

# 伺服电机在高精度机械加工中的应用研究

张王锋 胡凌豪 郎新峰

天通智能装备有限公司 浙江 海宁 314400

**【摘要】**：随着制造业对精密度和加工效率要求的不断提升，伺服电机因其响应快、控制精度高等特点，在高精度机械加工领域得到广泛应用。本文以伺服电机为核心，系统分析其在机床及自动化加工设备中的应用优势，重点探讨其在实现微米级精度、提升生产稳定性等方面的关键作用。研究表明，伺服电机通过闭环控制显著提高了机械加工过程的精度和可靠性，有效推动了高端制造业技术升级。该研究对于推进高精度加工设备的智能化和自动化发展具有重要意义。

**【关键词】**：伺服电机；高精度机械加工；闭环控制；加工精度；自动化设备

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.070

## 引言

当前，我国制造业向智能化、高端化转型，对机械加工精度与效率提出更高要求。高精度机械加工技术是先进制造技术的重要支撑，其发展关乎产品质量、企业竞争力及相关产业链技术创新。据工信部数据，我国高端数控机床及自动化装备市场规模逐年扩大，年复合增长率超12%，精密加工自动控制需求凸显。伺服电机因响应快、定位精度高、负载能力强，成为高精度机械加工系统关键驱动元件。此前研究多聚焦机械结构、加工工艺及传统控制方法，但在伺服电机智能控制及复杂加工场景精度保障方面仍有优化空间。本文结合实际应用，分析伺服电机在微米级精度加工和生产稳定性提升中的作用，为高端制造业智能化升级及相关技术创新与产业升级提供参考。

## 1 概述与必要性

### 1.1 高精度机械加工的发展趋势与需求

高精度机械加工作为现代制造业的重要组成部分，其发展趋势与需求在全球化竞争以及科技快速进步的推动下愈加显著<sup>[1]</sup>。当前航空航天、电子信息、医疗器械等领域对机械加工产品的精密度、一致性和复杂化要求日益提高，这对加工设备的性能提出了更高的要求。传统机械加工方式因容易受到加工误差和环境因素的影响，难以满足微米级乃至纳米级的加工需求。高精度、智能化和高效化已成为机械加工领域发展的主流方向，以应对严苛的行业标准和市场需求。

在市场需求推动下，高精度加工技术的研究不断向高速度、低能耗和高柔性维度延伸。这意味着机械加工设备必须具备更高的实时控制能力、更稳定长期的精度保持性以及提高资源利用率的能力。高端制造业的兴起进一步加速了高精度加工技术在自动化、智能化方向的革新步伐，推动加工技术从半手动向全数控、自动化再到智能化发展，以提升生产效率和制造

质量，降低生产成本。由此，高精度机械加工正逐渐成为行业核心竞争力的重要体现，其发展趋势和需求为相关技术和设备的创新提供了强大驱动力。

### 1.2 伺服电机的技术特点与性能优势

伺服电机具有一系列优异的技术特点和性能优势，使其在高精度机械加工中得到广泛应用<sup>[2]</sup>。其主要特点在于响应速度快、定位精度高、控制灵活性强。伺服电机采用闭环控制技术，能够实时反馈电机运行状态，并根据偏差信号及时调整输出，从而大幅提升系统的动态响应性能和控制精度。这种特性在微米级精度加工场景中尤为重要。

伺服电机具有极高的可靠性，其核心部件经优化设计，使其运行稳定且寿命较长，能够很好地适应复杂加工环境。伺服电机扭矩输出特性优越，低速时可实现恒定扭矩输出，高速时保持稳定的运行状态，这对加工复杂曲面或高负载条件下的设备运行尤为关键。

在能源效率方面，由于伺服电机具有智能调节能力，其运行功耗较传统驱动方式明显降低<sup>[3]</sup>。这种高效能的特性也契合了当前制造业对节能减排和可持续发展的需求。总体而言，伺服电机凭借其技术特点与性能优势，为高精度机械加工的稳定性与效率提升提供了重要保障。

### 1.3 伺服电机在高精度加工中的必要性分析

伺服电机在高精度加工中的必要性主要源于现代制造业对加工精度和效率的极高要求。高精度机械加工需要设备在微米级甚至纳米级范围内保持精确定位，而传统驱动系统难以满足这一需求。伺服电机具备高响应速度和高控制精度，能够实现位置、速度和力矩的精准闭环控制，从而显著提升加工设备的精密度和稳定性<sup>[4]</sup>。

