

动梁式龙门机床双驱动态不同步误差补偿研究

程 瑶¹ 赵万华¹ 李玉霞¹ 杨清宇²

1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室,西安,710049

2. 西安交通大学电信与信息工程学院,西安,710049

摘要:针对动梁式龙门机床双驱系统广泛存在的双驱不同步问题,测量并设计补偿控制器以补偿双驱动态不同步误差。首先规划了S形加减速曲线输入,利用光栅尺反馈测量出系统的不同步误差。然后设计了动态不同步误差补偿控制器,采用PID控制算法,实现了对双驱两同步轴动态不同步误差的补偿,其中PID控制算法的参数通过稳定边界法确定。最后,在DK-1200动梁式龙门数控机床上进行了实验,实验结果验证了该补偿控制器的有效性。

关键词:双驱动;动态不同步误差;PID补偿;稳定边界法

中图分类号:TH39

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.08.008

Research on Compensation of Dynamic Non-synchronous Errors of Dual-drive System in Gantry-type Machine Tools

Cheng Yao¹ Zhao Wanhua¹ Li Yuxia¹ Yang Qingyu²

1. State key laboratory for manufacturing systems engineering,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049

2. School of electronic and information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049

Abstract: In order to solve the problem of dynamic non-synchronous widely existing in dual drive machine tools, the non-synchronous errors were measured and a compensation controller was designed. First, a kind of S accelerate/decelerate curve was deduced, the dynamic non-synchronous errors were detected using linear scale. Second, PID compensation controller was designed to compensate the non-synchronous errors and the parameters of PID controller were obtained by means of Z-N method. Finally, some experiments were carried out on DK-1200 gantry-type machine tools with travelling bridge. The results show that PID controller has a satisfactory performance.

Key words: dual drive; dynamic non-synchronous error; PID compensation controller; Z-N method

0 引言

双电机共同驱动的动梁式龙门结构越来越多地应用于高速、高精度数控机床中。由于双电机共同驱动的机械结构并不总是形成对称结构及对称受力,导致横梁两端位移不一致,从而使双驱动系统产生不同步误差,影响加工精度。实际机床运行中,速度和加速度的实时变化导致不同步误差变化更加复杂。因此,研究动态不同步误差的成因,并针对性地采用补偿算法对其进行补偿显得尤为必要。

目前虽已有很多学者对机床单轴误差补偿进行了研究,但是关于双驱动结构应用于实际机床时的不同步误差补偿研究多停留在理论仿真的阶段^[1-4],或只是针对双驱同步控制方式进行研究,对机床双驱动加减速变化的动态过程未作研

究^[5]。很少有文献涉及将补偿算法应用到实际机床的双驱控制系统中进行动态误差补偿。

本文以动梁式龙门数控机床DK-1200为实验平台,规划了一种S形加减速曲线,实现了加减速实时变化时,动态不同步误差的测量及存储。设计了动态不同步误差补偿控制器,以实现双驱动态不同步误差的补偿。最后在实际机床上进行实验,验证了动态不同步误差补偿控制器的有效性。

1 双驱不同步误差的测量

1.1 运动路径规划

本文将S形加减速曲线^[6]作为测量双驱不同步误差的运动路径。S形加减速曲线的特点是速度、位移曲线皆为连续变化的曲线,可以使电机在加减速时运动平稳且振动小。S形加减速曲线的加速度与时间关系如图1所示,各参数表示如下:

收稿日期:2011-01-24

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX04009-015);国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2009CB724407)

$$t_{aa} = t_{ad} = v/a_{avg} - v/a_{max} \quad (1)$$

$$t_{c1} = 2v/a_{max} - v/a_{avg} \quad (2)$$

$$t_{c2} = S/v - v/a_{avg} \quad (3)$$

式中, t_{aa} 、 t_{ad} 分别为加速度的增大时间和减小时间; t_{c1} 、 t_{c2} 分别为匀加速度时间和匀速时间; v 为最大速度; a_{max} 为最大加速度; a_{avg} 为总行程中的平均加速度; S 为行程。

