

五轴数控机床的精度控制与故障排除

吴攀

(四川成飞集成科技股份有限公司 四川 成都 610091)

摘要: 随着制造业的进步和现代化的发展,五轴数控机床在机械加工领域的重要性日益显现。由于其能在五个自由度上进行操作,五轴数控机床在复杂零件的加工中有着突出优势。然而,由于其操作的复杂性和高精度要求,对五轴数控机床的精度控制和故障排除提出了新的挑战。本文将详细介绍五轴数控机床精度控制的基本原理、关键技术,以及五轴数控机床常见故障的排除方法,并探讨智能化控制技术、大数据和机器学习在精度控制和故障排除中的应用和发展趋势,旨在为实现高精度、高效率的机械加工提供新的理论和实践基础。

关键词: 五轴数控机床;精度控制;故障排除;智能化控制技术

0 引言

五轴数控机床是一种高精度、高效率的自动化机床,可在五个自由度上进行操作,包括三个直线轴和两个旋转轴。这种设计可以使工件在一次装夹后,完成五个面的加工,大大提高了加工效率和精度。具有五个自由度的加工方式,提供了复杂几何形状零件加工的可能性,比如曲面和斜面。五轴数控机床在航空航天、汽车、模具和生物医疗等众多高精尖领域中有着广泛应用^[1]。

随着数控技术的不断进步,五轴数控机床的性能得到大幅度提升,应用领域也日益广泛。在航空航天领域,五轴数控机床的使用已经非常普遍,成为制造复杂航空零件的主力设备,复杂的发动机零件、大型飞机结构件、精密导航器件等都离不开五轴数控机床的加工。

1 五轴数控机床的精度控制

1.1 精度控制的基本原理

五轴数控机床的精度控制基本原理主要涉及控制系统、驱动系统、测量系统及误差补偿技术等多个方面。控制系统是五轴数控机床的大脑,主要负责处理数控编程,解释和执行各种指令,对机床进行运动控制^[2]。驱动系统负责将控制系统的指令转换为机床各轴的实际运动。驱动系统的性能直接影响到五轴数控机床的运动精度,因此对驱动系统的精确控制是精度控制的重要环节。测量系统主要负责对机床各轴的位置、速度、

加速度等参数进行测量和反馈。误差补偿技术是五轴数控机床精度控制的另一关键环节,据研究合理的误差补偿策略可以提高五轴数控机床的加工精度10%~20%。机床在加工过程中会受到各种因素的影响,例如,齿轮齿条和减速机在使用过程中会产生磨损,从而产生间隙,导致传动系统刚性下降。误差补偿技术就是通过测量和计算这些误差,然后在控制系统中进行相应的补偿,以实现高精度加工。齿轮齿条传动示意图见图1。

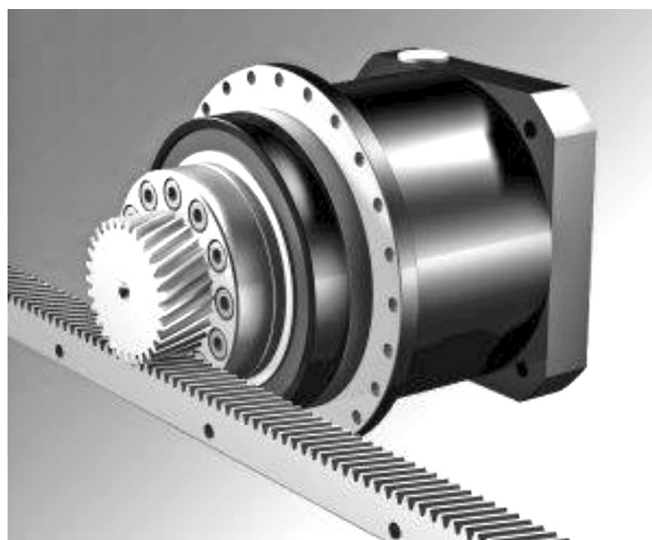


图1 齿轮齿条传动示意图

1.2 五轴数控机床的误差分析

1.2.1 位置误差

位置误差指的是机床在进行线性或旋转运动时,实际位置与预设位置之间的偏差。根据调研数据显

示，位置误差主要来源于以下几个方面：刀具磨损、伺服系统误差、机械传动误差、热变形误差等。位置误差来源及影响因素分析见表1。

表1 位置误差来源及影响因素分析

错误来源	误差范围 /mm	主要影响因素	误差减小方式
刀具磨损	0.05 ~ 0.2	刀具材料, 刀具寿命, 刀具切削参数	使用高质量刀具, 合理设定切削参数
伺服系统误差	0.01 ~ 0.05	伺服电动机性能, 伺服控制器性能	使用高性能伺服系统
机械传动误差	0.02 ~ 0.1	机械结构设计, 制造工艺	优化机械结构设计, 改进制造工艺
热变形误差	0.05 ~ 0.2	机床使用环境, 冷却系统性能	控制使用环境, 提升冷却系统性能

