

# 微型电机转子动平衡精度提升措施研究

张皓云 曾春源

红塔烟草(集团)有限责任公司楚雄卷烟厂 675000

DOI:10.12238/ems.v7i12.16457

**[摘要]** 微型电机作为精密设备的核心驱动单元,其运行平稳性与噪声控制高度依赖于转子动平衡精度。当前,高速化、小型化趋势对转子平衡提出了更为严苛的要求,而传统工艺在精度控制与效率上面临显著瓶颈。本研究针对微型电机转子动平衡工艺中的关键环节进行系统性优化,聚焦于不平衡量识别精度的提升与修正工艺的可靠性强化。通过革新材料预处理方法以改善初始均质性,引入高刚性气浮主轴与闭环反馈装夹系统来降低装夹误差,结合激光干涉仪在线补偿技术显著减少测量系统误差。在修正环节,深入优化激光烧蚀参数的自动匹配及智能去重路径规划,并集成机器学习模型实现对微小不平衡残余量的预测补偿。

**[关键词]** 微型电机转子; 动平衡精度; 不平衡量; 工艺优化; 自动补偿

## 引言:

现代电子设备与精密仪器正持续向微型化、高功率密度和高转速方向迅猛发展,微型电机作为其核心动力源,性能的可靠性、低噪声及长寿命成为衡量品质的关键指标。转子动平衡精度是决定电机振动噪声水平和机械可靠性的核心要素。不平衡量产生的离心力在高转速下被急剧放大,直接导致轴承异常磨损、结构疲劳破坏以及难以抑制的噪声污染,严重影响终端产品的品质与用户体验。当前,受限于转子微型化带来的结构复杂性与材料特性变异,传统动平衡工艺在保证高精度、高效率及批量一致性方面遭遇严峻挑战。因此,亟需系统性地探索并实施具有工程实践意义的动平衡精度提升策略,突破固有局限。

## 1 微型电机转子动平衡技术基础

### 1.1 转子动平衡基本原理

转子动平衡的核心目的在于识别并消除或抵消转子旋转时因质量分布不均产生的离心惯性力及力偶,从而使其惯性主轴与几何旋转轴最大限度重合,实现平稳运转。针对刚性转子,依据国际标准 ISO 1940-1 或国家标准 GB/T 9239.1 通常采用许用残余不平衡量或更精确的不平衡量剩余比来衡量平衡精度,该比值反映了单位转子质量所允许的最大残余不平衡量。对于广泛应用在消费电子、精密仪器及小型医疗器械中的微型电机转子,工作转速通常高达数万转每分钟甚至更高,因此常要求其精度等级达到 G 级水平,意味着在微小质量和体积限制下对残余不平衡量的控制极其严格。

### 1.2 微型电机转子动平衡的技术需求与应用挑战

微型电机转子的显著特征是尺寸微小、结构精巧且惯量极低,这一特性对动平衡工艺提出了远超常规电机转子的精度需求。一方面,其转速常高达数万甚至十几万转每分钟,微小的残余不平衡量也会在高速下被显著放大为巨大的离心力,引发强烈振动与噪声,加速轴承磨损;另一方面,为适应微小空间,结构设计常采用悬臂支撑或非对称形态,热变形影响更为突出。这些特点使得其在动平衡过程中对初始不平衡量控制、材料均匀性、夹持工装的刚性与重复定位精度、测量设备分辨率及抗干扰能力、补偿操作的精细度要求达到了前所未有的苛刻水平。

## 2 微型电机转子动平衡精度的关键影响因素

### 2.1 转子自身制造引入的不平衡量来源

微型电机转子自身在设计和制造过程中产生的质量分布不均构成了不平衡的固有基础。材料自身的密度不均一性是首要因素,尤其在采用粉末冶金或压铸工艺成型的微型转子中,材料内部气孔、成分偏析普遍存在,导致局部质量差异显著。转子轴颈、铁芯叠片、磁体安装槽等部位的加工精度,如形状误差、位置度偏差、同轴度问题会直接影响质量的初始分布对称性。此外,在磁体装配工序中,粘接剂涂抹不均匀、固化收缩差异或磁体本身重量及尺寸的微小离散性,都可能导致整体质心偏离理论旋转中心<sup>[1]</sup>。热处理工序中的不均匀变形,以及后续其他部件装配过程中的不对称施力或应力释放,同样会为转子引入难以忽视的不平衡量。这些源于

