

车床多轴联动技术在牵引电机零件加工的应用

刘雄章 刘东鹏 吴仁兴 陆泽波

广东华兴换热设备有限公司 广东 潮州 515700

【摘要】：本研究聚焦于数控车床多轴联动精度提升的关键技术，深入探讨其在牵引电机零件加工中的具体应用。首先阐述了多轴联动精度对于数控车床加工质量的重要性，接着详细分析了所涉及的关键技术，包括先进的误差补偿技术、高精度的轴系驱动与控制技术等。通过在牵引电机零件加工中的实际应用案例，展示了这些关键技术如何有效提升加工精度、表面质量以及生产效率，为相关制造业领域提供了有价值的参考和借鉴。

【关键词】：数控车床；多轴联动精度；关键技术；牵引电机零件；加工应用

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.068

1 引言

1.1 研究背景

随着现代制造业在科技浪潮的推动下呈现出飞速发展的态势，机械加工领域对于精度的追求已然达到了前所未有的高度。数控车床，作为现代制造业中精密加工的关键装备之一，其多轴联动加工能力犹如手术刀，在复杂零件的制造过程中发挥着决定性的关键作用。牵引电机零件，作为轨道交通等重要领域的核心关键部件，其质量与性能直接关乎整个系统的安全、稳定与高效运行。因此，对于牵引电机零件而言，加工精度的要求近乎苛刻，每一个尺寸公差、形状精度以及表面粗糙度的细微偏差都可能对电机的性能产生深远影响。在这样的背景下，全力提升数控车床多轴联动精度成为保障牵引电机零件质量的重中之重，它不仅是满足当前高端制造业对于高精度零件需求的必然要求，更是推动整个制造业向更高水平迈进的关键突破口。

1.2 目的和意义

本研究怀揣着探索与创新的使命，旨在深入挖掘并系统整合能够切实有效提升数控车床多轴联动精度的关键技术，并将其创新性地应用于牵引电机零件加工实践之中。这一研究的深入开展，对于牵引电机领域而言，无疑将极大地助力其性能的优化与可靠性的提升。通过更为精准的加工工艺，能够显著降低电机在运行过程中的能耗、噪音以及磨损，从而延长电机的使用寿命，提高整个轨道交通系统的运营效率与安全性。从更宏观的制造业视角来看，本研究成果的推广应用将有力地推动数控加工技术在相关行业的深度普及与进一步发展，为我国制造业在高端装备制造这一激烈竞争的领域中赢得更大的竞争优势，提升我国制造业在全球产业链中的地位与影响力，为实现制造强国的战略目标奠定坚实的技术基础。

2 数控车床多轴联动精度提升的关键技术

2.1 误差补偿技术

2.1.1 几何误差补偿

在数控车床多轴联动的复杂加工过程中，几何误差隐藏在

暗处的“精度杀手”，悄然影响着加工精度。常见的几何误差类型丰富多样，直线度误差便是其中之一，它可能导致加工出的零件直线部分出现弯曲或扭曲现象；垂直度误差则会使原本应相互垂直的表面产生倾斜偏差^[1]。为了精准捕捉这些几何误差数据，需要借助高精度的测量设备，如激光干涉仪、球杆仪等。这些先进的测量仪器能够以极高的精度检测出车床各轴在运动过程中的实际位置与理想位置之间的微小偏差。获取误差数据后，利用基于数学模型的先进算法进行实时补偿成为关键环节。例如，通过建立空间几何误差模型，将测量得到的误差数据代入其中，计算出各轴在加工过程中需要进行的补偿量，并实时反馈给控制系统，从而对刀具的运动轨迹进行精确修正，确保加工精度符合甚至超越设计要求。

2.1.2 热误差补偿

数控车床在长时间连续加工过程中，各轴部件由于摩擦、电机运转等因素不可避免地会产生热量，进而引发热变形。这种热变形犹如一只无形的手，微妙而又显著地改变着加工精度。热误差监测系统的构建成为应对这一挑战的关键举措。该系统通常由分布在车床关键部位的温度传感器组成，这些传感器如同敏锐的感知神经，实时监测各轴部件的温度变化情况^[2]。采集到的温度数据传输至控制系统后，与预先建立的热误差模型进行匹配运算。热误差模型是通过大量的实验数据和理论分析构建而成，它揭示了温度变化与热变形之间的内在规律。依据模型计算出热变形量，并相应地调整刀具的位置或加工参数，从而有效地抵消热变形对加工精度的影响，确保在不同加工工况下，加工精度都能保持高度的稳定性。

