数控机床直线进给系统精度设计与装配误差控制方法研究进展

孙光明[1,2] 孙艺萌[1] 郭 鑫[2,3] 张大卫[2] 阎 兵[1] 杨 悦[2*] 何改云[2]
高卫国[2] 赵 坚[1]

1.天津城建大学控制与机械工程学院,天津,300384
2.天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室,天津,300072
3.沈阳机床中捷友谊厂有限公司,沈阳,110142

摘要:从误差传递机理研究、精度设计、装配误差控制等方面梳理了机床直线进给系统精度设计与装配误差控制方法技术体系。对机床直线进给系统装配误差与运动误差的建模方法进行归纳,并围绕误差权重分析、精度优化及仿真验证等方面梳理了直线进给系统的精度设计流程。梳理了直线进给系统装配流程,通过误差溯源将装配误差反馈到精度设计环节,优化设计参数并指导再次装配,从而控制机床直线进给系统装配误差。在现有研究基础上,展望了未来机床直线进给系统装配误差控制的研究方向。

关键词:直线进给系统;误差传递机理;精度设计;装配误差
中图分类号:TG659
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.10.017 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Research Progresses on Precision Design and Assembly Error Control Methods for Linear Feed Systems of CNC Machine Tools

SUN Guangming[1,2] SUN Yimeng[1] GUO Xin[2,3] ZHANG Dawei[2] YAN Bing[1] YANG Yue[2*]
HE Gaiyun[2] GAO Weiguo[2] ZHAO Jian[1]

1.School of Control and Mechanical Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin, 300384
2.Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin, 300072
3.Shenyang Machine Tool Zhongjie Friendship Factory Co., Ltd., Shenyang, 110142

Abstract: The technical framework of precision design and assembly error control methods of machine tool linear feed systems was reviewed from three aspects: error transmission mechanism research, precision design and assembly error control. Modeling methods for the relationship between assembly errors and motion errors of machine tool linear feed systems were summarized. The research results of precision design for linear feed systems were summarized, mainly focusing on error weight analysis, precision optimization, and simulation verification. By establishing error traceability chains, the assembly-induced errors can be systematically fed back to the precision design phases for iterative optimization. Moreover, the design parameters were optimized to guide subsequent re-assembly processes, effectively mitigating assembly-induced errors in the machine tool linear feed systems. Finally, the future research directions of assembly error control methods were discussed.

Key words: linear feed system; error transfer mechanism; precision design; assembly error

0 引言

直线进给系统作为数控机床的核心功能单元,是由床身、直线导轨副、工作台等复杂零部件按特定装配序列集成的精密机械系统,其运动精度直接影响着整机的加工精度[1]。机床直线进给系统位姿误差受制造误差、装配误差和环境干扰的影响,其中装配误差的贡献度可达40%以上[2],是影响机床直线进给系统运动精度的关键因素。早期机床进给系统装配误差控制主要依赖装配人员的工程经验,效率低下且精度难以保证。后来,统计过程控制理论与偏差流理论被引入,研究装配过程中的误差传递规律,为机床直线进给系统装配误差控制研究提供了理论基础。

近年来,基于误差传递机理的机床直线进给系统装配误差主动控制方法成为研究热点,形成

收稿日期:2025-05-08
基金项目:国家自然科学基金(52205535,U23B20102);天津市自然科学基金(25JCYBJC00260,22JCQNJC01000);沈阳市科技重大专项(23-401-1-01)

了精度设计和装配误差控制的闭环反馈精度优化体系，避免了传统单向精度设计仅考虑传统设计阶段关键部件的公差分配而忽略装配过程中累计误差的问题，为机床直线进给系统装配误差的量化分析与控制提供基础[3]。通过装配误差与运动误差的建模，研究装配过程中误差传递机理；在精度设计环节分析误差权重，合理设计系统各部件的设计参数，进行公差分配；指导装配过程中的装配误差控制，并根据移动副6项位姿误差检测结果进行误差溯源，将误差数据反馈到设计环节，优化设计参数，再次指导装配，直至装配精度符合设计要求，为直线进给系统装配误差控制提供技术路径[4]。本文梳理了国内外相关研究进展，旨在为直线进给系统装配误差控制提供参考。

1　机床直线进给系统误差传递机理研究

1.1　直线进给系统误差建模方法

不同类型进给系统的结构特点、工艺要求等不同，其误差传递机理也有所差异，常见的数控机床直线进给系统类型主要有滚动导轨、静压导轨和气浮导轨[5]。滚动直线导轨通过导轨和滑块之间的滚动体实现进给系统的相对运动，对滚动体的尺寸精度和圆度有极高的要求，具有摩擦因数小、运动灵敏度高、能够实现高速运动等优点[6]，然而，其承载能力相对有限，在重载或有较大冲击的工况下，滚动体和导轨容易产生磨损和疲劳破坏。静压导轨通过润滑油在油腔内形成压力油膜，将进给系统运动部件与导轨表面隔开，实现液体摩擦运动，具有较好的精度保持性，在重载、高精度加工的场合具有明显优势，但静压导轨需要配备专门的供油系统和节流装置，并且油温的变化会对油膜的厚度和刚度产生影响[7]。气浮导轨则是以压缩空气作为润滑介质，在导轨与运动部件之间形成微米级气膜，实现非接触运动，具有摩擦近乎为零、无磨损、运动精度极高、热变形小等突出优点，尤其适用于超精密加工对洁净度与运动平稳性要求极高的领域，不过，气浮导轨的承载能力相对较低，且对气源洁净度、气压稳定性以及导轨加工精度均有极为严格的要求。

误差建模旨在通过构建直线进给系统装配误差与运动误差的模型，揭示装配误差与运动误差之间的映射关系，以指导后续进给系统的精度设计和装配误差控制。机床直线进给系统精度设计与装配误差控制方法技术体系如图1所示，接下来对目前建模方法的特点和适用范围进行阐述。

1.1.1　静力平衡建模法

静力平衡建模法是一种根据直线进给系统结构特征，将系统中的力和力偶矩简化为合力和合力偶矩，建立力学平衡方程，分析系统在各个方向上受力平衡状态的建模方法。

为了研究滚动导轨副的受力状态与误差传递机理，周传宏等[8]引入静力平衡建模法，将力学和运动学原理应用于双导轨四滑块结构进给系统的静力平衡分析，结合变形协调方程建立双导轨四滑块结构的静力平衡模型，推导了负载分布与工作台位移的关系，该建模方法成为滚动导轨静力平衡建模的理论支撑。在此基础上，WU等[9]对上述双导轨四滑块进给系统静力平衡模型进行简化，建立滑块位移矩阵，分析了预紧力和滑块变形对导轨副垂直刚度的影响，但该简化模型只考虑滑块位移，忽略了滑块自身偏转的影响。为了更清晰地描述导轨直线度误差和工作台位姿误差间的误差传递关系，韩凡滨[10]引入矩阵方程进行滚动导轨副静力平衡建模，计算了工作台的5项运动误差。考虑到材料的滞弹特性，SUN等[11]基于静力平衡分析研究导轨装配误差、丝杠装配误差等因素对重复定位误差的影响机理。除上述研究外，许多学者还运用静力平衡建模法进行滚动导轨静刚度特性、载荷分布以及导轨副结构优化等研究[12]。

静力平衡建模法不仅适用于滚动导轨的误差建模，将其与雷诺方程相结合还能建立静压导轨以及气浮导轨等滑动导轨的力学模型。EKINCI等[13]分别将雷诺方程和雷诺方程的气体变式融入静力学分析中，建立静压导轨和气浮导轨的静力平衡模型，进行不同载荷下导轨的受力分析。张朋海[14]建立气浮导轨的静力平衡方程，分析气浮导轨运动误差、导轨形状误差和导轨结构参数三者之间的关系，研究了气浮垫间隙、封气边宽度、节流孔直径等对滑动导轨的误差传递机理。考虑到油膜的弹性特性，ZHA等[15]进一步将油膜简化为线性弹簧，以解释滑块运动过程中的误差来源，通过调节油膜结合面误差来控制导轨几何误差，揭示了滑动导轨的误差传递机理。综合考虑流体的可压缩性和压膜效应，静力平衡建模法还能进行滑动导轨的油膜压力分布与导轨承载能力分析，计算导轨的直线度误差和转角误差[16]。

综上，静力平衡建模法作为一种经典建模方法，通过静力平衡方程，除了能建立滚动导轨副的静力平衡模型外，还能建立静压导轨、气浮导轨等滑动导轨的静力平衡模型，如图2所示。图中，f表示各个导轨支撑力；k表示导轨刚度；δ表示工

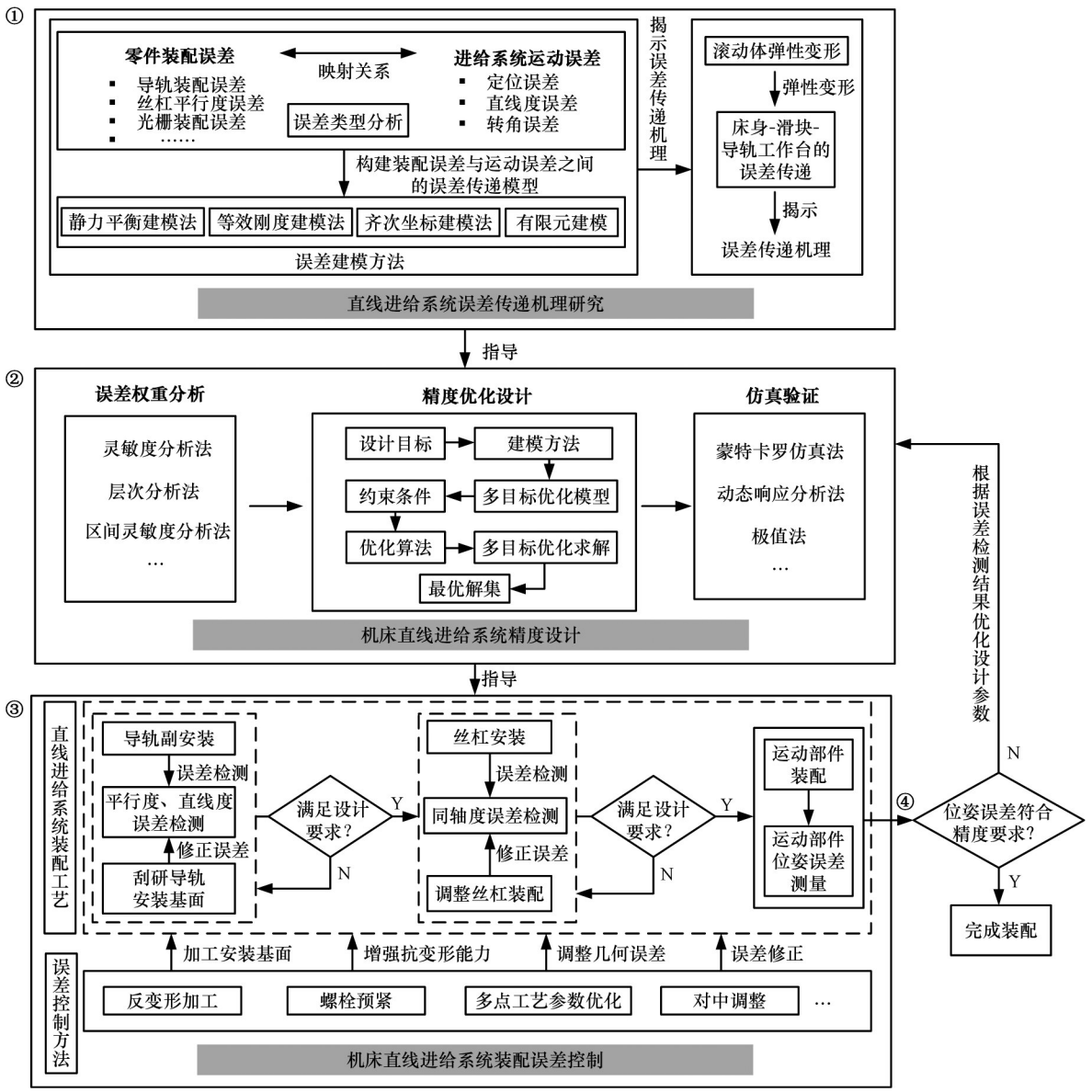


图1 机床直线进给系统精度设计与装配误差控制方法技术体系

Fig.1 Technical system of precision design and assembly error control method for machine tool linear feed system