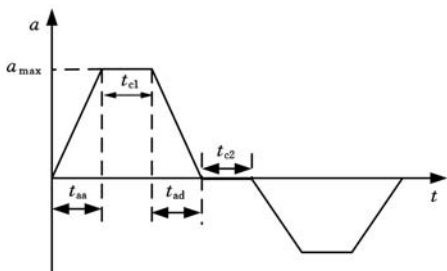
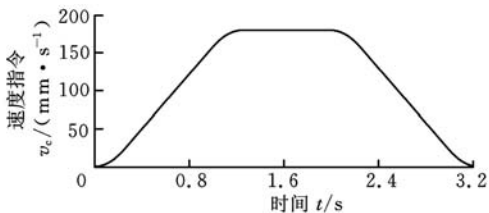


图 1 S 形曲线加速度关系图

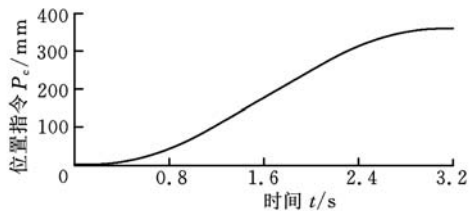
S 形动态曲线可以根据最大速度 v 、最大加速度 a_{max} 、平均加速度 a_{avg} 以及行程 S 这四个参数进行确定。根据机床的实际情况, 采用表 1 所示的参数值来规划 S 形加减速曲线。规划好的 S 形加减速曲线的速度和位置指令曲线如图 2 所示。

表 1 S 形曲线参数表

| v (mm/s) | a_{max} (mm/s ²) | a_{avg} (mm/s ²) | S (mm) |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|----------|
| 180 | 180 | 144 | 360 |
| 120 | 50 | 40 | 450 |
| 100 | 45 | 35 | 450 |



(a) 速度指令曲线



(b) 位置指令曲线

图 2 S 形曲线速度与位置指令曲线图

1.2 实验系统

动态不同步误差的测量、储存以及补偿器都是基于 PA(power automation) 开放式数控系统的二次开发功能来实现的。PA 开放式数控系统是基于 PC 机的纯软件开放式系统, 整个软件的结构组成可以分为人机界面、解释器、插补器、位置控制器、PLC。PA 数控系统各部分的组成关系如图 3 所示。其中, 解释器、插补器和 PLC 都是对用户开放的, 系统留给用户一个二次开发接

口, 通过二次开发, 用户可以实时读取解释器内程序运行进度, 在插补器中加入自己的插补、补偿算法, 实时读取系统运行中的参数。

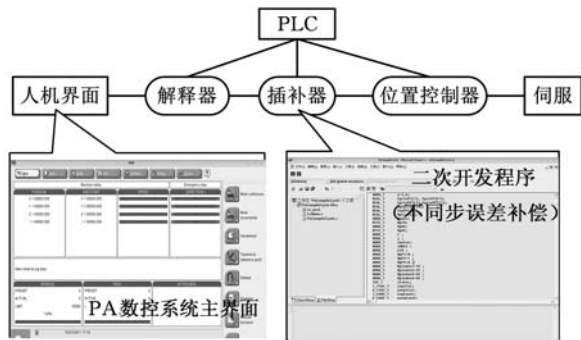


图 3 PA 数控系统各部分结构关系图

本文采用的实验平台为 PA 开放式数控系统控制下的 DK-1200 数控机床(图 4)。机床双驱动结构的两同步轴分别安装海德汉 LS177 封闭式光栅尺, 其分辨率为 $0.5\mu\text{m}$, 精度为 $\pm 3\mu\text{m}/\text{m}$, 双驱动两轴的最大速度可达 $12\text{m}/\text{min}$, 最大加速度为 $0.5g$, 数控系统的插补周期为 2ms 。由于光栅尺反馈的两轴实际位置数据没有自动保存功能, 因此本文基于开放式 PA 数控系统所提供的二次开发平台, 开发了光栅尺反馈数据的实时读取及保存功能, 使得 CNC 系统可以在机床运行的同时将光栅尺反馈的两同步轴位置值保存下来。数据读取及保存的采样率为 50Hz 。实验中以 S 形曲线作为位置指令输入, 实时测量双驱两轴的位置反馈输出(存储为主动轴的位置反馈 Y_p 和从动轴的位置反馈 V_p)。将 $Y_p - V_p$ 作为动态不同步误差, 图 5 和图 6 所示为使用表 1 中第一行参数的测量结果。多次测量显示, 双驱不同步误差都在 $-2\sim 16\mu\text{m}$ 范围内, 测量结果具有重复性。



