数设置失误、人员操作疏忽，易形成批量性参数报废。

焊接不良：焊点虚焊、过焊、开裂、夹渣，焊接电流、时间、压力参数不合理及端子氧化是主要诱因，易造成接触不良、通电发热甚至断路故障。

折弯角度超差：引线折弯角度、半径偏离图纸公差，手动操作偏差、折弯设备精度不足是主要原因，直接影响产品装配适配性，增加返工成本。

上述缺陷不仅单独影响产品质量，还存在相互关联、相互诱发的特点。例如张力不稳定既会造成排线松散，也会拉扯导线导致线径不均、绝缘微伤，形成复合型质量问题，大幅增加质量整改难度。

2 精密绕线工艺质量缺陷成因分析（基于5M1E分析法）

为精准定位质量缺陷根本诱因，采用5M1E鱼骨图分析法，从人员、机器、物料、方法、环境、测量六个维度展开系统剖析。

2.1 人员因素

操作人员专业技能参差不齐，对不同线径对应的张力、转速、焊接参数掌握不熟练；质量标准认知不足，无法及时识别绝缘破损、排线不均等隐性缺陷；岗位责任心不强，未严格执行开机点检、过程巡检要求；关键焊接、折弯工序缺少专项培训，操作手法不统一，人为误差放大质量波动。

2.2 机器因素

绕线机长期运行未按期校准，主轴定位、排线导轨精度下降；张力器老化稳压失效，张力波动幅度超标；导轮、轴承等易损部件磨损起毛刺，持续刮伤漆包线绝

缘层；计数模块、焊接控制系统稳定性不足，易出现计数偏差、焊接参数漂移；折弯机定位与角度控制精度不足，缺少定期维护校准。

2.3 物料因素

漆包线存在线径偏差、绝缘层厚度不足、漆膜附着力差等先天缺陷；骨架尺寸超差、表面有毛刺锐边，绕线过程持续划伤导线；端子、焊材材质不达标，表面氧化油污严重，降低焊接结合强度；物料存储防潮防尘管控不到位，导线受潮氧化、绝缘性能衰减。

2.4 方法因素

缺少标准化作业指导书SOP，工艺操作依赖经验，无统一规范；绕线张力、速度、排线间距等核心参数未通过DOE试验优化，不同线径共用一套参数；设计阶段未采用DFMA理念，产品结构不利于绕线、焊接与折弯作业；工序流转管控不严，上道工序不合格直接流入下道生产环节^[3]。

2.5 环境因素

车间温湿度波动超标，引发漆包线热胀冷缩、柔韧性变化，影响绕线与折弯精度；生产区域粉尘堆积，附着在导线与设备表面，加剧绝缘磨损；临近设备振动传导，干扰绕线机排线稳定性；焊接区域气流干扰、湿度过高，破坏焊点成型质量与抗氧化性能。

2.6 测量因素

千分尺、测径仪、绝缘测试仪等检测量具未定期校准，测量数据失真；依赖人工肉眼检验，缺少CCD视觉在线检测，漏检、误检率高；检测流程不规范，抽检频次、测量点位不统一；未开展Cp/Cpk过程能力分析，无法量化评估工艺稳定性，质量偏差发现滞后。

3 精密绕线工艺质量系统性解决方案

针对5M1E全维度成因，构建“设计源头防控—生产过程管控—质量检测验证—批量生产批准—风险动态防控”全流程管控体系。整套体系摒弃了传统单一、零散的整改模式，实现从源头设计、制程生产、智能检测、量产准入到风险复盘的闭环管理，能够从根本上压缩质量波动空间，持续提升制程稳定性，适配高精度线圈批量生产需求。

3.1 设计源头质量控制

融入DFMA面向制造与装配设计理念，设计、工艺、生产多部门协同，简化产品结构，优化绕组布局与引线位置，去除骨架尖锐边缘，降低绕线、焊接、折弯工艺难度。在概念设计、详细设计、试生产前三个节点开展设计评审，审核功能指标、结构工艺性、关键公差设置，从源头规避设计带来的质量隐患，减少后期生产整改成本。

