

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.03.013

基于伺服电机的齿轮箱传动精度检测系统

马天文, 周建军*, 张亚平

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对传统齿轮箱传动精度检测设备中存在由于安装调整复杂而影响测试精度的问题, 提出了一种采用伺服电机检测齿轮箱传动精度的新方法, 直接利用伺服电机集成驱动电机和编码器实现了检测中系统的驱动和转角信号采集, 简化了传动精度检测系统结构。该系统以伺服电机、数据采集卡为硬件基础, 在被测齿轮箱的输入轴与输出轴两端分别连接一台伺服电机, 用作驱动与负载; 以LabVIEW为软件平台, 实现了高频时钟脉冲细分编码器信号的空间脉冲的方法, 显示了被测齿轮箱传动精度曲线, 对系统的软、硬件实现方法进行了初步探索, 对伺服电机集成的编码器信号进行了采集。研究表明, 伺服电机编码器信号的采集与复用是可行的, 因此利用伺服电机测量齿轮箱传动误差的方法具有可行性。

关键词: 齿轮箱传动精度; 测量; 伺服电机; 细分

中图分类号: TP391; TH132; TH86

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)03-0303-04

Transmission accuracy test rig for gearboxes based on servo motors

MA Tian-wen, ZHOU Jian-jun, ZHANG Ya-ping

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to solve the problems of the complicated installation adjustment and the testing accuracy influence in the testing equipment of traditional gear box transmission accuracy, a novel method to test it with servo motor was investigated. This new way, which directly used the servo motor to integrate a driving motor and an encoder to realize the signal acquisition of both the actuator and torsion angle, simplified the transmission accuracy system structure. In the system, based on the hardware such as servo motor and data acquisition card, two servo motors were utilized as the actuator and the load at both the input and output shaft of the tested gear box. In addition, high frequency clock pulse was adapted to divide the encoder signal of the space pulse based on the LabVIEW. Then, transmission accurate curves of the tested gear box were displayed and the implementation of the system's software and hardware was explored initially, the experimental signals of the integrated servo-actuator encoder were acquired. The results indicate that the acquisition and reuse of the servo-actuator encoder signal are available, therefore, the method to measure the transmission accuracy of the gear box using a servo motor is feasible.

Key words: gearbox transmission accuracy; measuring; servo motor; subdivide

0 引 言

机械的传动部件是推动机器向高速、高效、节能、高精度、高可靠性、智能化、轻量化和多样化方向发展不可或缺的关键基础单元。而齿轮传动^[1]在所有的机械传动中应用最广, 其传动效率高, 结构紧凑, 工作可靠、寿命长, 传动比稳定。现代高端装备

(如航天工业、高精度机床、机器人等领域)对传动机构的传动精度要求很高。为此研究者需要对传动误差TE(Transmission Error)进行精确测量与控制, 为在设计和制造中采取合理的方法补偿、减少传动误差提供指导, 提高关键零部件制造精度, 从而提高齿轮箱产品质量。

传动误差^[2]是指在传动链的输入轴的驱动完全准

收稿日期: 2012-09-04

作者简介: 马天文(1987-), 男, 浙江嘉兴人, 主要从事智能机电系统与数控技术、检测与控制技术方面的研究。E-mail: matianwen0000@126.com

通信联系人: 周建军, 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: zhoujj@hdu.edu.cn

确且为刚性的条件下,其输出轴的实际输出角度与理论输出角度的差值。

目前国内外对传动精度检测装置的研究已达到了角秒的精度。资料显示,格里森公司有专门测量齿轮传动误差装置凤凰500数控齿轮检验机,测量精度在 $\pm 1''$;日本小笠原开发的MEATA-3型齿轮副传动精度检测仪其分辨率为 $1''$;国内彭东林老师发明的时栅位移传感器精度达到 $\pm 0.8''$ 。

当前齿轮箱检测设备一般是由电机、电机控制模块、带轮、联轴器、编码器、编码器信号采集调理整形模块、加载器、数据处理显示模块等装配在一起而构成的。由此可见,传统的齿轮箱检测设备结构比较复杂,且设备各个组成部分的安装误差都对设备的检测精度有所影响,其中编码器的安装误差对其影响较大。现有齿轮箱检测设备中的编码器^[3]与被测齿轮箱之间通过联轴器相联,非专业人员操作时其安装精度很难保证小于 0.02 mm 。安装调整带来的同轴度误差直接给传动精度测量带来测试误差,同时由安装调整带来的同轴度误差过大会产生附加载荷,并产生振动,降低了运动传递平稳性,从而进一步降低了传动误差的检测精度。

影响传动精度检测的另一个问题是,无论研究者采用何种检测角度传感器^[4],由于传感器结构和制造技术的限制,大都需要采用细分方法^[5]提高检测分辨率和精度。而现有的方法中,插补细分方法均与传感器工作转速有关,稳定测量中的传感器转速,是提高测试精度的关键技术之一。

本研究针对上述的传统的齿轮箱检测设备的缺点,将伺服电机^[6]用于齿轮箱传动误差的检测,直接利用伺服电机中集成的编码器,解决了安装时同轴度调整问题,减小了安装引入的误差。采用伺服电机的齿轮箱精度测量系统可简化为4个模块:伺服电机、伺服电机驱动器、联轴器、采集数据处理显示模块,结构较传统检测设备简单,且将电机控制、信号调理等模块集成在一个电气箱内,便于现场维护与使用。同时利用伺服电机的低频特性好和控制精度高的优点,研究者能更有效地测量被测齿轮箱在不同转速下的传动表现,更全面地检测齿轮箱的整体表现。