图 4 DK-1200 数控机床

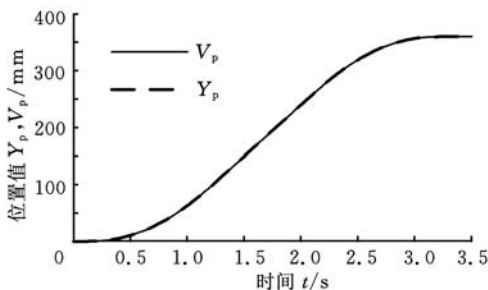


图 5 双驱两同步轴实测位置图

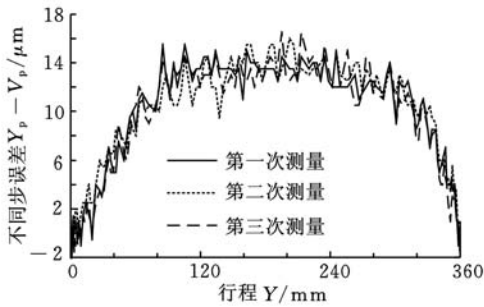


图 6 不同步误差测量结果图

2 动态不同步误差补偿控制器设计

2.1 不同步误差补偿架构

现有的双驱动控制分为串联控制、并联控制及主从控制。本文中的实验平台采用主从控制，即主动轴接收位置指令，从动轴跟随主动轴的速度指令。

基于PA开放式数控系统，本文设计了图 7 所示的不同步误差补偿架构，以实现不同步误差的实时补偿。以主动轴位置指令为基准，通过补偿控制器计算出不同步误差的补偿量，并将补偿量前馈到从动轴的速度指令中，进而对两轴的不同步误差进行补偿。

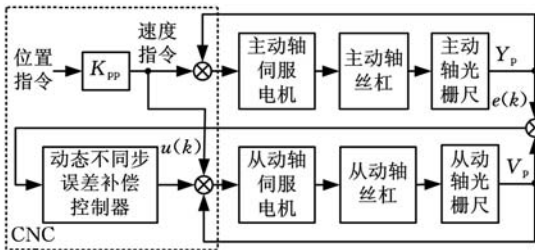


图 7 双驱不同步误差补偿的结构图

此动态不同步误差补偿控制器将 PA 数控系统的二次开发功能嵌入数控系统发挥补偿作用。补偿控制器的具体实现方式如下：使用 PA 数控系统提供的二次开发功能，实时读取 Y_p 和 V_p ， $Y_p - V_p$ 即为不同步误差 $e(k)$ 。不同步误差(作为动态不同步误差补偿器的输入)经过误差补偿器的计算后，输出从动轴的位置补偿值 $u(k)$ ，补偿值与数控系统本来的位置指令共同作用生成新的从动轴位置指令。本文将 PID 控制算法作为补偿控制器中的控制算法。

2.2 PID 控制算法及参数整定

由于上述不同步误差补偿器要直接嵌入机床的数控系统，对机床的机械结构发生控制作用，若使用的控制算法太复杂，会给机床数控系统带来不必要的负担，实现起来也会增加难度，甚至出现控制算法无法嵌入数控系统的状况，因此本文首先考虑采用目前应用较为成熟的 PID 控制算法。

PID 控制算法只需要确定 3 个控制参数，就可以达到控制的目的，其控制器的输出和输入之间为比例—积分—微分的关系，其算法表达式为

$$u(k) = k_p[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T}[e(k) - e(k-1)]] \quad (4)$$