从表1可以看出，位置误差的范围通常在0.01 ~ 0.2mm，其中热变形误差和刀具磨损是误差较大的两个方面。

1.2.2 姿态误差

姿态误差主要指的是刀具或工件在旋转过程中，实际姿态与预设姿态之间的偏差。研究数据显示，姿态误差主要来源于以下几个方面：机床装配误差、刀具和夹具装配误差、伺服系统误差等。姿态误差来源及影响因素见表2。

表2 姿态误差来源及影响因素

错误来源	误差范围 / (°)	主要影响因素	误差减小方式
机床装配误差	0.02 ~ 0.1	机床制造工艺, 装配工艺	完善机床制造和装配工艺
刀具和夹具装配误差	0.01 ~ 0.05	刀具和夹具的设计和制造精度	提高刀具和夹具的设计和制造精度
伺服系统误差	0.01 ~ 0.05	伺服电动机性能, 伺服控制器性能	使用高性能伺服系统

通过分析表2的数据，可以明显看到，姿态误差的范围一般在0.01° ~ 0.1°，其中机床装配误差是误差较大的一个方面。

1.3 精度控制的关键技术

1.3.1 误差补偿技术

误差补偿技术是一种能有效减少五轴数控机床加工误差的关键技术。在五轴数控机床的加工过程中，无论是因为机械结构还是控制系统的不完善，都会

引发各类误差^[3]。通过预先测定并建立误差模型，再利用控制系统进行适当的补偿，可以有效地提高加工精度。误差补偿技术的主要方式包括预先估计和补偿机床的系统误差，如导轨磨损、回转轴误差、刀具磨损等。常见的误差补偿方法及相应的补偿效果和适用情况见表3。

表3 误差补偿方法及其效果

补偿方法	补偿误差类型	平均补偿效果 /%	适用情况	优点
导轨磨损补偿	位置误差	60 ~ 80	导轨长时间使用后	可降低长期使用磨损导致的位置误差
回转轴误差补偿	姿态误差	50 ~ 70	回转轴存在制造误差	可减少姿态误差, 提高加工精度
刀具磨损补偿	切削误差	40 ~ 60	刀具长时间使用后	可减少切削误差, 提高切削效率

1.3.2 伺服系统控制技术

五轴数控机床的伺服系统主要包括伺服电动机、驱动器和反馈装置等，它是连接数控系统和机床的重要桥梁，负责将数控系统的指令转化为机床的实际运动。数控机床伺服系统一般包含三个闭环控制系统，从内到外依次是电流环、速度环和位置环。数控机床伺服系统见图2。

1.3.3 不同类型的伺服系统及其性能特点和应用效果

伺服系统类型及其性能特点和应用效果见表4。

2 五轴数控机床的故障排除

2.1 常见故障类型及其识别方法

五轴数控机床在使用过程中可能出现各种故障，其中包括电气故障、机械故障、系统故障和操作故障^[4]。这些故障的识别方法各不相同，需要结合故障现象、故障代码及机床状态进行分析和判断。四种类型的常见故障及其识别方法的汇总和比较见表5。

由这些数据可知，在使用和维护五轴数控机床时，需要特别关注电气系统和控制系统的状态，同时也不能忽视机械结构和操作方式的影响。

2.2 五轴数控机床故障排除的基本步骤

故障识别是故障排除的第一步，通过收集机床的报警信息、故障代码和故障现象，结合相关资料和经验，可以确定故障的类型和可能原因。然后进行故障分析，根据故障的类型和可能原因，通过对