作台因变形产生的位移；φ表示因变形位移产生的夹角。通过建立静力平衡方程，可进行机床直线进给系统多种类型导轨的位姿误差、材料特性以及载荷分布等研究。

1.1.2 等效刚度建模法

等效刚度建模法是在静力平衡建模法的基础上发展起来的，结合赫兹接触理论将直线进给系统复杂的接触问题简化为一个等效的刚体或弹簧系统从而简化静力分析过程，研究机床直线进给系统的误差传递机理。

等效刚度参数的选取是等效刚度建模法的关键，直接关系到模型的精度。早期的等效刚度建模方法中，只是简单的将结合面参数作为等效刚度参数等效为固定的刚度，导致建模的准确性较低。近年来学者们通过定义接触力与接触误差之间的关系来等效接触刚度，主要有传递函数法、模态分析法等。传递函数法最早由SHAMOTO等[17]提出，将滑块所受合力的幅值与导轨几何误差的幅值之比定义为传递函数$K(\omega)$，并取$K(0)$为等效刚度，运用静力平衡分析研究直线进给系统的位姿误差。随后，KHIM等[18]通过引入传递函数，简化滚动导轨运动误差的计算，结合静力平衡方程推导出滑块在导轨几何误差作用下的受力情况。根据滑块与导轨之间的变形关系，孙伟等[19]建立滚动导轨的等效刚度模型，研究了外载荷及预紧力对导轨接触刚度的影响。HWANG等[20]将传递函数应用于滑动导轨领域，根据滑块受载与位移变化的关系以及等效刚度特性，计算工作台的运动误差。除了传递函数法外，还有许多学者运用模态分析等方法进行接触刚度等效。

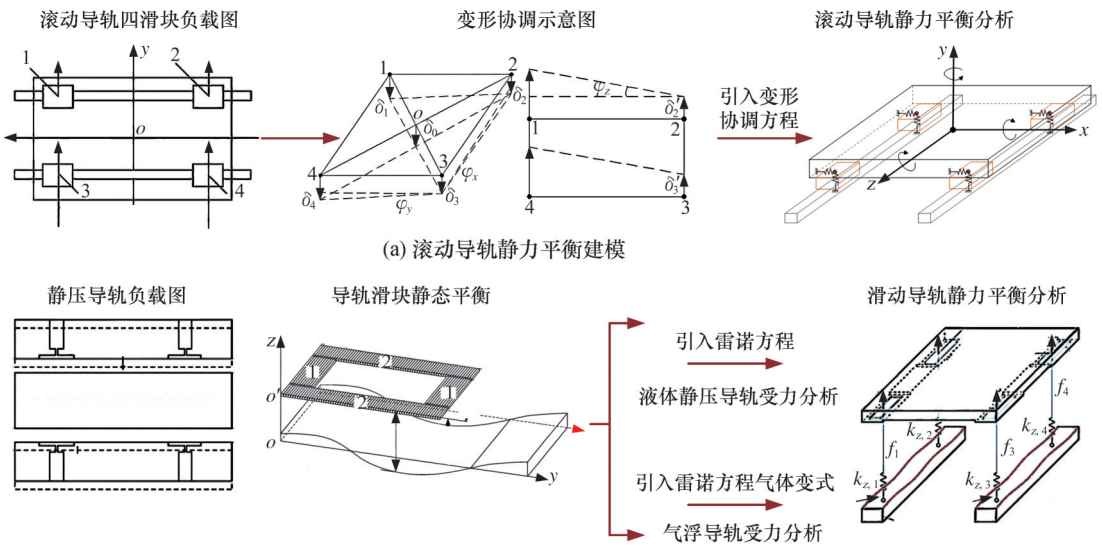


图 2　静力平衡建模方法

Fig.2　Static equilibrium modeling method

汪纯锋[21]通过固有频率与模态振型反向推演等效刚度参数，运用模态分析法，研究了结合面的接触及油膜刚度特性、导轨滑块受载特性。

以上方法都假设进给系统两条导轨的误差形态相同，具有一定局限性。KHIM 等[22]进一步将等效刚度模型扩展至三维空间，利用传递函数的大小定量地表示每个空间频率下的误差传递机理，成功预测了直线进给系统五自由度运动误差。后来，NI 等[23]通过静力平衡法与传递函数揭示导轨直线度误差波长与相位差对误差均化效应，进一步阐明了机床直线进给系统的误差传递机理。等效刚度建模时需要将误差数据转换为周期函数的形式，但由于导轨表面曲线的随机特性，无法准确反映实际的误差分布情况。

综上所述，等效刚度建模法通过引入等效刚度参数，显著降低了进给系统装配接触界面的模型复杂度，能够有效量化接触界面的刚度特性，为机床直线进给系统的误差传递机理研究提供重要的理论支持，如图 3 所示。图中，K 表示等效刚度；F 表示所受的力；$f(x)$ 表示滑块所受承载力；$e(x)$ 表示导轨误差；Q 表示滚动体所受载荷。然而，采用等效刚度建模法进行非线性系统建模时效果不佳，刚度等效依赖于假设和简化，可能导致分析结果出现偏差。

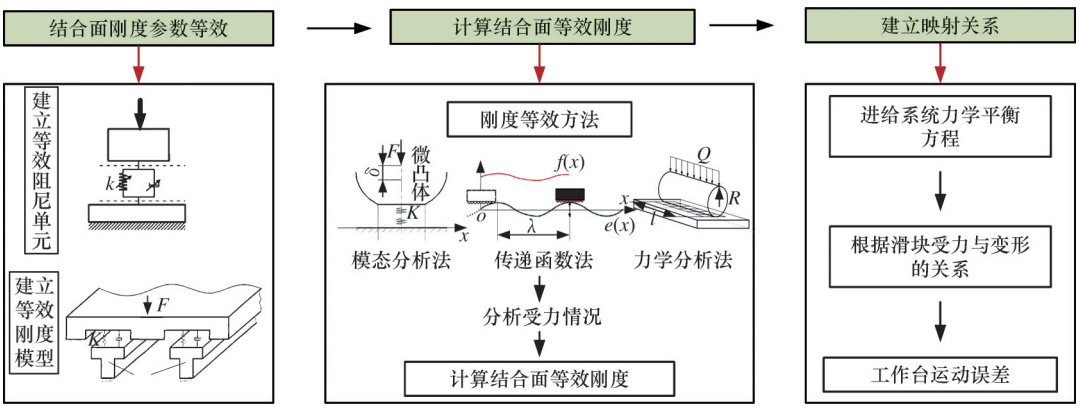


图 3　等效刚度建模方法

Fig.3　Equivalent stiffness modeling approach

1.1.3　齐次坐标变换建模法

齐次坐标变换建模法基于多体系统运动学理论，运用齐次坐标变换矩阵建立进给系统各零部件误差到工作台位姿误差的线性映射关系，在研究直线进给系统误差传递机理方面具有独特优势。其核心数学工具为齐次坐标变换矩阵，可表示为

$$T=T_xT_yT_zR_xR_yR_z \qquad T_t=T_xT_yT_z$$

$$R=R_xR_yR_z$$

式中：T_x、T_y、T_z 分别为沿 x、y、z 轴的平移矩阵；R_x、R_y、R_z 分别为沿 x、y、z 轴的旋转矩阵。

齐次坐标变换法主要通过构建多体系统运动学链，运用矩阵连乘来量化误差传递路径，利用齐

次变换矩阵描述部件间的误差传递。王伟文[24]推导出直线进给系统运动链的齐次变换矩阵，建立相邻零部件间的误差映射关系，实现了从导轨误差到工作台运动误差的定量关联。HWANG等[20]将齐次坐标变换矩阵用于滑动导轨的建模，通过建立滑动导轨运动误差的齐次变换矩阵，分析机床直线进给系统运动误差。此外，徐安林[25]通过建立齐次坐标变换矩阵进行了机床直线进给系统静刚度特性的研究。

上述模型基于刚体假设，无法表征接触变形，预测精度受限。为了求得任意外载荷对滚动直线导轨副各个方向变形量的影响，张巍等[26]运用齐次变换矩阵建立滚动直线导轨副的接触刚度模型，分析了滚动导轨预紧力和接触角对其刚度的影响规律。考虑到部件接触变形的影响，何改云等[27]结合赫兹接触理论，将滚动体接触变形纳入齐次坐标变换模型，进一步分析了导轨误差与工作台位姿误差间的传递规律，通过反向溯源的方法实现单轴几何误差的主动控制，但未考虑工作台弹性变形，重载工况下模型预测偏差增大。由于几何误差、弹性变形等因素的影响，实际移动副的运动参数通常呈现为离散数据，难以进行评价，为此，王德伦等[28]提出了一种基于离散误差不变量的移动副误差运动评价方法，通过提取约束曲线和曲面的不变量，确定空间准线误差密度与球面方向误差密度，实现离散运动轨迹的全局性质表征。在此基础上，吴煜等[29]进一步突破刚体假设局限，整合移动副的弹性约束特性，建立弹性移动副5维误差预测模型，揭示了机床直线进给系统零部件特征状态与运动误差之间的映射关系，显著提高模型的准确性与适用性。

总体来说，齐次坐标变换建模法通过构建齐次变换矩阵将复杂的误差传递问题转化为矩阵运算，描述各部件间的误差映射关系，能够有效揭示机床直线进给系统中各部件之间的误差传递规律。然而，该方法在处理非线性误差传递和动态误差时可能面临一定的局限性。