3.2 生产过程质量管控

人员管控实行分级培训、持证上岗,开展设备操作、参数设置、缺陷识别专项培训,将产品合格率、规范操作纳入绩效考核,强化全员质量意识。

设备管控建立日点检、周巡检、月校准制度,定期更换磨损导轮、轴承,校准主轴、张力器、计数系统;升级高精度绕线机、恒张力控制器、自动折弯机,实现设备状态稳定可控。

物料管控建立供应商准入与年度评估机制,严格执行IQC来料全检,对线径、绝缘层、骨架尺寸逐批核验;规范物料密封存储、先进先出管理,杜绝受潮氧化变质。

工艺管控采用DOE实验设计,优化不同线径尤其是0.18mm细线的张力、转速、排线间距、焊接参数,编制标准化SOP,明确操作流程与质量控制点,实现工艺参数标准化、操作流程规范化^[4]。

3.3 质量检测与过程能力验证

搭建CCD视觉检测、在线激光测径、绝缘性能测试、焊点拉力检测一体化智能检测体系,实现绕线外观、匝数、绝缘、焊点、折弯角度全项在线自动检测,替代人工检验。定期开展Cp/Cpk过程能力分析,对线径、匝数、折弯角度等关键质量特性量化评价,根据指数数值及时优化工艺参数,保障过程能力持续达标。建立来料、工序、成品三级检验台账,实现质量数据可追溯、缺陷可溯源。

3.4 PPAP生产件批准与风险管控

严格执行PPAP量产批准流程,新品、改料、改设备均需完成设计文件、过程控制计划、MSA测量分析、初始过程能力研究等资料准备,经样品全项检测审核通过后方可量产。基于风险思维建立制程风险清单,采用风险矩阵划分风险等级,对绝缘破损、虚焊等高风险点增设管控频次与专项防控措施,实现风险动态识别、评估、管控与复盘。

4 案例分析

4.1 通用电机绕线质量改进

某电机企业绕线工序长期存在绝缘破损、焊接不良、

折弯超差问题,综合不良率达8%。应用本文系统性方案后,优化设备校准维保、落实SOP标准化作业、开展人员专项培训、引入CCD视觉检测与Cp/Cpk管控。实施三个月后,综合不良率降至1%以下,返工成本大幅下降,客户投诉归零,工艺稳定性与量产能力显著提升。

4.2 0.18mm细铜线绕线工艺优化

某传感器企业0.18mm超细漆包线绕线易出现断线、绝缘破损、绕线松动,不良率高达15%。通过优化低张力、低速专用工艺参数,更换防磨损陶瓷导轮,强化来料检验与车间防尘恒温管控,配套全流程视觉检测与PPAP量产管控,优化后不良率降至2%以下,关键工序Cp/Cpk稳定在1.33以上,完全满足高端微型传感器生产要求。

5 结论与展望

本文系统梳理精密绕线工艺基础与质量标准,识别六大典型质量缺陷,依托5M1E鱼骨图完成全维度成因剖析,构建涵盖DFMA设计、过程管控、智能检测、PPAP量产批准、风险防控的系统性解决方案。实际生产案例验证表明,该方案可有效降低精密绕线不良率,提升产品一致性与生产效率,具备较强实用性与推广价值。未来可结合人工智能与机器视觉技术,搭建智能缺陷识别与质量预测平台,利用数字化仿真优化工艺参数,推动精密绕线工艺向智能化、数字化、预测性质量管控方向升级^[5]。

参考文献

- [1]李晓红.细线径线圈的绕制工艺研究[J].城市建设理论,2025,8(20):79-82.
- [2]葛敏.基于PLC的智能扁平线宽边绕线机的研制[J].后勤工程学院学报,2023,12(4):113-116.
- [3]陈浩.基于PLC的电源线绕线扎线步进控制系统设计[J].计算机与数字工程,2023,22(3):96-98.
- [4]高雅,朱秦岭.精密排线系统的设计方法研究[J].计算机测量与控制,2024,17(6):166-169.
- [5]沈勇.CM6150绕线机的设计与应用[J].林业机械与木工设备,2022,35(6):217-219.