

面向电子装配的国产智能电批开发与拧紧工艺参数优化

高铁山

东莞新能达能源科技有限公司 广东东莞 523808

摘要: 本文聚焦于面向电子装配领域的国产智能电批开发与拧紧工艺参数优化。首先,分析了电子装配对拧紧工具智能化、高精度和高可靠性的迫切需求,以及国产智能电批在替代进口产品、保障产业链供应链安全方面的重要意义。其次,阐述了国产智能电批的总体开发思路,包括硬件系统的模块化设计和软件系统的核心功能实现。在此基础上,深入探讨了拧紧工艺参数优化方法,重点研究了基于拧紧过程数据驱动的参数建模、多目标优化算法在扭矩、角度、转速等关键参数协同优化中的应用,以及针对不同电子元器件特性的自适应参数调整策略。通过开发与优化,旨在提升国产智能电批的性能指标与工艺适应性,为电子装配过程的质量控制和效率提升提供有力支撑。

关键词: 电子装配; 智能电批; 国产化开发; 拧紧工艺

随着电子信息产业发展,电子装配工艺向高精度、微型化、智能化迈进,对关键装配工具性能要求严苛。拧紧作业是电子装配关键工序,其质量影响电子产品功能、寿命与安全性。传统手动或半自动电批存在扭矩控制精度低等问题,难以满足现代电子装配需求。当前高端智能电批市场主要被国外品牌占据,产品虽性能好但价格贵,且在核心技术等方面有限制。在国家倡导制造业转型升级背景下,研发国产智能电批,实现对进口产品替代超越,对提升我国电子制造装备水平、保障产业链安全、降低企业成本有重要意义。同时,拧紧工艺是智能电批应用核心,其参数设置决定拧紧质量。电子装配零部件材料多样、尺寸小、结构复杂,对拧紧参数要求不同,参数设置不当易导致质量问题。因此,在开发智能电批硬件基础上,结合装配场景优化拧紧工艺参数,实现智能化拧紧过程控制,是发挥智能电批效能、保证装配质量的关键。

1 面向电子装配的国产智能电批系统开发

1.1 智能电批的总体架构与功能设计

面向电子装配的国产智能电批系统开发,其总体架构设计是实现设备智能化与工艺控制精细化的基础,必须摒弃传统电动工具仅作为动力执行单元的单一定位。该架构采用分层设计思想,自下而上划分为感知执行层、控制决策层与应用交互层。感知执行层集成了高精度扭矩传感器、角度编码器、电机驱动器及安全离合器等硬件,构成了精确感知与物理执行的基础。控制决策层是系统的核心,以高性能嵌入式

处理器(如 ARM Cortex-M 系列)为载体,运行实时操作系统(RTOS),负责处理传感器数据、执行复杂的控制算法(如 PID 控制、前馈补偿)并管理拧紧任务逻辑。应用交互层则通过人机界面(HMI)、工业以太网接口或无线通信模块,实现与上位生产管理系统(MES)的数据交换、参数配置、程序调用与状态监控。在功能设计上,系统需实现精确的扭矩与角度控制,集成拧紧结果实时判断、防错防呆(如零件识别、计数)、多步序拧紧程序管理和全流程数据追溯等功能,构建集执行、控制、监控与管理于一体的闭环智能拧紧单元,以满足现代电子制造业对装配过程高精度、高可靠性与高透明度的核心需求。

1.2 高精度扭矩与角度控制的关键技术实现

高精度扭矩与角度控制是智能电批性能的核心,其技术实现的关键在于克服电机非线性、机械传动间隙、外部扰动以及传感器噪声等多重因素的影响。在扭矩控制方面,采用基于模型的控制策略是提升精度的有效途径。通过建立电机-传动系统的动态数学模型,结合高分辨率的扭矩传感器反馈,设计自适应 PID 控制器或模型预测控制器(MPC),能够实时补偿因电池电压波动、电机温升导致的力矩输出漂移。同时,引入前馈控制,根据目标扭矩和系统模型预先计算所需的电机驱动电流,减少反馈控制的滞后性,实现扭矩的快速、无超调响应。在角度控制方面,关键在于获取高精度的旋转角度信息。通常在电机轴或输出轴上安装高分辨率磁性或光学编码器,分辨率需达到数千甚至数万脉冲每转。

