

# 大型龙门导轨磨床工作台运动精度 控制方法研究

孔丽国, 董田江, 包 坚

(宁波海天精工股份有限公司, 浙江 宁波 315800)

**摘要:** 大型龙门导轨磨床工作台整机运动场、主轴漂移量、补偿误差均会对控制精度产生影响, 因此研究新的大型龙门导轨磨床工作台运动精度控制方法; 根据大型龙门导轨磨床基本结构连接形态, 求解主要技术参数, 实现龙门导轨磨床工作台设计; 从静态、动态两个角度出发, 分析立柱部件、横梁部件受力情况, 确定多目标拓扑与模态有限元条件, 以此分析磨床工作台的运动特性; 以动静态参数求解结果和整机运动场为基础, 计算主轴漂移量的取值范围, 结合相关运动参数计算补偿误差数值, 结合对补偿误差数值计算以及 PDDF 控制器结果对工作台运动精度进行控制; 实验结果表明, 所提方法可以将工作台运动路径拟合误差控制在  $0\sim 0.07$  mm 范围之内, 满足龙门导轨磨床工作台运动精准控制的要求, 实际应用效果好。

**关键词:** 龙门导轨磨床; 工作台; 运动精度; 多目标拓扑; 模态有限元; 运动场; 主轴漂移量; 补偿误差

## Research on Motion Accuracy Control Method of Large Gantry Guideway Grinder Workbench

KONG Ligu, DONG Tianjiang, BAO Jian

(Ningbo Haitian Precision Industry Co., Ltd., Ningbo 315800, China)

**Abstract:** The motion field, spindle drift and compensation error of a large gantry guideway grinder workbench affect the control accuracy. Therefore, a new motion accuracy control method of the large gantry guideway grinder workbench is studied. According to the basic structural connection form of a large gantry guide grinding machine, its main technical parameters are solved to realize the design of the gantry guide grinding machine workbench. From the static and dynamic perspectives, the forces on the column and beam components are analyzed, and the multi-objective topology and modal finite element method (FEM) are determined to analyze the motion characteristics of the grinding machine workbench. Based on the solution results of dynamic and static parameters and motion field of the whole machine, the value range of the spindle drift is calculated, the compensation error value is calculated in combination with the relevant motion parameters, and the motion accuracy of the workbench is controlled in combination with the compensation error and the results of the PDDF controller. The experimental results show that the proposed method can control the fitting error of the worktable motion path within the range of  $0\sim 0.07$  mm, and meet the requirements of the worktable motion precise control of the gantry guideway grinder, and it provides a good practical application.

**Keywords:** gantry rail grinder; workbench; motion accuracy; multi objective topology; modal FEM; motion field; spindle drift; compensation error

## 0 引言

龙门导轨磨床是集液压传动技术、计算机技术、信息处理技术于一体的机电设备, 作为一种精密的数控机床, 能够对于大型零件进行磨削处理, 从而使其所加工的新型机械装备质量更佳, 使用寿命更长<sup>[1]</sup>。从自动化加工的角度来看, 龙门导轨磨床会对内部细小元件进行多次打磨处理, 从而在保障磨削平面光滑性的同时, 避免碎屑颗粒对砂轮运转所造成的阻塞, 避免龙门导轨磨床因阻塞原因而不能正常工作。与其他类型的数控机电设备相比, 龙门导轨磨床各个功能模块之间具有相互替代性, 在各个模块保持独立连接的情况下, 中控主机可以根据实际应用情况完

成对磨床结构的优化配置, 从而使其在具有维持导轨稳定传输能力的同时, 确保各级交换设备能够正常运行<sup>[2]</sup>。

工作台是实现龙门导轨磨床磨削的处理台平面, 由立柱、横梁等连接部件组成, 工作台平面的稳定性决定了导轨磨床对于零件设备的处理精准度, 特别是存在相对滑动位移时, 控制工作台平面上的运动路径存在一定的误差, 因此难以实现龙门导轨磨床工作台运动的精准控制。基于区间理论的控制方法通过定义区间扩张因子, 采用求解磨床工作台平面内灵敏度误差指标取值范围的方式, 确定导轨运动轴在各个方向上的运动趋势, 以此达到精准控制其运动路径的目标<sup>[3]</sup>。基于 Adams 的控制方法根据导轨磨床

收稿日期: 2023-01-10; 修回日期: 2023-03-15。

作者简介: 孔丽国(1985-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 孔丽国, 董田江, 包 坚. 大型龙门导轨磨床工作台运动精度控制方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 110-116.

