

论换向器表面质量对微电机输出波形的影响

姚茂岑

贵州航天林泉电机有限公司 贵州 贵阳 550081

【摘要】：换向器表面质量是决定微电机输出波形稳定性的重要因素，其表面平整度、粗糙度及清洁度的差异，会直接改变电刷与换向器间的接触状态，进而导致电机输出波形出现畸变、波动等问题。深入探究换向器表面质量对输出波形的影响机制，可为微电机制造过程中换向器加工工艺的优化提供方向，减少因表面质量缺陷引发的电机性能下降问题，保障微电机在精密设备中的可靠运行。通过分析换向器表面不同质量状况下电机输出波形的变化特征，明确表面质量各指标与输出波形参数间的关联，对提升微电机整体性能具有重要现实意义。

【关键词】：换向器；表面质量；微电机；输出波形；接触状态

DOI:10.12417/2705-0998.25.21.004

引言

微电机作为精密电子设备、自动化装置等领域的核心驱动部件，其输出波形的稳定性直接关系到下游设备的运行精度与可靠性。换向器作为微电机实现电流换向的关键部件，其表面与电刷的接触效果直接影响电流传导的连续性与均匀性。在实际运行中，换向器表面若存在划痕、磨损、油污附着等质量问题，会破坏电刷与换向器间的稳定接触，引发电流波动，最终导致电机输出波形偏离理想状态。探究换向器表面质量与微电机输出波形间的内在联系，能够揭示影响电机输出性能的关键环节，为从源头改善微电机运行稳定性提供理论支撑，同时也为电机制造过程优化生产工艺、提升产品质量提供重要参考。

1 换向器表面质量的核心评价指标及特征分析

换向器表面平整度指宏观凹凸程度，以平面度误差、圆周跳动量为评价标准，局部凸起或凹陷会使电刷接触位置和面积变化，影响电流传递均匀性，埋下输出波形波动隐患，可通过精密车削、抛光控制，需轮廓仪检测^[1]。表面粗糙度反映微观凹凸，以 Ra 为参数，受切削速度、加工刀具等影响，过大会致电流“跳跃式”传导，过光滑易使电刷打滑，均影响接触稳定。表面清洁度衡量油污、碎屑等污染物，会阻碍电流传导，可通过视觉观察、放大检查，需控制污染来源以防输出波形畸变或部件损坏。

2 换向器表面质量缺陷对微电机输出波形的具体影响

2.1 表面划痕与磨损导致输出波形出现周期性波动

换向器在长期运行或加工过程中产生的表面划痕与磨损，会使电刷与换向器的接触点呈现周期性变化。当电刷经过划痕或磨损较严重的区域时，接触压力会瞬间减小，接触电阻增大，导致通过的电流瞬时下降，反映在输出波形上则表现为周期性的波谷，而经过相对平整的区域时，接触状态恢复正常，电流回升，形成周期性的波动。这种波动的频率与换向器的转速相关，转速越高，波动频率越快，对电机输出性能的影响越显著。

在精密仪器驱动用微电机中，这种周期性波动会导致仪器运行精度下降，出现定位偏差等问题，尤其在要求连续稳定输出的场景中，此类波形缺陷会严重影响设备的正常工作。

2.2 表面油污与杂质造成输出波形产生非周期性畸变

表面油污与杂质的分布通常具有随机性，因此其对输出波形的影响表现为非周期性畸变。当油污附着在换向器表面的局部区域时，该区域的接触电阻会显著高于其他区域，电流在通过该区域时会出现突然的衰减，使输出波形产生不规则的凹陷，若杂质为导电性金属碎屑，可能会在局部形成短暂的导电通路，导致电流瞬时增大，产生尖锐的波峰。这种非周期性畸变难以通过常规的滤波手段消除，会使电机输出的电压或电流信号稳定性大幅下降，例如在通信设备中使用的微电机，输出波形的非周期性畸变可能会干扰信号传输，导致通信质量降低，甚至出现信号中断的情况。

2.3 表面不平整引发输出波形的幅值与频率偏差

换向器表面不平整，如存在局部凸起或凹陷，会导致电刷与换向器的接触面积持续变化，进而影响电机的输出幅值与频率。当接触面积减小时，电机输出的有效电流减小，对应的输出波形幅值降低；而接触面积增大时，幅值则可能超出正常范围，形成幅值波动。表面不平整还会影响换向器的换向精度，导致电流换向时刻出现偏差，使输出波形的频率偏离设定值^[2]。在控制电机转速的应用场景中，频率偏差会导致电机转速不稳定，出现时快时慢的现象，影响设备的运行节奏，对于要求精确转速控制的生产线传送带、精密机床等设备，这种偏差会直接降低生产效率与加工精度。