式中， k_p 为比例增益； T_i 为积分时间； T_d 为微分时间； T 为临界振荡周期。

算法流程如图 8 所示。

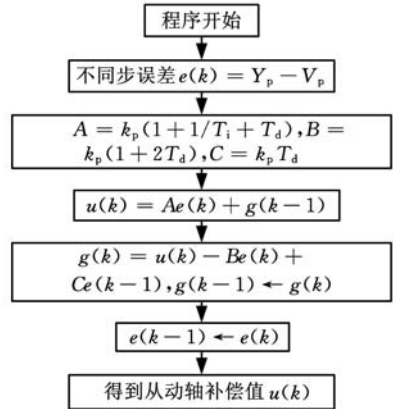


图 8 PID 控制算法流程框图

可以看出，PID 控制算法是通过 k_p 、 T_i 和 T_d 3 个参量起作用的。参数整定通过对这 3 个参数的选择，使不同步误差补偿模块的控制达到最佳状态。由于本文使用的算法直接应用于动梁式龙门机床，具有结构复杂、数学模型不确定等特点，因此本文采用工业现场最为常用的稳定边界法^[7]来实现算法的参数整定。稳定边界法的优点在于不需要获得调节对象的准确动态特性，方法简单，计算方便。针对改进的积分分离的 PID 控制算法，本文使用的参数整定步骤如下：

(1) 将 PID 控制部分的积分时间 T_i 和微分时间 T_d 都置零，比例增益 k_p 设为较小的值，使机床稳定运行。

(2) 逐步加大比例增益 k_p 直到机床出现临界振荡状态，此时的增益值即为临界增益 k_{pm} ，同时要记录此时系统的临界振荡周期 T 。

(3) 按照表 2 中的公式计算相应的 PID 参数，并应用于机床进行调试验证。

表 2 稳定边界法 PID 参数整定的计算公式

| 调节规律 | 整定参数 | | |
|------|---------------|--------|----------|
| | k_p | T_i | T_d |
| P | $0.5k_{pm}$ | | |
| PI | $0.455k_{pm}$ | $1.1T$ | |
| PID | $0.6k_{pm}$ | $0.5T$ | $0.125T$ |

3 参数整定及补偿结果

由于本文的补偿算法直接应用于实际机床，

相比于仿真有更多不确定因素,因此开始时比例增益 k_p 不能设得太大,以 0.5 为起始点,以 0.2 为增量增加,测得 $k_p = 2.1$ 时机床达到临界振荡状态。此外,由于直接测量振荡周期较为困难,本文测量机床临界振荡时的位置输出,通过对输出进行傅里叶变换得到振荡频率 f ,如图 9 所示,从而计算出临界振荡周期 $T = 1/f = 0.07s$ 。根据表 2 中的公式计算得到整定参数为 $k_p = 1.26, T_i = 35ms, T_d = 8.75ms$ 。首先将整定得到的 k_p 减小, T_i 和 T_d 增大,再应用于实际机床,以防止参数的控制作用过大而引起机床振动,之后再结合实际补偿效果逐步增大 k_p ,减小 T_i 和 T_d ,直到达到最优的补偿效果。最终确定实际应用的参数为 $k_p = 1, T_i = 40ms, T_d = 1ms$ 。将表 1 所列 3 种不同参数的 S 形加减速曲线作为输入,在机床的双驱同步系统上进行实验验证,测量加入补偿控制器前后的双驱不同步误差,所得补偿效果如图 10 ~ 图 12 所示,补偿前后数据如表 3 所示。可以看出,对于 3 种不同参数的 S 形加减速曲线输入,经过补偿控制器补偿后,不同步误差都可以被补偿到 $-3 \sim 4\mu m$ 的范围内。由此可见,此补偿控制器对双驱动态不同步误差有明显的补偿效果。