设备综合误差数值, 确定工作台平面在过载荷下的精度衰退规律, 从而使主机元件能够准确掌握磨床工作台平面内的运动路径变化情况, 以此实现运动控制的相关目标<sup>[4]</sup>。基于西门子 S7-1200 PLC 的移动工作台高速高精控制方法着重介绍采用西门子 S7-1200 PLC 的脉冲指令驱动伺服电机运行过程, 通过行星减速机驱动齿轮齿条控制移动工作台的移出移入, 利用 S7-1200 方便的工艺指令和良好的运动控制功能, 实现工作台运行<sup>[5]</sup>。

然而上述两种方法难以确定整机运动场、主轴漂移量、补偿误差, 导致工作台运动路径拟合误差过大。针对上述情况, 设计一种新的大型龙门导轨磨床工作台运动精度控制方法。该方法的主要内容如下:

1) 根据大型龙门导轨磨床基本结构连接形态, 求解主要技术参数, 包括丝杠的等效转动惯量, 工作台折算到丝杠的转动惯量, 从而由伺服控制装置、砂轮、联动修整器组成相关的功能模块, 实现龙门导轨磨床工作台设计。

2) 分析立柱部件、横梁部件受力情况, 确定多目标拓扑与模态有限元条件, 确定磨床工作台的静态和动态特性。

3) 对大型龙门导轨磨床工作台模态进行判断, 确定该工作台的动力特征, 从而求解大型龙门导轨磨床工作台静态和动态特性参数。计算动静参数、整机运动场、主轴漂移量、补偿误差, 并将其作为 PDDF 控制器的输入, 实现大型龙门导轨磨床工作台运动精度控制。

## 1 龙门导轨磨床工作台的总体设计

为了实现大型龙门导轨磨床工作台运动精度的有效控制, 应根据磨床结构建模特点, 求解主要技术参数, 通过确定功能性模块连接形式, 以此实现龙门导轨磨床工作台的设计

### 1.1 导轨磨床基本结构

大型龙门导轨磨床搭载了移动式工作台平面, 可以在顶梁与升降横梁的配合下, 实现对零部件结构的磨削处理, 从而在维持零件加工精度的同时, 确保立柱部件、基础床身不会出现压力过大的情况。工作台平面套接于床身之上, 在其自由滑动的过程中, 已完成加工的零部件由前侧进入下级处理流程中, 未完成加工的零部件进入摸头部分, 以便后续导轨磨床继续进行加工与处理任务的顺利进行。万能磨头、水平磨头同时安装在升降横梁内表面之上, 前者可随工作台平面的运动进行全方位转动, 主要任务是对零部件进行细微磨削。后者不具备运动能力, 负责将大型零部件切割成多个小型结构, 以便于万能磨头对其进行细致处理。立柱与顶梁之间需要保持绝对垂直的连接状态, 一方面可使万能磨头、水平磨头在磨削处理零件的过程中具有向上的牵引力, 另一方面也可以为升降横梁提供稳定的横向支撑力<sup>[6]</sup>。完整的龙门导轨磨床连接结构如图 1 所示。

为了避免磨床工作台在处理零件时发生明显滑动, 床身必须稳定放置在不具有坡度的水平面之上。

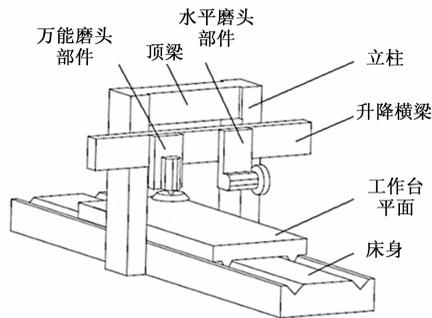


图 1 龙门导轨磨床基本结构示意图

### 1.2 主要技术参数

大型龙门导轨磨床的主要技术参数包括丝杠的等效转动惯量、工作台折算到丝杠的转动惯量。

#### 1.2.1 丝杠的等效转动惯量

龙门导轨磨床工作台的连接采用矩—三角形导轨, 中间部分的 T 型槽结构能够方便零部件的定位与装夹, 而丝杠元件转动所需的力必须完全由油缸齿条来提供, 因此求解丝杠等效转动惯量可以确定油缸齿条对于磨床工作台的动力供应能力<sup>[7]</sup>。等效转动惯量求解表达式如下:

$$J_1 = \frac{\delta_1 S_1}{|\Delta A|} \cdot D_1^4 \cdot l_1 \quad (1)$$

式中,  $\Delta A$  表示动力作用的单位累积量,  $\delta_1$  表示动力等效系数,  $S_1$  表示动力参数,  $D_1$  表示转动承力参数,  $l_1$  表示惯性参数。

#### 1.2.2 工作台折算到丝杠的转动惯量

磨削零件的过程中, 伺服电机的同步驱动带动周边磨头产生运动, 此时工作台承载能力会发生一定的变化, 丝杠转动惯量会出现一定程度的折损<sup>[8]</sup>。工作台折算到丝杠的转动惯量求解表达式为:

$$J_2 = \left( \frac{|\Delta A|}{2\delta_2 \cdot D_2} \right)^2 \cdot \frac{l_2}{S_2} \quad (2)$$

其中:  $\delta_2$  表示动力磨损参数,  $S_2$  表示磨削强度,  $D_2$  表示转动承力条件,  $l_2$  表示磨头元件的趋向运动参数。设计龙门导轨磨床工作台时, 各级功能性模块的连接应参考主要技术参数的实际求解结果, 以此为后续的大型龙门导轨磨床工作台运动精度控制奠定坚实的基础。

### 1.3 功能性模块

大型龙门导轨磨床工作台的功能性模块主要包括伺服控制装置、砂轮和联动修整器。

#### 1.3.1 伺服控制装置

伺服控制装置<sup>[9]</sup>能够为大型龙门导轨磨床工作台的正常运行提供较为稳定的动力, 导轨磨床工作台平面上包含至少两个动力接入端口, 其中一个端口内的动力作用方向与丝杠转动惯量的作用方向相同, 另一个则与其完全相反。工作台运动过程中, 伺服控制装置平衡两个动力接入端之间的力学负载作用, 从而使导轨滑动保持稳定。