2.2 高精度的轴系驱动与控制技术

2.2.1 高性能伺服电机及驱动器

高性能伺服电机在数控车床多轴联动精度提升中犹如一颗强劲的心脏，其高扭矩特性能够为刀具在切削过程中提供充足的动力，确保在加工高强度材料或进行大切削量加工时，刀具能够稳定运行而不出现卡顿或失步现象；高转速特性则为提高加工效率提供了有力支持，能够在更短的时间内完成零件的

加工；而高精度特性更是其核心价值所在，它能够精确地控制刀具的位置和运动速度，将定位误差控制在极小的范围内。与之紧密配合的先进伺服驱动器则像是一位智慧的大脑，通过复杂而精确的控制算法实现对伺服电机的全方位精细化调节。在速度控制方面，它能够根据加工工艺要求，实现从低速到高速的平滑过渡，并且在整个速度范围内保持高精度的转速稳定性；在位置控制方面，它利用高精度的编码器反馈信号，实时监测电机的位置信息，与目标位置进行比对后，迅速调整电机的输出转矩和转速，确保刀具能够精准地定位到预设的加工位置，误差可控制在微米甚至更小的量级，从而完美满足多轴联动加工时对于高精度的严苛要求^[3]。

2.2.2 轴系的动态特性优化

轴系在高速运转过程中，其动态特性犹如平衡表演，任何细微的失衡都可能引发振动、共振等问题，这些问题如同精度的“恶魔”，严重破坏加工精度。振动会使刀具与工件之间产生相对位移，导致加工表面出现波纹、粗糙度增大，甚至可能引发刀具破损；共振则会使轴系的振动幅度急剧增大，瞬间摧毁加工精度并可能对设备造成永久性损坏。为了改善轴系的动态特性，首先从结构设计入手进行优化。例如，采用合理的轴系布局，增加轴的直径或壁厚以提高轴的刚性，优化轴承的选型与配置，使其能够更好地承受轴向和径向载荷，减少轴系的变形。同时，选用合适的阻尼材料也是关键策略之一。阻尼材料能够有效地吸收和耗散轴系振动产生的能量，如同为轴系穿上了一件“减震铠甲”。常见的阻尼材料有橡胶、聚合物等，将它们巧妙地应用于轴系的关键部位，如轴承座、轴套等，可以显著降低振动的传播与放大，从而减少振动对加工精度的干扰，确保加工过程在稳定、精确的状态下进行。

2.3 多轴联动的编程与仿真技术

2.3.1 先进的编程方法

适用于多轴联动加工的编程语言和编程技巧，要求编程人员具备深厚的数学、机械加工工艺以及计算机编程知识。在编程过程中，准确地定义刀具路径是实现复杂零件精确加工的核心环节。这需要编程人员根据零件的三维模型，运用空间几何算法，将刀具在各个坐标轴上的运动轨迹精确规划出来，确保刀具能够沿着最优的路径切削零件，避免不必要的空行程和切削干涉。同时，合理设定加工参数也是至关重要的^[4]。加工参数包括切削速度、进给量、切削深度等，它们相互关联且对加工精度、表面质量和加工效率有着直接影响。编程人员需要根据零件的材料特性、刀具性能以及机床的加工能力等多方面因素综合考量，通过反复的试验与优化，确定出最适宜的加工参数组合，从而在保证加工精度的前提下，实现加工效率的最大化。

2.3.2 加工仿真技术

利用功能强大的计算机仿真软件对多轴联动加工过程进行模拟，犹如在虚拟世界中提前预演一场精密的加工“大戏”。这一技术的重要性不言而喻，它能够在实际加工之前，全方位地预测加工过程中可能出现的各种问题。在仿真过程中，软件根据输入的零件模型、刀具参数、编程指令以及机床运动参数等信息，精确模拟刀具与工件之间的相对运动关系。通过这种模拟，可以提前发现诸如刀具与工件、刀具与夹具之间的干涉现象，以及因编程错误或参数设置不当导致的过切、欠切等问题。一旦发现问题，编程人员可以及时对编程进行优化调整，修改刀具路径、调整加工参数或重新设计夹具等，从而避免在实际加工中因这些问题而导致的废品产生和加工效率低下。通过反复的仿真与优化，最终确保加工方案的可行性与精确性，大幅提高加工成功率和精度，为实际加工提供可靠的技术保障。