3 改善换向器表面质量以优化输出波形的工艺措施

3.1 优化加工工艺参数提升换向器表面平整度与粗糙度

在换向器加工环节，通过调整车削、磨削等工艺参数，可有效提升表面平整度与粗糙度。在车削加工时，适当提高切削速度，减小进给量，可减少表面刀痕的深度与间距，降低粗糙度；采用高精度磨削设备，选择细粒度砂轮，并控制磨削压力

与进给速度，能够进一步提高表面平整度，减少平面度误差^[3]。在加工完成后增加精密抛光工序，使用专用的抛光工具与抛光剂，对换向器表面进行精细处理，可消除加工过程中残留的微小划痕，使表面更趋平整光滑。通过这些工艺优化措施，可使换向器表面质量指标达到微电机运行的理想要求，为稳定输出波形奠定基础，减少因加工工艺不当导致的表面质量缺陷。

3.2 加强生产过程清洁管控减少表面污染物附着

为减少换向器表面污染物附着，需在生产全过程加强清洁管控。在加工环节，采用具有良好清洗功能的加工设备，在每道加工工序完成后，及时使用专用清洗剂清除表面的切削液、金属碎屑等污染物，在装配环节，控制车间内的粉尘浓度，操作人员佩戴无尘手套，避免人为因素造成的污染。在换向器出厂前增加严格的清洁度检测环节，对每一批次产品进行抽样检测，确保表面无油污、杂质等污染物。通过建立完善的清洁管控体系，可从源头减少表面污染问题，避免因污染物导致的输出波形畸变，保障微电机在装配完成后的初始运行性能。

3.3 采用表面涂层技术增强换向器表面质量稳定性

表面涂层技术可在换向器表面形成一层具有良好耐磨性、耐腐蚀性的保护膜，增强表面质量稳定性。常用的涂层处理包括镀钯、镀镍钯等，镀钯、镀镍钯具有较高的硬度与耐磨性，可减少换向器在运行过程中的磨损，延长表面平整状态的保持时间。在涂层制备过程中，采用电镀工艺，确保涂层与换向器基体结合紧密，厚度均匀，避免涂层脱落导致新的表面质量问题。通过表面涂层处理，可显著提升换向器的抗损耗能力与抗污染能力，减少长期运行中表面质量的劣化速度，从而维持微电机输出波形的长期稳定性。

4 换向器表面质量与微电机输出波形关联性的验证方法

4.1 搭建模拟实验平台观测不同表面质量下的波形变化

搭建模拟实验平台是验证两者关联性的重要手段，实验平台主要由微电机测试系统、换向器表面质量调节装置、波形采集与分析设备组成。在实验中，通过更换具有不同表面质量（如不同粗糙度、平整度、污染程度）的换向器，在相同的电机运行参数（电压、转速、负载）下，利用示波器等波形采集设备记录电机的输出电压或电流波形。通过对不同表面质量条件下的波形数据，观察波形的畸变程度、波动频率、幅值偏差等参数变化，可直观呈现换向器表面质量对输出波形的影响规律。在测试表面粗糙度的影响时，分别安装 Ra 值为 0.2 μm、0.8 μm、1.6 μm 的换向器，记录并对比对应的输出波形，可明确粗糙度与波形平滑性的关联。

4.2 开展现场运行监测获取实际应用中的波形数据

现场运行监测可获取换向器在实际应用场景中的表面质量变化与输出波形数据，更贴近实际使用情况。在电机运行过

程中，定期使用便携式检测设备对换向器表面质量进行检测，包括表面粗糙度、清洁度等指标，同时通过数据采集模块实时记录电机的输出波形^[4]。通过长期监测，可观察换向器表面质量随运行时间的劣化情况，以及对应的输出波形变化趋势。可发现随着运行时间增加，换向器表面磨损加剧，输出波形的波动幅度逐渐增大，从而确定换向器的合理更换周期，避免因表面质量劣化导致的设备故障。

4.3 运用对比分析方法明确表面质量指标与波形参数的关联

对比分析方法需对实验平台与现场监测获取的数据进行系统处理，建立换向器表面质量指标（如平整度误差、Ra 值、清洁度等级）与输出波形参数（如畸变率、波动幅度、频率偏差）之间的对应关系。首先对采集到的表面质量数据与波形数据进行标准化处理，消除不同测试条件带来的干扰；然后采用统计学方法，如相关性分析、回归分析等，计算各表面质量指标与波形参数的相关系数，确定影响波形的关键表面质量指标。通过分析发现，表面平整度误差与输出波形幅值偏差的相关系数较高，说明平整度对幅值稳定性的影响更为显著；而表面清洁度等级则与波形畸变率的关联性更强。通过这种对比分析，可明确改善输出波形需重点优化的表面质量指标，为工艺改进提供针对性方向。

