

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.07.005

## 巨量转移设备热误差补偿技术研究进展

刘正勇<sup>1,2</sup>, 陈友东<sup>1</sup>, 张鹏举<sup>2</sup>, 王广炎<sup>2</sup>, 薛芮<sup>3</sup>, 韩江<sup>3</sup>

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191; 2. 合肥欣奕华智能机器股份有限公司, 安徽 合肥 230013; 3. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 巨量转移设备在高速、高频运行工况下将产生大量的热, 导致零部件热变形, 严重影响巨量转移工艺的精度。对巨量转移设备的热误差进行合理建模, 并实现热误差补偿对保障转移精度非常关键。文章介绍设备高速进给机构的热误差补偿技术研究进展, 从高速机构热特性分析与建模、热误差建模技术、高速进给机构热误差建模与补偿等方面对国内外研究现状进行总结。首先介绍了直线运动机构热特性, 其次系统阐述了热误差建模过程中温度测量、热误差测量、温度测点优化选取、热误差建模方法, 最后对巨量转移设备热误差补偿研究进行总结与展望, 为相关的技术研究提供借鉴和参考。

**关键词:** 巨量转移设备; 高速进给机构; 直线电机; 热误差机理; 热误差补偿

**中图分类号:** TH165.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)07-0889-09

### Advances in the research on thermal error compensation technology for mass transfer equipment

LIU Zhengyong<sup>1,2</sup>, CHEN Youdong<sup>1</sup>, ZHANG Pengju<sup>2</sup>, WANG Guangyan<sup>2</sup>, XUE Rui<sup>3</sup>, HAN Jiang<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Hefei Sineva Intelligent Machine Co., Ltd., Hefei 230013, China; 3. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The operation of mass transfer equipment at high speeds and frequencies results in the generation of significant heat, which can lead to thermal deformation of components and, consequently, a notable decline in the precision of the mass transfer process. It is of great importance to develop a reasonable model of the thermal error of mass transfer equipment and to implement a thermal error compensation strategy in order to guarantee the transfer precision. This paper presents the research progress on thermal error compensation technology for high-speed feeding mechanisms. It provides an overview of the current research landscape, both domestically and internationally, with a focus on three key areas: thermal characteristic analysis and modelling of high-speed mechanisms, thermal error modelling technology, and thermal error modelling and compensation of high-speed feeding mechanisms. Firstly, the thermal characteristics of linear motion mechanisms are introduced. Secondly, the temperature measurement, thermal error measurement, optimal selection of temperature measurement points, and thermal error modelling method in the process of thermal error modelling are systematically elaborated. Finally, the research on thermal error compensation of mass transfer equipment is summarized and outlooked to provide reference for related technical research.

**Key words:** mass transfer equipment; high-speed feeding mechanism; linear motor; thermal error mechanism; thermal error compensation

收稿日期: 2024-11-04; 修回日期: 2025-01-24

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4702100); 安徽省科技重大专项资助项目(2021d0505001)

作者简介: 刘正勇(1982—), 男, 湖南株洲人, 北京航空航天大学博士生;

陈友东(1973—), 男, 安徽合肥人, 博士, 北京航空航天大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: chenyd@buaa.edu.cn;

韩江(1963—), 男, 河南洛阳人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师。

### 0 引 言

Mini LED 显示具有画面品质高、能量利用率高、寿命长、分辨率高等优点,是下一代重要显示技术<sup>[1]</sup>。Mini LED 显示面板生产的关键环节在于把晶圆上密集分布的 Mini LED 转移到大尺寸显示基板的巨量阵列散点处。Mini LED 尺寸小(最小 75 μm 宽)、数量多,如何在大尺寸显示基板的范围内,高速精准地转移 Mini LED 是巨量转移设备的核心技术,是 Mini LED 显示发展需要解决的首要问题<sup>[2-3]</sup>。

巨量转移设备定位精度由高速进给机构提供精度保障。巨量转移设备结构,如图 1 所示,巨量转移设备是由 4 个直线电机组成的龙门式多轴联动机构、龙门架两侧分别对称布置直线电机 1、3,沿着 y 轴做高精度往复运动实现高精度定位;设备左右两侧对称布置直线电机 2、4 实现 x 向的运动。由于驱动系统电气系统电阻生热、机械系统摩擦生热等,巨量转移设备会产生热变形引起定位误差,即热误差。

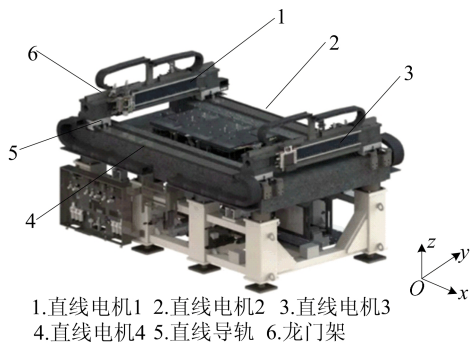


图 1 巨量转移设备结构

由于热误差的存在,巨量转移设备在实际生产中存在如下问题:① 大批量生产时显示面板合格率偏低;② 为保持热平衡状态时生产,需要较长的热机时间,设备空运行增加生产成本;③ 为进一步提高转移芯片精度,控制环境并调节温度的恒温车间建设必不可少,然而这显然会造成企业成本过高问题。因此,热误差已经成为阻碍巨量转移设备精度提升瓶颈,亟待解决,热误差产生的机理研究和补偿成为提升巨量转移设备定位精度的重要途径。

