DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.002

一种用于滑块磨床的双导程进给系统静动态特性分析

葛紫阳¹,王立平^{1,2},马凤举^{2,3},王冬²

(1. 电子科技大学 机械与电气工程学院,四川 成都 611731;

2. 清华大学 机械工程系,北京 100084;

3. 山东华准机械有限公司,山东 济宁 272500)

摘 要:以一种应用于某滑块磨床的双导程进给系统为对象,对该双导程进给系统进行了介绍;基于 Workbench 对滑块 磨床中的 y 轴双导程进给系统进行了静动态特性仿真分析。分析结果表明:静态特性方面,该进给系统最大应力约为 1.65 MPa,最大变形约为 11 µm,位于第二工作台最右端,砂轮处变形约为 4.2 µm;动态特性方面,该进给系统1 阶固有 频率约为 138.34 Hz,最大振幅位于二级进给驱动部分,相较于传统滚珠丝杠进给系统具有更好的动态特性。在设计阶 段对该双导程进给系统进行静动态特性分析,为进给系统的结构优化设计、指导样机生产提供了理论支撑。 关键词:滑块;磨床;进给系统;静动态特性

中图分类号:TP391.9; TG58 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2024)06-0012-05

Static and Dynamic Characteristics Analysis of Double Lead Rolling Linear Feed System for Slider Grinding Machine

GE Ziyang¹, WANG Liping^{1,2}, MA Fengju^{2,3}, WANG Dong²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Shandong Huazhun Machinery Co., Ltd., Jining 272500, China)

Abstract: A double lead rolling linear feed system applied in a special grinding machine for sliding block is introduced: its working principle and structure characteristics are elaborated, and the static and dynamic characteristics of the y axis feed system in the slider special grinder are simulated and analyzed in Workbench simulation software. The analysis results show that the maximum stress of the feed system is about 1.65 MPa in terms of static characteristics, the maximum deformation is about 11 μ m, located at the far right end of the second workbench, and the deformation at the grinding wheel is about 4.2 μ m; while in terms of dynamic characteristics, the first order natural frequency of the feed system is about 138.34 Hz, and the maximum amplitude is located in the secondary feed drive section, which has better dynamic characteristics compared with the traditional ball screw feed system. The analysis on the static and dynamic characteristics of the double lead rolling linear feed system is conducted in design stage, which provides theoretical support for structural optimization design of the feed system and guiding prototype production. **Keywords**:slider; grinding machine; feed system; static and dynamic characteristics

0 引言

滚动直线导轨副是各类数控装备的核心功能 部件,直接影响数控装备的性能^[1]。滚动直线滑 块滚道及定位面的加工质量决定了滚动直线导轨 副的性能及寿命^[2]。为了保证精度,必须采用磨 削作为滚动直线滑块加工的最后工序。因此,需 要研发高精度的磨床以保证滑块的最终加工质 量。砂轮进给系统是磨床的关键组成部分,其性 能直接影响磨削加工的精度和效率。运动速度和 定位精度是衡量进给系统性能的重要指标。为实 现高精、高效的目标,就要求进给系统能够实现高速 运动并具有较高的机械分辨率。对于传统的滚珠丝 杠进给系统,在驱动速度一定时,增大丝杠导程可以 获得较高的运动速度;但增大导程会降低机械分辨 率,影响系统的定位精度。因此,高速和高精度间存 在矛盾。本文以滑块磨削为背景,介绍一种新型双 导程进给系统^[3]。该进给系统具有两级进给功能, 其中一级进给通过大导程滚珠丝杠副实现快速运 动,二级进给通过具有小导程的滚柱丝杠副实现精

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52105520);国家自然科学基金资助项目(51975319);清华大学与山东华准机械 有限公司校企合作项目(20212001886)

第一作者简介:葛紫阳(1998—),男,安徽宿州人,硕士研究生,研究方向为智能制造,pfgeziyang@163.com。

密运动,使系统兼具高速和高机械分辨率的优点。

进给系统是数控机床的重要组成部分,其静 动态特性对机床的加工精度、工件的形状精度和 表面质量来说至关重要^[4]。朱坚民等^[5]基于赫 兹接触理论计算了滚珠丝杠进给系统中结合面的 刚度,建立了进给系统的动态特性仿真模型,对进 给系统进行了动态特性分析,并通过模态试验对 仿真结果进行了验证。丁喜合等^[6]以双丝杠驱动 直线进给系统为对象,利用弹簧阻尼单元对结合 面进行模拟,建立了该进给系统的有限元仿真模 型,对该进给系统进行了静动态特性分析。本文 在滑块磨床的研发阶段,以应用于磨床中的双导 程进给系统为对象,对该新型进给系统进行了静 动态特性分析,在样机制造前充分了解了该新型 进给系统的静动态特性,为滑块磨床的性能提升 以及样机生产提供了理论指导。

