

数控机床自适应加工技术的多目标优化算法设计

朱小龙

中车大同电力机车有限公司 山西大同 037038

摘要: 数控机床在现代制造业中发挥着至关重要的作用,其高精度和自动化水平使其成为复杂零部件加工的首选工具。随着技术的发展,自适应加工技术应运而生,能够根据实时加工状态调整加工参数,提高加工效率和质量。然而,实际加工过程中常常面临多个优化目标的冲突,如加工精度、时间和成本等。因此,设计高效的多目标优化算法显得尤为重要。本研究旨在针对数控机床的自适应加工技术,提出一种新的多目标优化算法,以实现加工性能的综合提升。通过对目标函数的合理定义和算法框架的优化,我们希望能够在理论与实践,为数控加工领域提供有效的解决方案,从而推动智能制造的进一步发展。

关键词: 数控机床自适应加工技术;多目标优化;算法设计

引言

在现代制造业中,数控机床作为高精度加工的核心设备,广泛应用于航空、汽车、模具等行业。随着产品复杂度的增加和市场竞争的加剧,传统的加工技术面临着新的挑战。自适应加工技术应运而生,它能够根据实时加工条件和工件特性,动态调整加工参数,从而实现更高的加工效率和更好的产品质量。然而,在实际应用中,自适应加工常常需要同时满足多个优化目标,如提高加工精度、缩短加工时间和降低生产成本。这些目标之间往往存在矛盾,使得单一优化方案难以满足实际需求。因此,设计有效的多目标优化算法成为当前研究的热点,能够在这些相互制约的目标之间找到最佳平衡,为数控机床的智能化和自动化发展提供重要支持。这一研究不仅具有理论意义,还有助于推动制造业向更高水平的智能化迈进。

一、数控机床自适应加工技术的特点分析

(一) 动态参数调整机制

机床自适应系统工作原理如图1所示,在数控机床自适应加工技术中,动态参数调整是实现高效加工的核心机制之一。该机制依托于实时监测系统,通过传感器获取加工过程中的各项数据,如切削力、温度、振动等,从而动态调整加工参数以适应工件和加工环境的变

化。首先,切削力监测与反馈控制是动态参数调整的重要组成部分。通过在机床主轴或刀具上安装力传感器,实时监测切削力的变化情况。当切削力超过设定阈值时,系统会自动调整进给速度或切削深度,以防止刀具过载和工件损坏。例如,在铣削过程中,当检测到切削力急剧增加时,系统可以即时降低进给速度,确保加工过程的稳定性和刀具的使用寿命。其次,温度控制在高精度加工中同样至关重要。加工过程中产生的热量会影响工件的尺寸精度和表面质量。自适应加工系统通过温度传感器实时监测切削区的温度变化,并根据反馈信息调整冷却液的喷洒量或冷却方式,以保持工件和刀具的最佳工作温度。例如,在高温铸造材料的加工中,系统可以根据温度变化动态调整冷却液的流量,确保工件在整个加工过程中的温度均匀,从而提高加工精度和表面质量。最后,振动控制也是动态参数调整的重要方面。加工过程中产生的振动不仅影响加工精度,还可能导致刀具的早期失效。自适应加工系统通过安装加速度计或位移传感器,实时监测机床的振动状态。当检测到异常振动时,系统会自动调整切削参数或改变切削路径,以减少振动对加工质量的影响。例如,在高速铣削过程中,如果系统检测到工件发生共振现象,便会立即调整切削速度或切削深度,避免振动进一步加剧,从而保证加工过程的平稳进行和工件的高质量输出。动态参数调整机制通过综合利用多种传感器数据,实现对加工过程的全面监控和智能调整,大幅提升了数控机床的自适应加工能力,满足了复杂加工任务对高精度和高效率的双重要求。