通过对近年来热误差补偿相关研究的梳理,本文从巨量转移设备热误差机理分析、热误差建模技术和热误差补偿技术等方面展开论述,为巨量转移设备热误差建模与补偿问题研究提供借鉴

和参考。

### 1 巨量转移设备热误差机理分析

#### 1.1 巨量转移设备热源分析

巨量转移设备的内、外部热源因素如图 2 所示。巨量转移设备热量来源分为内部因素和外部因素两大类,内部因素包括直线电机电气部分线圈发热、机械结构摩擦生热等,是热误差主要影响因素。外部因素包括光照、车间温度、操作人员体温等。具体地,在内部因素方面,直线电机在高频高速运动过程中,需要较高的电机线圈电流来获得高电机峰值推力,导致电机线圈发热量大。此外,高速运动导致运动部件之间摩擦生热显著。

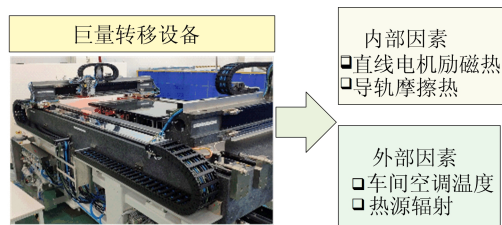


图 2 巨量转移设备的内、外部热源因素

巨量转移设备热误差形成机理如图 3 所示。

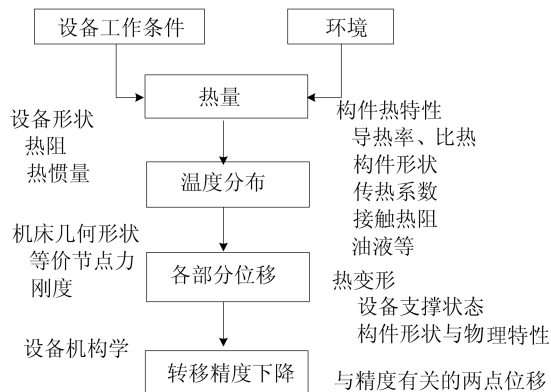


图 3 巨量转移设备热误差形成机理

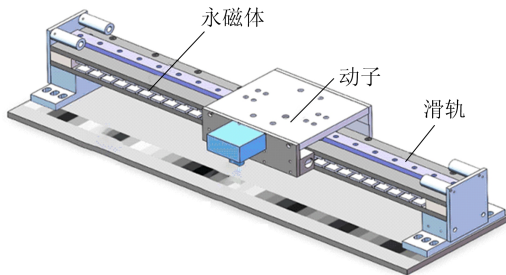
总的来看,巨量转移设备热误差机理是复杂的,设备工作时高速高频工况下产生的热量一部分通过对流与环境交换,一部分通过热传导零部件间交换,由于设备零部件之间的热物理特性(如导热率、比热等)的不同,以及零部件之间结合面复杂接触特性,增加了热传递过程的复杂性,从而导致巨量转移设备热误差产生部件间温度分布不均匀,造成巨量转移设备末端机构的相对位移变化,进而引起巨量转移设备精度下降,导致热误差的产生。

## 1.2 温度场与热变形场理论模型

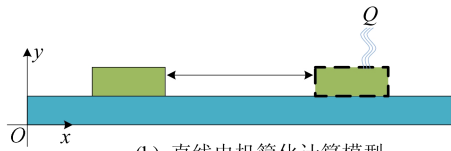
直线电机简化模型如图4所示,由于电机系统中的部件具有不同的特性,热量以不同的速率向不同的方向传递,导致温度场不均匀。根据基本的传热学理论,直线电机三维温度场分布满足的方程式<sup>[4]</sup>为:

$$\begin{cases} \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -q_v, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_2} = 0, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_3} = -\alpha(T - T_f) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $T$ 为温度; $\lambda_x$ 、 $\lambda_y$ 、 $\lambda_z$ 分别为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的导热系数; $q_v$ 为单元体产生的热量; $s_2$ 、 $s_3$ 分别为第二类和第三类边界条件; $\alpha$ 为第三类边界的散热系数。



(a) 直线电机三维结构



(b) 直线电机简化计算模型

图4 直线电机简化模型

根据热弹性原理,可以根据温度场确定直线电机的热误差<sup>[5]</sup>。例如,通常通过对温度分布积分,可以获得直线电机的一维热误差公式,即

$$E_x(t) = \int_0^L \alpha_E T(x,t) dx \quad (2)$$

其中: $\alpha_E$ 为膨胀系数(常数); $L$ 为直线电机行程。

由于瞬态温度分布的计算过程往往比较复杂,大多数研究者都集中在稳态或一维瞬态温度分布下直线电机热特性的理论研究上。然而,在实际中,直线电机的结构复杂,温度总是随时间变化的,这导致较难得到准确的温度场和热误差理论分析结果。需要进一步结合数值仿真方法和实验的结果对模型验证。

诸多学者利用数值方法对其温度场分布进行了仿真研究。文献<sup>[6]</sup>通过传热学理论推导直线

电机进给一维的传热模型;文献<sup>[7]</sup>构建一套用于变磁阻式直线电机的热阻模型,探讨了直线电机在热态条件下的性能特征,并利用有限元法对其模型的精确度进行验证;文献<sup>[8]</sup>建立一种双侧平面型永磁直线同步电机的二维温度场模型,并深入探讨该电机在热态条件下的理论特性和实验验证,计算直线电机温度场,相关结果如图5所示;文献<sup>[9]</sup>建立永磁同步直线电机的三维模型,此项建模工作是实现精确温度场计算与深入解析直线电机性能的关键基石,为后续研究提供了必要的参数支撑。