1 双导程进给系统介绍

1.1 工作原理

双导程进给系统基本结构如图1所示。该进给 系统具有宏、微两级进给功能,其工作原理可描述 为:在进给过程中,首先由第一伺服电机通过联轴器 带动一级丝杠旋转,进而带动第一工作台和第二工 作台共同做直线进给运动,由于一级丝杠具有大导 程,因此一级进给能够实现高速运动;在高速运动结 束后,第一工作台不再运动,第二伺服电机通过摆线 滚轮带动旋转式螺母内圈回转,进而驱动第二工作 台运动,实现二级进给。由于旋转式螺母与二级丝 杠之间的滚动体类型为滚柱,而滚柱导程十分微小, 因此二级进给运动可获得较高的机械分辨率,故能 够实现精密定位。因此,该双导程直线进给系统兼 具高速和高机械分辨率的优点。



1、11—支撑轴承;2、21—摆线滚轮组;3、8、17、20—滑块;
4—旋转式螺母;5—第二工作台;6—二级丝杠;7—螺母固定座;
9、15—导轨;10—一级丝杠;12—联轴器;13—第一电机;
14—底座;16—第一工作台;18—止推轴承;19—第二电机。
图1 双导程直线进给系统原理图

1.2 结构特征

在工程应用中,为了提高进给系统的静动刚 度,需要对系统中各滚动结合面进行预紧。在该 双导程进给系统中,滚珠丝杠结合面采用双螺母 垫圈的方式进行预紧,滚柱丝杠结合面采用双螺 母垫片的方式进行预紧,两端支撑轴承采用施加 轴向预载荷的方式进行预紧。该进给系统预紧后 系统内部接触示意图如图2所示。



图 2 进给系统内部接触示意图

为了满足滑块专用磨床整机的装配要求,基 于前述的双导程进给系统的工作原理,将该滑块 专用磨床上的 y 轴进给系统设计成图 3 所示结 构。其中砂轮主轴置于第二工作台上,底座与两 个工作台之间通过导轨滑块连接,底座两侧的滑 板结构为专门设计,主要用于连接该滑块专用磨 床的 z 轴进给系统。该进给系统用于滑块滚道表 面的磨削,其在磨床中的装配关系如图 4 所示。



图 3 滑块专用磨床 y 轴进给系统结构图



图 4 磨床局部结构示意图

2 静态特性分析

2.1 仿真前处理

为了提高仿真计算效率,在对该进给系统进

行有限元仿真之前,首先将原始设计模型在 SolidWorks 中进行简化处理。图 5 为简化处理后 的进给系统模型图。



图 5 简化后进给系统模型图

将简化后的模型图导入 Workbench 中,利用 静力分析模块对该进给系统进行静态特性的仿真 分析。处理步骤如下。

1)设置材料参数

根据设计要求,该进给系统中各功能部件如 丝杠、螺母、滑块等采用 45 钢,其余部件如底座、 工作台、各支座等结构采用 HT250。表 1 为材料 属性参数。

材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/Pa	泊松比
45 钢	7 850	2.0×10 ¹¹	0.30
HT250	7 340	1.5×10 ¹¹	0.27

表1 材料属性参数

2) 网格划分

选用六面体网格单元对模型进行划分,同时 结合各部件的真实尺寸大小,对不同部件的网格 尺寸进行分别设置。其中,由于底座尺寸较大,将 其网格尺寸设置为50mm,工作台、电机支座等结 构网格尺寸设置为30mm,丝杠、螺母等小部件网 格尺寸设置为10mm。网格划分后共有206642 个节点,118526个六面体单元,图6为该进给系 统的网格划分模型图。