作者简介：姓名：张王锋；出生年月：1986年4月；性别：男；民族：汉族；籍贯：浙江海宁人；学历：本科，工程师；研究方向：电气工程及其自动化。

高度自动化的制造环境要求设备具备实时调整能力，以应对复杂的加工条件和多变的生产需求，而伺服电机凭借其先进的动态性能和兼容性，能够实现快速响应与自适应优化，满足复杂场景下的加工需求。伺服电机在高精度加工设备中的应用，不仅有助于提升产品质量和加工效率，还对推动智能制造发展、实现产业升级具有重要意义。

## 2 伺服电机在高精度机械加工中面临的问题分析

### 2.1 伺服系统精度保持性与长期稳定性不足

伺服系统在高精度机械加工中面临的核心问题之一是其精度保持性与长期稳定性不足。这个问题主要来源于机械结构、伺服驱动器性能及反馈元件的综合影响。高精度加工要求伺服系统具备稳定的闭环控制能力，但由于长期运行过程中部件的磨损、热膨胀、振动和外部干扰，系统精度往往难以维系。反馈元件如光栅尺、编码器等分辨能力和精度直接决定了伺服系统的控制能力，但外界环境因素会降低其信号输出的可靠性，进而影响系统整体性能。

运动控制参数的漂移也是导致精度保持性不足的重要因素。在长期连续运行中，伺服系统可能因温度变化、电子元器件老化等原因引发参数波动，从而导致伺服误差的累积。高频动态响应时的伺服控制振荡现象，也可能对加工过程的稳定性产生不利影响<sup>[5]</sup>。尤其是在微米级加工需求下，这种误差对加工结果的精度和一致性的破坏效果更加明显。

伺服电机的长期稳定性不足，还与加工环境的复杂性密切相关。由于多轴联动加工对同步性要求极高，伺服系统间的协调一致性具有很高挑战，微小偏差可能引发加工误差的放大<sup>[6]</sup>。这些问题的存在对高精度机械加工的可靠性形成了制约，也对伺服系统优化提出了更高要求。

### 2.2 动态响应特性与加工效率之间的矛盾

伺服电机在实现高精度机械加工时，动态响应特性与加工效率之间的矛盾成为亟需解决的关键问题。伺服电机的动态响应性能直接影响机床对加工指令的精准执行，但由于制造工艺对效率的要求不断提高，快速响应与加工稳定性之间的平衡较难实现。高速加工场景中，伺服系统需要频繁进行位置调整，导致实际加工速度受限，增加了系统误差积累的风险。伺服电机在快速切换运动路径或进行复杂加速减速操作时，其驱动系统可能面临功率损耗加剧、热负载增加等问题，这对保持加工精度带来了极大的挑战。系统响应速度有限还会影响加工过程中的振动抑制效果，导致表面质量难以满足高端制造领域的严格要求。伺服电机动态响应特性与效率的矛盾有效地凸显了当前技术和工艺改进的必要性，与之相关的优化设计对于提升设备综合性能至关重要。分析该问题将为伺服电机在更复杂、更高速的加工应用中实现稳定、高效的功能铺垫重要的理论基础。

## 2.3 复杂加工环境下的抗干扰与兼容性问题

复杂加工环境对伺服电机系统的抗干扰和兼容性提出了严峻挑战。在高精度机械加工中，电磁干扰、振动、温度波动等外部因素容易影响伺服电机的稳定运行，导致加工精度与系统可靠性下降<sup>[7]</sup>。不同机械设备控制系统之间的兼容性问题限制了伺服电机在复杂加工环境中的推广应用。抗干扰能力不足可能引发控制信号失真，进而出现误差累积，而兼容性问题则可能导致设备之间的信息交互效率降低，系统协同受阻<sup>[8]</sup>。解决这些问题需要改进电机设计，优化屏蔽与滤波措施，提高系统软硬件的适配性，以及通过算法升级增强系统对复杂环境的适应能力，从而保障高精度加工的稳定性与一致性。

## 3 伺服电机在高精度机械加工中的优化策略与解决方案

### 3.1 提升伺服系统精度与稳定性的控制方法优化

伺服系统的精度与稳定性是高精度机械加工中的核心问题，其优化对于提升加工质量与生产效率具有重要意义。在控制方法优化方面，闭环控制技术的有效应用成为关键。闭环系统通过实时监测位置、速度和扭矩信号，并执行反馈调节，实现精准控制。这种模式能够显著减小加工过程中的误差，确保微米级的精度需求。先进的PID控制算法在伺服系统调节中表现出显著优势。通过参数优化和自适应调整，PID控制算法可以提高系统的动态性能，减少超调现象，从而增强加工过程的稳定性。与此针对伺服系统的长期稳定性问题，采用主动式误差补偿技术成为一种解决方案。该技术通过实时预测外界干扰因素，对伺服控制参数进行动态调整，有效减轻长期运行过程中的性能衰减。伺服电机的智能控制模块也是优化手段，通过引入大数据分析和人工智能算法，可实现加工任务的模式预测与实时优化，从而进一步提升系统精度与稳定性。这些优化策略的应用，为高端制造领域的发展奠定了技术基础<sup>[9]</sup>。