### 1.3.2 砂轮

磨床砂轮不仅能够接收旋转动力，还能够提供滑动动力，随着圆形导轨的不断运动，模板工作台与固定装置保持同向运动趋势，此时零部件结构能够通过磨床砂轮实现多次打磨处理。磨床砂轮如图 2 所示。

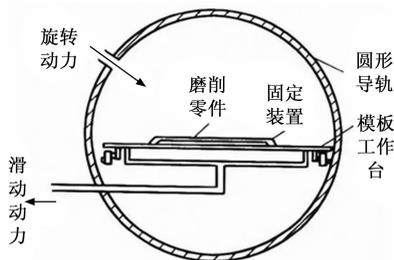


图 2 磨床砂轮

### 1.3.3 联动修整器

伺服控制装置直接控制联动修整器，主要在滑动导轨与磨床工作台之间起到平衡作用，随着工作台所负载力学作用量的增大，修整器元件对于磨床砂轮的处理能力较强。一般情况下，丝杠等效转动惯量取值大，工作台的转动惯量的取值也就相对较大<sup>[10]</sup>。

## 2 运动特性分析

对于大型龙门导轨磨床工作台运动特性的分析由静态、动态两部分组成，其中静态部分的分析主要针对立柱部件与横梁部件，而动态部分的分析则需要有多目标拓扑表达式的基础上，求解模态有限元条件，以此完成工作台运动特性分析。

### 2.1 静态特性

#### 2.1.1 立柱部件

立柱部件将工作台平面与磨床砂轮连接起来，起到了一定的支撑作用<sup>[11]</sup>。受到丝杠等效转动惯量、工作台折算到丝杠的转动惯量的影响，立柱部件的横向与纵向跨度越大，工作台平面与磨床砂轮之间的相互挤压作用表现越轻微，当挤压作用效果无限接近于零时，则表示龙门导轨磨床工作台并未出现运动行为，磨床砂轮不会对放置于其表面上的磨削零件进行加工处理<sup>[12]</sup>。在立柱部件上随机选择两个力学作用等效点，分别将其命名为“1号等效点”、“2号等效点”，其中“1号等效点”的横向系数为  $h_1$ 、纵向系数为  $g_1$ ，“2号等效点”的横向系数为  $h_2$ 、纵向系数为  $g_2$ ，联立上述物理量，推导立柱部件的静态运动特性表达式为：

$$K_1 = \sqrt{\frac{1}{J_1 \times J_2} \cdot f(|h_1 - h_2|^2 + |g_1 - g_2|^2)} \quad (3)$$

当“1号等效点”、“2号等效点”所处位置重合情况下，表示立柱部件上不存在两个完全独立的力学作用等效点，此时若想求解静态运动特性表达式，则可以默认一个等效点的横向、纵向系数取值为其实际数值，另一个等效点的横向、纵向系数取值为零。

### 2.1.2 横梁部件

横梁部件是导轨磨床的基本组成结构，包括上层顶梁和中层升降横梁。上层顶梁起到一定的连接固定作用，可以将磨头部件与立柱固定在一起，从而保证大型龙门导轨磨床工作台的运动稳定性<sup>[13-14]</sup>。中层升降横梁贴合在两端立柱侧面，会随着磨头部件的运动从而表现出向上或向下的运动行为，但由于这种纵向运动行为并不能发生在绝对光滑的工作台表面之上，所以升降横梁部件与立柱结构之间存在符合滑动摩擦特性的力。设  $\chi$  为升降横梁部件与立柱结构之间的滑动摩擦系数， $\alpha$  为力学负载参数的初始取值， $d_1$  为与上层顶梁结构匹配的力学稳定性系数， $d_2$  为与中层升降横梁结构匹配的力学稳定性系数， $\beta$  为梁架组合参数。在上述物理量的支持下，联立式 (1)、式 (2)，可将横梁部件的静态运动特性表达式定义为：

$$K_2 = (J_1 \times J_2)^2 + \left( \frac{1}{\chi} \sum_{\alpha=1}^{+\infty} \beta |d_1 - d_2|^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

由于横梁部件始终保持绝对水平的连接状态，所以  $K_2$  表达式取值不会出现小于平衡值“0”的情况。

### 2.2 动态特性

#### 2.2.1 多目标拓扑

通过所建立的多目标拓扑确定大型龙门导轨磨床工作台平面的运动能力。为了保证控制精度，要求多目标拓扑处理结果必须与相关部件的静态特性表达式完全匹配<sup>[15]</sup>。所谓多目标就是从动力特性、运动行为、位移标准等多个方面选择约束条件，控制工作台运动精度时，只有统一所有目标参数，才能将运动路径拟合误差控制在合理的数值范围之内。设  $\bar{W}$  表示工作台运动路径内的目标节点， $\bar{E}$  表示运动行为在平台轨迹内的分配系数， $\varphi$  表示惯性运动标准位移参数， $\bar{R}$  表示目标运动节点运动累积均值， $\epsilon$  表示动力特性参数，联立式 (3)、式 (4)，推导基于多目标拓扑的龙门导轨磨床工作台动态特性分析表达式为：

$$\rho_\epsilon = \pm \left| \frac{\sqrt{K_1 \cdot K_2 \cdot \bar{W}}}{\varphi \times (\bar{E}^2 - 1)} \right| - \frac{\bar{R}}{\epsilon^2} \quad (5)$$