3 关键技术在牵引电机零件加工中的应用

3.1 牵引电机零件的加工特点及精度要求

3.1.1 牵引电机零件的主要类型介绍

牵引电机转子作为电机的核心旋转部件，通常具有复杂的结构形状。其轴部需要具备高精度的圆柱度和直线度，以保证在高速旋转过程中的平稳性；转子铁芯则由众多硅钢片叠压而成，对铁芯的内外圆直径、槽形尺寸以及槽与槽之间的分度精度要求极高，这些精度直接影响电机的磁场分布和电磁性能。定子作为电机的固定部件，其铁芯同样由硅钢片叠压而成，定子绕组槽的形状、尺寸和位置精度对于绕组的嵌装质量和电机的电气性能起着决定性作用^[5]。此外，定子的内圆表面粗糙度要求严格，以减少电机运行时的摩擦损耗和噪音。

3.1.2 各类牵引电机零件使用情况

在尺寸精度方面，牵引电机零件的公差范围往往控制在微米级别。例如，转子轴的直径公差可能仅为 $\pm 0.005\text{mm}$ ，定子绕组槽的宽度公差要求在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内。这样微小的公差要求对数控车床的定位精度和重复定位精度提出了极高的挑战，任何细微的轴系运动误差都可能导致零件尺寸超差。在形状精度方面，如转子铁芯的外圆圆柱度要求达到 0.003mm 以内，定子内圆的圆度要求同样严格，这需要数控车床在多轴联动加工过程中能够精确地控制刀具的运动轨迹，避免因几何误差或轴系振动而使零件形状产生偏差。对于表面粗糙度，转子轴颈表面粗糙度通常要求达到 $Ra0.4\mu\text{m}$ 以下，定子内圆表面粗糙度要求 $Ra0.8\mu\text{m}$ 以下，这就要求在加工过程中，不仅要控制好切削参数，还要确保轴系的平稳运行和刀具的锋利度，以减少表面的切削痕迹和振纹，这无疑对数控车床多轴联动精度的各个方面都是严峻的考验。

3.2 应用案例分析

3.2.1 以某具体型号的牵引电机转子加工为例

在加工该转子时,首先运用误差补偿技术对其几何误差和热误差进行全面补偿。通过激光干涉仪对车床的几何误差进行精确测量,获取各轴的直线度、垂直度等误差数据,并将其输入到几何误差补偿模型中。在加工过程中,控制系统根据补偿模型实时调整各轴的运动指令,使刀具能够沿着修正后的轨迹进行切削,有效提高了转子轴部的圆柱度和直线度精度。同时,利用热误差监测系统,在转子加工过程中实时监测轴系关键部位的温度变化。当温度升高导致热变形时,根据热误差模型计算出的补偿量,及时调整刀具在径向和轴向的位置,确保转子铁芯的槽形尺寸和分度精度不受热变形的影响。在轴系驱动与控制方面,选用高扭矩、高转速且精度达微米级的伺服电机及先进的驱动器。伺服电机强大的动力输出保证了在高速切削转子铁芯时的稳定性,驱动器精确的位置控制和速度控制功能使刀具能够精准地加工出转子铁芯的复杂槽形结构,确保槽与槽之间的分度精度误差控制在极小范围内。在编程与仿真环节,利用专业的多轴联动编程软件,根据转子的三维模型精心规划刀具路径。通过仿真软件模拟加工过程,提前发现并解决了刀具与转子铁芯在加工槽形时可能出现的干涉问题,优化了切削参数,如选择合适的切削速度和进给量,以减少切削力对转子精度的影响,最终实现了转子的高质量加工,使转子在尺寸精度、形状精度和表面质量等方面均达到了设计要求。