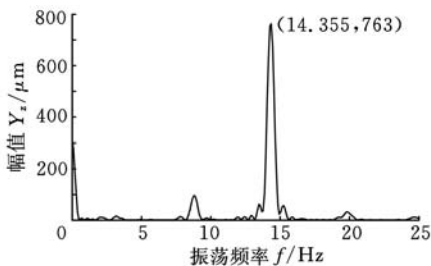


图 9 临界振荡时位置输出的傅里叶变换结果图

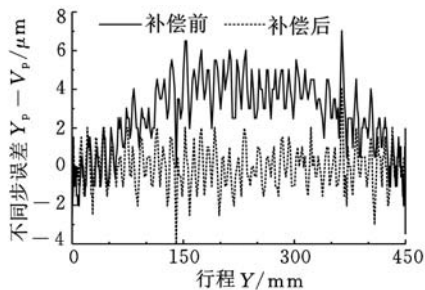


图 10 $v = 100\text{mm/s}$ 时 S 形曲线下不同步误差补偿效果

表 3 不同 S 形曲线下的补偿结果

| 补偿速度 v (mm/s) | 补偿前 (μm) | 补偿后 (μm) |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| 100 | -4 ~ 7 | -3 ~ 2 |
| 120 | -3 ~ 7 | -2 ~ 2 |
| 180 | -2 ~ 16 | -2 ~ 4 |

4 结语

本文以动梁式龙门数控机床为实验平台,以双驱同步结构所产生的不同步误差为研究对象,

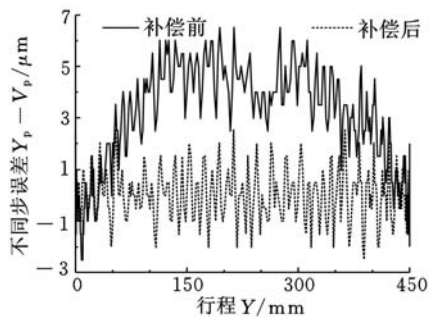


图 11 $v = 120\text{mm/s}$ 时 S 形曲线下不同步误差补偿效果

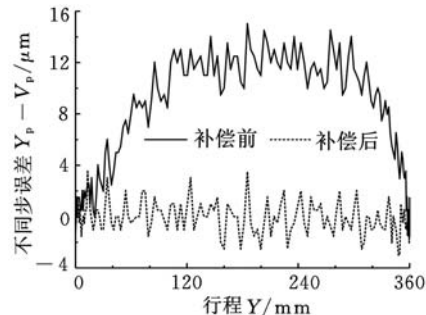


图 12 $v = 180\text{mm/s}$ 时 S 形曲线下不同步误差补偿效果

实现了双驱动态不同步误差的测量、补偿以及实验验证。考虑龙门双驱的机械耦合以及摩擦特性造成的不同步误差问题,开发了动态不同步误差补偿控制器,并使用开放式 PA 数控系统的二次开发功能将补偿控制器嵌入数控系统。将 PID 控制算法作为动态不同步误差补偿算法,结合机床实际应用的特点,使用稳定边界法,完成了 PID 控制算法的参数整定。最后在实验室的 DK-1200 龙门数控机床上将补偿控制器与开放式 PA 数控系统进行了集成,通过进一步实验,测量 3 种不同参数的 S 形曲线的补偿前后误差。结果表明,对于 3 种不同参数的 S 形加减速曲线,经过补偿控制器补偿后,不同步误差都可以被补偿到 $-3 \sim 4\mu m$ 的范围内,证实了此补偿控制器可有效补偿动梁式龙门机床双驱结构的动态不同步误差。

参考文献:

[1] 郭庆鼎,唐光谱,唐元钢,等. 基于自适应控制的双电动机同步传动控制技术的研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 79-81.

[2] Zhao Ye, Yang Kaiming, Zhu Yu. Modeling and Analyzing of an H-drive Precision XY Stage[C]// 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Wuhan, China, 2010: 6311-6314.