如果零部件形状较为规则，则表示磨刀部件在执行磨削任务时的转速水平相对较低。在实际中，单一运动轨迹内目标节点运动累积量较小，多目标拓扑表达式的取值也就相对较小<sup>[16]</sup>。

#### 2.2.2 模态有限元条件

模态有限元是一种处于动态情况下的运动学平衡条件。相对于静态特性表达式而言，不定性就是指龙门导轨磨床工作台平面内运动路径的拟合方向并不固定，且路径节点的分布密度也并不规律<sup>[17]</sup>。在多目标拓扑条件分析的基础上，有限元软件逐一提取运动路径内的目标节点，在标记阶段性运动精度的同时，求解模态极限值，从而精准掌握工作台运动路径的拟合误差水平<sup>[18]</sup>。设  $u'$  表示模态极值参数， $i'$  表示有限元极值参数，且  $u' \neq i'$  的不等式取值条件恒成立， $\bar{y}$  表示磨床工作台平面内的运动轨迹节点分布参数， $\varphi$  表示规律性特征指标， $\Delta T$  表示龙门导轨磨床工作台磨削单

个零件时间消耗, 根据上述物理量, 推导基于模态有限元条件的龙门导轨磨床工作台动态特性分析表达式为:

$$R = (u' + i') \cdot \frac{(\tilde{y} - 1)^2}{\varphi \cdot p_e} \times |\Delta T| \quad (6)$$

对于大型龙门导轨磨床工作台运动精度的控制需同时参考静态特性、动态特性条件, 故而在求解计算式时, 要求功能性模块与相关技术参数必须保持一一对应关系。

### 3 工作台运动精度控制

在运动特性分析表达式的基础上, 分别求解动静态参数、整机运动场、主轴漂移量与补偿误差参数, 将这种参数输入至 PDDF 控制器中, 实现大型龙门导轨磨床工作台运动精度控制。

#### 3.1 动静态参数求解

对大型龙门导轨磨床工作台模态进行判断, 能够确定该工作台的动力特征, 即在确定静态特性、动态特性后, 对不同静态、动态特性参数进行求解, 设置不同状态下的工作台控制参数, 以期对工作台运动精度控制奠定坚实的基础。

大型龙门导轨磨床工作台静态方程可以用下述式表示:

$$\{f\} = [M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} \quad (7)$$

式中,  $[M]$  表示大型龙门导轨磨床工作台质量矩阵,  $[C]$  表示工作台阻尼矩阵,  $[K]$  表示工作台刚度矩阵,  $\{x\}$ ,  $\{\dot{x}\}$ ,  $\{\ddot{x}\}$  表示“1号等效点”、“2号等效点”、“3号等效点”的位移列阵。

在实际中, 阻尼对于大型龙门导轨磨床工作台的固有频率和振型参数的影响较小, 并不影响对于静态、动态特性参数分析与求解, 因此基本可以忽略不计, 在无外力作用下, 则以下式成立:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (8)$$

对式 (8) 进行求解, 求解结果可以用下述公式进行描述:

$$\{x\} = \{x_0\} \sin(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

式中,  $\{x_0\}$  表示初始位移列阵,  $\varphi$  表示振动相位初始值,  $\omega$  表示大型龙门导轨磨床工作台振动的固有频率。

结合式 (8) 和式 (9) 可以得到:

$$[K] - \omega^2 [M] \{\delta\} = 0 \quad (10)$$

式中,  $\{\delta\}$  表示大型龙门导轨磨床工作台振动模态矩阵。

对式 (10) 进行求解的过程中, 获取非零解的充要条件是系数行列式是 0, 因此以下公式成立:

$$[K] - \omega^2 [M] = 0 \quad (11)$$

通过式 (11) 即可获得相关矩阵的特征值和特征向量, 以此确定大型龙门导轨磨床工作台固有频率、振型参数, 从而对工作台静态特性参数与动态特性参数进行判断。当特征值等于 0 的情况下, 大型龙门导轨磨床工作台处于静态状态; 当特征值不等于 0 的情况下, 大型龙门导轨磨床工作台处于动态状态。

在大型龙门导轨磨床工作台处于静态状态情况下, 需要对于静态特性参数进行求解, 具体过程如下:

1) 在重力的作用下, 大型龙门导轨磨床工作台静态动力学模型用下述公式表示:

$$U_r = \sqrt{U_x^2 - U_y^2 + U_z^2} \quad (12)$$

式中,  $U_x, U_y, U_z$  表示工作台坐标系中不同方向上的应力应变。

在实际中, 应力应变共有 6 个分量。其中主应力计算公式如下:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (13)$$

式中,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  表示第 1、2、3 主应力。

等效应变主要可以利用等高线来表示大型龙门导轨磨床工作台静态动力学模型内部的应变分布情况, 等效应变计算公式如下:

$$\epsilon_e = \frac{1}{2 + \mu} \sqrt{\frac{1}{2}[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]} \quad (14)$$