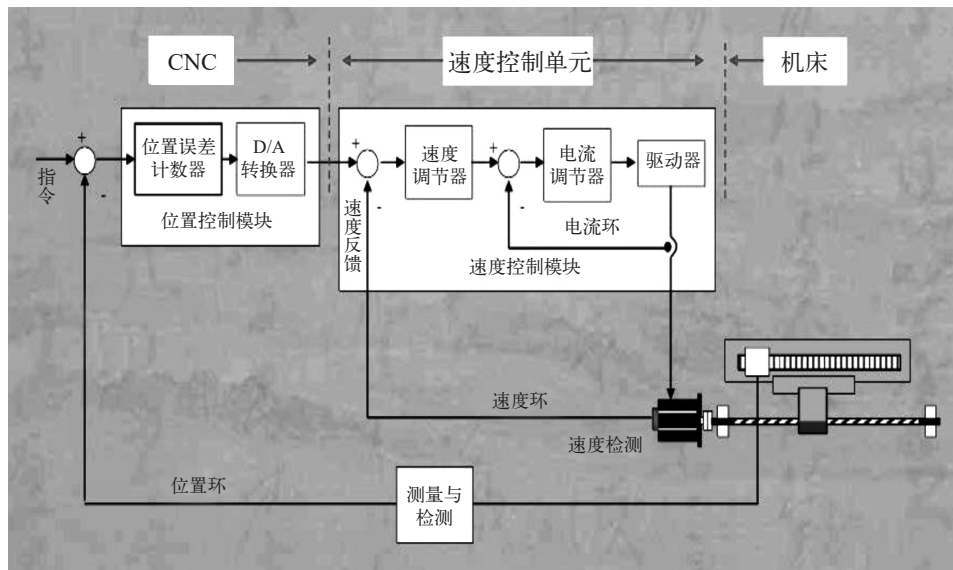


图2 数控机床伺服系统

表4 伺服系统类型及其性能特点和应用效果

伺服系统类型	响应速度	精度	驱动力矩	适用情况	优点
交流伺服系统	快	高	中等	对精度和响应速度要求较高的情况	响应快，精度高
直流伺服系统	中等	中等	较大	对驱动力矩要求较高的情况	驱动力矩大，稳定性好
步进伺服系统	慢	较高	较小	对速度要求不高，但对精度要求较高的情况	精度较高，成本较低
线性伺服系统	中等	高	中等	精度和驱动力矩都要求较高的情况	精度高，驱动力矩适中
直线伺服系统	快	高	小	对精度和响应速度要求高，驱动力矩要求不高的情况	响应快，精度高，驱动力矩小

表5 常见故障类型及其识别方法

故障类型	故障现象	故障识别方法	出现频率/%
电气故障	机床无法启动，伺服电动机失效	检查电源线，测量电源电压，诊断伺服电动机	35
机械故障	机床运动异常，精度下降	检查机械结构，测量运动误差	25
系统故障	控制系统无法正常运行，出现错误代码	读取错误代码，分析系统日志	30
操作故障	操作不当导致机床无法正常工作	检查操作步骤，复核操作指南	10

机床的进一步检查和测试，可以确定故障的具体原因。例如，对于电气故障，可能需要使用万用表或示波器进行电路测试；对于机械故障，可能需要进行振动分析或声学分析。故障排除是故障处理的第三步，根据故障分析的结果，可以选择相应的处理方法，如更换损坏的部件、修复故障的电路、修改错误的程序等。在处理故障时，必须遵守相应的操作规程，

以避免造成进一步的损坏。最后，完成故障预防工作，通过总结故障的原因和处理过程，可以提出相应的预防措施，如改进操作方法、加强设备维护、优化系统设置等。此外，还可以通过对故障的统计分析，发现故障的规律和趋势，为进一步的故障预防提供依据^[5]。

2.3 典型故障的排除方法

2.3.1 电气系统故障

电气系统故障主要包括电源故障、驱动器故障、编码器故障等，针对这些故障，可以采取以下的排除方法：电源故障可能导致整个五轴数控机床无法正常工作，这类故障的排除首先要检查电源线路是否正常，电源电压是否稳定。比如在一次实际维修中，发现机床无法启动，通过检查发现电源线路断裂，导致机床无法获取电源。在这次维修中，机床的电源电压应为380V，但检查时发现电源电压只有120V，因此确定了是电源故障。更换新的电源线路，调整电源电压至380V后，机床恢复正常运行。

驱动器故障则可能导致机床的某个或几个轴无法正常运动。这类故障的排除主要依赖驱动器的报警信息。例如，在一次机床故障中，发现Y轴无法运动。通过查看驱动器的报警信息，发现是驱动器过热导

