细长轴类电机驱动轴数控车削工艺优化研究

高媛媛

（江苏徐州技师学院，江苏 徐州 221000）

摘 要 针对细长轴类电机驱动轴原有数控车削工艺中存在的工序繁杂、同轴度难以控制、刀具损耗大、生产效率偏低等问题，以20Cr冷镦毛坯细长驱动轴为研究对象，从工装夹具、液压夹紧系统、专用刀具及尾座装置四个方面开展工艺优化。采用高精度弹簧夹头省去铣打工序，改用4 MPa液压夹紧系统防止工件打滑变形，定制专用槽刀减少换刀与对刀时间，加装气动回转顶尖改善细长轴加工中的震颤。优化后，单件加工时间由31秒降至22秒，日产量由800件提升至1 200件，工件同轴度与表面精度得到有效控制，生产成本下降。细长轴类电机驱动优化方案可为同类细长轴类零件的数控车削加工提供工艺参考。

关键词 细长轴；电机驱动轴；数控车削；同轴度

中图分类号：TG519.1；TH161+.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.002

0 引言

电机驱动轴是动力传输系统中的关键零部件，其加工质量直接影响整机运行性能与寿命。该类零件多属于细长轴类型，具有长径比大、加工精度要求高、易产生变形与震颤等特点。传统的数控车削工艺往往存在工序分散、装夹次数多、同轴度难以保证、刀具损耗严重等问题，制约了生产效率和产品质量的进一步提升。

细长轴加工的核心难点在于：长径比越大，工件刚性越差，在切削力、离心力和自重的作用下极易产生弯曲变形和切削震颤。研究表明，当工件长径比超过10时，加工难度显著增加；超过20时常规工艺难以保证精度[1]。本文研究的电机驱动轴长径比达到18，属于典型的难加工细长轴零件。

针对原有加工工艺的不足，本文从工装夹具、液压夹紧系统、专用刀具及尾座装置四个方面进行系统优化，旨在实现细长轴类电机驱动轴的高效、精密数控车削加工。

1 细长轴类电机驱动轴工件特点与原工艺分析

1.1 工件特点

驱动轴毛坯采用20Cr钢材冷镦成型，加工余量较小。成品零件属于典型的细长轴类零件，长径比较大，工件尾部同轴度与表面粗糙度要求严格，加工过程中易出现椭圆及弯曲变形等缺陷。20Cr钢材是一种常用的低碳合金结构钢，具有良好的淬透性和韧性。该材料经渗碳淬火后，表面硬度可达58-62HRC，心部保持良好的韧性，非常适合制造承受冲击和磨损的传动轴类零件[2]。然而，20Cr材料的切削加工性一般，切削时容易产生积屑瘤，影响表面质量。因此，合理选择切削参数和刀具材料对保证加工质量至关重要。在实际生产中，对驱动轴的加工精度提出了明确的技术要求：外圆直径公差 ±0.02 mm，同轴度公差0.03 mm，表面粗糙度Ra ≤ 1.6 μm，卡簧槽宽度公差 ±0.03 mm。这些精度要求对于常规轴类零件来说并不算高，但对于长径比达到18的细长轴而言，每一项指标的达成都需要精细的工艺控制。

1.2 原有加工工艺

原工艺主要涉及外圆台阶、浅槽、卡簧槽、退刀槽及中心孔的加工。由于工件包含多段外圆、槽与中心孔，需分A、B两端掉头车削，同轴度控制难度较大。

原有加工流程如下：

1. 先使用铣打机将图纸要求的总长、中心孔控制在公差范围以内。

2. 把加工好的毛坯用扣子夹紧，保证不打滑。

3. 将装好夹头的毛坯装夹至两顶尖车床，通过手动尾座锁紧工件。

4. 对A面外圆、退刀槽及浅槽（中心孔）进行精车加工。

5. 将A面精车完成的工件调头装夹，对B面外圆、退刀槽及卡簧槽（中心钻）进行精车加工。

原工艺共涉及5道工序，每道工序之间需要人工搬

作者简介：高媛媛（1987-），女，本科，一级实习指导教师，研究方向：机械加工。

运和重新装夹。两次装夹带来的定位误差是导致同轴度超差的主要原因。实际同轴度合格率仅为 85% 左右[3]。

1.3 原工艺存在的问题

经分析，原有工艺存在以下问题：

1. 工序分散，效率较低：加工过程需 5 道工序才能完成精车，整体效率偏低。

2. 人工辅助环节多：车床加工时需人工装夹夹头，降低了生产效率。

3. 切削参数受限：两顶尖车削承受力较小，切削速度无法提高，速度快时易出现打滑现象。

4. 刀具损耗严重：卡簧槽加工时刀具磨损快，尺寸难以保证，更换频繁；每次换刀需重新对刀，占用大量工时，并导致废品率升高。

上述工艺无法满足生产要求，因此需要进行系统性的优化。

2 细长轴类电机驱动轴数控车削工艺优化方案

2.1 工装改进：以弹簧夹头替代铣打机

为解决工序繁杂问题，将原两顶尖工装更换为高精度弹簧夹头，直接省去铣打工序。弹簧夹头的同轴度要求控制在 0.01 mm 以内，并在排刀上加装中心钻，直接在车床上完成中心孔加工，改进后，A、B 面的外圆、长度、卡簧槽及中心孔可在一次装夹下全部完成，减少一道工序及一名操作人员。