1.1.4 有限元建模法

有限元建模法通过精细的网格划分与复杂的边界条件设置，能够将直线进给系统中的零部件作为弹性体参与计算，模拟零部件间相互作用、接触非线性等耦合效应，揭示直线进给系统误差的产生与传递机理。

有限元建模过程中结合部的等效方法对仿真精度有着重要影响，确保结合部的建模精度是保证有限元仿真结果可靠性的关键。目前常用的结合部的建模方法有弹簧单元法和虚拟材料法，如图4所示。等效弹簧单元法将导轨滑块结合面的滚动体表示为等效弹簧单元，通过调整弹簧参数来模拟不同的接触状态和力学行为。HUNG[30]建立了两种滚珠滚道接触面的有限元接触模型，仿真结果证明，采用等效弹簧单元法进行导轨结

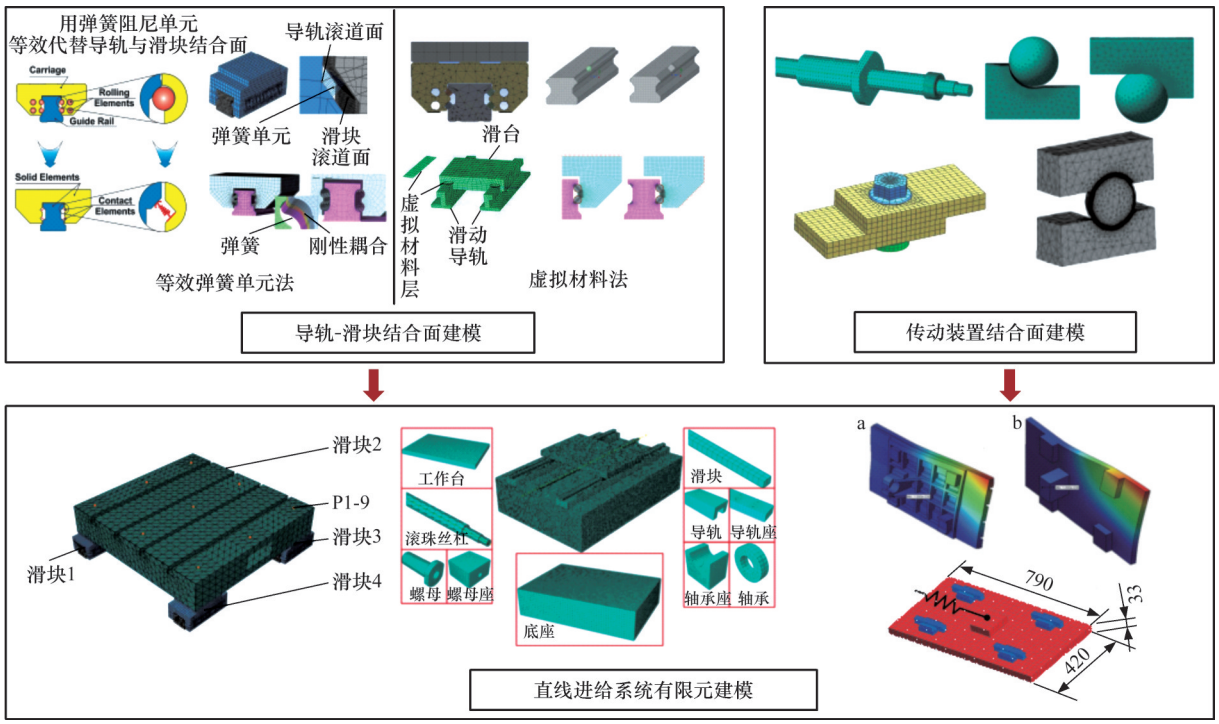


图4 直线进给系统有限元建模方法

Fig.4 Finite element modeling method for linear feed system

合部建模可以在保障仿真精度的同时显著提高计算效率。张耀满等[31]使用单向压缩弹簧单元模拟导轨滑块系统中滚珠的弹性接触，通过逐个调节弹簧阻尼单元的参数，分析导轨结合部的力学行为，提高有限元仿真精度。目前通用的等效弹簧单元建模法为MAJDA[32]提出的双导轨四滑块滚动导轨副有限元模型，该模型考虑到导轨几何误差的非线性特性，将滚动体与导轨和滑块的接触点模拟为弹簧单元，通过改变弹簧单元的长度模拟不同位置的导轨几何误差，进行导轨几何误差对工作台转角误差影响的研究。

等效弹簧建模需要对每个滚动体的弹簧阻尼参数进行建模和参数调整，建模过程较为繁琐，仿真效率较低，且忽略了单元间的耦合关系，难以全面反映接触界面的复杂力学行为。虚拟材料法能够更好地模拟接触面之间的力学特性，更适用于静压导轨结合部的有限元建模。TIAN等[33]基于赫兹接触理论和分形理论提出了一种基于虚拟材料假设的建模方法，通过虚拟各向同性材料假设，将微观接触行为与宏观力学特性关联，显著提高了结合部建模精度。孙伟等[34]引入假想弹性垫片，利用不同材料属性的虚拟材料模拟结合面的刚度，仿真分析了机床直线进给系统的位移情况。陈汀等[35]利用导轨结合部的有限元仿真结果对理论模型计算得到的滑块裙部变形量进行验证。汪纯峰[21]将滑动导轨结合面等效成虚拟材料层，构建“固体-等效间隙层-固体”接触有限元模型进行预应力模态分析，并得出相比于弹簧阻尼单元法建模，滑动导轨虚拟材料建模法更具优势的结论。

除了上述机床直线进给系统误差建模方法外，学者们还提出了多种其他建模方法。例如，HE等[36]提出一种分层建模法对直线进给系统导轨副的不同层面进行分层建模，分析误差在不同层面之间的传递机理，探讨误差从基面层—导轨层—滑块层—工作台层的传递机理，在细化误差来源分析及改进系统设计方面表现出了显著的优势。KHAN等[37]使用积分法研究了机床直线进给系统导轨误差到工作台误差间的传递机理。此外，还有学者提出了自创结合面单元、接触单元、梁单元和神经网络等建模方法，研究装配误差与运动误差映射关系，为机床进给系统误差传递机理的研究提供了不同途径。

综上所述，静力平衡建模法通过建立静力平衡方程来分析直线进给系统的力平衡关系，被广泛用于导轨副位移和负载分析中。等效刚度建模法将复杂系统简化为等效刚度模型，便于快速评估系统的动态特性。齐次坐标变换建模法基于机器人学的齐次坐标变换理论，通过建立各运动部件的变换矩阵，精确描述系统的运动学关系，揭示各部件之间的误差传递规律。有限元建模法将直线进给系统中的零部件作为弹性体，能够反映系统中各部件的弹性变形行为，通过仿真结果与理论模型的相互验证，更全面地分析系统的误差特性。

1.2　直线进给系统误差均化机理研究

在机床直线进给系统误差传递机理的研究过程中，学者们注意到各零部件在误差传递过程中呈现出显著的非线性特征，即各零部件之间会产生弹性形变，导致误差并非简单地按1∶1比例传递，而是在逐层传递过程中发生相互吸收、抵消和分散的现象，这种现象被定义为误差均化。

国内外学者深入研究了机床直线进给系统的误差均化机理，如图5所示。早期主要聚焦于滑动导轨副的误差均化机理研究。SHAMOTO等[17]采用半解析法研究滑动导轨轮廓误差与运动部件6项位姿误差的关系。XUE等[38]运用油膜厚度均化分析方法，计算了不同导轨误差分量对应的运动误差和均化系数，发现导轨误差波长对

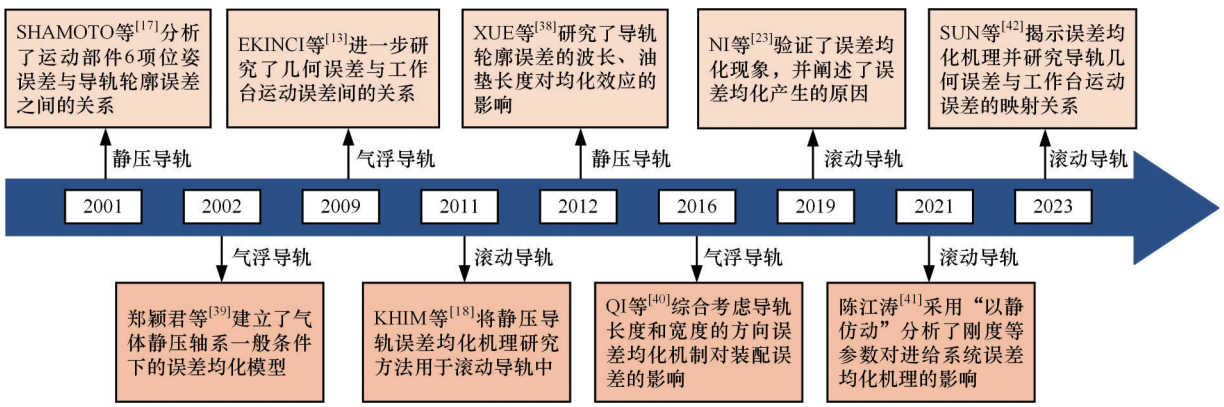


图5　机床直线进给系统误差均化机理研究现状

Fig.5　Research status of error homogenization mechanism of machine tool linear feed system

静压导轨的误差均化机理具有显著影响。郑颖君等[39]建立了在一般条件下气体静压轴系的误差均化模型，运用静力学理论计算了典型工况下气体静压轴承的误差均化系数。EKINCI等[13]运用静力平衡法分析了导轨几何误差与工作台运动误差两者间的误差均化关系，为气浮导轨的设计精度提供了理论支撑和实践指导。但上述研究主要集中在导轨长度方向的误差均化机理上，忽略了宽度方向上误差的影响。QI等[40]综合分析了导轨长度和宽度两个方向上的误差均化机理，进一步揭示了误差均化机理与导轨副装配精度之间的关系，将各个零部件的公差与进给系统运动误差联系起来。

与滑动导轨不同，滚动导轨副的导轨滑块间的误差均化现象主要源于滚动体与导轨接触面的弹性变形。KHIM等[18]将滑动导轨的误差均化机理研究方法应用于滚动导轨，提出了一种基于逆向分析的加工算法，分析工作台位姿态误差与导轨误差间的误差均化现象。NI等[23]综合运用静力平衡法及等效刚度法，验证了滚动导轨副误差均化现象，并深入分析了误差均化的具体成因，但未对误差均化系数进行定量分析。陈江涛[41]建立双导轨四滑块滚动导轨副误差均化模型，系统研究了滚动导轨副的误差均化机理，并量化了误差均化效应，发现导轨误差的波长是影响滚动导轨副误差均化作用的主要因素，导轨副垂直方向直线度误差影响工作台的垂直直线度误差、俯仰误差以及滚转误差，导轨副的水平方向直线度误差影响工作台的水平直线度误差和偏摆误差。上述研究主要集中在幅值对误差均化机理的影响上，没有考虑导轨误差形态的影响。SUN等[42]深入研究了不同误差形态下双导轨四滑块滚动导轨副结构参数对误差均化系数的影响，研究发现，直线进给系统的误差均化效果主要受导轨垂直方向直线度误差的影响。