[3] Teo C S, Tan K K, Huang S, et al. Dynamic Modeling and Adaptive Control of a Multi-axial Gantry Stage[C]// 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Hague, Netherlands,

凸轮轴偏心的测量与修正方法研究

孔明¹ 丁力华^{1,2} 赵军¹ 周广才²

1. 中国计量学院,杭州,310018 2. 哈尔滨精达测量仪器有限公司,哈尔滨,150000

摘要:将实用谐波分析技术应用用于凸轮轴两端主轴颈偏心修正中,建立了基于凸轮轴两端主轴颈的各凸轮偏心距和偏心角的计算模型并对其算法进行了分析,通过偏心修正减小了凸轮轴测量基准和设计基准不统一以及凸轮轴自身弯曲带来的系统误差,避免了传统修正偏心算法中的插值误差。搭建了测量凸轮轴的实验平台,对主轴颈和凸轮的实测数据进行了偏心修正。实验结果表明,该方法对主轴径和凸轮偏心量的修正效果明显,提高了仪器的测量精度。

关键词:凸轮轴;偏心修正;测量与修正;实用谐波分析

中图分类号:U464.134

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.08.009

Research on Measuring and Correcting Method for Camshaft Eccentricity

Kong Ming¹ Ding Lihua^{1,2} Zhao Jun¹ Zhou Guangcai²

1. China Jiliang University, Hangzhou, 310018

2. Harbin Jingda Measuring Instrument Co., Ltd., Harbin, 150000

Abstract: A practical harmonic analysis technology and its application in the correction of main journal eccentricity of camshaft ends was proposed, a calculation model of camshaft eccentric distance and eccentric angle was established based on the main journal eccentricity of camshaft ends and the algorithm was analyzed, which would reduce system errors caused by the disunity between measurement datum and design datum of camshaft, and the deflection of the camshaft itself and avoid interpolation errors of traditional eccentricity correction algorithm. Experimental platform for measuring camshaft was built, measured data was corrected according to the proposed eccentricity correction algorithm. Experimental results demonstrate the proposed algorithm can correct eccentricity of main journal eccentricity of camshaft ends and camshaft itself effectively, the accuracy of instrument is improved.

Key words: camshaft; eccentricity correction; measurement and correction; practical harmonic analysis

0 引言

在凸轮测量过程中,由于凸轮轴安装测量的旋转中心与凸轮实际工作时的旋转中心不在同一轴线上,因此,测量结果包含了测量基准与设计基准不统一引起的误差成分^[1-3]。同时,加工误差或自然因素等引起的凸轮轴自身的弯曲也会带来偏心误差。因此要对凸轮的偏心进行修正,以反映

凸轮本身的真实误差情况^[4-5]。

目前,主要的凸轮偏心修正算法有插值法、差分法、平均值法、曲线拟合法等^[6-8]。各种算法都有缺点:插值法计算会引入其他误差,削弱偏心修正的效果;平均值法和差分法不能对非对称凸轮进行修正;曲线拟合法精度较低,不能用于高精凸轮轴测量。因此本文根据实际的等周期测量数据,利用实用谐波分析技术,按照谐波分解式求系数的方法求出凸轮轴两端主轴颈的偏心量,进而

收稿日期:2011-10-17

2005:3374-3379.

[4] Gomand J, Bearee R, Kestelyn X, et al. Physical Dynamic Modeling and Systematic Control Structure Design of a Double Linear Drive Moving Gantry Stage Industrial Robot[C]//2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2007:1-9.

[5] Lorenz R D, Schmidt P B. Synchronized Motion Control for Process Automation[C]//Industry Application Annual Meeting, San Diego, United States, 1989:1693-1698.

[6] 黄艳,李家霖,于东,等. CNC系统S形曲线加减速

算法的设计与实现[J]. 制造技术与机床, 2005(3): 55-58.

[7] Ziegler J G, Nichols N B. Optimum Settings for Automatic Controllers[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1993, 115(213): 759-768. (编辑 张洋)

作者简介:程 瑶,女,1988年生。西安交通大学机械工程学院硕士研究生。主要研究方向为双驱动同步控制技术。赵万华,男,1965年生。西安交通大学机械工程学院教授、博士研究生导师。李五霞,女,1987年生。西安交通大学机械工程学院硕士研究生。杨清宇,男,1974年生。西安交通大学电子与信息工程学院副教授。