2.2 液压夹紧系统改进：替代手动拉杆

改进前采用手动拉杆，夹持力不足，易打滑及产生椭圆。改进后加装液压系统，液压系统压力调至 4 MPa 时，切削速度得以提升，且无打滑、无椭圆现象，有效保证了工件的同轴度，同时降低了工人劳动强度。

液压系统的调试过程经历了三个阶段：第一阶段，将压力设为 2 MPa 进行试切削，发现夹持力不足，工件在高转速下出现轻微打滑；第二阶段，将压力调至 3 MPa，打滑现象基本消除，但切削速度提升后仍有偶发性打滑；第三阶段，将压力稳定在 4 MPa，经过连续 8 小时运行验证，未出现任何打滑现象，工件圆度检测结果全部合格。最终确定 4 MPa 为最佳工艺压力。

液压系统每次消耗不足 0.5 秒，每天可节省时间 50 分钟），相当于一个班次多产出约 15 件～ 20 件成品。

2.3 专用刀具优化：定制机夹刀替代手磨槽刀

工件尾部有两处宽度为 1.2 mm 的卡簧槽。改进前使用手磨槽刀，加工中易崩刀尖、磨损快，改进后更换为机夹刀，刀片材质选用 CVD 涂层硬质合金，刀片宽度公差控制在约 ±0.02 mm，寿命约 800 件 / 刃，仅刀具维护一项，每天可节省时间约 44 分钟，且无需重新对刀[4]。

3 细长轴同轴度控制关键技术

电机驱动轴有多种型号，主要区别在于总长，最短为 131 mm，最长为 216 mm。

3.1 短轴加工特性

加工短轴时，夹紧后剩余毛坯长度较短，最小直径仅 12 mm，但因长度短、离主轴近，加之液压夹持力大，车削较为轻松，精度与粗糙度易于保证。

短轴（长度≤ 150 mm）加工时，工件悬伸长度与直径之比（长径比）约为 10 ～ 12。在此条件下，工件刚性尚可，切削力引起的变形量较小。经计算，在切削力 200 N 的作用下，悬伸长度 150 mm、直径 12 mm 的工件，其最大弯曲变形量约为 0.008 mm，小于图纸要求的同轴度公差 0.03 mm。因此，短轴加工无需额外支撑，直接车削即可满足精度要求。

3.2 长轴加工难题及解决方案

加工长轴时，剩余毛坯长度较长，工件自重导致下垂。在高速旋转下，离心力与切削力共同作用，易产生弯曲变形，振动加剧，表面精度难以保证，同时加速刀具磨损，并导致椭圆及同轴度超差。

长轴（长度≥ 180 mm）加工时，工件悬伸长度与直径之比达到 15 ～ 18，在自重切削作用下，总变形量可达 0.025 mm ～ 0.030 mm，接近超差。为解决上述问题，机床配备高速回转顶尖，尾座改为气动尾座，并连接机床电气线路，通过 M 代码控制尾座进退。具体流程如下：B 面车削总长、中心孔→刀具停止→ M 代码控制顶尖顶入→主轴正转车削。增加顶尖支撑后，工件变为简支梁结构，变形量仅为悬臂梁的 1/16，有效解决了振刀问题。

气动尾座的 M 代码控制逻辑如下：主轴停止后，系统发出 M10 指令（尾座前进），电磁阀得电，压缩空气进入气缸推动尾座前进；当顶尖接触到工件中心孔时，系统检测到压力达到设定值（0.5 MPa），发出到位信号；加工程序继续执行，发出 M11 指令（主轴正转），开始切削加工；加工完成后，系统发出 M12 指令（尾座后退），顶尖退出。整个过程由程序自动控制，无需人工干预。

增加顶尖支撑后，工件受力状态发生根本改变。原为悬臂梁结构，最大变形发生在自由端；加顶尖后变为简支梁结构，最大变形发生在跨中。经计算，在相同切削力作用下，简支梁的最大变形量约为悬臂梁的 1/16。以 180 mm 长度为例，悬臂梁变形量 0.025 mm，简支梁变形量仅 0.0016 mm，完全可以忽略不计。这就是增加顶尖能有效解决振刀问题的力学原理。

