

# 数控机床进给系统的优化设计与性能分析

孙浩源 张 景

(河北科技学院 河北 保定 071000)

**【摘要】**随着制造业的快速发展,数控机床作为现代制造技术的核心设备,其性能要求日益提高。数控机床进给系统作为机床的关键组成部分,直接影响着机床的加工精度、加工效率和稳定性。进给系统通过精确控制刀具或工件的运动路径、速度和定位精度,确保机床能够按照预设的程序完成各种复杂的加工任务。然而,在实际应用中,数控机床进给系统常面临精度不足、响应迟缓及稳定性欠佳等问题,这些问题的存在严重制约了数控机床的加工性能。因此,对数控机床进给系统进行优化设计与性能分析,对于提升机床的整体性能、提高加工产品的质量和生产效率具有重要意义。

**【关键词】**数控机床;制造技术;系统分析;性能分析

## 1 数控机床优化设计

### 1.1 进给系统结构优化

数控机床进给系统的结构优化是提高其性能的重要途径之一。进给系统作为数控机床的核心组成部分,承担着将伺服电机的旋转运动转化为刀具或工件的直线运动的关键任务,其性能优劣直接影响到机床的加工精度、效率和稳定性。进给系统主要由伺服电机、驱动器、传动机构和位置检测装置等核心部件构成,这些部件相互协作,共同决定了进给系统的整体性能。

其中,传动机构的性能对进给系统的精度和稳定性有着直接影响。传动机构负责将伺服电机的动力传递到刀具或工件上,其传动精度、刚度和响应速度等因素都会直接影响到进给系统的性能。因此,在结构优化中,应重点关注传动机构的改进。

以滚珠丝杠为例,作为数控机床进给机构中运动传递的核心部件,滚珠丝杠的传动效率、定位精度和使用寿命对进给系统的性能至关重要。滚珠丝杠通过滚珠在丝杠和螺母之间的滚动来实现运动传递,具有传动效率高、摩擦阻力小、定位精度高等优点。然而,在实际应用中,滚珠丝杠也存在传动间隙、刚度不足等问题,这些问题会导致系统误差和振动,从而影响进给系统的精度和稳定性。

为了减小滚珠丝杠的传动间隙,可以采用预紧的方法,即在滚珠丝杠和螺母之间施加一定的预紧力,使滚珠在传动过程中始终保持紧密接触,从而消除传动间隙。同时,还可以通过优化滚珠丝杠的结构设计,如增加丝杠的直径、减小螺距等,来提高其传动刚度和承载能力。此外,采用高精度的滚珠丝杠制造工艺

和先进的热处理技术,也可以进一步提高滚珠丝杠的定位精度和使用寿命。

### 1.2 控制策略优化

控制策略的优化是提升数控机床进给系统性能的另一个关键方面。传统的控制策略,如PID控制,虽然具有结构简单、易于实现等优点,但往往难以满足现代数控机床对高精度、高响应速度和高稳定性的要求。因此,采用先进的控制策略,如模糊控制、神经网络控制等,成为提升进给系统性能的有效手段。

模糊控制是一种基于模糊数学理论的控制方法,它通过模拟人的思维方式和决策过程,能够对复杂的系统进行有效的控制。在数控机床进给系统中,模糊控制可以根据系统的输入和输出信号,通过模糊推理规则来自动调整控制参数,以适应不同的工作条件和加工要求。例如,当系统出现超调或振荡时,模糊控制可以自动减小控制量,以降低系统的超调量和振荡频率;当系统需要快速响应时,模糊控制可以自动增大控制量,以提高系统的响应速度。

神经网络控制则是一种基于人工神经网络的控制方法,它通过学习和训练,能够自动调整控制参数,以适应不同的系统特性和工作环境。在数控机床进给系统中,神经网络控制可以通过对系统的输入输出数据进行学习和分析,建立系统的数学模型,并根据模型来预测系统的输出和调整控制参数。例如,当系统的负载发生变化时,神经网络控制可以自动调整控制参数,以保持系统的稳定性和精度。

这些先进的控制策略具有自适应能力强、鲁棒性好等优点,能够更好地应对进给系统中的非线性、时

变性和不确定性等因素。通过优化控制策略，可以显著提高进给系统的动态响应速度和稳定性，从而提升机床的加工性能。

### 1.3 参数优化

参数优化是提升数控机床进给系统性能的又一重要手段。进给系统的性能受到多种参数的影响，如速度环增益、位置环增益、加速度、减速度等。这些参数的设置直接影响着系统的动态响应、稳定性和精度。因此，通过调整这些关键参数，可以显著改善系统的性能。