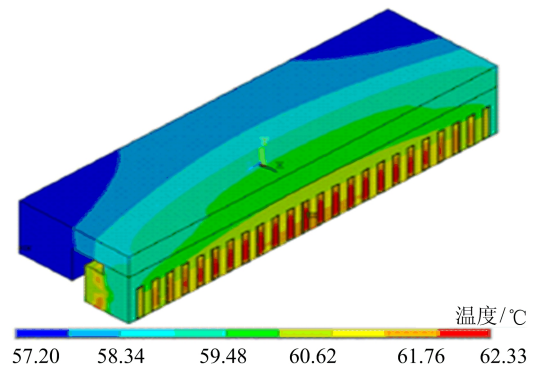


图5 直线电机温度场

## 2 误差建模

虽然理论分析和数值模拟可以提供大量机构热特性的信息,但理论分析和数值模拟结果仍需通过实验进行验证。实验测试可以提供有关机构热特性的实际可靠数据,可以用于进一步的热误差建模和补偿。因此,直接测量温度和热误差非常重要。

### 2.1 热误差建模参数测量

1) 温度测量。对于温度测量,传感器从安装形式上可分为接触式<sup>[10]</sup>和非接触式<sup>[11]</sup>。接触式传感器多为热电阻式传感器和热电偶式传感器。随着测量技术的不断发展,基于红外图像的非接触式传感器被越来越多地用于测量温度。相比电阻式传感器,红外传感器成本相对较高,作为被动接受环境反射的热辐射测温方式,环境中灯光、人员以及其他环境因素产生或反射的红外线可能对测量的准确度产生影响。

2) 热误差测量。对于热误差的测量主要有电感式传感器、电容式传感器、激光传感器、光栅传感器等<sup>[12-13]</sup>。激光位移传感器的直线度较好,但是激光发生装置结构复杂且体积较大,易受机

油污污染,影响测量精度。电容式传感器精度高、稳定性好、非线性小,但是量程一般小于 1 mm。涡流式位移传感器结构简单、灵敏度高,但其线性度较低,一般为量程的 1%,精度可达到 0.1  $\mu\text{m}$ ,且要求被测体为非导磁体。光纤光栅传感器体积小、质量轻、抗电磁干扰,对温度变形较敏感,但解调系统相对较昂贵。

## 2.2 温度测点选取优化

温度作为误差预测模型的输入数据,测量时需要选择合适的位置布置传感器且数目合理。过多的温度传感器会使测点之间的共线性增强,导致模型的精度降低,较少则会引起预测模型的鲁棒性不足。学者们对此做了大量的研究,主要方法有灰色系统理论<sup>[14]</sup>、逐步回归法<sup>[15]</sup>、模糊聚类法<sup>[16]</sup>、热模态分析法<sup>[17]</sup>等。

1) 灰色系统理论法。灰色系统理论法一般应用于当样本数量较小时,为了确定众多温度测量点与热变形数据之间的关联性,在对温度测量点进行区分之后,利用灰色系统理论来建立每个类别与热误差数据关联度排序,并将关联度最大的温度测量点作为敏感温度测点,即关键温度测量点,从而降低温度测点选取个数并最大限度地描述数控装备温度变化特点。

文献[18]应用灰色系统模型  $GM(0, N)$  分析温度测点 1 至  $n$  中对热变形量影响较大的温度测点,进一步结合模糊  $C$  均值聚类(fuzzy  $C$ -means clustering, FCM)进行测点的优化,最后得到主轴系统的关键温度点。

2) 逐步回归法。逐步回归模型由多个候选变量构建,基于先前确定的温度变量组合,通过检验

部分  $F$  统计量依次引入新的温度变量,同时,对模型中选择的旧变量进行重新测试,删除不重要的变量,重复该过程,直到既不能引入新变量也不能删除旧变量。该方法将统计上不显著的温度变量剔除,不仅保留在模型中的温度变量之间多重共线性不明显,还对热误差有较好的解释贡献度。

文献[19]根据温度变量与热误差的灰色关联度,选取不同分组中的关键温度变量,再通过逐步回归分析,剔除不显著变量,确定最佳关键温度点。逐步回归法只是对热误差和温度变量进行相关性分析,由于测量点数量众多,温度变量之间可能会出现共线性,这不仅增加了计算复杂度,还降低了模型的补偿精度和鲁棒性。因此,逐步回归适用于自变量较少的热误差模型。

3) 模糊聚类法。模糊聚类法首先将温度检测站点划分为若干组,并接着执行相关性分析,以识别出在每一组内与热形变最高度相关的温度参数。随后,这些被选定的关键温度变量被整合进热误差模型中,以此提升模型对于热效应的预测精度。

文献[20]通过灰色关联度分析模型  $GM(1, N)$  和模糊  $C$  均值聚类后筛选出 T18、T55、T63、T68、T71 这 5 个关键点温度测点,为后期建立机床热误差预测模型奠定基础,构建基于模糊  $C$  均值聚类测点优化的热误差模型,如图 6 所示;文献[21]采用模糊聚类选择关键温度点,并结合神经网络进行建模,通过实验验证了不同切削条件下模型的预测精度和泛化能力,该方法可以有效防止变量间的耦合影响,显著提升选定温度测量点的操作效率。