总体来说，机床直线进给系统误差并非简单的线性传递，而是呈现出非线性特性，这主要是由于整个直线进给系统属于过约束系统，力-位移-误差多源因素之间互相耦合给误差建模和传递机理的研究带来较大困难。目前，静力平衡法、等效刚度法等建模方法已经被广泛应用于双导轨四滑块导轨副的误差建模中，不过这些误差建模方法通常需要大量的公式计算，或者仿真模型搭建困难。随着对机床精度需求的日益提高及非共面多导轨多滑块结构的应用，这种耦合特性更加复杂，在通用性和易用性方面仍面临挑战，大大增加了建模的复杂性和时间成本。未来需要更加关注非共面多导轨多滑块进给系统误差建模方法，建立更为精准的误差传递机理解析模型，指导机床直线进给系统的精度设计。

2 机床直线进给系统精度设计方法

机床直线进给系统精度设计是确保进给系统运动精度的关键环节，通过误差权重分析、精度优化设计以及仿真验证等环节，以机床进给系统各项性能指标为优化目标，以各项设计参数为设计变量，将进给系统的末端精度分配到各装配环节，确保直线进给系统运动部件的位姿误差符合设计要求。

2.1 误差权重分析

机床直线进给系统的装配精度受多种几何误差的共同作用，但不同误差对进给系统精度的影响程度存在显著差异，因此，分析各误差源对直线进给系统运动精度的影响权重，在设计中优先优化这些关键误差源，是进行直线进给系统精度优化设计的重要环节。

国内外学者对机床直线进给系统误差权重分析方法进行了广泛的研究，主要有层次分析法、灵敏度分析法等，如表1所示。层次分析法通过构建层次结构模型和判断矩阵来量化不同误差源，分析机床直线进给系统的误差权重。王之学等[43]通过构造判断矩阵量化各因素对滚珠丝杠误差的影响权重，验证了层次分析法在机床进给系统误差权重分析中的有效性，但层次分析法依赖精确数据，对复杂误差源的误差权重分析具有局限性。封志明等[44]引入模糊判断矩阵，利用模糊评判矩阵表达不确定信息，实现机床进给系统误差权重的模糊量化。此外，SAMVEDI等[45]进一步将模糊层次分析法和灰色关联分析方法相结合，进行误差权重计算，并利用灰色关联分析法对误差进行排序，提高误差权重分析的精确性。

表1 误差权重分析方法

Tab.1 Error sensitivity analysis method

方法	层次分析法	灵敏度分析法
理论基础	基于专家经验的主观权重排序，通过判断矩阵量化定性因素	基于数学模型或实验数据分析，量化参数变化对输出的影响
核心目标	解决多准则决策问题，确定误差源的相对重要性	识别关键敏感参数，评估参数对系统性能的贡献度
优缺点	优点：处理定性指标、快速决策 缺点：主观性强	优点：客观量化、动态耦合分析 缺点：依赖高精度模型、计算成本高
发展趋势	结合模糊矩阵处理不确定性，引入机器学习生成判断矩阵	使用神经网络代理模型加速计算

灵敏度分析法通过量化系统输出对误差源的敏感程度来识别关键误差项，以指导设计优先级。李自汉[46]运用灵敏度分析法研究了不同误差元素的影响机理，发现线性误差是影响进给系统精度的主要误差类型。然而，灵敏度分析法的准确性依赖于模型建立和假设条件，对非线性系统的灵敏度分析效果并不理想。因此，刘奕颖等[47]将灵敏度分析法与正交试验方法相结合，分析各项精度要求与机床运动轴误差公差带的映射关系，进一步提高灵敏度分析准确性。此外，学者们还提出了区间灵敏度分析法、多项式混沌展开理论分析法等进行机床直线轴关键几何误差的权重分析。

2.2　精度优化设计

机床直线进给系统的精度优化设计是精度设计的关键环节。根据误差权重分析结果，设立优化目标，定义约束条件，构建多目标优化模型，流程如图6所示，结合遗传算法、粒子群算法等优化算法进行机床直线进给系统优化设计。

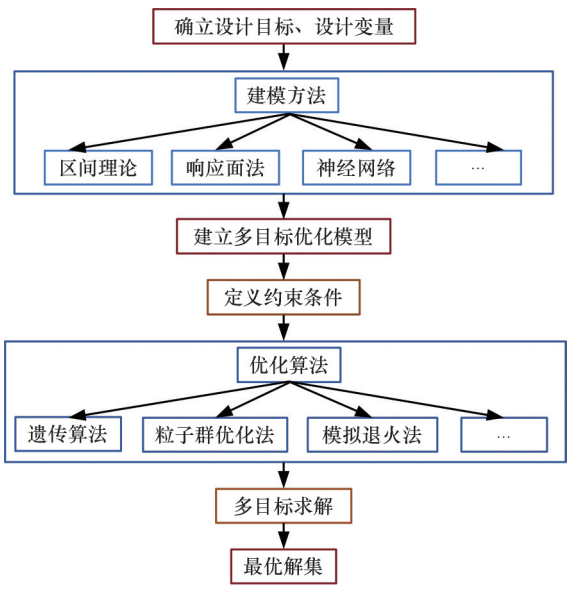


图6　直线进给系统多目标优化流程

Fig.6　Multi objective optimization process of linear feed system

对于直线进给系统多目标优化，由于设计变量与优化目标间难以建立确定的函数表达式，学者们研究了多种建模方法及优化策略。常用的建模方法包括二次多项式拟合和响应面法。二次多项式拟合通过简单的二次函数建立设计参数与系统响应的关系，适用于变量较少的误差敏感性分析；响应面法则可通过方差分析实现系统多变量及其复杂耦合的精细化建模与优化。

学者们运用不同的建模和优化方法，深入研究了机床直线进给系统多目标优化设计。苏芳等[48]借助二次多项式拟合方法，构建直线轴轮廓误差和定位误差与设计变量间的响应面模型，并利用多目标优化遗传算法获取优化目标的Pareto最优解集，该方法能较好地捕捉系统各变量间的非线性关系，但需要大量实验数据支持。石宏雨[49]采用神经网络代理模型，拟合设计变量与优化目标之间的响应面黑箱函数，对进给系统进行多目标优化，并结合遗传算法求解Pareto解集，有效平衡了设计变量与优化目标。葛紫阳等[50]结合响应面法和多目标遗传算法，选取滑块布局、底座内部加强筋厚度等8个参数作为设计变量，对双导程直线进给系统的结构进行优化，显著提高了系统的静动态特性。田文杰[51]则引入区间理论，将设计变量表示为区间向量形式，使几何误差源的精度设计值放宽至最大可行区间，克服了传统误差分配方案中设计变量取值不合理的问题。未来的研究可以进一步整合这些方法，充分发挥各自的优势，以实现直线进给系统更高效、更精确的多目标优化。

2.3　仿真验证

对于机床直线进给系统精度设计的仿真验证方法，目前常用的有蒙特卡罗法和极值法(表2)。

表2　仿真验证方法

Tab.2　Simulation verification method

仿真验证方法	特点	优势	应用场景
蒙特卡罗法	通过大量随机抽样来模拟系统不确定性因素	能考虑多种随机因素综合作用，提供系统性能统计分布信息，评估设计方案可靠性	系统存在多个不确定因素时，预测系统在不同概率下的精度表现
极值法	根据尺寸链分析组成环极限尺寸确定封闭环极限尺寸	计算简单直观，对精度进行保守评估，确保在最不利情况下系统精度仍能满足要求	初步设计评估、误差分析，判断设计方案是否满足精度要求

蒙特卡罗法通过随机采样和统计模拟来估计结果或计算积分，能有效应对多变量耦合及不确定性问题，因而广泛应用于机床直线进给系统精度设计的仿真验证。WANG等[52]运用蒙特卡罗法对机床直线进给系统进行抽样分析，确定了数控机床各轴的各项几何精度设计变量的初始值和上下限。唐宇航等[53]根据蒙特卡罗模拟采样机理，确定了对加工误差影响最大的机床几何误差。国外研究团队在蒙特卡罗法的基础上引入雅可比矩阵，运用旋量理论对机床的刚体运动进行数学描述，量化不同误差源对运动精度的贡献，为误差分配和优化设计提供科学依据[54]。

极值法通过分析误差源或设计参数公差允许的极限值来评估系统性能极限，保障优化方案的

鲁棒性与可靠性。邓敬亮等[55]通过分析尺寸在设计公差范围内的分布规律，提出了一种基于正态分布规律的概率法尺寸链设计方法，得出封闭环在设计要求区间内的概率值，以此评判优化设计参数的合理性。

上述的机床直线进给系统精度优化设计研究中，多数没有考虑用户工艺需求，为此，国内外学者提出了以用户工艺需求为目标的机床正向设计方法。正向设计流程如图7所示，包括几何精度正向设计、刚度设计、热平衡设计等。以提高机床加工精度为目标，SHI等[56]提出了一种机床刚度建模与刚度匹配方法，实现了自上而下的刚度设计，通过构建系统静刚度与各组件静刚度之间的关联模型来满足用户需求为目标，合理匹配各部件静刚度目标值。翁凌韬[57]提出了一种机床结构热误差与工作空间热误差建模方法，针对机床工作过程热源不对称性、温控能力不均衡问题，研究了各热源对机床部件热量传递规律，使机床直线进给系统能够更好地应对热因素的影响。

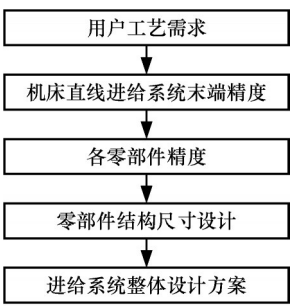


图7 直线进给系统正向设计流程图

Fig.7 Forward design flow chart of linear feed system

综上，本节从误差权重分析、精度优化设计和仿真验证三个方面梳理了直线进给系统的精度设计方法，然而，目前的精度设计研究主要集中在机床整机精度向单轴精度的分配上，对直线进给系统零部件间精度设计的关注较少，并且设计过程中未能充分考虑用户工艺需求，难以适应多样化的用户工艺和工况环境要求，在通用性和设计精度上面临诸多挑战。随着机器学习、人工智能、数字孪生等新兴技术的发展，未来研究应建立实时更新的精度优化系统，研究机床直线进给系统零部件间的精度设计，提高精度设计的全面性与可靠性，掌握正向设计的关键技术，实现更高效、更精准的机床直线进给系统的精度优化设计。