图 6 进给系统网格划分模型图

3)边界条件

根据已设计的滑块专用磨床整体空间结构,

考虑该进给系统的实际安装情况,将进给系统两 侧的滑板设置为固定约束;将进给系统中各固定 结合面之间设置为 Bonded 接触。基于赫兹接触 理论^[7]对双导程进给系统中的滚珠丝杠结合面、 滚柱丝杠结合面以及滚动轴承结合面的初始预紧 刚度进行计算,得到上述 3 个滚动结合面的轴向 初始 预 紧 刚 度 分 别 为 302 N/μm、124 N/μm、 110 N/μm;基于结合面刚度计算结果,利用 Spring 单元对滚动结合面进行等效处理,如图 7 所示。



图 7 滚动结合面等效处理

 $\delta = \frac{2J}{\pi m} \left\{ \frac{1}{8} \left[\frac{3}{2} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) \right]^2 \right\}^{1/3} (\Sigma \rho)^{1/3} Q^{2/3}$ (1)

式中:m 和 J 是赫兹常数; μ 是接触物体的泊松 比; E 是接触物体的弹性模量。其中

$$\sum \rho = \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}}$$
(2)

式中 R_{11} 、 R_{12} 、 R_{21} 、 R_{22} 分别是各接触物体的曲率半径。

由于该进给系统在此滑块专用磨床中用于滑 块滚道面的磨削,而在进行滚道磨削时,上下滚道 面的磨削力总是以力偶的形式成对出现,故磨削 力不会对砂轮末端姿态的偏移产生影响,只需考 虑在重力载荷的作用下进给系统整机的静力变形 情况。这里将重力添加为载荷边界条件。边界条 件设置情况如图 8 所示。



图 8 边界条件施加情况

2.2 仿真结果分析

由于该进给系统质量较大且安装情况特殊, 故在空载工况时,其自身重力会导致结构整体产 生一定的变形,从而引起加工误差的出现,因此需 要考虑重力对结构变形的影响情况。完成前处理 工作后,经计算得到在重力的作用下该进给系统 的静力仿真结果,提取得到该进给系统的应力分 布云图以及变形云图如图9、图10所示。



图 10 进给系统变形云图

从图 9 中可以看出,该进给系统整体的最大 应力出现于第二工作台右侧,大小约为 1.65 MPa, 结构的应力值很小,远小于 HT250 的屈服强度 250 MPa。这说明该进给系统结构传递载荷能力 强,整体结构设计合理。

从图 10(a)中可以看出,该进给系统在重力 作用下产生的最大变形位于第二工作台最右端, 约为 11 μm;从图 10(b)中可以看出,整个二级进 给驱动部分也产生了较大变形,约为 8 μm。该部 分的变形虽未直接导致砂轮末端的姿态发生偏 移,但会导致一级传动处的滚珠丝杠和二级传动 处的滚柱丝杠向下产生较大位移量,进而导致丝 杠、螺母与滚动体之间的接触参数(如接触角)发 生改变,同时也会使滚动体与滚道之间的磨损加 剧,进而会影响进给系统的定位精度和传动效率, 因此需要针对该部分的变形进行进一步优化。

对于该进给系统来说,砂轮末端的偏移量是重 点关注的指标,它直接反映了该进给系统静态性能 的好坏。从进给系统整体变形云图中提取得到主 轴砂轮处的整体变形云图以及 x、y、z 3 个方向上的 变形云图,如图 11 所示。从图 11(a)中可以看出, 主轴 砂轮处的最大变形位于砂轮末端,约为 4.2 μm;从图 11(b)、图 11(c)、图 11(d)中可以看 出,砂轮末端在 x、y、z 3 个方向上的变形量分别为 1.6 μm、4.0 μm、0.1 μm(x 方向为砂轮轴向,y 方向 为重力方向,z 方向为砂轮侧向)。经分析可知,该 进给系统砂轮末端并未产生较大变形,满足设计要 求。但为了提高机床的加工精度,在机床进给时可 重点关注重力方向以及砂轮轴向的进给量。



3 动态特性分析

模态分析是结构动态特性分析的常用分析方法,主要是求解获得结构的各阶固有频率及振型, 根据求解结果对结构的动态特性进行分析并做出预测^[8]。对于机床进给系统来说,当激励载荷频 率接近进给系统结构的固有频率时,会引起共振, 严重影响进给系统的定位精度和机床的加工精 度。因此,对该新型双导程进给系统进行模态分 析是十分必要的。

在完成静力分析之后,添加模态分析模块,对 该进给系统进行模态分析。本文采用 Block Lanczos 法提取其前6阶模态,得到前6阶模态信 息如表2所示,对应的前6阶振型如图 12 所示。