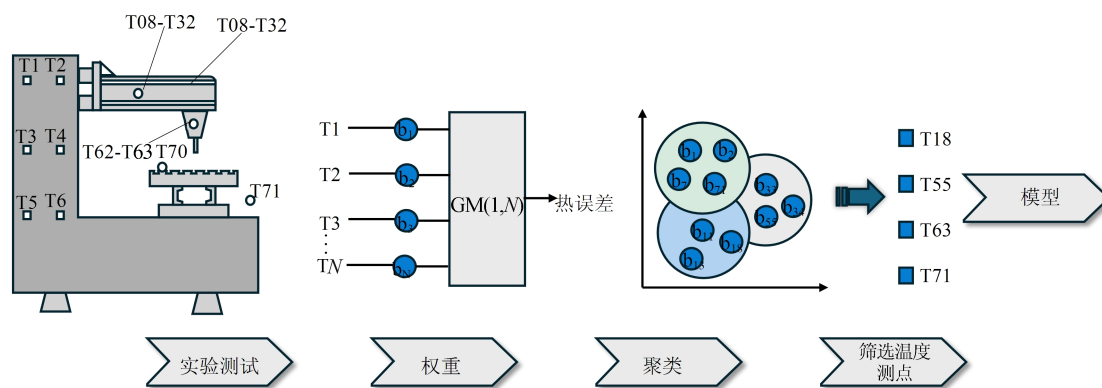


图 6 模糊  $C$  均值聚类测点优化

4) 热模态分析法。热模态分析法是将机床热误差看作热模态的叠加,从热变形的本质出发,

类比动力学的模态分析,利用有限元法对机构进行热模态分析,在此基础上布置温度测点。热模

态分析法中布置测点提高了温度测点之间的独立性,有利于提升热误差模型的预测精度。

### 2.3 热误差建模

热误差建模是描述热变形误差量随着温度变化的关系模型,是实现热误差补偿的基础。热误差建模时采用许多数学上的经典模型,例如多元回归分析模型<sup>[22-23]</sup>、神经网络模型<sup>[24-25]</sup>、支持向量机(support vector machines, SVM)模型<sup>[26-27]</sup>、时间序列模型等<sup>[28-29]</sup>。

1) 多元回归分析模型。多元回归是一种以单个或多个变量为输入,单个变量为输出的建模方法。文献[30]针对轴向热误差问题,采集不同工况的数据,利用多元回归和反向传播网络进行建模,比较两者的建模精度,通过实验验证了多元回归模型具有更好的鲁棒性和精度。

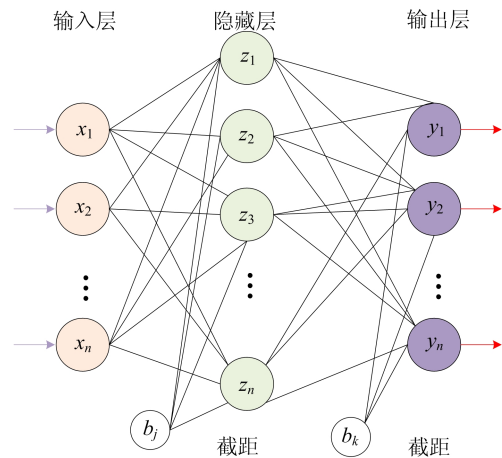
2) 神经网络模型。神经网络是一种强大的机器学习模型,可以学习和逼近各种函数。文献[31]提出一种结合遗传算法和小波神经网络的创新方法,旨在构建一种高效的机床热误差补偿模型,通过遗传算法对小波神经网络权值和阈值优化,构建精确的热误差模型,同时通过实验验证了模型的精度和抗干扰能力的显著优势;文献[32]通过遗传算法优化BP神经网络,构建基于5个基本温度节点的热误差模型,该模型显著提高了热误差预测的精度,有效降低了预测热变形时计算资源的消耗;文献[33]建立了基于遗传算法的径向基函数神经网络热误差模型(genetic algorithm-radial basis function, GA-RBF), GA-RBF模型预测结果如图7所示,从图7可以看出,偏差保持在 $-5\sim 5\ \mu\text{m}$ 之间。

除BP神经网络模型外,有学者还研究并应用了径向基函数网络<sup>[34]</sup>、集成递归神经网络(integrated recurrent neural network, IRNN)<sup>[35]</sup>等其他神经网络。神经网络具有较强的对非线性模型的预测能力,基于神经网络的建模能够较好地预测热误差,但模型的辨识参数缺乏实际物理意义,因此对于非训练工况的预测结果有待进一步验证。

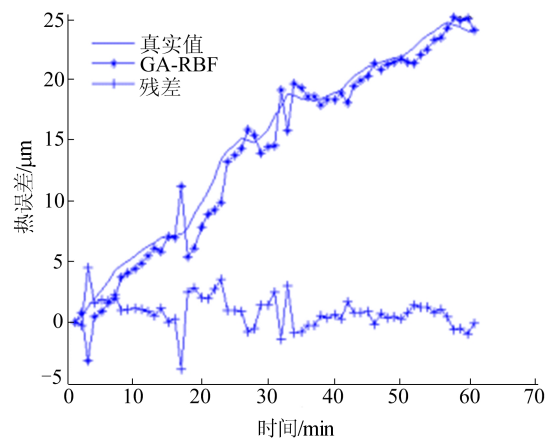
3) SVM模型。支持向量机模型针对小样本统计和预测学习有着较好的效果。文献[36]构建了基于最小二乘支持向量机(least squares support vector machine, LS-SVM)的热误差预测模型,比较灰色模型(grey models, GM)和多元线性回归(multiple liner regression, MLR),证明模型的有效性,基于LS-SVM模型的主轴轴向热误