3 机床直线进给系统装配误差控制方法

上述理论建模和精度设计的结果需要通过装配误差控制来实现，因此进行机床直线进给系统装配误差控制方法的归纳，对提高该系统的运动精度具有重要意义。

3.1 机床直线进给系统装配工艺

机床直线进给系统各零部件装配误差的控制是装配后工作台运动误差的决定因素，在装配过程中，需要严格控制装配流程中各个环节的误差以抑制总体装配误差。机床直线进给系统装配流程如图8所示，通过误差溯源控制机床直线进给系统的装配误差，可避免单向设计的局限性。

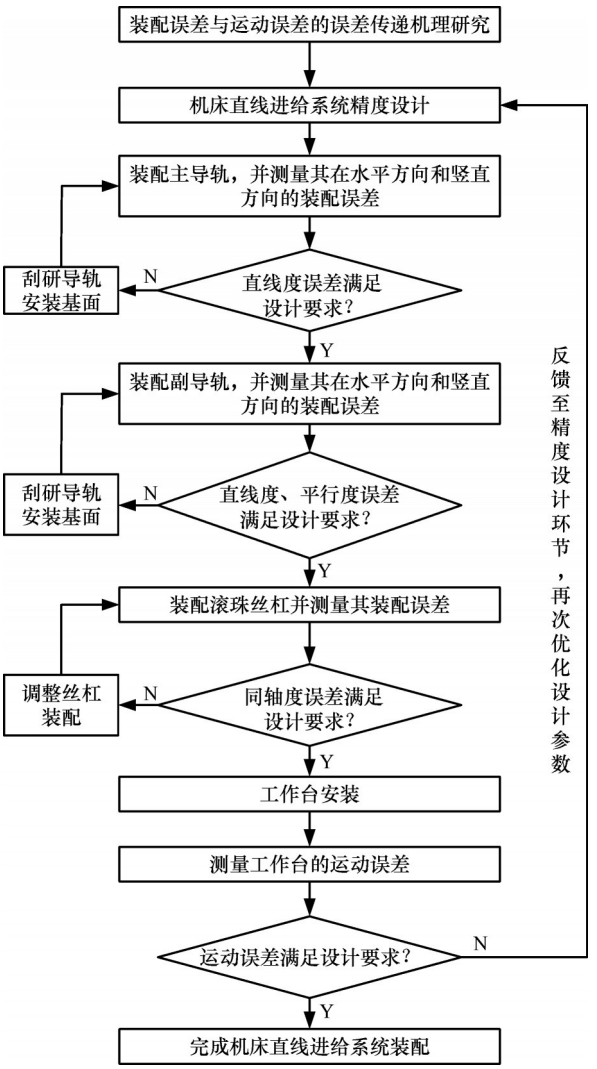


图8 直线进给系统装配流程

Fig.8 Assembly process of linear feed system

该系统的核心在于精度设计→装配阶段→反馈环节→再次装配的过程[58]，具体步骤如下。

1）精度设计：通过公差分配优化合理分配各部件的公差范围，指导装配工艺规划。

2）装配阶段：进行导轨副、丝杠以及工作台的安装，并检测装配误差是否满足设计要求，若满足要求则进行下一步安装，若不满足则刮研导轨安装基面修正误差，直至满足装配要求。

3）反馈环节：装配完成后检测运动部件位姿

误差，若满足设计要求则完成装配，若不满足设计要求则将检测结果反馈至设计环节，再次优化精度设计参数。

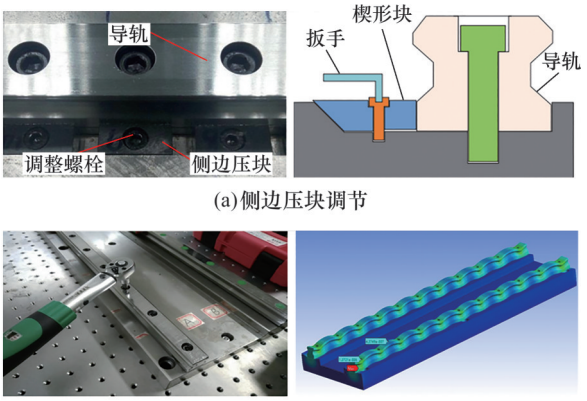
4）再次装配：基于优化后的参数再次进入装配阶段。通过精度设计→装配工艺→反馈环节控制装配误差，直至运动精度满足设计要求。

3.2　导轨装配误差控制方法

导轨是直线进给系统的基础支撑与导向结构，控制导轨的直线度误差及平行度误差是保证各部件装配精度与工作台运动精度的基础。

装配导轨前，对其安装基面进行刮研处理，精细加工调整安装基面的微观形态，保证导轨安装基面精度。研究发现，垂直方向刮研量遵循导轨长度方向中间大两端小的原则，即将导轨的安装基面刮研成凹形时，装配后的导轨误差的幅值最小。目前导轨安装基面刮研的主要方法仍采用人工刮研的形式，尤其是在一些高精度、复杂形状的基面加工中，具有不可替代的优势。然而人工刮研存在对操作者经验依赖性强、刮研效率低、工人培养成本高等局限性，难以满足现代制造业规模化与高精度需求。为了推动导轨安装基面刮研的自动化，国内外学者进行了广泛的研究。孟凡义[59]研发了动力刮刀及半自动刮研机等辅助刮研工具，实现了局部区域半自动刮研，但其单一往复运动模式、缺乏回程拾刀功能限制了其适用性。HSIEH等[60]通过建立结构化表面与结构化砂轮之间的映射矩阵，设计与刮研图案相对应的结构化砂轮，模拟刮研纹理，显著提高刮研效率，不过仍需人工干预路径规划及参数调整，难以在复杂曲面和高精度场景运用。目前自动化刮研技术的研究主要聚焦于表面形貌数字化表征与刮研表面质量检测，利用三维形貌仪、分水岭算法[61]等方法构建刮研表面参数模型，量化刮研表面接触特性，为自动化刮研提供理论依据。随着机器视觉和激光检测技术的发展，FAN等[62]将其引入刮研表面质量检测中，成功实现了刮研高点识别以及刮研质量的实时监测。

装配过程由于定位螺钉、导轨自身重力等多种因素的综合影响，使得导轨变形误差难以控制，国内外学者研究了多种导轨装配误差控制方法，如通过调节螺栓预紧力和拧紧顺序的方法控制导轨形变（图9）。黄灿[63]建立螺栓连接有限元模型，分析了不同情况下螺栓连接产生的应力分布状态，为设计螺栓的预应力提供参考。CORIA等[64]通过比较各预紧顺序下竖直方向直线度的变化情况，发现采用标准预紧力并按照从中间到两边的预紧顺序进行装配时导轨的变形量最小。此外，学者们还通过支撑预变形法使零部件在装配前的支撑阶段呈现预变形，通过优化导轨支撑件布局和结构设计增强接触面刚度来控制装配误差[65]。



(a)侧边压块调节

(b)螺栓预紧

图9　螺栓预紧[63]

Fig.9　Pre tightening of bolts[63]

然而，上述控制方法仍然难以完全消除导轨变形误差，于是学者们提出了反变形法，即通过提前对直线进给系统装配时可能出现的变形误差进行预测，将安装面加工成微圆弧形。胡敏等[66]运用反变形加工法进行导轨安装面的预加工，使其结构受力时能够与重力变形相补偿，抵消横梁和运动部件在重力作用下引起的变形，然而，该方法未能明确安装基面的刮研量，在安装过程中需要反复调整。徐源培[67]综合考虑重力变形和导轨各位置的变形曲线提出了导轨安装基面刮研曲线设计方法，以指导刮研操作量，但曲面成形精度的工艺控制仍面临挑战。为了提高导轨装配的一致性，孙光明等[68]提出了一种基于工艺过程控制的反变形加工方法，如图10所示（δ_y为导轨垂直方向形变），运用“镜像”反变形法和跨桥法控制导轨副的平行度误差，提高装配精度，为精密装配提供了有效的技术手段。刘志峰等[69]提出了一种基于装配变形反修制造误差的导轨装配精度控制方法，该装配方法可以使导轨装配直线度误差减小64.5%。此外，吴煜等[29]还提出采用多点工艺参数优化法控制装配误差，如图11所示，通过在导轨螺钉处施加侧向位移，调整导轨几何误差并减小直线轴装配误差。

早期机床导轨误差测量工作主要依赖于指示表、钢尺和水平仪等传统测量工具[70]，由操作工人利用测量工具进行直线度误差的手动测量，至今仍被广泛应用于机床初加工阶段以及精度要求不高的误差测量工作。手动导轨测量方法虽然操作简单、成本低廉，但受环境和操作人员经验影响较

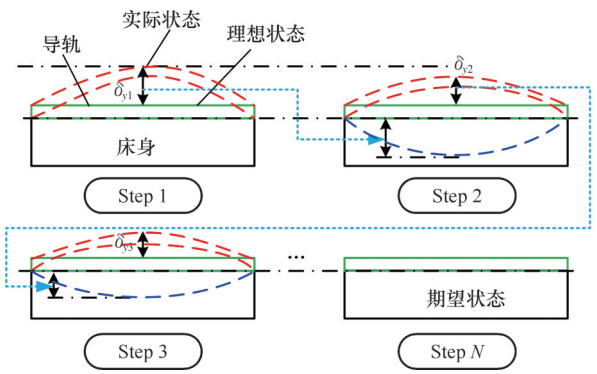


图10 反变形加工法[68]

Fig.10 Anti deformation processing method[68]

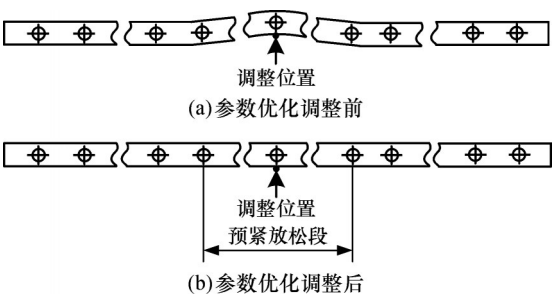


图11 多点参数优化法[29]

Fig.11 Multi point parameter optimization method[29]

大，容易引入阿贝误差，影响测量结果的准确性。随着机床精度要求的提高，光学测量仪器逐渐被引入到导轨直线度误差的测量领域。激光准直仪和激光干涉仪等光学测量仪器[71]能够通过平行光束实现非接触式测量，有效避免阿贝误差的影响。直线度误差检测方法如表3所示。

表3 直线度误差测量方法

Tab.3 Measurement method for straightness error

测量方法	测量原理图	测量原理	优缺点
指示表法	测微仪 被测工件 测量基准 测微仪台架	以平尺或平板作为基准，通过指示表读取工件表面的形位误差	优点：操作简单、成本低等 缺点：对接触面形状有要求，测量精度有限
水平仪法	水平仪 桥板 0 L 1 L 2 L 3 L 4	通过观察水平仪中的水泡变化测量相邻跨距的角度变化，进而计算误差	优点：精度较高，适合大型工件 缺点：适用于相对较短的测量距离
激光干涉仪法	1 2 3 4 1.激光准直仪 2.导轨 3.靶镜 4.五角棱镜	利用两束不同频率的激光束由于光程差造成的频率差来测量直线度误差	优点：精度高，可同时测量水平和垂直方向 缺点：受环境影响大，仪器价格昂贵
激光准直仪法	1 2 3 4 5 6	利用激光束的直线传播特性，通过反射分析激光束的位置变化来测量导轨直线度	优点：精度高，可以实时测量 缺点：随着测量距离增加精度降低，成本较高