式中,  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  表示第 1、2、3 主应变。 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  的计算公式分别如下:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (15)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] \quad (16)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu(\sigma_2 + \sigma_1)] \quad (17)$$

式中,  $E$  表示工作台结构位移参量,  $\mu$  表示屈服参数。

结合上述过程确定工作台静态特征参数, 则工作台静态特征参数求解结果如下:

$$Z = U_r + \frac{\sigma_e}{\epsilon_e} + \frac{K_1 + K_2}{2} \quad (18)$$

2) 大型龙门导轨磨床工作台处于运行情况下时, 其所受载荷是随着时间的变化而变化的, 因此为了确定真实的大型龙门导轨磨床工作台动态变化, 需要对动态特征参数进行求解, 具体过程如下:

以有限元瞬态动力学理论为基础, 对于大型龙门导轨磨床工作台运动学方程进行求解, 求解结果可以用下述公式表示:

$$\{k\} = P^T ([M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\}) \quad (19)$$

式中,  $P^T$  表示外载荷向量。由于大型龙门导轨磨床工作台运动学方程与工作台静态方程求解过程一致, 因此此处不再赘述, 结合上述过程确定工作台动态特征参数, 则工作台动态特征参数求解结果如下:

$$Y = \frac{U_r}{R} + \frac{\sigma_e}{\epsilon_e} \quad (20)$$

#### 3.2 整机运动场

整机运动场是指分布在大型龙门导轨磨床工作台平面上的动力学作用效应, 在磨床设备静态特性、动态特性保持不变的情况下, 运动场效应直接影响运动路径节点的拟合程度, 因此为实现对工作台运动精度的有效控制, 要求整机运动场分布必须要保持绝对均匀<sup>[19-20]</sup>。对于整机运动

场的求解涉及横轴 ( $\vec{X}$ )、纵轴 ( $\vec{Y}$ )、空间轴 ( $\vec{Z}$ ) 3 个方向上的运动场强法向量, 具体计算公式如下:

$$\begin{cases} \gamma = c_x \cdot \vec{X} \\ \iota = c_y \cdot \vec{Y} \neq 0 \\ \kappa = c_z \cdot \vec{Z} \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $c_x$  表示横轴方向上的运动行为赋值,  $c_y$  表示纵轴方向上的运动行为赋值,  $c_z$  表示空间轴方向上的运动行为赋值。在式 (21) 的基础上, 设  $\vec{O}$  表示常源向量, 大型龙门导轨磨床工作台的整机运动场推导结果为:

$$U = \frac{\gamma \cdot \iota \cdot \kappa}{R^3} \times |\vec{O}| \quad (22)$$

若导轨磨床工作台在磨削零件的过程中, 磨头部件不会出现全方位旋转行为, 在求解整机运动场表达式时, 就可以不考虑空间轴方向上的运动场强法向量与运动行为赋值。

### 3.3 主轴漂移量

主轴漂移量就是指工作台主轴在龙门导轨磨床运行过程中所出现的运动偏移量, 主轴漂移量的计算数值越大, 就表示当前情况下工作台平面内的相对运动行为越明显。为了实现对龙门导轨磨床工作台运动精度的控制, 要求主轴漂移量指标的取值必须小于工作台平面对于运动偏移量的最大承载能力<sup>[21-22]</sup>。设  $v_1, v_2, \dots, v_n$  表示  $n$  个不相等也不为零的主轴运动系数,  $\bar{V}$  表示大型龙门导轨磨床整机运动场内的轴系数偏移均值,  $\lambda$  表示轴系平面内的运动精度控制参数。在上述物理量的支持下, 联立式 (22), 推导主轴漂移量如下所示:

$$M = \left| \frac{\sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{\bar{V}}}}{1 - \sqrt{|\lambda U|}} \right|_{n \geq 1} \quad (23)$$

式中,  $n > 1$  表示工作台运动路径内包含多个节点对象,  $n = 1$  表示工作台运动路径内只包含一个节点对象,  $n < 1$  则表示工作台运动路径内不包含完整的节点对象, 对于大型龙门导轨磨床工作台运动精度的控制, 默认不存在非完整的运动路径, 即  $n < 1$  的不等式条件不成立。

### 3.4 补偿误差

补偿误差可以理解为工作台平面所能承载的最大运动精度误差。对于大型龙门导轨磨床工作台而言, 在主轴漂移量求解结果已知的前提下, 可以根据定向运动指标、定量运动指标的取值情况, 完成对补偿误差指标的精准计算<sup>[23-24]</sup>。设  $Q_{\max}$  表示定量运动指标的最大取值,  $\hat{q}$  表示导轨磨床设备工作台的定量运动参数,  $\mu$  表示定向运动参数,  $\theta$  表示区域性控制参量。在上述物理量的支持下, 联立式 (23), 可将补偿误差求解结果表示为:

$$b' = Q_{\max} - \left( \mu M \frac{\sqrt{1 - \theta^2}}{\hat{q}^2} \right)^2 \quad (24)$$

为实现对大型龙门导轨磨床工作台运动精度的有效控制, 求解补偿误差指标时, 要求系数  $\mu$ 、系数  $\theta$  的取值必须相同。至此, 完成对各项指标参量的计算与处理, 在其他