差预测过程,如图8所示。

然而,大多数热误差模型中没有考虑机床的加工工况变化,这样导致模型的适用性不佳。使用混合模型是综合误差建模的理想方案。文献[37]构建一种混合支持向量机-贝叶斯网络模型,首先采用贝叶斯网络对实验数据进行规则分类,分类完成后用支持向量机模型来预测误差,经过验证实用性更强。



(a) RBF网络拓扑结构



(b) 预测结果和拟合误差

图7 GA-RBF模型预测结果

4) 时间序列模型。时间序列模型非常适合用于那些输入不能确定或不可预测的研究对象的描述。文献[38]利用所建立的基于时间序列分析法的机床热误差模型,经过计算机算出补偿值并送入机床控制器对刀架进行附加进给运动来完成实时补偿,大幅度提高了机床的加工精度,但是时序建模方法缺少选型和判定条件。由于时间序列预测法过于强调时间序列而忽略了外部因素的影响,导致了其出现了预测误差的问题。当外部环境发生显著变化时,这种误差往往会变得很大。

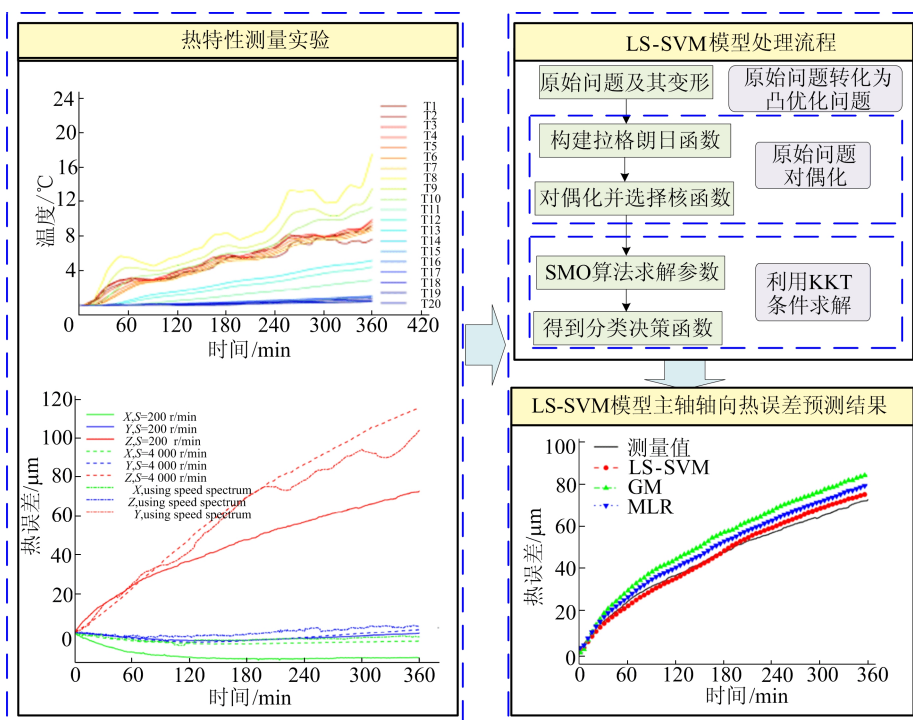


图 8 基于 LS-SVM 模型的主轴轴向热误差预测过程

### 3 热误差补偿技术

热误差补偿通过“软技术”(某些算法措施抵消发热造成的原始误差)以很小的代价便可获得“硬技术”(提高机床制造和装配精度)难以达到的精度水平。高速运动机构热误差补偿通常分为误差防止法和误差补偿法<sup>[39]</sup>。误差防止法能在一定范围内提升精度,达到一定精度等级后,随精度提高成本急速增加,应用范围有限。而误差防止法的相对成本低、效益更明显,且可以在已经服役的设备上部署,灵活性更高。

#### 3.1 误差防止法

误差防止法是通过设计、制造等方面优化设计与外部环境控制来消除或减少潜在的误差源,以此来提高设备的加工精度,主要包括热对称设计<sup>[40]</sup>、隔热材料选取<sup>[41]</sup>、散热设计<sup>[42]</sup>、润滑设计<sup>[43]</sup>等。在热设计方面,热对称设计策略着重于在构建系统架构及组件结构的过程中,力求将热源、散热区域、传热路径以及各个零件的质量等关键因素实现对称配置。此方法通过确保整体结构的几何特性、支撑方式以及刚度均匀分布在中心面或轴线上,旨在有效降低零件因热力作用产生的形变,进而维持在热应力作用下,整个系统的敏感度中心位置保持稳定,从而确保其性能指标不受显著影响。

文献<sup>[44]</sup>对宏微运动平台,从热力耦合角度

进行多目标优化设计,通过求解目标函数获得匹配参数,经验证满足期望设计;文献<sup>[45]</sup>针对精密机械中压电陶瓷受到环境温度变化干扰,提出一种具有热保护和内部热源的紧凑型位移平台,采用热力学模拟方法研究了整个位移平台的温度分布和柔性机构的热应变,通过实验验证了平台低温和高温下的运动性能。

