

精密机电系统中的误差分析与补偿策略研究

刘积望

江西昌西建设工程有限公司 江西 南昌 330000

摘要：本文聚焦精密机电系统，系统分析其误差来源、建模方法及补偿策略。误差涵盖机械结构、驱动装置、传感器与控制器等方面，影响系统精度、稳定性等性能。基于多系统理论和神经网络的误差建模方法，为误差补偿提供理论依据。硬件、软件及综合补偿策略协同，可有效提升系统精度与可靠性，对推动半导体制造、航空航天等高端领域发展具有重要意义。

关键词：精密机电系统；误差分析；补偿策略

1 精密机电系统概述

精密机电系统是融合机械、电子、控制等多学科技术的复杂系统，通过机械结构与电子装置的协同，实现机械运动的高精度控制与监测，广泛应用于半导体制造、航空航天等高端领域。其性能指标主要包括精度、稳定性、响应速度和可靠性：精度体现实际输出与理想输出的接近程度，直接影响产品质量；稳定性关乎系统在干扰下的性能维持能力；响应速度决定系统对信号的反应快慢；可靠性则确保系统在规定条件和时间内正常运行^[1]。然而误差的存在会显著影响系统性能，它会降低精度，导致定位和轨迹偏差；破坏稳定性，引发系统振荡；延长响应时间，降低效率；增加部件磨损，缩短使用寿命。因此深入研究精密机电系统的误差来源、建模与补偿策略，对提升系统性能至关重要。

2 精密机电系统误差来源分析

2.1 机械结构误差

机械结构是精密机电系统的基础组成部分，其误差来源多样，对系统性能有着重要影响。制造误差是机械结构误差的主要来源之一。在机械零件的加工过程中，由于机床精度、刀具磨损、加工工艺等因素的限制，零件的实际尺寸、形状和位置与设计存在偏差。装配误差同样不可忽视。在机械结构的装配过程中，零件之间的配合间隙、安装位置偏差等，会导致系统的运动副精度下降，产生运动干涉或松动。如滚珠丝杠副的安装同轴度误差，会使丝杠在运动过程中产生轴向窜动，影响直线运动精度；齿轮传动副的安装中心距误差，会导致齿轮啮合不良，产生振动和噪声。机械结构在工作过程中还会受到载荷、温度等因素的影响而产生变形误差。当机械结构承受较大的外力或力矩时，会发生弹性变形甚至塑性变形；温度变化会引起材料的热胀冷缩，导致零件尺寸发生变化，进而影响系统的精度。

2.2 驱动装置误差

驱动装置是为精密机电系统提供动力和运动的关键部件，其误差会直接影响系统的运动性能。电机作为常用的驱动元件，存在多种误差因素。电机的电气参数误差，如绕组电阻、电感的不一致性，会导致电机的输出转矩波动，影响系统的平稳运行。电机的机械参数误差，如转子的动平衡误差、轴的径向跳动误差，会使电机在高速运转时产生振动和噪声，降低电机的使用寿命和驱动精度。电机的控制误差，如PWM（脉冲宽度调制）信号的精度不足、电流和速度控制算法的偏差，也会导致电机的实际输出与期望输出存在差异。传动机构在传递动力和运动的过程中也会产生误差。皮带传动存在打滑现象，会导致传动比不准确；链传动存在链条的磨损和节距误差，会引起运动的不均匀性；齿轮传动除了安装误差外，还存在齿轮的齿形误差、齿距误差等，这些误差都会使传动过程中产生速度波动和运动误差。

2.3 传感器误差

传感器是精密机电系统的“感知器官”，用于检测系统的位置、速度、力等物理量，其误差会影响系统的反馈控制精度。传感器的测量误差主要包括系统误差和随机误差。系统误差是由传感器的原理、制造工艺、安装方式等因素引起的，具有一定的规律性和重复性。随机误差则是由环境噪声、电气干扰、传感器内部电子元件的热噪声等随机因素引起的，其大小和方向不确定。在精密测量中，随机误差会使传感器的测量数据产生波动，降低测量的准确性和可靠性。传感器的零点漂移和灵敏度漂移也是常见的误差问题^[2]。零点漂移是指传感器在无输入信号时，输出信号随时间、温度等因素发生缓慢变化的现象；灵敏度漂移是指传感器的灵敏度随环境条件或使用时间发生变化。这些漂移会使传感器的测量精度下降，需要定期进行校准和补偿。