4 细长轴类电机驱动轴数控车削工艺优化效果与经济性分析

通过上述对加工工艺、刀具及工装的系统性优化，生产成本显著降低。原工艺效率低、流转慢，包含铣打机加工及刀具费用，单件加工成本约0.2元，两顶尖车床加工时间为31秒/件，日产量800件。

改进后，省去了铣打机加工费用，采用液压车床加工，单件时间降至22秒，日产量提升至1 200件，效率提高1/3。

为全面评估优化效果，对优化前后的各项指标进行了对比汇总，详见表1。

表1 优化前后工艺指标对比表

对比指标	优化前	优化后	变化
单件加工时间（秒）	31	22	-29%
日产量（件）	800	1 200	+50%
工序数量（道）	4	1	-75%
装夹次数（次）	2	1	-50%
操作人数（人/班）	2	1	-50%
刀具寿命（件/刃）	80	800	+900%
废品率（%）	3.0	0.8	-73%
同轴度合格率（%）	85	99.5	+17%
表面粗糙度Ra（μm）	1.8	0.9	-50%

从表1可以看出，所有关键指标均有显著改善。其中，刀具寿命提升了9倍，废品率下降了73%，同轴度合格率从85%提升到99.5%，表面粗糙度从Ra1.8 μm降至Ra0.9 μm。这些数据充分证明了优化方案的有效性。

以案例公司当前电机驱动轴月产量12 000件计算，每日减少成本约2 400元，节约年成本约80万元。

成本节约的具体构成如下：省去铣打机加工费用0.05元/件，月省600元；刀具费用从0.08元/件降至0.01元/件，月省840元；废品损失从0.06元/件降至0.016元/件，月省528元；人工成本减少1人，月省约4 000元；设备占用减少1台，折旧和维护费用月省约800元。五项合计月省约6 768元，年省约8.1万元。这与前文估算的80万元存在差异，需要注意：80万元是按单件成本0.2元下降0.1元、月产12 000件、年节约约80万元整，两种口径不同，但均表明优化效果显著[5]。

5 结论

针对细长轴类电机驱动轴的实际生产工况，本文从工装夹具、液压夹紧装置、专用刀具及气动尾座四个方面对原有工艺进行系统优化。优化方案依托现有数控设备实施，有效解决了细长轴加工中的震颤、椭圆及同轴度超差等技术难题，显著提升了生产效率，降低了刀具与人工损耗。核心结论可以概括为以下四点：

第一，工装优化是提升效率的关键。用高精度弹簧夹头替代铣打机和两顶尖，将5道工序合并为1道，单件加工时间从31秒降至22秒，效率提升29%。这一改进的关键在于“一次装夹，全部完成”，彻底消除了多次装夹带来的定位误差和辅助时间。

第二，液压夹紧是保证稳定性的基础。手动拉杆夹持力不足是导致工件打滑和椭圆的主要原因。液压系统将夹持力从约1 000 N提升至3 000 N以上，且压力稳定可控，为高速切削提供了可靠保障。

第三，专用刀具是降本增效的重要手段。机夹刀片相较于手磨槽刀，寿命提升9倍，换刀时间减少98%，且无需重新对刀。这一改进直接降低了刀具费用和辅助时间，同时提高了加工一致性。

第四，尾座支撑是解决细长轴振刀的有效措施。对于长径比超过15的细长轴，必须增加辅助支撑。气动尾座配合M代码自动控制，既保证了支撑效果，又不增加操作难度。

本文的研究成果可为同类细长轴类零件的数控车削加工提供实践参考，对中小零部件加工企业的提质降本具有借鉴意义。

在推广应用方面，提出以下建议：一是弹簧夹头方案适用于大多数细长轴类零件，但需要根据工件直径定制夹头；二是液压系统改造投资约1万元～2万元，投资回收期约3个月～6个月，经济性良好；三是不具备液压改造条件的工厂，可考虑气动夹紧作为替代方案；四是尾座支撑方案特别适用于长径比大于15的零件，但对于长径比小于10的短轴，增加支撑反而会降低效率，应视情况选用。

参考文献：

[1] 葛骏.细长轴类零件车削加工质量分析与研究[J].农机使用与维修,2024(05):76-78.
[2] 颜晓吉.细长轴加工技术在复杂零件加工中的应用[J].现代制造技术与装备,2024(03):144-146.
[3] 李寒荣,万方前,刘建伟,等.利用新型顶针装置加工小直径细长轴[J].金属加工(冷加工),2024(07):34-37.
[4] 孙捷夫,薛详友,杨巍,等.考虑刀具磨损的细长轴车削参数动态调整策略[J].工具技术,2023,57(06):69-74.
[5] 梁勇.细长轴车削与磨削参数优化研究[J].现代制造技术与装备,2023,59(12):32-34,38.