材料选择方面,选择新型材料(如碳纤维、花岗岩等)能减少温度引起的变形,是一种简单易行的方法,但这种方法使设备成本增高,提升精度范围有限。文献<sup>[46]</sup>为改善直线电机热性能在主要部件与工作台之间放置绝缘层,可以减少由于电动机负载变化引起的温度差波动。合理设计冷却装置,也是一种直接且效果显著的方法。文献<sup>[47]</sup>系统比较了直驱式系统散热器冷却、水冷却和强制风冷却的冷却效率,并提出一种优化的抛物线型散热器结构,该结构对直线电机的散热帮助明显;文献<sup>[48]</sup>提出用于高带宽定位系统的直线电机的设计优化模型,采用铝制材料优化的热致动器通过减少机架的热损失来提高冲程与功率消耗,有利于快速冷却获得快速热响应;文献<sup>[49]</sup>针对直线电机设计了 2 种不同水冷结构,计算了在短时、高过载条件和周期性运行下的温度,并通过实验验证了 2 种不同水路拓扑的散热效果,优化了水冷电机的电磁性能。

在其他设备误差防止方法方面,日本大隈

(OKUMA)公司基于对热变形补偿的研发经验,提出“热亲和”的设计概念,即接受热并合理利用热达到减弱热误差对设备的影响。OKUMA 开发的主轴热位移控制功能 TAS-S,如图 9 所示。通过 TAS-S<sup>[50]</sup>能够预见并调整主轴产生的热量波动,确保机床在持续工作时的热变形不超过 4 μm。热亲和设计从结构优化方面直接减少了误差源的产生,但是设备的实际运行工况复杂多变,各组件的热误差一般难以相互抵消。

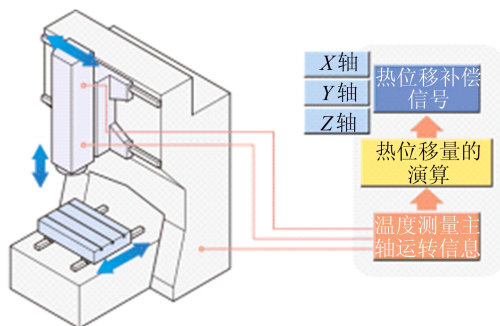


图 9 主轴热位移控制功能 TAS-S

### 3.2 误差补偿法

误差补偿技术旨在人为引入修正措施,以中和或减轻导致问题的初始误差。误差补偿技术的具体应用模式紧密关联于数控系统的开放性。在开放式数控系统中,误差补偿算法能够被整合至核心程序以实现精确控制。而对于半封闭式的商用数控系统,可通过配置外部补偿设备来达到相似效果。在数控机床领域,外置补偿器借助特定通信协议获取西门子和发那科公司数控系统的实时位置与转速数据。随后,该补偿器通过即时计算生成相应的补偿值,并将其精确地反馈至数控系统,以优化性能与精度。

误差补偿原理如图 10 所示。从补偿原理视角出发,误差补偿方法主要分为反馈中断法和坐标原点偏移法。在反馈中断法中,计算机并行执行 2 个关键步骤:① 获取编码器的反馈信号;② 计算主轴的热误差值。随后将计算出的补偿量整合至伺服系统的反馈环路内。补偿量通过控制器得以应用,实现了对热误差的有效修正(图 10a)。

坐标原点偏移,即计算机通过接收数控系统提供的位置和速度数据,运用热误差模型进行计算来确定补偿量;随后将这个补偿量发送至控制器,控制器据此调整系统的参考点位置,并将修正后的信息整合进伺服回路的指令信号中。该过程

旨在精确校正由于温度变化等因素引起的机械误差,提升整体系统的定位精度和稳定性。此补偿技术在操作中既不干扰坐标系统的准确性,也不对零件程序产生任何影响(图 10b)。

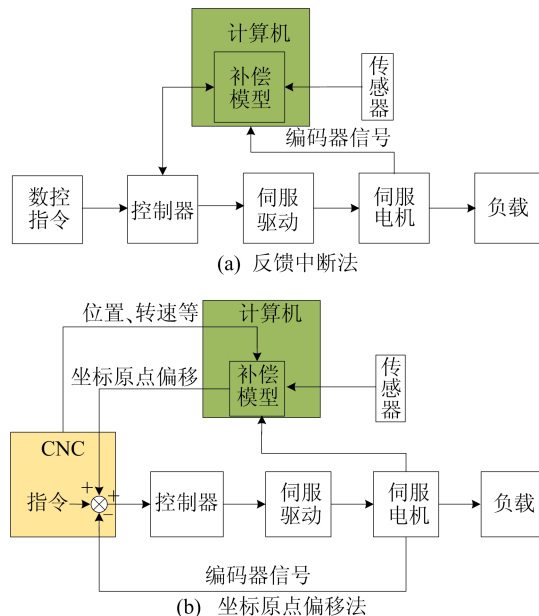


图 10 误差补偿原理

综上所述,反馈中断补偿法是一种不改变数控软件的补偿方法,适用任何机床但需要特殊的电子装置将相位信号添加到伺服系统中,同时避免与反馈信号干涉。坐标原点偏移法由 CNC 系统外部机械坐标系统基点偏移函数补偿,该函数不影响加工,并提供更好的可实施性。