在参数优化过程中，需要综合考虑机床的具体要求、工件加工的精度需求以及系统的动态特性等因素。例如，对于需要高精度加工的机床，应适当增大位置环增益，以提高系统的定位精度；对于需要快速响应的机床，应适当增大速度环增益和加速度，以提高系统的响应速度。同时，还需要考虑系统的稳定性，避免参数设置过大导致系统出现超调或振荡。

具体来说，速度环增益的调整可以影响系统的响应速度和稳定性。增大速度环增益可以提高系统的响应速度，但过大的增益会导致系统出现超调和振荡；减小速度环增益可以降低系统的超调量和振荡频率，但过小的增益会导致系统响应迟缓。因此，在调整速度环增益时，需要根据系统的实际情况进行权衡和选择。

位置环增益的调整则可以影响系统的定位精度和稳定性。增大位置环增益可以提高系统的定位精度，但过大的增益会导致系统对干扰信号敏感，降低系统的稳定性；减小位置环增益可以降低系统对干扰信号的敏感性，但过小的增益会导致系统定位精度下降。因此，在调整位置环增益时，也需要根据系统的实际情况进行权衡和选择。

通过合理的参数优化，可以使进给系统在不同的工作条件下都能保持良好的性能。同时，参数优化还可以为机床的调试和维护提供便利，降低机床的故障率和维修成本。。

## 2 数控机床系统分析

### 2.1 进给系统性能评价指标

数控机床进给系统的性能评价是一个多维度、综合性的过程，其中精度、响应速度和稳定性是最为关键的三个方面。这些指标不仅直接反映了进给系统的技术水平，更对加工产品的质量和生产效率产生深远

影响。

精度作为衡量进给系统性能的首要指标，其重要性不言而喻。在数控机床的加工过程中，进给系统的精度直接决定了刀具或工件的运动准确性，进而影响到加工产品的尺寸精度和表面质量。高精度的进给系统能够确保刀具按照预设的轨迹精确运动，减少加工误差，提高产品的合格率和一致性。为了评估进给系统的精度，通常会采用实验测试的方法，通过测量机床各轴的实际位置与指令位置之间的偏差来量化精度水平。这种偏差越小，说明进给系统的精度越高。在实际应用中，精度指标还包括重复定位精度、定位精度等，这些指标共同构成了进给系统精度的综合评价体系。

响应速度则是反映进给系统对指令信号快速响应能力的重要指标。在数控机床的加工过程中，进给系统需要迅速、准确地响应控制系统的指令，以确保刀具或工件能够按照预定的速度和轨迹运动。响应速度的快慢直接影响到加工效率的高低。为了评估进给系统的响应速度，可以通过测量系统对指令信号的响应时间和稳态误差来实现。响应时间越短，稳态误差越小，说明进给系统的响应速度越快，加工效率也就越高。在实际应用中，为了提高进给系统的响应速度，可以采用先进的控制算法和硬件组件，如高速伺服电机、高性能驱动器等，以优化系统的动态性能。

稳定性是确保进给系统能够持续稳定运行的重要保障。在数控机床的长期运行过程中，进给系统可能会受到各种干扰和不确定性因素的影响，如负载变化、温度变化、机械磨损等。这些因素都可能导致系统性能下降或出现故障，从而影响加工质量和生产效率。因此，对进给系统进行稳定性分析显得尤为重要。稳定性分析主要包括系统的鲁棒性分析和抗干扰能力分析。鲁棒性是指系统在受到外部干扰时保持其性能不变的能力，而抗干扰能力则是指系统能够抵抗各种干扰信号对其正常运行的影响。通过稳定性分析，可以评估进给系统在各种工作条件下的稳定性表现，并采取相应的措施来提高系统的稳定性。例如，可以采用先进的控制策略来增强系统的鲁棒性，通过优化传动机构的设计来减少机械磨损对系统稳定性的影响等。

### 2.2 进给系统动态响应分析

动态响应是数控机床进给系统性能的重要组成部分，它直接关系到加工过程中的效率与精度。在加工

过程中,进给系统需要能够快速、准确地跟踪加工轨迹,以减少延迟和过冲,从而提高加工效率和精度。动态响应主要涉及伺服电机的加减速性能、机械结构的响应速度以及控制系统的调节能力。