由于导轨座的安装面和导轨加工误差，使得导轨装配过程中不可避免地产生装配误差，故主导轨装配时需进行直线度误差检测，检测合格后才能进行副导轨安装，安装过程中需检测多个导轨间的平行度误差（平行度误差检测方法见图12）以保证导轨平行度，从而保障机床直线进给系统的稳定性。

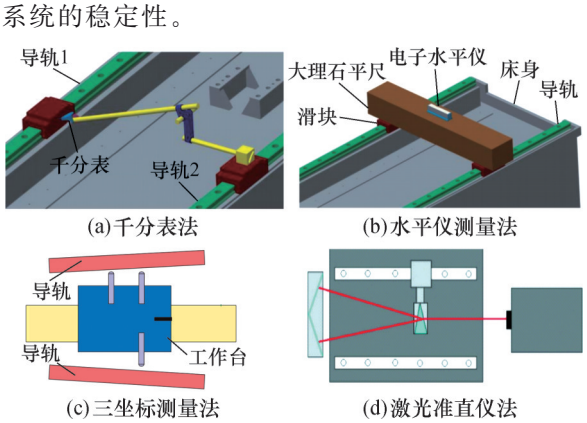


图12 平行度误差测量方法

Fig.12 Measurement method for parallelism error

3.3 丝杠装配误差控制方法

装配过程中滚珠丝杠通过前后两个轴承座固定在床身上，并通过丝杠螺母将工作台与丝杠连接，从而实现工作台的直线运动。受滚珠丝杠装配误差的影响，丝杠旋转轴与电机输出轴无法完全重合，产生角度偏差，使工作台在运动过程中出现偏移或振动，此类误差称为滚珠丝杠副同轴度误差。

同轴度误差是判断机床滚珠丝杠装配质量的关键指标，在装配过程中应尽可能减小丝杠在水平和垂直方向的装配误差，控制丝杠同轴度误差，丝杠装配误差检测方法如图13所示。

目前常用的丝杠同轴度误差测量方法有千分表、激光准直仪和三坐标测量仪[72]测量法。千分表测量法主要配合校准芯轴进行接触式测量。该方法通过将高精度芯轴安装于轴承座内孔，利用千分表检测芯轴旋转时的径向跳动，计算同轴度偏差，其优势在于操作简单、成本低廉，广泛应用于车间装配初调阶段或精度要求较低的场合。激

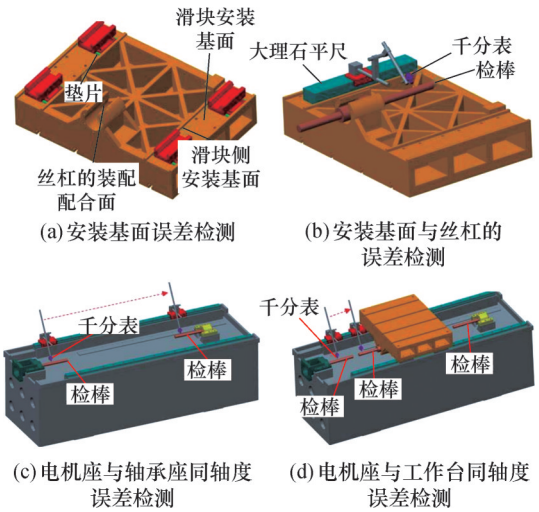


图 13　丝杠装配误差检测

Fig.13　Screw assembly error detection

光准直仪测量法能够利用准直激光束建立理论基准轴线，通过位置敏感探测器计算同轴度误差，可识别周期性误差，其动态检测精度达微米级，主要用于精密机床的滚珠丝杠装配。三坐标测量仪对丝杠两端轴承座内孔、丝杠轴径等关键特征进行扫描，通过软件拟合轴线，计算两轴线的空间偏差，具有检测数据全面等优势，不过设备成本较高，通常用于实验室的高精度误差检测。

摩擦和运动产生的热量会造成滚珠丝杠受热伸长，导致传动精度降低。为解决丝杠受热伸长问题，学者们提出了丝杠预拉伸法，即在安装滚珠丝杠丝副时，利用丝杠两端支承轴承将其进行预拉伸，使其伸长量恰好等于丝杠的热伸长量，依次抵消丝杠热变形及其弹性变形，如图 14 所示。

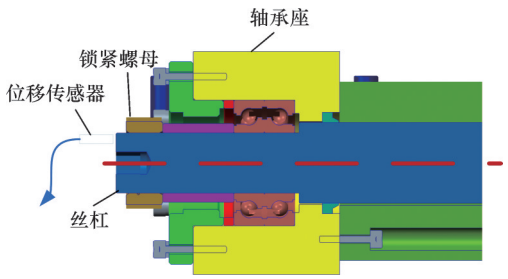


图 14　丝杠预拉伸

Fig.14　Lead screw pre stretching

通常采用螺母背紧的方式进行丝杠预拉伸，不过这种预拉伸方法在丝杠直径较大时拉伸力无法满足要求，限制了其在高精度数控机床中的应用。研究发现，随着丝杠预拉伸量的增加，直线进给系统运动误差先减小然后趋于稳定，因此需要精确控制丝杠预拉伸量。陈维范等[73]通过理论分析和计算确定预拉伸量和预拉伸力矩，设计了预拉伸滚珠丝杠支承结构，通过工件加工温升试验和定位误差检测，证明了该预拉伸方法的可行性。胥云等[74]从丝杠传动结构优化入手，研究了一种丝杠精确预拉伸方法，该方法通过设计丝杠滚道变形量，使丝杠在热变形时能够精确抵消热变形，实现了丝杠预拉伸量的精确控制，可广泛应用于高精度数控机床领域的丝杠精确预拉伸。

学者们还研究了预紧力、惯量比等因素对丝杠运动误差的影响，研究了装配过程中的平行度误差和预紧力偏差对丝杠运动误差的影响[75]，以及伺服电机与负载惯量匹配问题，研究了惯量比对滚珠丝杠动态性能的影响规律，为装配误差控制提供了重要参考[76]。

3.4　运动部件 6 项位姿误差检测

机床直线进给系统的运动过程中会产生 6 项位姿误差，通过分析运动误差测量结果，可针对性地修正装配误差。

在机床直线轴运动误差测量领域，单参数或少参数直线轴运动误差测量方法已相当成熟。通常采用水平仪和测微仪等进行直线度误差测量；采用光电自准仪和激光干涉仪等光学仪器通过检测光线的偏移量来评估偏摆角和俯仰角误差[77]。直线进给系统的运动误差测量方法如表 4 所示。

表 4　直线进给系统运动误差测量方法

Tab.4　Measurement method for motion error of linear feed system

测量方法	原理	测量误差
水平仪	将水平仪沿工件表面放置，观察气泡的位置偏移，通过偏移量来计算角度误差	角度误差
	通过角度读数与桥板跨距进行简单的计算，通过角度换算间接得到被测物的直线度	直线度误差
测微仪	通过调整测量嘴与待测物体之间的接触，并结合主尺和微动螺杆上的刻度，可以直接读取物体的尺寸及其微小变化，实现高精度的测量	角度误差
自准仪	利用激光产生的平行光束，结合光学准直原理，通过比对光束与基准水平或垂直线之间的偏差来测量角度误差	角度误差
激光干涉仪	利用激光的相干性和干涉现象，通过比较待测直线与理想直线之间的光程差来测量直线度误差	直线度误差
	通过观察和分析这些干涉条纹来测量微小的位移、角度和其他几何变化	角度误差
	线性反射镜发生位移时发生干涉，会出现明暗相间的变化，通过检测单元得到直线轴在这个方向上的距离变化，求得直线轴的定位误差	定位误差
激光光栅测量	通过栅格宽度和移动的栅格数来确定位移量，并通过光敏元件将周期性变化的光信号转换为正弦或方波信号，进而求出准确的线性位移	定位误差

随着对机床精度和测量效率要求的不断提高，传统的单参数或少参数测量方法已难以满足

高精度、多参数同时测量的需求，许多学者研究了机床直线进给系统6项运动误差的同时检测技术，通过结合干涉测量、激光准直、衍射光栅等多种技术，开发了多种多运动误差同时测量方法。如基于干涉测量方法利用差分波传感技术，抑制双频光混叠造成的非线性误差以及消除自由度之间的串扰误差，实现了多运动误差同步测量[78]，但传统外差干涉技术在大行程测量方面存在局限性。基于激光准直技术的测量方法能够通过激光反射光束的位置偏移获得除定位误差外的5项运动误差。结合扩束器使用，还可以有效减小光束的发散，提高误差测量精度，但测量准确性受限于测量单元与误差敏感元之间的距离，对精度影响较大。

然而，以上测量方法都难以同时测量定位误差，WANG等[79]另辟蹊径改变测量光线的传播方向，将定位误差转化为面内位移，根据光栅尺上光斑位置的变化，实现了直线轴6项运动误差的同时测量。目前，雷尼绍公司研发的非接触式XM-60激光干涉仪[80]是市面上较为成熟和稳定的直线轴多自由度误差测量仪器之一，通过一次测量即可获取直线轴6项运动误差参数，在高端机床的直线进给系统运动误差检测中得到广泛应用。

总之，如今机床直线进给系统运动误差检测技术取得显著进展，实现了直线轴运动误差的实时测量，根据装配误差与运动误差间的映射关系，揭示装配过程存在的误差，反馈到精度设计环节优化设计参数，为机床直线进给系统的装配误差控制提供理论依据和技术支持。不过现有的机床直线进给系统误差检测技术的研究主要集中在单个部件的误差检测上，缺乏部件间相对误差及误差关联性的测量方法。未来应结合新型传感器和智能算法等新型技术，研究部件间相对误差及其关联性的检测方法，实现更高精度以及更高效的误差测量。

4 未来研究方向

1)在直线进给系统误差传递机理方面，关注非共面多导轨多滑块进给系统误差传递机理研究，运用弹性力学、板壳力学等理论，建立更为精准的解析模型，进一步揭示机床直线进给系统的误差传递机理。

2)在直线进给系统精度设计方面，未来应关注进给系统零部件间的精度设计，考虑导轨几何误差“形态”设计，研究以工艺需求为出发点的正向设计方法。

3)在直线进给系统装配工艺方面，未来应开发智能化刮研装备，实现装配基面误差的定向、定量刮研，将精度设计结果切实落实到装配过程，并应用数字孪生、人工智能等新兴技术优化装配工艺，推动装配误差控制的研究。

4)在直线进给系统误差检测方面，未来应注重零部件间相对误差及其关联性误差的检测方法，开发关联性误差的检测系统，更精准、高效地指导装配过程中的误差控制。

参考文献：

[1] MUFAZZAL S, MUZAKKIR S M, KHANAM S. Numerical Investigation of the Effect of Ball Bearing Geometry on Oil Film Damping due to Lubricated Contact at Different Loads[M]. Singapore: Springer Singapore, 2021.