## 4 结 论

随着显示行业的快速发展,巨量转移设备的转移精度受到越来越多关注。本文介绍了大量的国内外文献,针对巨量转移设备存在影响转移工艺精度的热误差问题,分析了热误差产生的机理、温度敏感点优化及热误差建模方法的研究现状以及热误差模型建立的过程,介绍了建模过程常用的数学模型,并着重分析了建模技术的不足之处。针对热误差补偿技术的研究未来在以下几方面有待进一步深入研究。

1) 在误差测量方面,传统的接触式和非接触式测量,测量结果在非加工状态和真实加工状态下存在很大差异。随着测量技术发展,在测量方面将朝着动态测量、实时在线测量的方向发展。

2) 在热误差建模方面,目前热误差模型大多在一个稳定的工况下进行实验测试,能达到较为

满意的结果,但当工作环境及工况突然变化时,热误差模型的精度有所降低。如何提高热误差模型的精度、鲁棒性、长时间补偿精度有待深入研究。

3) 在热误差补偿方面,目前的误差建模一般是基于单台设备开展的,但是同系列的设备参数一般不同,导致建立的模型无法适用于其他同批次的设备,通用性比较低。为更好地推广应用误差补偿技术,应当同时对同批次的多台设备误差规律进行研究。进一步研究设备的热误差与环境温度、装配预紧力、运动速度等参数的关系。

4) 随着人工智能不断发展,智能化已成为重要的发展趋势,各种智能算法与设备热误差预测模型结合更加紧密。例如根据设备工作过程中相关数据的采集分析,采用基于人工智能方法建立高精度、高自适应性、高鲁棒性热误差模型。

### [参 考 文 献]

- [1] 于璇. Mini LED 电视或将迎来较大发展[J]. 电器, 2021(5): 52-53.
- [2] 陈佳昕, 李梦梅, 郭伟玲. Micro LED 微显示芯片制备技术[J]. 照明工程学报, 2021, 32(1): 12-18.
- [3] 牛萍娟, 曹世楠, 刘强, 等. Micro-LED 巨量转移磁悬浮平台设计与磁路特性分析[J]. 微纳电子与智能制造, 2021, 3(3): 100-105.
- [4] PEI Z, ZHAO J, SONG J, et al. Temperature field calculation and water-cooling structure design of coreless permanent magnet synchronous linear motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(2): 1065-1076.
- [5] ATTIA M H, FRASER S, OSMAN M O M. On-line estimation of time-variant thermal load applied to machine tool structures using a s-domain inverse solution[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39(6): 985-1000.
- [6] 林献坤, 张薇, 樊振华. 直线电机驱动进给轴热动态伪滞后建模与补偿方法研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(19): 137-143.
- [7] CHAYOPITAK N, TAYLOR D G. Thermal analysis of linear variable reluctance motor for manufacturing automation applications [C]//International Electric Machines and Drives Conference. San Antonio: IEEE, 2005: 866-873.
- [8] LI Y, HUANG X, ZHANG L, et al. Thermal characteristic of double-side tabular permanent magnet linear synchronous motor in different working models[C]//proceedings of the 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Harbin: [s. n. ], 2008: 1-5.
- [9] MOU X J, XU Y T, JIANG F J. Heat analysis of a flat permanent-magnet linear synchronous motor [J]. Advanced Materials Research, 2011, 328: 974-978.
- [10] GUI H, LIU J, MA C, et al. New mist-edge-fog-cloud system architecture for thermal error prediction and control enabled by deep-learning[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 109: 104626.
- [11] WU C Y, XIANG S, XIANG W S. Spindle thermal error prediction approach based on thermal infrared images: a deep learning method[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 59: 67-80.
- [12] ZHOU Z D, GUI L, TAN Y G, et al. Actualities and development of heavy-duty cnc machine tool thermal error monitoring technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(5): 1262-1281.
- [13] HONG C, IBARAKI S. Non-contact r-test with laser displacement sensors for error calibration of five-axis machine tools[J]. Precision Engineering, 2013, 37(1): 159-171.
- [14] LIU H, MIAO E, ZHUANG X, et al. Thermal error robust modeling method for CNC machine tools based on a split unbiased estimation algorithm[J]. Precision Engineering, 2018, 51: 169-175.
- [15] CHEN C, ZHANG C, CHEN H. Selection and modeling of temperature variables for the thermal error compensation in servo system[C]//IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Chengdu: [s. n. ], 2011: 220-223.
- [16] WANG H, WANG L, LI T, et al. Thermal sensor selection for the thermal error modeling of machine tool based on the fuzzy clustering method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(1): 121-126.
- [17] 张琨, 张毅, 侯广锋, 等. 基于热模态分析的热误差温度测点优化选择[J]. 机床与液压, 2012, 40(7): 1-3.
- [18] ABDULSHAHED A M, LONGSTAFF A P, FLETCHER S, et al. Thermal error modelling of machine tools based on anfis with fuzzy c-means clustering using a thermal imaging camera[J]. Applied Mathematical Modelling, 2015, 39(7): 1837-1852.
- [19] MIAO E, GONG Y, DANG L, et al. Temperature-sensitive point selection of thermal error model of CNC machining center[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(5): 681-691.
- [20] ABDULSHAHED A M, LONGSTAFF A P, FLETCHER S. The application of anfis prediction models for thermal error compensation on CNC machine tools [J]. Applied Soft Computing, 2015, 27: 158-168.
- [21] YANG J, SHI H, FENG B, et al. Applying neural network based on fuzzy cluster pre-processing to thermal error modeling for coordinate boring machine [J]. Procedia CIRP, 2014, 17: 698-703.
- [22] CHEN J S, YUAN J X, NI J, et al. Real-time compensation for time-variant volumetric errors on a machining center [J]. Journal of Engineering for Industry, 1993, 115(4): 472-479.
- [23] LO C, YUAN J, NI J. Optimal temperature variable selection by grouping approach for thermal error modeling and compensation[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39: 1383-1396.