设计、材料与制造环节的内在缺陷，是整个动平衡过程中需要首先识别并尽可能从源头控制的复杂性来源，其控制的精细程度直接影响最终平衡效果的可达成上限。

### 2.2 动平衡测量过程中的精度限制因素

测量环节是动平衡的核心，其精度易受多重因素制约。机械支撑系统方面，平衡机主轴自身的旋转精度、轴承游隙以及支撑方式的动态刚度不足，会使转子在测试时产生非刚性效应或额外振荡，干扰真实不平衡信号的捕捉。连接转子的工装夹具设计不当，例如与转子接触面配合不良、存在间隙或微小异物，夹具自身的制造精度缺陷或安装时因偏心造成预不平衡，都会叠加到测量结果中形成误差。测量传感器特别是高精度位移或速度传感器的灵敏度漂移、非线性特性及在微弱信号下的噪声干扰水平，对识别超微型转子微小不平衡量形成巨大考验。现场环境的振动源，包括地面传导的机器振动、空气湍流、声音波动，以及工频磁场或其他电磁干扰都可能耦合进极其敏感的测量回路。此外，平衡机驱动系统，尤其是电机伺服控制的波动和传动的间隙，也会在信号中引入低频扰动甚至造成相位测量偏差，这些因素共同构成了准确获取不平衡矢量信息的客观屏障。

### 2.3 动平衡修正工艺实施的难点

在成功精确测量后，将修正方案高效、可靠且符合精度要求地实施到微型转子上仍面临显著的技术难点。对于最常见的质量去除法，去重位置的微小偏差会显著降低修正效率甚至引入新的不平衡分量。去重深度与转子去除材料体积精度是难题；激光烧蚀工艺参数如脉冲能量、频率、焦点稳定性等对烧蚀形态和深度具有决定性影响，需精细控制；物理铣削则存在刀具磨损补偿难及切入冲击问题。配重添加法应用在微型转子中空间限制极大，焊锡、点胶等工艺的添加量微小精确控制与粘接长期稳定性同样具有挑战。无论哪种方法，修正操作带来的局部热应力、可能的材料组织结构改变甚至微观变形都可能部分抵消修正效果或带来新的不平衡。如何保证修正操作的精准性、一致性以及对转子本体影响的最小化，是平衡工艺链最终能否高效达成目标精度的最关键环节。

## 3 提升微型电机转子动平衡精度的具体策略

### 3.1 优化转子材料选择与预处理工艺

从源头控制不平衡量至关重要。首选策略是选用具有更高材料密度均匀性和更低缺陷率的原材料。对于金属转子基体，优先选用高纯度等级如 A 级或更好的冷轧带钢，其内部组织更细小均匀，杂质少。粉末冶金转子的粉末粒径分布应更窄、氧含量控制更严格，采用冷等静压或金属注射成型技术可提升压坯密度和均匀性。在转子加工成型前，对棒材或带材实施高精度精密校直及多重应力释放热处理，能有效消除前期加工累积的内应力，大幅减少后续加工中的应力释放变形。针对磁体装配工序，实施严格的重量与外形尺寸分选匹配，确保每批装配磁体间的重量公差控制在毫克以下，并采用精度更高的设备保证装填位置一致性和粘胶均匀性<sup>[2]</sup>。通过引入材料初始状态的精细化管理与高一致性预处理流程，能够有效降低后续平衡加工的补偿负担，为达到更高精度提供良好基础。

### 3.2 加强工装夹具系统刚性并改进装夹方式

提升测量平台本身精度是根本。设计制造超高精度、具有极佳动静刚性的夹具尤为关键，夹具本体采用硬质合金或特殊处理钢制造，所有接触基准面须研磨至镜面光洁度。摒弃传统的螺纹顶紧夹持，采用非接触式气体静压膨胀芯轴或液压卡盘配合定心顶尖系统装夹转子，这种径向均匀加压的方式可彻底消除装夹应力不对称导致的附加不平衡量<sup>[3]</sup>。核心改进是在系统中增设闭环反馈控制功能。安装高灵敏度电容或光纤微位移传感器实时监测转子夹持后的微小跳动，并将偏差信号实时反馈至驱动装置，如压电陶瓷微动执行器，进行微量角度或位置自适应调整，直至达到亚微米级别的定心精度要求。同时，在主轴前端集成高精度转子质量补偿装置，能自动标定并补偿夹具系统自身的微量残余不平衡，消除其对被测信号的叠加污染。此套组合技术旨在最大限度减少装夹环节引入的非转子不平衡干扰。

### 3.3 应用先进传感与补偿技术提高测量精度

测量系统升级是提升精度的核心硬件支撑。将传统电磁式传感器更换为抗电磁干扰能力极强、分辨率和线性度更高的激光多普勒测振仪或差分电容式位移传感器，其分辨率可达纳米级，能有效捕捉更微弱的不平衡振动信号。为突破环境振动对微米级测量的干扰瓶颈，在平衡机基座下安装高效精密的气浮隔振垫层，与测量舱体本身的多级阻尼设计结合，