干扰条件保持不变的情况下, 以 PDDF 控制器为基础, 结合整机运动场、主轴漂移量、补偿误差计算结果实现对大型龙门导轨磨床工作台运动精度的有效控制。

### 3.5 PDDF 控制器

PDDF 控制器由 PDF 控制器演变而来, 该控制器结构与 PI 控制器结果具有一致性, 具有比例和积分两个环节, 但是由于该控制器的前向通道仅有积分环节, 所以其响应速度始终保持在较低的水平。但是该控制器也具有一定的优点, 就是能够对所有的误差信号均进行积分处理, 能够提升相关的积分增益, 从而提升控制器的抗干扰能力。PDF 控制器的开环以及闭环传递函数分别用下述公式表示:

$$G_0(S) = \frac{K_i G_p(S)}{s + K_p G_p(S)} \quad (25)$$

$$G(S) = \frac{G_0(S)}{1 + G_0(S)} = \frac{K_i G_p(S)}{s + K_p G_p(S)} \quad (26)$$

式中,  $K_p, K_i$  表示比例、积分调节参数,  $G_p(S)$  表示传递函数。

PDF 控制器消除了 PI 控制器闭环传递函数中的零点, 从而削弱了由于系统零点接近原点而造成的系统超调问题, 从而提升控制效果, 但是该 PDF 控制器也存在一定的缺陷, 就是不能够满足大型龙门导轨磨床工作台运动控制精度与速度的要求, 稳定性和鲁棒性较差。为了解决 PDF 控制器存在的缺陷, 需要对该控制进行优化, 引入了一个前馈比例控制器  $K_f$ , 从而搭建一种新的控制器, 即 PDDF 控制器, 使该控制器能够具有较高的稳定性和较强的鲁棒性, 从而提升大型龙门导轨磨床工作台运动控制精度与响应速度。PDDF 控制器闭环传递函数如下所示:

$$G'(S) = Z \times Y \frac{MUK_i K_f + K_f K_{fs}}{K_i K_f + Ms^2 + Bs + b' K_i K_{fs}} \quad (27)$$

式中,  $K_f$  表示积分调节参数,  $s$  表示工作台响应参数,  $B$  表示大型龙门导轨磨床工作台被控参数。

## 4 实例分析

本次实验为验证工作台运动路径拟合误差对于精准控制大型龙门导轨磨床工作台运动控制精度的影响, 选择大型龙门导轨磨床工作台运动精度控制方法、基于区间理论的控制方法、基于 Adams 的控制方法作为实验对比方法。

### 4.1 实验设备连接

按照图 3 所示, 连接龙门导轨磨床工作台各级元件, 旋转向阀使其呈闭合状态, 将电极板与外界电源相连, 开启电动舵机, 使电动转子呈现匀速转动状态, 当转向阀受力并由闭合自动转换至开启状态后, 调节控制器, 使磨头能够在加工区域内对实验用零部件进行磨削处理。

利用大型工作台运动精度控制方法干预龙门导轨磨床对实验用零部件的磨削处理行为, 待实验装置趋于稳定后, 记录运动路径拟合误差在既定实验时间内的数值变化情况, 所得数据即为实验组变量。利用基于区间理论的控制方法对龙门导轨磨床对实验用零部件的磨削处理行为进行控制,

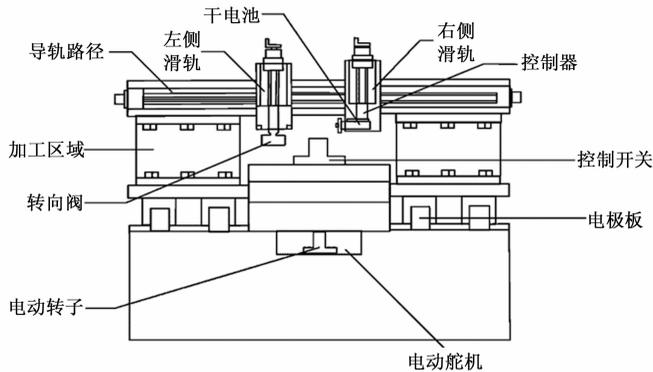


图 3 龙门导轨磨床工作台实验结构

重复上述实验步骤, 所得数据即为对照组 (1) 的变量。利用基于 Adams 的控制方法干预龙门导轨磨床对实验用零部件的磨削处理行为, 再次重复上述实验步骤, 所得数据即为对照组 (2) 的变量。整合所得实验数据, 得出实验结果并总结实验规律。

### 4.2 参数解释

工作台运动路径拟合误差可以反映出所选实验方法对大型龙门导轨磨床工作台运动形态的精准控制能力, 关于拟合误差与控制能力之间的对应关系如表 1 所示。

表 1 拟合误差与控制能力的对应关系

编号	拟合误差/mm	控制能力
1	0~0.03	精准控制
2	0.03~0.07	精准控制
3	0.07~0.09	常规控制
4	0.09~0.10	常规控制
5	0.10~0.13	常规控制
6	>0.13	非精准控制