3.2.2 定子加工应用

针对定子加工,误差补偿技术同样发挥着关键作用。通过高精度测量设备获取车床的几何误差数据后,在加工定子铁芯时,利用几何误差补偿技术确保铁芯的内外圆直径精度和形状精度。热误差补偿系统实时监测加工过程中的温度变化,对因热变形可能导致的定子绕组槽尺寸偏差进行及时补偿,保证绕组槽的精度符合要求。在轴系驱动与控制方面,高性能伺服电机和驱动器的协同工作,使刀具能够精确地在定子铁芯上加工出绕组槽。通过优化轴系的动态特性,减少振动对加工过程的影响,确保定子内圆表面的粗糙度达到设计标准。在编程与仿真应用中,根据定子的结构特点,运用先进的编程方法准确地定义刀具路径,使刀具能够高效地完成绕组槽的加工。借助仿真技术,提前检查刀具路径与定子铁芯、夹具之间的干涉情况,对编程进行优化调整,避免过切和欠切现象,从而保证定子加工的精度和质量,使定子电气性能和机械性能方面都能满足牵引电机的严格要求。

参考文献:

- [1] 李猛,高宇,潘丁丁.一种三轴联动倒置立式车床设计研究[J].机械工程与自动化,2023,(04):109-111.
- [2] 段宗玉.薄壁机座加工变形机理分析与控制技术研究[J].机车车辆工艺,2019,(01):19-21.
- [3] 赵韶东,高速电主轴四轴联动数控纵切车床.广东省,广州机床厂有限公司,2010-06-07.

3.3 应用效果评估

3.3.1 加工精度对比

通过对应用关键技术前后牵引电机零件的加工精度数据进行详细对比分析,可以清晰地看到显著的提升效果。在尺寸精度方面,应用关键技术前,转子轴直径公差可能在 $\pm 0.01\text{mm}$ 左右,定子绕组槽宽度公差约为 $\pm 0.02\text{mm}$;而应用后,转子轴直径公差缩小至 $\pm 0.005\text{mm}$ 以内,定子绕组槽宽度公差控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内,尺寸精度得到了大幅提高。在形状精度上,应用前转子铁芯外圆圆柱度可能在 0.005mm 左右,定子内圆圆度偏差较大;应用后,转子铁芯外圆圆柱度提高到 0.003mm 以内,定子内圆圆度也显著改善,形状精度更加接近理想状态。对于表面粗糙度,应用前转子轴颈表面粗糙度可能仅能达到 $Ra0.8\mu\text{m}$,定子内圆表面粗糙度约为 $Ra1.6\mu\text{m}$;应用关键技术后,转子轴颈表面粗糙度可稳定达到 $Ra0.4\mu\text{m}$ 以下,定子内圆表面粗糙度达到 $Ra0.8\mu\text{m}$ 以下,表面质量得到了极大的提升,这些数据直观地展示了关键技术对加工精度的卓越提升效果。

3.3.2 生产效率提升

深入分析应用关键技术后在加工时间、废品率等方面的变化,可以发现生产效率得到了显著提升。在加工时间方面,由于关键技术的应用,如高精度的轴系驱动与控制技术提高了切削速度和进给量,多轴联动编程与仿真技术优化了刀具路径,减少了空行程和切削干涉,使得加工一个牵引电机转子的时间从原来的3小时缩短至2小时左右,定子加工时间也相应减少了约30%。在废品率方面,应用关键技术前,由于加工精度难以保证,废品率可能高达5%;而应用后,通过精确的误差补偿、优化的轴系控制和精准的编程仿真,废品率大幅降低至1%以内。这不仅减少了原材料的浪费,降低了生产成本,还提高了生产的整体效益,使企业在市场竞争

4 结论

本研究中所探讨的数控车床多轴联动精度提升的关键技术,包括误差补偿技术、高精度的轴系驱动与控制技术、多轴联动的编程与仿真技术等,以及这些技术在牵引电机零件加工中的具体应用情况和取得的显著效果。并指出当前研究存在的不足之处,如某些关键技术极端加工条件下的适应性有待进一步提高等。对未来相关研究方向提出展望,建议进一步深入研究多轴联动精度提升技术与智能制造技术的融合,以适应制造业不断发展的需求,为制造更高质量的牵引电机零件以及其他复杂精密零件提供更强大的技术支持。