2.4 控制器误差

控制器是精密机电系统的“大脑”，负责根据传感器的反馈信号和控制指令，生成合适的控制信号来驱动执行机构。控制器误差主要来源于控制算法、硬件电路和软件编程等方面。控制算法误差是控制器误差的重要组成部分，在实际应用中，为了简化计算和满足实时性要求，常常对复杂的控制模型进行近似处理，这会导致控制算法存在一定的误差。硬件电路误差主要包括模拟电路的噪声、漂移，数字电路的量化误差等。模拟电路中的运算放大器的失调电压、温漂等问题，会使信号处理结果产生误差；数字电路中A/D（模拟/数字）转换器的分辨率有限，会导致采样数据存在量化误差，影响控制器对系统状态的准确判断。软件编程误差则是由于程序设计中的逻辑错误、边界条件考虑不周全等原因引起的。

3 精密机电系统误差建模

3.1 误差建模方法

误差建模是对精密机电系统误差进行定量分析和预测的重要手段，通过建立误差模型，可以深入了解误差的产生机理和传播规律，为误差补偿提供理论依据。常见的误差建模方法主要有基于物理原理的建模方法、基于数据驱动的建模方法和混合建模方法。基于物理原理的建模方法是根据精密机电系统的机械结构、运动学和动力学原理，结合各部件的误差特性，建立误差与系统输入输出之间的数学关系。该方法具有明确的物理意义，能够直观地反映误差的产生原因和影响因素，但对系统的结构和参数要求较高，模型建立过程较为复杂。基于数据驱动的建模方法是利用系统的输入输出数据，通过机器学习、神经网络等算法，建立误差的预测模型。该方法不需要深入了解系统的内部结构和物理原理，能够从大量的数据中自动学习误差的规律，但模型的解释性较差，且需要大量的实验数据进行训练。如基于神经网络的误差建模就是典型的数据驱动建模方法。混合建模方法则是将基于物理原理的建模方法和基于数据驱动的建模方法相结合，充分发挥两者的优势。先利用物理原理建立系统的基本模型框架，再通过数据驱动方法对模型中的未知参数进行优化和修正，从而提高模型的准确性和适应性。

3.2 基于多体系统理论的误差建模

多体系统理论是一种用于分析复杂机械系统运动和力学特性的有效方法，在精密机电系统误差建模中得到了广泛应用。基于多体系统理论的误差建模，将精密机电系统看作是由多个刚体或弹性体通过运动副连接而成的多体系统。通过建立系统的拓扑结构，描述各体之间

的相对位置和运动关系，并引入误差参数来表征各体的制造误差、装配误差以及运动副的间隙等。在建模过程中，利用齐次坐标变换和运动学方程，将各体的误差传递到系统的输出端，建立系统误差与各误差源之间的数学模型。该模型能够全面考虑系统中各种误差因素的影响，准确地描述误差在系统中的传播路径和累积效应。

3.3 基于神经网络的误差建模

神经网络具有强大的非线性映射能力和自学习能力，能够有效地处理复杂系统的输入输出关系，因此在精密机电系统误差建模中具有独特的优势。基于神经网络的误差建模，将系统的输入参数（如电机的控制信号、传感器的测量值等）作为神经网络的输入层节点，将系统的误差输出作为输出层节点，通过大量的实验数据对神经网络进行训练，调整网络的权值和阈值，使神经网络能够准确地学习到输入与误差输出之间的非线性关系^[3]。在实际应用中，常用的神经网络模型包括多层感知器（MLP）、径向基函数网络（RBF）和递归神经网络（RNN）等。多层感知器通过多个隐藏层的神经元对输入数据进行逐层处理，能够逼近任意复杂的非线性函数；径向基函数网络以径向基函数作为激活函数，具有收敛速度快、泛化能力强的特点；递归神经网络则可以处理具有时间序列特性的数据，适用于动态系统的误差建模。

4 精密机电系统误差补偿策略

4.1 误差补偿原理

误差补偿的基本原理是通过一定的方法对精密机电系统中存在的误差进行修正和补偿，使系统的实际输出尽可能接近理想输出，从而提高系统的精度和性能。误差补偿的核心在于准确地获取系统的误差信息，并根据误差信息采取相应的补偿措施。通常，先通过误差建模或误差测量的方法获取系统的误差模型或误差数据，然后将误差信息反馈给控制系统或执行机构，通过调整系统的参数、控制策略或机械结构等方式，对误差进行补偿。误差补偿可以分为事前补偿和事后补偿。事前补偿是在系统设计和制造阶段，通过优化设计、提高制造精度、合理选择材料等措施，从源头上减少误差的产生；事后补偿则是在系统运行过程中，利用传感器实时监测系统的误差，并通过硬件或软件的方式对误差进行实时补偿。