对于大型龙门导轨磨床工作台运动路径拟合误差的求解表达式如下:

$$\omega = \xi \cdot \vartheta \quad (28)$$

其中:  $\xi$  表示线性误差,  $\vartheta$  表示转动误差。为避免不公平性实验结果的出现, 除所采用实验方法不同外, 实验组、对照组其他实验条件完全保持一致。

### 4.3 结果分析

按需连接各级实验设备, 打开控制开关, 确保左侧滑轨、右侧滑轨所处位置保持完全对称的状态, 开始进行实验。图 4、5 分别反映了实验组、对照组线性误差参数 ( $\xi$ ) 与转动误差参数 ( $\vartheta$ ) 的具体实验结果。

为推算出工作台运动路径拟合误差的最大数值, 分别取线性误差参数 ( $\xi$ )、转动误差参数 ( $\vartheta$ ) 的最大实验结果进行计算, 具体计算结果如下:

1) 实验组:  $\omega = 0.03$ , 属于 0~0.07 mm 的取值范围 (精准控制);

2) 对照组 (1):  $\omega = 0.10$ , 属于 0.07~0.13 mm 的取值范围 (常规控制);

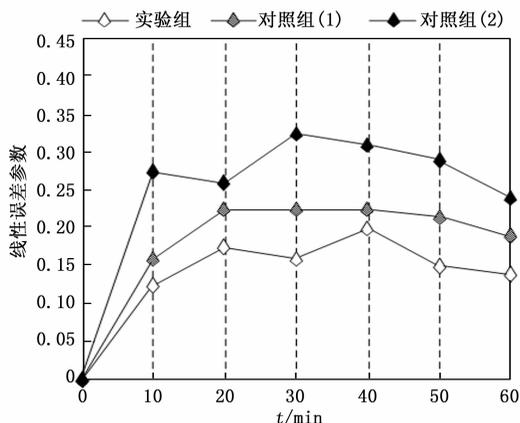


图 4 线性误差参数 ( $\xi$ )

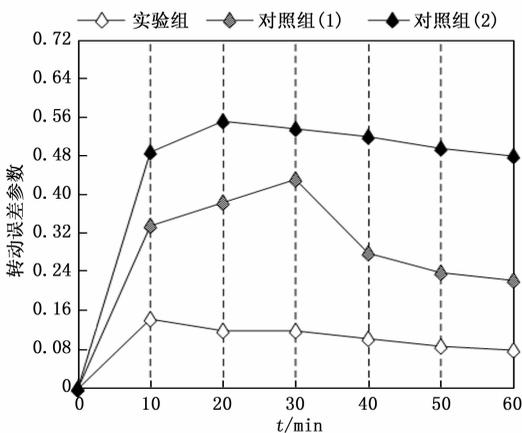


图 5 转动误差参数 ( $\vartheta$ )

3) 对照组 (2):  $\omega = 0.18$ , 属于 >0.13 mm 的取值范围 (非精准控制);

综上所述, 基于区间理论的控制方法可以实现对龙门导轨磨床工作台运动形态的常规控制; 基于 Adams 的控制方法只可以实现对龙门导轨磨床工作台运动形态的非精准控制; 大型工作台运动精度控制方法可以将线性误差参数、转动误差参数同时控制在较低的数值水平, 符合精准控制龙门导轨磨床工作台运动控制的要求, 控制精度较高, 鲁棒性较好。

## 5 结束语

所设计的大型工作台运动精度控制方法通过重新规划了导轨磨床基本结构的连接形式, 根据主要技术参数求解结果, 确定功能性模, 该方法从静态特性、动态特性两方面着手, 在分析立柱部件、横梁部件承力能力的同时, 推导多目标拓扑与模态有限元条件分析其运动特征。由于整机运动场分布形式很难发生改变, 所以该方法以 PDDF 控制器为基础, 结合主轴漂移与补偿误差指标对工作台运动精度进行有效控制。随着这种新型控制方法的应用, 工作台运动路径拟合误差过大的问题得到了解决, 在龙门导轨磨床工作台运动精准控制方面具有较强的应用价值。