作者简介: 朱小龙(1986.10——),男,汉族,吉林公主岭人,大学本科,高级工程师,主要从事机械加工(冷加工)方面的研究工作。

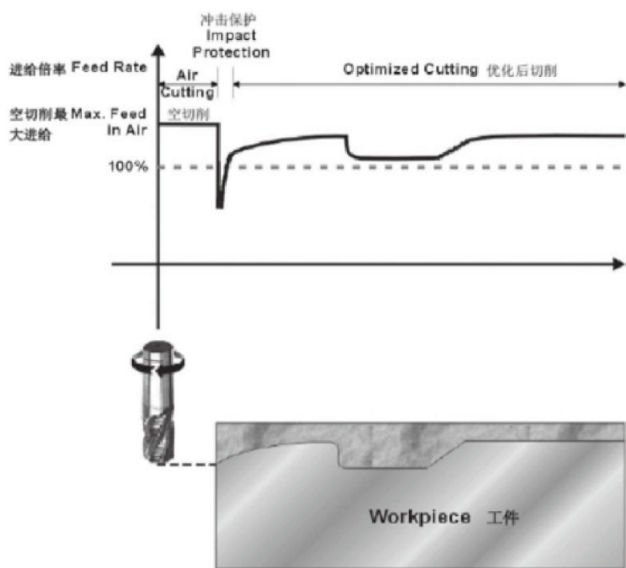


图1 机床自适应系统作用原理

（二）智能监测与故障诊断

数控机床自适应加工技术中的智能监测与故障诊断系统，通过先进的数据分析和机器学习算法，提升了机床的可靠性和加工稳定性。该系统集成了多种传感器，能够实时采集机床运行中的各项参数，如轴向位置、速度、加速度、电流、电压等，并将这些数据传输到中央处理单元进行分析和处理。首先，数据采集与预处理是智能监测的基础。高精度传感器如激光位移传感器和电流传感器，能够提供高频率和高精度的数据采集。预处理过程中，通过滤波、去噪和信号增强等技术，确保采集到的数据具备高质量和高可靠性。例如，在精密钻削过程中，系统通过激光位移传感器实时监测钻头的位置变化，并通过滤波算法去除高频噪声，保证位置信息的准确性。其次，基于机器学习的故障诊断方法，通过对历史数据和实时数据的分析，能够准确预测和识别机床的潜在故障。常用的算法包括支持向量机（SVM）、神经网络和决策树等。这些算法通过训练模型，学习正常和异常状态下的数据特征，从而在故障发生前进行预警。例如，利用神经网络对电流信号进行分析，可以提前识别电机过载或轴承故障，避免因突发故障导致的加工中断和设备损坏。最后，智能决策与优化调控是故障诊断系统的关键应用。基于诊断结果，系统能够自动调整加工参数或启动预防性维护措施，确保加工过程的连续性和稳定性。例如，当系统检测到主轴温度异常升高时，自动降低切削速度并增加冷却液的供应，同时提醒维护人员进行检查和维护。这种智能决策机制不仅提高了机床的运行效率和加工质量，还延长了设备的使用寿命，

减少了因故障停机带来的经济损失。智能监测与故障诊断系统通过深度融合传感器技术和智能算法，实现了数控机床的智能化管理和自适应控制，显著提升了加工过程的可靠性和智能水平。

（三）自适应路径规划与优化

自适应路径规划与优化是数控机床自适应加工技术中的另一个重要特点，通过智能算法实现刀具路径的实时调整和优化，提高加工效率和质量。该技术利用先进的路径规划算法，根据工件的几何特性和加工要求，动态生成最优的刀具路径，并在加工过程中根据实时反馈进行调整。首先，基于几何特征的路径规划，通过对工件表面的几何模型进行分析，识别关键特征如曲面、凹凸点和过渡区域，生成适应性强的刀具路径。例如，在复杂曲面的铣削过程中，系统能够根据曲率变化自动调整刀具的进给方向和切削深度，确保加工路径与工件表面紧密贴合，从而提高加工精度和表面质量。其次，基于优化算法的路径优化，通过引入遗传算法、粒子群优化（PSO）和蚁群算法等优化技术，对初步生成的刀具路径进行优化，减少切削时间和刀具磨损。例如，利用遗传算法优化多轴铣削路径，能够有效减少刀具的非加工移动距离，缩短加工周期，同时降低刀具的磨损率，延长刀具寿命。这种优化过程不仅提升了加工效率，还降低了生产成本。最后，实时反馈与路径调整机制，通过集成传感器和控制系统，实时监测加工过程中的偏差和异常，并根据反馈信息动态调整刀具路径。例如，在车削过程中，如果检测到工件表面出现微小的变形或振动，系统会立即调整刀具的切削路径和进给速度，确保加工过程的稳定性和工件的高质量。这种实时反馈与调整机制，使得路径规划与优化能够灵活应对加工过程中的各种不确定因素，保证加工的连续性和一致性。自适应路径规划与优化通过智能算法和实时反馈，实现了数控机床刀具路径的动态调整和优化，大幅提升了加工效率和质量，满足了复杂加工任务对高精度和高效率的需求。