形成双重物理隔振屏障。信号处理层面, 集成自适应滤波算法, 能根据现场特定频谱噪声源特性自动生成最优的数字滤波器参数, 选择性抑制干扰频带而保留信号<sup>[4]</sup>。关键创新是引入激光干涉仪结合温湿度传感器组成的在线补偿模块, 激光干涉仪实时扫描主轴及关键机械结构的热变形分布及振动模态, 温湿度传感器采集环境参数, 通过建立的多参数物理模型及预先标定的误差地图, 对测得的原始不平衡数据进行动态相位修正和幅度补偿, 使测量结果最大限度地逼近真实值。

### 3.4 创新动平衡修正工艺与路径优化

针对前述修正难点需研发精密可控技术。对于激光去重法, 核心是开发闭环可控的烧蚀流程。应用功率稳定性极高的飞秒光纤激光器, 其超短脉冲特性显著降低热影响区。工艺参数库需建立烧蚀深度与脉宽、能量、扫描速度、光斑重叠率等参数间的精准数学模型, 实现按所需修正量的体积自动解算并配置最优激光参数组合。集成高速高分辨率同轴视觉系统, 动态跟踪转子标记点进行精确相位定位, 引导激光束准确到达预设相位坐标<sup>[5]</sup>。算法层面, 针对复杂形状转子, 摈弃传统的简单角度分割修正策略, 研发基于转子的三维 CAD 模型和不平衡矢量分布计算所得的智能去重路径规划算法, 精确计算不同相位所需的去重体积与形状匹配最优的烧蚀路径点阵分布, 避免局部应力集中并保障整体强度。对于空间允许的转子, 可研究微点精密锡焊技术, 利用自动微量点锡装置和高精度激光辅助加热实现位置和锡量毫厘级控制, 并通过固化过程应力优化保障长期稳定性。

### 3.5 集成智能算法实现全流程预测与优化控制

将大数据分析与人工智能融入核心流程。首先, 运用多元统计过程控制方法建立关键工序参数如初始不平衡量均值/方差、主要测量设备偏差、激光修正效率等的持续监控模型, 一旦过程参数超出统计控制限即预警联动处理。其次, 基于历史积累的海量成功平衡案例数据, 训练深度神经网络模型。输入变量包括当前转子型号、结构特征、材料批次、各检测站点数据及当前测量结果; 模型通过学习复杂内在关联, 输出预测最优修正策略建议包含预期修正平面、建议修正方式以及具体参数预估值, 可辅助操作者决策或指导自动化设备预设定, 大幅提升首件修正成功率降低反复次数<sup>[6]</sup>。最后,

在核心平衡加工站后端部署微振动频谱实时监测单元, 捕获电机测试时的细微振动信号, 结合不平衡残余值构建联动分析模型, 一旦识别出特定频率异常, 系统自动反向追溯至上游可能出错工序单元进行精度校准提示, 实现生产流程的全闭环智能监控与持续改进优化, 最大化保障批次的工艺一致性和品质稳定性。

### 结束语:

本研究系统性地探索并验证了提升微型电机转子动平衡精度的多维度关键技术措施。从源头入手, 强调了优化原材料选择和实施严密的预处理流程以改善初始质量分布的重要性。在测量层面, 通过革新夹持方案应用非接触式气浮芯轴配合自适应闭环反馈定心技术、引入激光多普勒振动测量系统、集成高效环境振动隔离与噪声抑制自适应滤波算法以及基于激光干涉和温湿度传感的在线动态补偿模块, 显著降低了装夹干扰和环境因素对不平衡量测量的影响。修正环节更是聚焦创新实用方法, 开发了激光烧蚀参数的智能闭环匹配技术、转子相位与位置的视觉精密追踪, 以及基于模型的最优去重路径规划算法。特别通过集成多元过程控制建模深度神经网络预测和在线微振动闭环监控等智能手段实现了对动平衡生产全程的优化与质量控制。综合应用这些可工程化落地的具体策略, 成功实现了微型转子动平衡精度的突破性提升。

### [参考文献]

- [1] 姜东, 薛子曼, 鲁镇荣, 等. 基于离散矢量模型的微电机转子二次去重动平衡研究[J]. 振动工程学报, 2025, 38(7): 1486–1487.
- [2] 李佰坤. 变频器控制锥形转子电机保护及应用[J]. 辽宁青年, 2023 (19): 0241–0242.
- [3] 田春刚. 基于电气自动化的微电机转子送料系统优化研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2023 (11): 246–249.
- [4] 王艺铮, 韩辉. 电机转子动平衡测试系统的网络通信[J]. 成组技术与生产现代化, 2024, 41 (4): 44–48.
- [5] 钟义旭. 转子动平衡去重技术对电机振动负面影响研究[J]. 微特电机, 2024, 52 (8): 44–47.
- [6] 吴攀, 袁超, 何东, 等. F4 级燃气轮机转子现场动平衡研究[J]. 电站系统工程, 2024, 40 (5): 55–56.