[2] HUI Y, MEI X, JIANG G, et al. Assembly Quality Evaluation for Linear Axis of Machine Tool Using Data-driven Modeling Approach[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2022, 33(3): 753-769.

[3] 季泽平，田春苗，郭世杰. 数控机床几何误差研究现状与展望[J]. 航空制造技术，2021，64(22)：65-77.
JI Zeping, TIAN Chunmiao, GUO Shijie. Research Status and Prospect of Geometric Error of CNC Machine Tools [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(22): 65-77.

[4] LEE J H, LIU Y, YANG S H. Accuracy Improvement of Miniaturized Machine Tool: Geometric Error Modeling and Compensation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(12/13): 1508-1516.

[5] 徐许林，杨双双，饶建华，等. 机床直线导轨的单元化及发展[J]. 机床与液压，2017，45(13)：159-164.
XU Xulin, YANG Shuangshuang, RAO Jianhua, et al. Unitization of Linear Guide in Machine Tools and Its Development[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(13): 159-164.

[6] 王骁鹏，赵新泽，许翔，等. 直线运动滚动导轨副混合润滑研究[J]. 振动与冲击，2020，39(9)：260-266.
WANG Xiaopeng, ZHAO Xinze, XU Xiang, et al. Mixed Lubrication of a Linear Motion Rolling Guideway Pair[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(9): 260-266.

[7] 屈重年，伍良生，肖毅川，等. 机床导轨技术研究综述[J]. 制造技术与机床，2012(1)：30-36.
QU Chongnian, WU Liangsheng, XIAO Yichuan, et al. Summary of Guideway Technology Research on Machine Tools[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2012(1): 30-36.

[8] 周传宏，孙健利，杨叔子. 精密滚动直线导轨副工作台静刚度研究[J]. 机械设计，1999，16(5)：30-32.
ZHOU Chuanhong, SUN Jianli, YANG Shuzi. Study on Static Stiffness of Precision Rolling Linear Guide Table [J]. Journal of Machine Design, 1999, 16(5): 30-32.

[9] WU J, WANG J, WANG L, et al. Study on the Stiffness of A 5-DOF Hybrid Machine Tool with Actuation Redundancy[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(2): 289-305.

[10] 韩凡滨. 滚动直线导轨副工作台运动精度分析[D]. 西安：西安工业大学，2023.
HAN Fanbin. Analysis of the Motion Accuracy of the Worktable with Linear Rolling Guide[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023.

[11] SUN W, KONG X, WANG B, et al. Statics Modeling

and Analysis of Linear Rolling Guideway Considering Rolling Balls Contact[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(1): 168-179.

[12] 汤鹏飞. 滚动直线导轨副四滑块工作台静刚度与载荷分布研究[D]. 南京:南京理工大学, 2023.
TANG Pengfei. Research on Static Stiffness and Load Distribution of Four Slider Worktable with Rolling Linear Guide Pair[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023.

[13] EKINCI T O, MAYER J, CLOUTIER G M. Investigation of Accuracy of Aerostatic Guideways[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(6): 478-487.

[14] 张朋海. 气浮垫的误差均化能力研究[J]. 润滑与密封, 2024, 49(6):19-28.
ZHANG Penghai. Research on Error Averaging Ability of Air Pad[J]. Lubrication Engineering, 2024, 49(6): 19-28.

[15] ZHA J, XUE F, CHEN Y. Straightness Error Modeling and Compensation for Gantry Type Open Hydrostatic Guideways in Grinding Machine[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 112: 1-6.

[16] 查俊, 陈勃昊. 机理驱动的闭式静压导轨运动误差建模方法[J]. 机械工程学报, 2025, 61(11): 301-310.
ZHA Jun, CHEN Bohao. Mechanism-driven Motion Error Modeling for Closed Hydrostatic Guideways[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(11): 301-310.

[17] SHAMOTO E, PARK C H, MORIWAKI T. Analysis and Improvement of Motion Accuracy of Hydrostatic Feed Table[J]. CIRP Annals, 2001, 50(1): 285-290.

[18] KHIM G, PARK C H, SHAMOTO E, et al. Prediction and Compensation of Motion Accuracy in a Linear Motion Bearing Table[J]. Precision Engineering, 2011, 35(3): 393-399.

[19] 孙伟, 孔祥希, 汪博, 等. 直线滚动导轨的Hertz接触建模及接触刚度的理论求解[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 230-234.
SUN Wei, KONG Xiangxi, WANG Bo, et al. Contact Modeling and Analytical Solution of Contact Stiffness by Hertz Theory for the Linear Rolling Guide System[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 230-234.

[20] HWANG J, PARK C H, KIM S W. Estimation Method for Errors of an Aerostatic Planar XY Stage Based on Measured Profiles Errors[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 46(9): 877-883.

[21] 汪纯锋. 润滑导轨结合面的刚度建模与等效间隙模型研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2017.
WANG Chunfeng. Study on Stiffness Modeling and Equivalent Clearance Model of Lubrication Guide Joint Surfaces [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.

[22] KHIM G, OH J S, PARK C H. Analysis of 5-DOF Motion Errors Influenced by the Guide Rails of an Aerostatic Linear Motion Stage[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(2): 283-290.

[23] NI Y, ZHOU H, SHAO C, et al. Research on the Error Averaging Effect in a Rolling Guide Pair[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 1-12.

[24] 王伟文. 精密多轴数控机床误差建模研究[D]. 长春:长春工业大学, 2020.
WANG Weiwen. Research on Error Modeling of Precision Multi-axis CNC Machine Tools[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2020.

[25] 徐安林. 高性能直驱混联数控机床静刚度分析[J]. 机床与液压, 2020, 48(9): 158-161.
XU Anlin. Static Stiffness Analysis of a High Performance Hybrid CNC Machine Tool Driven by Linear Motor[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(9): 158-161.

[26] 张巍, 王民, 孙乐乐. 考虑预紧力和接触角变化的直线滚动导轨副刚度建模与分析[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(1): 56-63.
ZHANG Wei, WANG Min, SUN Lele. Stiffness Modeling and Analysis Considering Influences of Preload and Contact Angle of a Linear Rolling Guide[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(1): 56-63.

[27] 何改云, 王凯, 郭龙真, 等. 导轨平行度误差对工作台运动误差影响的建模与分析[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(11): 1705-1709.
HE Gaiyun, WANG Kai, GUO Longzhen, et al. Influencing Modeling and Analysis of Guide Parallelism Error on Table Motion Error[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(11): 1705-1709.

[28] 王德伦, 吴煜, 王智, 等. 移动副离散误差运动的不变量评价方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23): 1-9.
WANG Delun, WU Yu, WANG Zhi, et al. Evaluation Based on Invariants for Discrete Error Motion of Prismatic Pair [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(23): 1-9.

[29] 吴煜, 申会鹏, 孙璇, 等. 机床弹性移动副五维误差预测模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 121-126.
WU Yu, SHEN Huipeng, SUN Xuan, et al. 5D Error Prediction Model for Elastic Prismatic Pair of Machine Tool [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2019, 47(11): 121-126.

[30] HUNG J P. Load Effect on the Vibration Characteristics of a Stage with Rolling Guides[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(1): 89-99.

[31] 张耀满, 刘春时, 谢志坤, 等. 数控机床直线滚动导轨结合面有限元分析[J]. 制造技术与机床, 2007(7): 75-78.
ZHANG Yaoman, LIU Chunshi, XIE Zhikun, et al. Finite Element Analysis of NC Machine Tool Considering Linear Rolling Guide-way[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2007(7): 75-78.

[32] MAJDA P. Modeling of Geometric Errors of Linear Guideway and Their Influence on Joint Kinematic Error in Machine Tools[J]. Precision Engineering, 2012, 36(3): 369-378.

[33] TIAN H, LI B, LIU H, et al. A New Method of Virtual Material Hypothesis-based Dynamic Modeling on Fixed Joint Interface in Machine Tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(3): 239-249.

[34] 孙伟, 鲁明, 汪博, 等. 考虑导轨结合部特性的立柱-主轴系统动静力学特性分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(23): 2874-2878.
SUN Wei, LU Ming, WANG Bo, et al. Dynamics and Statics Analysis of Column-spindle System Considering Guide Joint Characteristics[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(23): 2874-2878.

[35] 陈汀, 黄其柏. 一种计及滑块裙部变形的滚珠直线导轨副垂直刚度模型[J]. 中国机械工程, 2011, 22(13): 1546-1550.
CHEN Ting, HUANG Qibai. Vertical Stiffness Model of Linear Motion Guide Considering Flexibility of Carriage [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(13): 1546-1550.

[36] HE G, SUN G, ZHANG H, et al. Hierarchical Error

Model to Estimate Motion Error of Linear Motion Bearing Table[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93: 1915-1927.

[37] KHAN A W, CHEN W. Correlation between Linear and Angular Kinematic Errors in Prismatic Joint of Machine Tools[J]. International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems, 2009, 75(11): 87-95.

[38] XUE F, ZHAO W, CHEN Y, et al. Research on Error Averaging Effect of Hydrostatic Guideways[J]. Precision Engineering, 2012, 36(1): 84-90.

[39] 郑颖君，李东升. 气体静压轴系径向回转误差均化机理的研究[J]. 工具技术，2002，36(2)：38-40.
ZHENG Yingjun, LI Dongsheng. Study on Averaging Mechanism of Radial Rotating Errors of Aerostatic Bearings [J]. Tool Engineering, 2002, 36(2): 38-40.

[40] QI E, FANG Z, SUN T, et al. A Method for Predicting Hydrostatic Guide Error Averaging Effects Based on Three-dimensional Profile Error [J]. Tribology International, 2016, 95: 279-289.

[41] 陈江涛. 直线滚动导轨副误差均化效应建模与分析[D]. 天津：天津大学，2021.
CHEN Jiangtao. Modeling and Analysis of Error Homogenization Effect of Linear Rolling Guide Pair[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.

[42] SUN G, CHEN S, SUN M, et al. Research on the Error Averaging Effect of Linear Feed Systems for Precision Machine Tool[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2024, 15(12): 103101.

[43] 王之学，王军，舒启林，等. 基于层次分析法滚珠丝杠副评价系统的研究[J]. 工具技术，2015，49(4)：95-98.
WANG Zhixue, WANG Jun, SHU Qilin, et al. Research of Evaluation System of Ball Screws Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Tool Engineering, 2015, 49(4): 95-98.

[44] 封志明，殷国富. 基于层次分析法的数控机床精度模糊评价[J]. 高技术通讯，2014，24(2)：183-188.
FENG Zhiming, YIN Guofu. Fuzzy Comprehensive Evaluation of the Accuracy of CNC Machine Tools Based on AHP [J]. Chinese High Technology Letters, 2014, 24(2): 183-188.