表 2 前 6 阶模态信息

阶数	频率/Hz	振型描述		
1	138.34	二级进给驱动部分左右摆动		
2	170.29	二级进给驱动部分上下摆动		
3	210.58	主轴部分上下摆动		
4	230.82	底座右侧绕丝杠轴向扭转		
5	236.11	第二工作台绕丝杠轴方向扭转		
6	256.70	底座右侧上下摆动		



由仿真结果可知,该双导程进给系统的1阶 固有频率约为138.34 Hz,传统单丝杠及双丝杠驱 动进给系统对比如表3所示。该双导程进给系统 的各阶固有频率均更高,故动态特性更好(本刊黑 白印刷,图11、图12图例中色彩无法显示,如有 疑问请咨询作者)。

衣 3 3 种近纪东犹时 6 时回有频率对比 半位:6

阶数	单丝杠系统	双丝杠系统	双导程系统
1	67.21	83.74	138.34
2	67.94	91.13	170.29
3	122.30	121.81	210.58
4	161.86	160.62	230.82
5	206.37	215.99	236.11
6	218.91	220.85	256.70
3 4 5 6	122.30 161.86 206.37 218.91	121.81 160.62 215.99 220.85	210.58 230.82 236.11 256.70

对于磨床来说,激励载荷的来源主要包括磨 削时高速旋转的砂轮与工件接触产生的磨削力、 电机转子的转动等方面。考虑到本文分析的进给 系统应用场景为滑块滚道面磨削,根据设计资料, 滑块滚道面磨削所使用的砂轮尺寸较小,直径约 为45mm,在精磨阶段砂轮线速度约为30m/s。 经计算可知,在进行滑块滚道面磨削时,砂轮转频 可达约212Hz。因此,在滑块滚道面磨削过程中, 由于某些轻微扰动、砂轮磨粒磨损等原因而导致 磨削力变化时,砂轮处将会产生较大频率的激励 载荷,可能引起共振,这就使得该双导程进给系统 虽具有较高的1阶固有频率,但在应用于滑块滚 道面磨削时,仍需进一步优化结构以提高其动态 特性;或通过在加工时调整工艺参数,使加工频率 落在各阶固有频率之间,以避开共振。

4 结语

 介绍了一种兼具高速和高机械分辨率特性 的新型双导程进给系统。为解决传统滚动直线进 给系统中速度和机械分辨率难以同时兼顾的问题 提供了新思路。

2)以滑块专用磨床上 y 轴双导程进给系统为 研究对象,基于 Workbench 对其进行了静动态特性 分析。静态特性分析表明:该进给系统最大应力约 为 1.65 MPa,远小于材料 HT250 的屈服强度;最大 变形约为 11 μm,砂轮处变形约为 4.2 μm。

3) 动态特性分析表明:1 阶固有频率约为 138.34 Hz,与传统单丝杠及双丝杠驱动进给系统 进行对比,双导程进给系统的1 阶固有频率更高, 动态特性更好;充分考虑滑块滚道面磨削工艺后 发现该进给系统在磨削时仍有可能引发共振,故 需进一步优化结构或在加工时调整工艺参数,以 避免共振发生。

参考文献:

- [1] 刘不凡,司欣格,包建东,等.基于激光的导轨直线度 检测算法研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(1): 140-142.
- [2] 张璐. GZB45 型滚动导轨滑块磨削表面质量的实验 研究[D]. 南京:东南大学,2020.
- [3] 清华大学,山东华准机械有限公司. 直线进给装置: CN202210051132.1[P].2022-04-15.
- [4] 杨国维. 立式加工中心 Z 向双驱直线进给系统静、动 特性分析与优化[D]. 南京:南京理工大学,2014.
- [5] 朱坚民,张统超,李孝茹. 基于结合部刚度特性的滚 珠丝杠进给系统动态特性分析[J]. 机械工程学报, 2015,51(17):72-82.
- [6] 丁喜合,袁军堂,汪振华,等.数控机床双丝杠驱动直 线进给系统静动态特性分析[J].机械设计与制造, 2014(3):155-157.
- [7] 张文杰,刘更,马尚君,等.不同安装方式下行星滚柱
 丝杠副载荷分布研究[J].西北工业大学学报,2015, 33(2):229-236.
- [8]郑天池,张军,鞠家全,等.直驱型高速立式加工中心 设计与静动态特性分析[J].制造业自动化,2015, 37(16):99-102.

收稿日期:2023-04-12