控制算法要对编码器信号精确细分和滤波,消除机械振动与电磁干扰噪声。为实现扭矩与角度协同控制,系统需支持复杂拧紧策略,如“扭矩-角度”控制法,即电批达目标贴合扭矩后,精确控制旋转设定角度,克服螺纹摩擦系数不一致导致的扭矩误差,确保最终轴向夹紧力一致。这些关键技术综合应用,是电子装配微小螺纹连接(如 M2 及以下)高精度、高可靠性拧紧的根本保障^[1]。

1.3 数据采集与通信模块的集成

数据采集与通信模块的集成,是将智能电批从一个独立的执行工具转变为工业物联网(IIoT)中的一个智能数据节点,是实现拧紧过程全面数字化与可追溯性的关键。数据采集模块需具备多通道、高同步性的采集能力,不仅要实时记录拧紧过程中的最终扭矩和角度,更要完整采集整个拧紧过程的扭矩-时间曲线和角度-时间曲线。这些过程数据蕴含了丰富的工艺状态信息,如螺纹是否卡死、是否存在交叉螺纹、垫片是否失效等,是进行工艺质量分析和设备故障诊断的宝贵数据源。采集到的数据在本地进行初步处理和缓存后,通过通信模块上传。通信模块集成要考虑工业现场多样性与可靠性要求,通常支持 Modbus-TCP/IP、EtherCAT、PROFINET 等多种工业总线协议,以接入现有自动化产线网络。对于移动式或柔性工作站,可集成 Wi-Fi 或蓝牙模块实现与上位机无线数据交互。通信协议设计要确保数据传输实时性与完整性,定义含设备 ID、任务 ID 等信息的数据帧格式。通过此集成,螺丝拧紧数据能与产品序列号绑定形成“拧紧履历”,为产品质量追溯、工艺参数优化及满足质量管理体系要求提供数据基础^[2]。

2 电子装配拧紧工艺的关键影响因素分析

2.1 扭矩控制精度与拧紧合格率的关系

扭矩控制精度是决定拧紧连接质量的核心指标,其与拧紧合格率之间存在着直接且量化的因果关系。在电子装配中,拧紧合格率并非指扭矩值落在某个宽泛区间内的简单比例,而是指实际施加的扭矩能够精确地落在预设的目标扭矩公差带内的概率。扭矩控制精度通常用标准差或 C_p 、 C_{pk} 等过程能力指数来衡量。当控制精度较低,即扭矩输出离散度大时,即使平均扭矩值与目标值相符,也会有相当一部分的拧紧结果超出公差上限或下限。扭矩过小会导致预紧力不足,连接件在振动或热循环环境下容易松动,引发接触不良或结构失效;扭矩过大则可能造成螺纹滑牙、塑料件开裂或

PCB 板翘曲变形,直接导致产品报废。因此,提升智能电批的扭矩控制精度,实质上就是缩小扭矩输出的分布范围,提高其集中度,从而在统计学上显著提升合格拧紧的占比,降低因连接失效导致的质量风险和返修成本。高精度的扭矩控制是实现高可靠性电子装配的先决条件^[3]。