伺服电机的加减速性能是影响进给系统动态响应的关键因素之一。在加工过程中,伺服电机需要频繁地启动、加速、减速和停止,以适应不同的加工需求。因此,伺服电机的加减速性能直接影响到进给系统的响应速度和稳定性。为了提高伺服电机的加减速性能,可以采用先进的电机控制技术和驱动算法,如矢量控制、直接转矩控制等,以优化电机的动态特性。

机械结构的响应速度也是影响进给系统动态响应的重要因素。机械结构包括传动机构、移动部件等,它们的响应速度直接影响到刀具或工件的运动速度。为了提高机械结构的响应速度,可以采用轻量化设计、优化传动机构等方法,以减小机械惯性,提高系统的动态性能。

控制系统的调节能力则是确保进给系统动态响应稳定、准确的关键。控制系统需要根据加工轨迹和指令信号,实时调整伺服电机的运动状态,以确保刀具或工件能够按照预定的轨迹运动。为了提高控制系统的调节能力,可以采用先进的控制算法和策略,如预测控制、自适应控制等,以优化系统的动态响应特性。

为了提升进给系统的动态响应,还可以采用先进的硬件组件,如高速伺服电机、高性能驱动器等。这些硬件组件具有更高的响应速度和更精确的控制能力,能够显著提高进给系统的动态性能。

### 2.3 进给系统稳定性分析

稳定性是数控机床进给系统性能的重要保障,它直接关系到加工过程的可靠性和产品质量。在实际应用中,进给系统可能会受到各种干扰和不确定性因素的影响,如负载变化、温度变化、机械磨损等。这些因素都可能导致系统性能下降或出现故障,从而影响加工质量和生产效率。因此,对进给系统进行稳定性分析显得尤为重要。

稳定性分析主要包括系统的鲁棒性分析和抗干扰能力分析。鲁棒性是指系统在受到外部干扰时保持其性能不变的能力。在数控机床的加工过程中,负载变化、温度变化等因素都可能对进给系统的性能产生影响。为了提高系统的鲁棒性,可以采用先进的控制策略,

如鲁棒控制、自适应控制等。这些控制策略能够根据系统的实际运行情况,自动调整控制参数,以确保系统在受到干扰时仍能保持稳定的性能。

抗干扰能力则是指系统能够抵抗各种干扰信号对其正常运行的影响。在数控机床的加工过程中,电磁干扰、机械振动等都可能对进给系统的正常运行产生干扰。为了提高系统的抗干扰能力,可以采用屏蔽技术、滤波技术等手段,以减小干扰信号对系统的影响。同时,还可以优化系统的机械结构,提高系统的刚性和阻尼比,以减小机械振动对系统稳定性的影响。

### 3 结论

数控机床进给系统的优化设计与性能分析是提升机床整体性能、提高加工产品质量和生产效率的关键环节。通过结构优化、控制策略优化和参数优化等手段,可以显著改善进给系统的精度、响应速度和稳定性等性能指标。同时,通过进给系统性能评价、动态响应分析和稳定性分析等方法,可以深入了解系统的运行特性和存在的问题,为系统的进一步优化设计提供理论依据。未来,随着制造业的不断发展和技术的不断进步,数控机床进给系统的优化设计与性能分析将面临更多的挑战和机遇。因此,需要不断探索新的优化方法和分析技术,以满足现代制造业对高精度、高效率和高稳定性数控机床的需求。

### 参考文献:

- [1] 陈晔,熊晓航,赵春雨,等.应用有限单元法的机床进给系统轴扭特性分析[J].机械设计与制造,2021(08):13-16.
- [2] 赵修平,石艳,胥云,等.大型立加机床进给系统刚柔耦合分析[J].机床与液压,2020,48(09).
- [3] 陈勇将,汤文成,华洪良,等.含虚拟材料结合部的高速滚珠丝杠进给系统动态特性分析[J].机床与液压,2021,49(08):156-160.
- [4] 朱坚民,张统超,李孝茹.基于结合部刚度特性的滚珠丝杠进给系统动态特性分析[J].机械工程学报,2015,51(17):72-82.

### 作者简介:

孙浩源(2004-),男,汉族,河北省唐山市曹妃甸区八农场十字沽204号。

第二作者:张景(1975-),女,汉族,河北生保定市安国市,本科,副教授,机械设计。