5 保障微电机输出波形稳定的换向器质量管控策略

5.1 建立完善的换向器表面质量检测标准体系

建立完善的检测标准体系是保障换向器表面质量的基础，需明确各表面质量指标的检测方法、合格范围及判定标准。针对表面平整度，规定采用轮廓仪进行检测，平面度误差需控制在 0.005mm 以内；对于表面粗糙度，明确使用粗糙度仪测量，Ra 值根据电机应用场景不同分为 0.1 μm-0.2 μm、0.2 μm-0.4 μm 等不同等级；表面清洁度则制定视觉检测与放大检查相结合的标准，要求表面无可见油污、杂质。建立检测结果的记录与追溯制度，对每一个换向器的检测数据进行存档，若后续电机出现输出波形问题，可通过追溯检测数据排查是否存在换向器表面质量隐患。定期对检测设备进行校准，确保检测结果的准确性与可靠性，避免因检测误差导致不合格产品流入市场。

5.2 实施全生命周期的换向器质量跟踪与维护

实施全生命周期质量跟踪与维护，可及时发现换向器在使用过程中的表面质量变化，保障电机输出波形长期稳定。在换向器生产阶段，记录原材料质量、加工工艺参数、检测结果等信息，建立产品质量档案，在电机装配与出厂阶段，记录装配工艺、出厂检测的输出波形数据，形成初始质量记录^[5]。在用户使用阶段，指导用户定期对换向器表面质量进行检查，如通过观察表面是否有磨损、污染痕迹，或使用简易检测工具测量粗糙度等，并提供维护建议，如定期清洁表面、及时更换磨损严重的换向器。建立用户反馈机制，收集电机运行过程中输出

波形异常的情况，结合换向器质量档案进行分析，找出质量问题的根源，如加工工艺缺陷、维护不当等，并针对性地改进生产或优化维护方案，形成质量管控的闭环。

5.3 推动换向器制造技术创新以提升质量稳定性

推动制造技术创新是提升换向器质量稳定性关键途径，可从材料选择、工艺改进、设备升级等方面入手。在材料选择上，研发具有高耐磨性、高导电性的新型换向器材料，如铜合金与碳纤维复合材料，减少长期运行中的表面磨损，延长表面质量保持时间；在工艺改进上，引入智能化加工技术，如数控精密磨削技术、自动化抛光技术，提高加工精度与一致性，减少人为因素导致的表面质量差异；在设备升级上，采用具有实时监测功能的加工设备，在加工过程中实时检测表面质量指标，一旦发现超标立即调整工艺参数，确保每一个换向器的表

面质量达标。加强与科研机构、高校的合作，开展换向器表面质量与电机输出性能关联性的基础研究，为制造技术创新提供理论支持，推动换向器质量水平不断提升，进而保障微电机输出波形的稳定性与可靠性。

6 结语

本文围绕换向器表面质量对微电机输出波形的影响展开深入探讨，明确平整度、粗糙度、清洁度是关键质量指标，分析了各类表面缺陷引发波形波动、畸变及参数偏差的具体机制，提出工艺优化、清洁管控、涂层应用等改善措施，还给出关联性验证方法与全周期质量管控策略。研究证实，提升换向器表面质量可有效保障输出波形稳定，为微电机制造过程改进生产、提升产品性能提供切实指导，也为下游精密设备可靠运行奠定基础，对推动微电机行业发展具有重要意义。

参考文献：

- [1] 余南南,冯占召.基于关联注意力的弱监督换向器表面缺陷识别与检测方法[J].江苏师范大学学报(自然科学版),2025,43(03):32-38.
- [2] 陈辉,陈秋林,袁晓.换向器压注模具设计与制造工艺优化研究[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会.人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集(二).安固集团有限公司;平阳县锦通汽车配件有限公司;温州市铭隆汽车科技有限公司;,2025:67-70.
- [3] 刘莉,姚鹏,褚东凯,等.不锈钢表面高质量微陷阱结构的激光辅助水射流加工(英文)[J].中国光学(中英文),2024,17(06):1476-1488.
- [4] 王杰,等强宽频触觉感知反馈微特电机的开发及产业化.四川省,四川大学,2024-06-12.
- [5] 王颖林.复杂环境下微特电机设计的关键技术研究[D].吉林大学,2024.