二、数控机床自适应加工技术的多目标优化算法设计

（一）基于Pareto最优解的多目标优化

在数控机床自适应加工技术中，多个目标往往需要同时优化，如加工精度、加工效率和加工成本之间的平衡。这种多目标优化问题通常没有唯一解，而是多个相互竞争的解集。基于Pareto最优解的多目标优化算法是一种有效的解决方案，它能够在不同的目标之间找到平衡，并生成一组非支配解，也就是Pareto最优解。

Pareto最优解是一组解的集合，这些解在优化过程中没有被其他解在所有目标上同时支配。换句话说，对于每一个Pareto最优解，没有其他解在所有目标上表现得更好。因此，Pareto解是多目标优化中的理想解集。在数控机床加工过程中，比如优化切削力和表面粗糙度时，一个解可以减少切削力，但可能会增加表面粗糙度，另一个解则相反。这种情况下，两者都是Pareto最优解。通过选择这些解，用户可以根据具体的需求在不同目标之间进行权衡。

（二）基于遗传算法的多目标优化设计

遗传算法（Genetic Algorithm, GA）是一种基于自然选择和遗传机制的全局优化算法，尤其适用于数控机床自适应加工中的多目标优化问题。其主要特点是通过模拟生物进化过程中的选择、交叉和变异操作，逐步优化加工方案。在复杂加工任务中，遗传算法能够高效搜索解空间，找到多个目标的近似最优解。

在数控机床的多目标优化问题中，遗传算法的第一步是对加工参数进行编码。常用的方法是将加工参数如切削速度、进给率、切削深度等转换为二进制或实数形式的染色体。每一个染色体代表一个加工方案。通过解码这些染色体，可以得到实际的加工参数配置。例如，在铣削过程中，切削速度和进给率可以分别被编码为染色体的不同片段，通过交叉和变异操作，生成新的加工方案。遗传算法的编码方式直接影响到算法的搜索效率，因此在实际应用中应根据不同的加工目标和工件特征，选择合适的编码方式。

遗传算法的核心操作包括选择、交叉和变异。选择操作基于适应度值，选择出最优的加工方案进行“繁殖”，生成下一代解。交叉操作通过交换两个父代染色体的部分基因，产生新的加工参数配置。而变异操作则通过随机改变某个参数，增加解的多样性，避免算法陷入局部最优。对于数控机床自适应加工，交叉操作可以优化刀具路径和切削参数的组合，变异操作则可用于调整切削深度和进给速度。通过反复迭代，遗传算法逐步找到满足多个优化目标的最优解。具体技术路线图如右：



（三）基于模糊逻辑的多目标优化算法

模糊逻辑（Fuzzy Logic）是一种处理不确定性和模糊性的方法，特别适用于数控机床自适应加工中需要权衡多个相互冲突目标的场景。在加工过程中，模糊逻辑通过将不同目标的优化程度表示为模糊集合，从而实现多个目标的平衡优化。

模糊逻辑系统的核心是基于“如果-那么”的模糊规则。在数控机床的自适应加工中，模糊规则用于描述加工参数对多个优化目标的影响。例如，“如果切削力较大，那么降低切削速度”，或者“如果表面质量不达标，那么提高进给速度”。这些规则可以根据经验知识或者通过实验数据进行设计。在一个复杂加工任务中，可能涉及到多个优化目标如加工效率、表面质量和刀具寿命，这些目标之间可能存在矛盾。模糊规则能够通过模糊隶属度函数将这些目标的优化要求模糊化，从而找到一个适合多个目标的折衷解。

结语

本研究围绕数控机床自适应加工技术的多目标优化算法设计展开，提出了基于Pareto最优解、遗传算法和模糊逻辑的优化方案，分别针对加工精度、效率、成本等相互冲突的目标进行了详细分析与实现。在实际应用中，这些算法通过实时反馈、智能调控等手段有效提升了加工性能，显著提高了生产效率和质量。未来的研究可以进一步结合人工智能、深度学习等前沿技术，进一步提高优化算法的智能化水平，以更好地应对复杂的加工任务，实现数控机床的全面智能化发展。

参考文献

- [1] 王圣斌, 陈荣刚. 基于自适应滤波技术的激光数控加工误差控制方法 [J]. 激光杂志, 2023, 44 (1): 216-220. DOI: 10.14016/j.cnki.jgzz.2023.01.216.
- [2] 梁继海. 不规则零件的数控机床加工工艺研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60 (7): 173-175. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5587.2024.07.056.
- [3] 蔡杨. 基于数字孪生机床模型的加工路径优化研究 [J]. 机电产品开发与创新, 2024, 37 (1): 139-141, 145. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6673.2024.01.039.