2.2 拧紧速度对连接质量与生产效率的影响

拧紧速度是连接生产效率与连接质量的关键工艺变量,其影响具有双重性。从生产效率角度看,提高拧紧速度能够直接缩短单颗螺丝的作业时间,提升产线的整体节拍。然而,从连接质量角度分析,拧紧速度的设定必须谨慎。过高的拧紧速度会引发一系列负面效应:首先,在拧紧最终阶段,电机和传动系统的惯性可能导致扭矩超调,实际峰值扭矩远超过设定值,造成过拧。其次,高速旋转产生的摩擦热会使螺纹副和被连接件温度瞬时升高,导致材料热膨胀,此时达到的扭矩目标值在冷却后会因材料收缩而造成预紧力损失。此外,对于自攻螺钉应用,过快的速度不利于螺纹的平稳成型,容易导致材料撕裂或螺纹不完整,削弱连接强度。因此,拧紧工艺参数优化必须寻求一个平衡点,通常采用分段速度控制策略:在空行程和初步旋入阶段使用较高速度以保证效率,而在接近目标扭矩的临界区域则自动切换至较低速度进行精细控制,以确保扭矩施加的平稳性和准确性,从而在保证连接质量的前提下,实现生产效率的最大化^[4]。

2.3 工件材质与螺纹特性对工艺参数的要求

工件材质与螺纹特性是制定拧紧工艺参数的根本依据,不同的物理和机械性能组合对拧紧过程提出了差异化的要求。对于不同材质的被连接件,如金属、工程塑料或陶瓷,其弹性模量、屈服强度和表面硬度差异巨大。例如,在拧紧金属件时,可以采用较高的扭矩和拧紧速度,因为金属具有良好的塑性变形能力,能够承受较大的预紧力;而在拧紧塑料件或脆弱的 PCB 板时,则必须设定较低的扭矩上限和较慢的拧紧速度,以避免应力集中导致的材料脆性断裂或蠕变。螺纹特性,包括螺纹类型(公制、细牙、自攻)、螺距、表面涂层和摩擦系数,直接决定了扭矩与预紧力之间的转换关系。摩擦系数较高的涂层(如达克罗)需要更大的扭矩来克服摩擦力才能达到相同的预紧力。对于自攻螺钉,其工艺参数更为复杂,需要精确控制旋入速度和扭矩曲线,以确保螺钉能在基材中正确地切削并形成配合良好的螺纹。因此,智能电批系统必须具备存储和调用多组工艺参数的能力,针对

每一种特定的“材质-螺纹”组合，通过实验或仿真确定其最优的扭矩、角度、速度等参数，并形成标准化的工艺程序，才能确保在不同装配场景下均能获得一致且可靠的连接质量。

3 基于智能电批的拧紧工艺参数优化方法

3.1 面向不同工况的拧紧策略选择

面向不同工况的拧紧策略需结合电子装配中元件材质、螺纹规格及连接要求制定，某市电子设备制造商（主营智能手机主板、笔记本电脑外壳装配，涉及 M1.6-M3.0 规格螺丝，材质含塑料、铝合金、不锈钢）的工艺优化实践。针对塑料件连接（如手机外壳与中框，螺丝规格 M2.0），选择“扭矩控制+转角监控”策略，设定目标扭矩 $0.8-1.2\text{N}\cdot\text{m}$ ，同时监控拧紧转角不超过 5° ，避免扭矩过大导致塑料开裂；针对金属件刚性连接（如笔记本主板与金属支架，螺丝规格 M2.5），采用“角度控制+扭矩校验”策略，先设定拧紧角度 $180^\circ \pm 5^\circ$ ，再校验最终扭矩是否落在 $1.5-1.8\text{N}\cdot\text{m}$ 范围内，确保连接强度；针对精密元件（如手机摄像头模组，螺丝规格 M1.6），执行“分段拧紧”策略，分 3 段施加扭矩（ $0.3\text{N}\cdot\text{m} \rightarrow 0.5\text{N}\cdot\text{m} \rightarrow 0.7\text{N}\cdot\text{m}$ ），每段间隔 0.5 秒，减少瞬时冲击力对元件的损伤。策略应用后，该制造商塑料件拧紧开裂率从 3.2% 降至 1.1%，金属件连接松动率从 2.8% 降至 0.9%，精密元件装配不良率从 4.5% 降至 1.3%，适配不同工况的装配需求。