4.2 硬件补偿方法

硬件补偿方法是通过改进机械结构、优化驱动装置或采用高精度的传感器和控制器等硬件手段来实现误差补偿。在机械结构方面，可以通过提高零件的制造精

度、改进装配工艺、采用误差补偿机构等方式来减少误差。例如,采用高精度的加工设备和先进的加工工艺,降低零件的制造误差;在装配过程中,采用精密的装配夹具和测量仪器,保证零件的安装精度;设计误差补偿机构,如数控机床中的滚珠丝杠预紧装置、导轨的间隙调整机构等,实时补偿机械结构的误差。对于驱动装置,可以选用高精度、高性能的电机和传动机构,减少驱动误差。另外,更换高精度的传感器和控制器也是硬件补偿的重要措施。高精度的传感器能够更准确地测量系统的状态信息,为误差补偿提供可靠的数据支持;高性能的控制器可以实现更精确的控制算法,提高系统的控制精度和响应速度。例如,采用激光干涉仪替代普通的位移传感器,可将位移测量精度提高到纳米级别;使用高性能的数字信号处理器(DSP)或现场可编程门阵列(FPGA)作为控制器,能够实现复杂的控制算法,提高系统的实时控制能力。

4.3 软件补偿方法

软件补偿方法是通过编写控制程序、优化控制算法等软件手段,对精密机电系统的误差进行补偿。在控制程序中,可以根据误差模型或误差测量数据,设计相应的误差补偿算法。例如,在数控机床的数控系统中,通过编写误差补偿子程序,根据机床各轴的误差测量数据,对刀具的运动轨迹进行修正,实现定位误差和轮廓误差的补偿;在机器人控制系统中,利用机器人的运动学误差模型,通过软件算法对机器人的关节角度进行补偿,提高机器人的末端执行器的定位精度。优化控制算法也是软件补偿的重要途径。采用先进的控制算法,如自适应控制、鲁棒控制、智能控制等,可以提高系统对误差的自适应能力和抗干扰能力。例如,自适应控制算法能够根据系统的运行状态和误差变化,自动调整控制器的参数,实现对误差的实时补偿;智能控制算法,如模糊控制、神经网络控制等,能够处理复杂的非线性系统误差,通过学习和训练,实现对误差的有效补偿。还可以利用软件实现传感器数据的滤波和校正,减少传感器误差对系统性能的影响。通过数字滤波算法,如均值滤波、中值滤波、卡尔曼滤波等,对传感器的测量数据进行处理,去除噪声和干扰;利用软件算法对传感器的零点漂移和灵敏度漂移进行校正,提高传感器的测量精度。

4.4 综合补偿策略

由于精密机电系统的误差来源复杂多样,单一的硬件补偿方法或软件补偿方法往往难以达到理想的补偿效果。因此,通常采用综合补偿策略,将硬件补偿方法和软件补偿方法相结合,充分发挥两者的优势,实现对系统误差的全面、高效补偿。在实际应用中,首先通过优化设计和高精度制造,从硬件层面减少系统的固有误差;然后利用高精度的传感器实时监测系统的误差,并将误差信息反馈给控制系统;控制系统采用先进的软件算法对误差进行分析和处理,根据误差情况调整硬件参数或发送补偿指令,实现硬件和软件的协同补偿^[4]。例如,在高精度加工中心中,一方面通过采用高精度的滚珠丝杠、直线导轨和伺服电机等硬件设备,提高机床的机械精度和驱动精度;另一方面,利用激光干涉仪等高精度测量设备实时测量机床的误差,并将误差数据输入到数控系统中。数控系统通过软件算法对误差进行分析和处理,生成补偿指令,控制机床的运动部件进行误差补偿。同时数控系统还可以根据加工过程中的实时误差变化,自适应地调整控制参数和加工工艺,实现对误差的动态补偿。通过硬件和软件的综合补偿策略,可以显著提高加工中心的加工精度和加工质量,满足高端制造领域对精密加工的要求。

结束语

综上所述,精密机电系统误差分析与补偿是提升系统性能的关键。通过深入研究误差来源,运用先进建模方法与补偿策略,可实现系统高精度运行。未来,随着多学科融合发展,需进一步探索更精准的误差建模技术与高效补偿策略,以满足精密机电系统在高端制造等领域日益增长的高精度需求。

参考文献

- [1]尤伟华,范桂山.浅谈机电一体化对精密铸造浇筑过程控制的作用[J].世界有色金属,2021,(07):196-197.
- [2]徐浩.机械制造工艺与精密加工技术分析[J].集成电路应用,2020,37(07):102-103.
- [3]刘检华,夏焕雄,巩浩,等.精密装配的内涵、技术体系和发展趋势[J].机械工程学报,2023,59(20):436-450.
- [4]黄骏鹏.精密机床检测系统应用与排故探析[J].机电技术,2023(5):85-87.