- [24] KANG Y, CHANG C, HUANG Y, et al. Modification of a neural network utilizing hybrid filters for the compensation of thermal deformation in machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(2): 376-387.
- [25] YANG S, YUAN J, NI J. The improvement of thermal error modeling and compensation on machine tools by CMAC neural network[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, 36(4): 527-537.
- [26] 刘善林, 高保林, 董云飞, 等. 支持向量机在机床热误差建模补偿中的机理研究[J]. *工具技术*, 2017, 51(8): 103-108.
- [27] LIN W, XU Y, FU J, et al. Thermal error modeling and compensation of spindles based on LS-SVM[C]//proceedings of the 2006 International Technology and Innovation Conference. Hangzhou: [s. n.], 2006: 841-846.
- [28] 姚晓栋, 黄奕乔, 马晓波, 等. 基于时间序列算法的数控机床热误差建模及其实时补偿[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(5): 673-679.
- [29] YANG J, ZHANG D, FENG B, et al. Thermal-induced errors prediction and compensation for a coordinate boring machine based on time series analysis[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014: 784218-784231.
- [30] LI Y, ZHAO W, WU W, et al. Thermal error modeling of the spindle based on multiple variables for the precision machine tool[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 72(9): 1415-1427.
- [31] 李彬, 张云, 王立平, 等. 基于遗传算法优化小波神经网络数控机床热误差建模[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(21): 215-220.
- [32] WU H, ZHANG H, GUO Q, et al. Thermal error optimization modeling and real-time compensation on a CNC turning center[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 207(1): 172-179.
- [33] LEI C, RUI Z. Thermal error modeling and compensating of motorized spindle based on improved neural network[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 129: 556-60.
- [34] LIANG R J, YE W H, ZHANG H H, et al. The thermal error optimization models for cnc machine tools[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 63(9): 1167-1176.
- [35] HOPFIELD J J. Learning algorithms and probability distributions in feed-forward and feed-back networks[J]. *Proc Natl Acad Sci*, 1987, 84(23): 8429-8433.
- [36] TAN F, YIN M, WANG L, et al. Spindle thermal error robust modeling using LASSO and LS-SVM[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(5): 2861-2874.
- [37] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N, et al. Thermal error measurement and modelling in machine tools. part II. hybrid bayesian network-support vector machine model[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(4): 405-419.
- [38] 李永祥, 童恒超, 曹洪涛, 等. 数控机床热误差的时序分析法建模及其应用[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2006, 38(2): 74-78.
- [39] 王维, 杨建国, 姚晓栋, 等. 数控机床几何误差与热误差综合建模及其实时补偿[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(7): 165-170.
- [40] LIANG Y, SU H, LU L, et al. Thermal optimization of an ultra-precision machine tool by the thermal displacement decomposition and counteraction method[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(1): 635-645.
- [41] 于英华, 王明旭, 徐平. 钢纤维聚合物混凝土机床基础件的热性能[J]. *兰州理工大学学报*, 2008, 34(3): 37-39.
- [42] FAN K, XU R, WANG R, et al. Thermoelectric-based cooling system for high-speed motorized spindle II: optimization and validation strategy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(9): 6521-6533.
- [43] ZENG Q, ZHANG J, HONG J, et al. A comparative study on simulation and experiment of oil-air lubrication unit for high speed bearing[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2016, 68(3): 325-335.
- [44] ZHANG L F, LONG Z L, CAI J D, et al. Multi-objective optimization design of a connection frame in macro-micro motion platform[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 32: 369-382.
- [45] MAO D B, WANG J R, XU Z, et al. Heat transfer analysis and performance testing for a precision positioning platform with thermal protection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation Measurement*, 2023, 72: 1-10.
- [46] EUN I U. Effects of insulation layer upon the thermal behavior of linear motors[J]. *KSME International Journal*, 2003, 17(6): 896-905.
- [47] HE P, JIAO Z X, YAN L, et al. Thermal optimization of a tubular linear oscillating motor for directly driven LEHA application[J]. *Numerical Heat Transfer Part a-Applications*, 2016, 69(4): 383-400.
- [48] PAALVAST S L, SARRO P M, SCHMIDT R H M. Dynamic model for design optimization of a high bandwidth thermal linear motor[C]//Proceedings of the EuroSimE 2009-10th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. [S. l. : s. n.], 2009: 249-255.
- [49] PEI Z, ZHAO J, SONG J, et al. Temperature field calculation and water-cooling structure design of coreless permanent magnet synchronous linear motor[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(2): 1065-1076.
- [50] OKUMA. Thermo-friendly concept[EB/OL]. [2023-08-16]. <https://www.okuma.co.jp/chinese/onlyone/thermo/index.html>.