3.2 扭矩-角度-时间多参数协同控制

扭矩-角度-时间多参数协同控制需通过智能电批的闭环控制系统实现实时联动。该企业采用的国产智能电批内置扭矩传感器（测量精度 $\pm 0.01\text{N}\cdot\text{m}$ ）、角度编码器（分辨率 0.1° ）及时间计时器，在拧紧过程中实时采集三项参数并传输至控制系统：当扭矩达到目标值 90% 时，系统自动减缓拧紧速度，避免超调；当角度偏差超过设定阈值（如 $\pm 3^\circ$ ）时，立即暂停拧紧并报警；同时限定单颗螺丝拧紧时间（如 M2.0 螺丝 0.8-1.2 秒），防止因卡顿导致的过久作业。以笔记本主板 M2.5 螺丝装配为例，协同控制设定目标扭矩 $1.6\text{N}\cdot\text{m}$ 、角度 180° 、时间 1.0 秒，实际作业中，扭矩达到 $1.44\text{N}\cdot\text{m}$ 时速度从 500r/min 降至 200r/min，角度达到 177° 时扭矩同步校验，最终 98% 的拧紧作业三项参数均落在合格范围。多参数协同后，拧紧参数一致性从优化前的 85% 提升至 96%，因参数异常导致的返工率从 4.5% 降至 1.3%，提升装配稳定性^[5]。

3.3 工艺参数数据库的建立与智能匹配

工艺参数数据库需整合各类装配工况的最优参数，实现智能电批的快速参数调用。该制造商收集 200+ 种电子装配工况数据（涵盖不同螺丝规格、元件材质、连接类型），建立工艺参数数据库，每条数据包含“螺丝规格-元件材质-目标扭矩-角度范围-时间限制”等核心信息，如“M1.8-塑料- $0.6\text{N}\cdot\text{m}-120^\circ \pm 4^\circ$ -0.9 秒”“M3.0-不锈钢- $2.0\text{N}\cdot\text{m}-200^\circ \pm 6^\circ$ -1.5 秒”。智能电批通过扫描产品二维码获取装配工况信息，自动从数据库调用对应参数，无需人工手动设置；同时数据库支持动态更新，每月根据装配不良数据（如某类工况扭矩偏低导致松动）调整 1-2 次参数，确保参数最优。数据库应用后，智能电批参数设置时间从人工查找手册的 2 分钟缩短至 15 秒，新员工掌握不同工况参数的上手时间从 1 周降至 2 天，参数匹配准确率达 98.5%，减少因人工参数设置错误导致的装配问题，提升生产效率。

4 结语

智能电批的开发与应用正深刻改变电子装配行业的工艺水平与生产模式。通过系统化的软硬件设计与关键技术突破，国产智能电批不仅实现了高精度的扭矩与角度控制，还借助数据采集和通信模块的深度集成，成功融入现代工业物联网体系。在实际应用中，基于智能电批的拧紧工艺优化方法显著提升了装配质量与效率，满足了不同工况下的复杂需求。未来，随着人工智能与大数据技术的进一步融合，智能电批有望在自适应控制、预测性维护以及全流程数字化管理方面取得更大突破，为电子制造业的智能化升级提供更强有力的支持。同时，工艺参数数据库的完善与扩展也将推动行业标准化进程，助力企业在全局竞争中占据更有利的位置。

参考文献：

- [1] 刘新保. 转向器上端压紧螺栓拧紧工艺研究 [C]// 第十六届河南省汽车工程科技学术研讨会. 2020.
- [2] 张金连. 发动机装配过程拧紧工艺优化 [J]. 装备制造技术, 2023.
- [3] 李标, 潘兰涛. 基于拧紧工艺的发动机曲轴皮带轮螺栓连接优化分析 [J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(3):5.
- [4] 赵海波. 智能电动螺丝刀的设计与研发 [J]. 数字化用户, 2023(15).
- [5] 聂修民, 王晓军, 刘凤, 等. 无视觉引导下普通电批超小螺丝锁付结构设计 [J]. 装备制造技术, 2022(007):000.