[45] SAMVEDI A, JAIN V, CHAN F T. An Integrated Approach for Machine Tool Selection Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Grey Relational Analysis[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(12): 3211-3221.

[46] 李自汉. 数控机床关键误差识别、建模及实时补偿应用研究[D]. 上海：上海交通大学，2020.
LI Zihan. Research on the Identification, Modeling and Compensation Method for CNC Machine Tool Key Error Sources [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.

[47] 刘奕颖，郭俊康，李宝童，等. 精密机床加工误差灵敏度分析与公差设计[J]. 机械工程学报，2019，55(17)：145-152.
LIU Yiying, GUO Junkang, LI Baotong, et al. Sensitivity Analysis and Tolerance Design for Precision Machine Tool [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 145-152.

[48] 苏芳，罗茹楠，刘艳明，等. 双轴联动进给系统多目标优化设计与研究[J]. 工程设计学报，2020，27(4)：456-462.
SU Fang, LUO Runan, LIU Yanming, et al. Design and Research on Biaxial Linkage Feed System Based on Multi-objective Optimization[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2020, 27(4): 456-462.

[49] 石宏雨. 基于神经网络代理模型&遗传算法的高速高精进给系统多目标优化设计[D]. 杭州：杭州电子科技大学，2023.
SHI Hongyu. Multi-objective Optimization Design of High-speed and High-precision Feed System Based on Neural Network Agent Model and Genetic Algorithm[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2023.

[50] 葛紫阳，王立平，马凤举，等. 一种用于滑块磨床的双导程进给系统静动态特性分析[J]. 机械制造与自动化，2024，53(6)：12-16.
GE Ziyang, WANG Liping, MA Fengju, et al. Static and Dynamic Characteristics Analysis of Double Lead Rolling Linear Feed System for Slider Grinding Machine[J]. Machine Building & Automation, 2024, 53(6): 12-16.

[51] 田文杰. 精密卧式加工中心几何精度设计及误差补偿方法研究[D]. 天津：天津大学，2014.
TIAN Wenjie. Investigation into Accuracy Design and Error Compensation of High-precision Horizontal Machining Centers[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

[52] WANG S, HE G, ZHANG D, et al. Innovative Design Methods for the Geometric Accuracy of Machine Tool Guide Rail Oriented to Spatial Accuracy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 119: 483-498.

[53] 唐宇航，范晋伟，陈东菊，等. 基于蒙特卡罗模拟的机床关键几何误差溯源方法[J]. 北京工业大学学报，2017，43(11)：1619-1628.
TANG Yuhang, FAN Jinwei, CHEN Dongju, et al. Tracing Method for Key Geometric Errors of a Machine Tool Based on Monte Carlo Simulation [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(11): 1619-1628.

[54] ZENG W, RAO Y, WANG P, et al. A Solution of Worst-case Tolerance Analysis for Partial Parallel Chains Based on the Unified Jacobian-Torsor Model[J]. Precision Engineering, 2017, 47: 276-291.

[55] 邓敬亮，刘才丽，劳贤豪. 正态分布规律下尺寸链设计分析[J]. 航空发动机，2024，50(1)：164-169.
DENG Jingliang, LIU Caili, LAO Xianhao. Design Analysis of Dimensional Chain Based on Normal Distribution Law [J]. Aeroengine, 2024, 50(1): 164-169.

[56] SHI Y, ZHAO X, ZHANG H, et al. A New Top-down Design Method for the Stiffness of Precision Machine Tools [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(9): 1887-1904.

[57] 翁凌韬. 基于解析建模的精密机床结构热平衡设计及热主动控制方法[D]. 天津：天津大学，2021.
WENG Lingtao. Thermal Balancing Design and Thermal Active Control Methods for Precision Machine Tool Structural Components based on Analytical Modeling Method [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.

[58] 赵敏. 机床直线滚动导轨的润滑、安装及设计要点研究[J]. 工程技术研究，2022，7(14)：105-107.
ZHAO Min. Research on Lubrication, Installation and Design Points of Linear Rolling Guideway of the Machine Tool [J]. Engineering and Technological Research, 2022, 7(14): 105-107.

[59] 孟凡义. 平板精刮研技术研究[J]. 机车车辆工艺，2022(4)：31-32.
MENG Fanyi. Precise Scraping Techniques for Flat Plate [J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2022(4): 31-32.

[60] HSIEH T H, JYWE W Y, TSAI Y C, et al. Design, Manufacture, and Development of a Novel Automatic Scraping Machine[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(9): 2617-2630.

[61] 杨春鹏，王立华，陈谢瑞，等. 基于3D-motif法的刮研表面形貌表征[J]. 工程设计学报，2024，31(3)：368-376.
YANG Chunpeng，WANG Lihua，CHEN Xierui，et al. Characterization of Scraped Surface Morphology Based on 3D-motif Method[J]. Chinese Journal of Engineering Design，2024，31(3)：368-376.

[62] FAN K C，TORNG J，JYWE W，et al. 3-D Measurement and Evaluation of Surface Texture Produced by Scraping Process[J]. Measurement，2012，45(3)：384-392.

[63] 黄灿. 直线滚动导轨低应力装配关键技术研究[D]. 天津：天津大学，2017.
HUANG Can. Research on Key Technology of Low Stress Assembly of Linear Rolling Guide[D]. Tianjin：Tianjin University，2017.

[64] CORIA I，ABASOLO M，OLASKOAGA I，et al. A New Methodology for the Optimization of Bolt Tightening Sequences for Ring Type Joints[J]. Ocean Engineering，2017，129：441-450.

[65] 何改云，李素乾，郭龙真，等. 机床基础大件支撑预变形设计方法研究[J]. 机械科学与技术，2018，37(1)：70-75.
HE Gaiyun，LI Suqian，GUO Longzhen，et al. Research on Design Methodology for Support Pre-deformation of Large Machine Tools Body[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering，2018，37(1)：70-75.

[66] 胡敏，马军旭，金涛，等. 可抵消重力变形的横梁导轨面曲面设计[J]. 组合机床与自动化加工技术，2016(5)：51-54.
HU Min，MA Junxu，JIN Tao，et al. The Design Method of the Guideways′ Surfaces of the Beam to Eliminate the Gravity Deformation[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique，2016(5)：51-54.

[67] 徐源培. 考虑重力变形的直线导轨安装基面刮研曲线创成设计方法[D]. 天津：天津大学，2022.
XU Yuanpei. Design Method for Seraping Curve of Linear-guide Rail Mounting Surface Considering Gravity Deformation[D]. Tianjin：Tianjin University，2022.

[68] 孙光明，杨景景，张大卫，等. 精密机床导轨装配误差一致性工艺控制方法研究[J]. 天津理工大学学报，2024，40(4)：29-34.
SUN Guangming，YANG Jingjing，ZHANG Dawei，et al. Research on Control Technology of Consistency of Guide Rail Assembly Error of Precision Machine Tool[J]. Journal of Tianjin University of Technology，2024，40(4)：29-34.

[69] 刘志峰，陈继民，李迎，等. 数控机床线轨装配精度建模及其控制方法[J]. 吉林大学学报(工学版)，2025，55(5)：1536-1643.
LIU Zhifeng，CHEN Jimin，LI Ying，et al. Modeling of CNC Machine Tool Line Rail Assembly Accuracy and its Control Method[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2025，55(5)：1536-1643.

[70] WANG X. Straightness Detection Method and Accuracy Analysis of Guide Rail Parts[J]. Journal of Physics：Conference Series，2021，2133(1)：012020.

[71] ELMELEGY A，ZAHWI S. Comparative Study of Error Determination of Machine Tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2023，124(11)：4575-4602.

[72] 彭晶晶，杨洪涛. 基于PSD的大构件双通孔同轴度测量装置设计[J]. 应用激光，2022，42(8)：101-108.
PENG Jingjing，YANG Hongtao. Design of Coaxiality Measuring Device for Large Components with Double through Holes Based on PSD[J]. Applied Laser，2022，42(8)：101-108.

[73] 陈维范，薛丹. 滚珠丝杠副热误差检测与预拉伸的研究[J]. 制造技术与机床，2020(7)：127-130.
CHEN Weifan，XUE Dan. Research on Thermal Error Measurement and Pre-stretching of Ball Screw Units[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool，2020(7)：127-130.

[74] 胥云，李冰兴，刘康，等. 精确预拉伸技术在高精度数控机床设计中的应用[J]. 机床与液压，2019，47(10)：38-40.
XU Yun，LI Bingxing，LIU Kang，et al. Application of Precise Pre-stretching Technology in Design of High Precision NC Machine Tool[J]. Machine Tool & Hydraulics，2019，47(10)：38-40.

[75] LIU C，ZHAO C，WEN B. Dynamics Analysis on the MDOF Model of Ball Screw Feed System Considering the Assembly Error of Guide Rails[J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2022，178：109290.

[76] 苏芳，王晨升，郭刚，等. 计及惯量比变化的直线进给系统动态误差分析[J]. 机械科学与技术，2020，39(12)：1882-1888.
SU Fang，WANG Chensheng，GUO Gang，et al. Dynamic Error Analysis of Feed System Considering Change of Inertia Ratio[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering，2020，39(12)：1882-1888.

[77] IBARAKI S，HIRUYA M. A Novel Scheme to Measure 2D Error Motions of Linear Axes by Regulating the Direction of a Laser Interferometer[J]. Precision Engineering，2021，67：152-159.

[78] GILLMER S，SMITH R，WOODY S，et al. Compact Fiber-coupled Three Degree-of-freedom Displacement Interferometry for Nanopositioning Stage Calibration[J]. Measurement Science and Technology，2014，25(7)：075205.

[79] WANG W，KWEO N SH，HWANG C S，et al. Development of an Optical Measuring System for Integrated Geometric Errors of a Three-axis Miniaturized Machine Tool[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2009，43(7)：701-709.

[80] XIN M，LI B，LI L，et al. Measurement Techniques for Complex Surface Based on a Non-contact Measuring Machine[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2022，121(9)：6991-7003.

（编辑　袁兴玲）

作者简介：孙光明，男，1987年生，副教授。研究方向为高档数控机床设计、数控机床误差测量分析与补偿技术。E-mail：gmsun@tju.edu.cn。杨　悦*（通信作者），男，1993年生，助理研究员。研究方向为数控机床正向设计方法、高精密机电系统设计与控制、混联机器人系统。E-mail：yue_yang@tju.edu.cn。

本文引用格式：

孙光明，孙艺萌，郭鑫，等. 数控机床直线进给系统精度设计与装配误差控制方法研究进展[J]. 中国机械工程，2026，37(10)：2540-2555.

SUN Guangming，SUN Yimeng，GUO Xin，et al. Research Progresses on Precision Design and Assembly Error Control Methods for Linear Feed Systems of CNC Machine Tools[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(10)：2540-2555.