致的。这次驱动器过热的报警代码为E07，通常这意味着驱动器内部温度超过75℃。停机冷却后，清理了驱动器的散热器上的灰尘，故障得到了排除。编码器故障主要影响位置和速度的反馈，导致机床运动精度下降或运动异常。编码器故障的排除需要检查编码器的连接线路、供电电压及编码器本身的工作状态。如在一次维修中，发现机床的位置偏

差过大,查看系统报警信息发现编码器报警,检查编码器供电电压发现电压过低,仅为3.0V,而正常情况下编码器的供电电压应为5.0V。调整电源参数后,将编码器的供电电压调整至5.0V,故障得到排除。

2.3.2 机械系统故障

机械系统故障主要包括轴承故障、导轨故障、丝杆故障等。针对这些故障,可以采取以下的排除方法:首先,对于轴承故障,主要表现为噪声过大、振动过大或者转动不灵活。需要检查轴承的润滑情况、安装状态及轴承本身的损坏情况。如果润滑不良,应加注适量的润滑油或润滑脂;如果安装不正,应调整轴承的安装位置;如果轴承本身损坏,应更换新的轴承。其次,对于导轨故障,主要表现为运动不平稳、定位精度降低或者运动阻力增大。需要检查导轨的清洁度、润滑情况及磨损状态。如果导轨污染严重,应进行清洁处理;如果润滑不良,应加注适量的润滑油;如果导轨磨损过度,可能需要更换新的导轨。例如,在一次机床的日常检查中,发现Z轴的运动精度低于要求的0.01mm,经过检查发现,导轨已经出现磨损,表面粗糙度达到 $R_a0.8$,超过了正常范围的 $R_a0.2$ 。通过更换新的导轨,精度恢复到0.01mm以内,故障得到排除。最后,对于丝杆故障,主要表现为丝杆与丝母之间的间隙增大、定位精度降低或者噪声增大。需要检查丝杆与丝母的磨损情况、润滑情况及丝杆的弯曲情况。如果磨损严重,需要更换新的丝杆和丝母;如果润滑不良,应加注适量的润滑油;如果丝杆弯曲,需要进行校直或更换^[6]。

2.4 预防性维护与故障预测技术

预防性维护和故障预测技术的应用,有助于提高五轴数控机床的稳定性和生产效率。预防性维护是在设备发生故障之前进行的一系列维护活动,包括定期检查、润滑、清洁和必要的零部件更换等,从而避免或延迟故障的发生。据统计,采用预防性维护的五轴数控机床其故障率可以下降20%左右。故障预测技术则是通过收集和分析设备运行数据,预

测设备可能发生的故障。这需要应用数据分析和机器学习等先进技术。以一台五轴数控机床为例,通过收集和分析其运行一年的数据,发现当主轴温度超过70℃,主轴转速超过6000r/min,且连续运行时间超过8h时,机床发生故障的概率会显著增加。

3 结语

总之,五轴数控机床在现代制造业中具有不可替代的地位,精度控制与故障排除是其关键技术。准确理解五轴数控机床的工作原理,深入探索其精度控制方法和故障排除技术,是提高设备效率,保证生产稳定的基础。而五轴数控机床的精度控制与故障排除是一个系统且繁杂的工程,需要技术人员不断研究、探索和实践,不断提高自己的技术水平和管理能力,以满足现代制造业对高效、高精度、高稳定性设备的需求。

参考文献:

- [1] 郝惠东. 基于五轴数控机床加工精度的分析与研究[J]. 内燃机与配件, 2018(20):99-100.
- [2] 陈晓健. 五轴数控机床定位精度及重复定位精度检测对光装置的设计及其运用研究[J]. 市场监管与质量技术研究, 2022(05):32-35+49.
- [3] 申晓龙, 张来希, 皮智谋. 数控机床控制故障排除方法及应用[J]. CAD/CAM与制造业信息化, 2007(01):92-93.
- [4] 洪迈生, 江建鹏. 数控机床和数控装备的精度诊断[J]. 设备管理 & 维修, 2000(09):27-28+34.
- [5] 潘铭. 五轴数控机床精度检测以及标定技术应用分析[J]. 科技创新与应用, 2016(27):157.
- [6] 李杰, 谢福贵, 刘辛军, 等. 五轴数控机床空间定位精度改善方法研究现状[J]. 机械工程学报, 2017, 53(07):113-128.

作者简介: 吴攀(1971.12-), 男, 汉族, 四川眉山人, 硕士研究生, 电气工程师, 研究方向: 数控机床的维护维修及管理。