### 3.2 动态响应与加工效率协同优化的参数整定策略

动态响应与加工效率的协同优化是高精度机械加工中伺服电机参数整定的关键环节。优化过程中，需充分考虑伺服电机响应时间与加工设备负载变化之间的关系，以实现高速加工条件下的稳定控制。通过引入先进的自适应控制算法，可动态调整伺服系统参数，确保响应时间与加工效率之间达到最佳匹配。一种有效的方法是在伺服控制中应用基于前馈补偿的速度与加速度控制技术，从而减少因负载变化带来的输出误差，提高动态性能的一致性。

为了提升复杂加工任务中的参数整定效果，可结合动力学建模与实验数据分析优化控制参数。通过构建高精度的数学模型，能够精确描述伺服电机在不同工况下的动态行为。采用基于现代控制理论的增益调节技术，可在多变量耦合作用下实现高效协同优化。为了进一步提高加工效率，优化过程应综合考

虑伺服系统与加工设备的机械性能匹配问题,以实现运动规划与伺服控制的深度融合,从而确保系统的高响应性与加工的高效稳定。

### 3.3 增强系统抗干扰能力与环境适应性的集成方案

在高精度机械加工过程中,伺服电机面临复杂加工环境中的多种干扰因素,针对提高系统抗干扰能力与环境适应性的需求,提出了多层次的集成优化方案。通过先进的滤波算法与高动态分辨率传感器结合,能够有效减少温度变化、电磁干扰等环境因素对伺服系统的影响<sup>[10]</sup>。引入自适应控制技术,使伺服系统能够实时识别并补偿动态干扰,从而提升控制精度与加工稳定性。在硬件设计方面,通过电磁屏蔽材料优化伺服系统结构,并提升连接器和信号电缆的抗干扰能力,增强设备的可靠性。结合系统软件优化,开发基于深度学习的实时误差预测与补偿模型,加强系统对复杂加工环境的适应性。对伺服电机和周边子系统进行协同设计,优化执行机构与控制单元的兼容

性,从而确保稳定运行。在多种优化策略共同作用下,伺服电机能够显著提升环境适应性和抗干扰能力,为高精度机械加工提供有力支持,助推制造业向智能化与高端化方向发展。

### 4 结语

本研究系统探讨了伺服电机在高精度机械加工中的应用,揭示其通过闭环控制策略,能显著提升机械加工精度与生产稳定性,在微米级尺寸控制、快速响应等方面作用突出,有力支撑了高端制造智能化、自动化发展。不过,当前伺服电机应用存在高成本、高集成度系统技术复杂、对极端环境适应力有限等问题,制约普及与效能提升。未来研究可优化其结构设计与驱动算法,提高抗干扰和节能水平;强化与智能传感、人工智能等新兴技术融合,提升复杂场景自适应能力;拓展其在超高精密、特殊材料加工等领域的应用,为技术创新与生产效能提升提供参考。

### 参考文献:

- [1] 陈安安.机械加工中的高精度加工技术分析[J].造纸装备及材料,2021,50(06):81-82.
- [2] 杨琳.高精度视频指纹技术在广告审核中的应用研究[J].现代电视技术,2022,(07):109-112.
- [3] 季顺延.数控加工技术在机械加工制造中的应用研究[J].河北农机,2021,(19):64-65.
- [4] 刘百明.高精度全站仪在隧道变形监测中的应用研究[J].现代交通技术,2023,20(04):74-78.
- [5] 马经帅,于洵,刘晓宇,韩峰,丁良华.高精度光电跟踪系统中伺服稳定控制算法研究[J].应用光学,2021,42(04):597-607.
- [6] 封光磊,彭梁锋,字立敏,余庆明,浦姣.高精度坐标镗床伺服电机温度主动控制装置研发与运用[J].机床与液压,2021,49(20):125-129.
- [7] 郭俊,王新,武艳慧,刘旭东.高精度分体焊接式阴模机械加工工艺研究[J].河北农机,2023,(04):67-69.
- [8] 孙成恺,刘海静,路同山,李灿伦,李卓慧,高泽天,王国防.高精度梯度控温系统应用研究[J].真空,2022,59(02):17-20.
- [9] 钟子龙.线切割技术在机械加工中的应用研究[J].中国机械,2021,(08):29-30.
- [10] 宋冠青王一卿.绿色制造工艺在电机机械加工中的应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2022,(02).