## 参考文献:

- [1] 李国龙, 谢天明, 任唯贤, 等. 横梁蠕变松弛对龙门镗铣床运动精度可靠性的影响建模 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (8): 944-951.
- [2] 吴天凤, 李 莉, 杨洪涛. 数控机床 XY 工作台单向运动二维阿贝误差分析与建模 [J]. 光学精密工程, 2021, 29 (2): 329-337.
- [3] 范晋伟, 谢本田, 叶 倩, 等. 基于区间理论的数控内圆复合磨床几何误差灵敏度分析方法研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (11): 220-230.
- [4] 王 峰, 陈 捷, 洪荣晶. 基于 Adams 的 TK13250E 数控转台蜗杆副传动精度的仿真 [J]. 机械传动, 2020, 44 (3): 155-159.
- [5] 夏煜昊, 乔礼惠, 姜君杰. 基于西门子 S7-1200 PLC 实现移动工作台高速高精控制的应用 [J]. 锻压装备与制造技术, 2021, 56 (1): 54-57.
- [6] 裴 彬, 米 洁, 杨庆东. 磨床导轨的动态特性分析及结构优化设计 [J]. 机械设计与研究, 2020, 36 (6): 110-113.
- [7] 范晋伟, 李晨晔, 李伟华. 基于公差数控外圆磨床几何误差源参数建模研究 [J]. 工具技术, 2021, 55 (6): 100-103.
- [8] 梅益, 薛茂远, 甘盛霖, 等. 基于多目标的九轴五联动磨床整机分析与结构优化 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2022, 49 (6): 25-36.
- [9] TIAN D, XU R, SARIYILDIZ E, et al. An adaptive switching-gain sliding-mode-assisted disturbance observer for high-precision servo control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69 (2): 1762-1772.
- [10] ARIF Z, FU Y. Mix frame visual servo control framework for autonomous assistive robotic arms [J]. Sensors, 2022, 22 (2): 642-653.
- [11] 宋碧颖, 王登峰, 王元清, 等. 除尘器壳体双肢组合截面立柱轴压稳定性研究 [J]. 工程力学, 2020, 37 (3): 228-237.
- [12] 徐 虹, 刘 猛, 国志鹏, 等. 动车组变曲率 L 型截面铝合金门立柱拉弯精度控制 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53 (2): 77-83.
- [12] 付江江, 杨永文, 刘 佳, 等. 气体机点火驱动软件测试平台的开发及应用 [J]. 能源技术与管理, 2019, 44 (6): 126-128.
- [13] 闫万杰, 刘明军, 殷维刚. 基于 PXI 总线的电源检定装置设计与实现 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2009, 27 (S1): 202-205.
- [14] 张 俊. 基于云计算的软件测试平台的设计 [J]. 数字技术与应用, 2022, 40 (1): 213-215.
- [15] 王新亮, 陈 凯, 薛琪琪, 等. 基于 1553B 总线的飞控软件测试仿真平台设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (11): 12-15.
- [16] 陈基昕, 王 忠, 赵锦宇. 导弹测发控系统 CAN 总线拓扑结构的分析及选择 [J]. 舰船电子工程, 2019, 39 (5): 129-134.
- [17] 王 瑞, 孙虎元, 刘 星, 等. 基于 PXI 总线的导弹火控自动
- [13] 吴启仁, 俞华锋, 彭子腾, 等. 斜向流攻角对近底圆柱状横梁冲刷坑展向开展速度影响的数值模拟 [J]. 水电能源科学, 2022, 40 (5): 105-108.
- [14] 杨利强, 楚永萍, 沈 钢. 基于永磁直驱结构的柔性转向架构架横梁革新设计 [J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23 (11): 44-46.
- [15] 黄广全, 肖莉明, 金传喜, 等. 多目标模糊综合评价的数控机床元动作单元关键质量特性识别 [J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28 (4): 1062-1078.
- [16] 杜义贤, 张 跃, 付君健, 等. 承载散热一体化的功能梯度多孔结构拓扑优化设计 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33 (7): 1141-1150.
- [17] 程英豪, 李迎光, 郝小忠, 等. 五轴联动机床运动轴位置信息高频率高精度实时采集 [J]. 航空制造技术, 2019, 62 (Z1): 87-94.
- [18] 谭立杰, 闫 芸, 宋婉贞. 伺服运动控制工作台精度误差分析 [J]. 电子工业专用设备, 2022, 51 (1): 53-56.
- [19] 黄泽辉, 张 定, 陈勇坤. 一种适应快速重构的可切换工作台及其自动传动系统设计 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (8): 85-89.
- [20] 裴未迟, 张雪静, 纪宏超, 等. 3D 打印机喷头及工作台振动响应特性分析 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (11): 4330-4337.
- [21] 曹晶晶, 盛步云, 张燕强, 等. 一种数控机床刀具三维轨迹数据压缩方法 [J]. 机械设计与制造, 2021 (6): 232-235.
- [22] 向单奇, 高 嵩, 杨建中. 基于强化学习的航空零件复合材料缠绕机床运动优化方法 [J]. 机械工程师, 2020 (5): 14-20.
- [23] 王俊波, 李国伟, 何胜红, 等. 10 kV 高压断路器电气试验机器人接线定位误差分析及动态补偿 [J]. 高电压技术, 2021, 47 (10): 3642-3649.
- [24] 张 羽, 王 朋, 刘纪元, 等. 合成孔径声纳重叠相位中心与惯性导航系统联合估计运动误差算法 [J]. 兵工学报, 2021, 42 (3): 588-597.
- [18] 方 丹, 崔少辉, 卢慧卿, 等. 通用检测系统中检测适配器及描述软件的研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31 (1): 185-188.
- [19] 卢慧卿, 孟 晨, 王 成, 等. 自动测试系统中测试通道配置工具的开发 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (5): 978-980.
- [20] 白海斌, 孙玉伟. 微波设备自动测试系统设计 [J]. 软件, 2021, 42 (8): 129-131.
- [21] 尉广军, 马 骏. 基于 PXI 总线的导弹装备通用检测系统设计 [J]. 计算机与数字工程, 2012, 40 (9): 54-56.
- [22] 吕社安, 孟庆辉, 徐 丹. 基于 PXI 测试仪的通信设备故障检测平台设计与实现 [J]. 舰船电子工程, 2009, 29 (6): 182-183.
- [23] 魏 祯, 许永辉. 基于 PXI 总线的航空串行总线专用通讯模块研制 [J]. 现代电子技术, 2014, 37 (17): 86-89.