1 伺服电机齿轮箱传动精度检测系统

基于伺服电机的齿轮箱传动精度检测系统由两台集成了光电编码器的伺服电机、被测齿轮箱、配套的伺服放大器、数据采集卡和计算机等构成。一台电机用于驱动及获取输入轴端的角位移脉冲信号,另一

台用于输出端加载(消除齿轮箱传动中的齿侧间隙,以实现轮齿间的单面啮合)及获取输出轴端的角位移脉冲信号。

伺服电机是一种集成了交流电机和编码器的运动控制驱动器,利用伺服放大器控制,能够精确控制速度和位置。其工作原理是:当伺服电机旋转时,所带编码器发出对应的运转脉冲,通过脉冲数量与编码器反馈的脉冲数量进行比较,可精确控制电机的转动,实现精确的运动控制与定位。伺服电机系统中的编码器和驱动电机由工厂化集成制造装配,其安装精度可达 $<0.002\text{ mm}$,同轴精度很高,从而提高了设备的检测精度。伺服电机的集成性还体现在驱动器不仅集成了编码器信号的调理整形模块,还集成了电机的控制模块,提高了整个检测装置的集成化程度,使得整个装置简单地分为3个部分:伺服电机和被测齿轮箱等组成的机械部分、伺服放大器等控制部分、数据采集处理显示部分。而且其编码器信号除了用于电机的闭环控制外,还可单独取用,经相关信号处理,可用于齿轮箱传动精度检测,实现齿轮箱传动精度检测中驱动与检测信号的一体化。

系统基本架构如图1所示,驱动主动电机转动,通过被测齿轮箱将动力传递给负载电机,并通过该伺服电机加载。集成在两电机上的编码器输出各自转角信息,反馈到伺服放大器,利用数据采集卡同时从两个伺服放大器采集编码器的反馈信号,再由计算机和开发的专用软件进行数据处理,即可实现齿轮箱传动误差的检测。

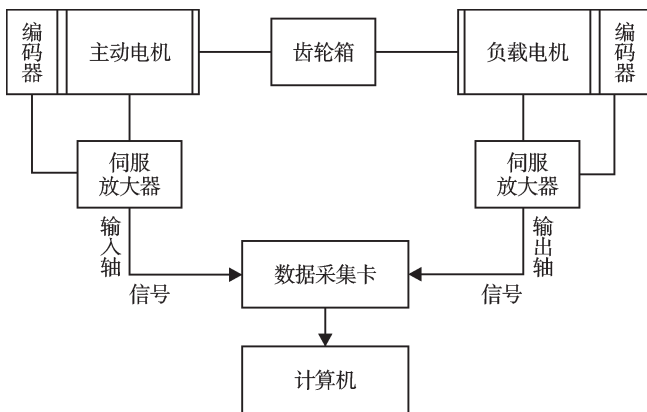


图1 系统的结构示意图

此外,本研究对编码器的信号进行一定的处理,如采用倍频、分频、细分等手段,以提高编码器的精度。彭东林老师提出的利用高频时钟脉冲去细分编码器信号的空间脉冲的方法,大大提高了检测设备的测量精度。其原理是:利用高频时钟脉冲^[7](相对于时间均匀分布的时间脉冲)对编码器信号(相对于空间均匀分布的空间脉冲)进行细分计数的方法,该方法

对硬件要求简单,且在硬件条件有限的情况下,提高了系统的检测精度,因此该设计选择脉冲细分计数法实现传动误差的测量。

该方法工作原理^[8]如图2所示,传动误差 $\Delta\phi_i$ 的计算公式为:

$$\Delta\phi_i = (\sum P_1 + \delta_i + \delta'_{i-1} - P_0) N_1 \quad (1)$$

式中: $\sum P_1$ —一个 P_2 脉冲周期内, P_1 脉冲的整数个数; P_0 —无传动误差时每个样信号所对应的 P_1 脉冲个数; $\delta_i + \delta'_{i-1}$ —一个 P_2 脉冲周期内, P_1 脉冲的小数部分,其中 $\delta'_{i-1} = 1 - \delta_{i-1}$; N_1 —一个 P_1 脉冲的脉冲当量。

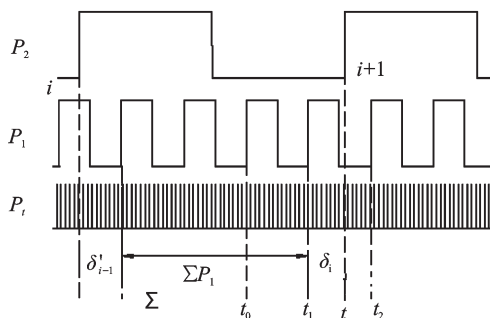


图2 信号细分原理图

第 i 个 P_2 脉冲内 P_1 脉冲的小数 δ_i 可以用 t_0 、 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 4 个参数采用拉格朗日插值和抛物线插值^[9]等方式求得。

但这种方法需要假设被测对象在一定时间内作匀速运动,所以对测量设备中电机运行的平稳性、匀速性要求较高。在传统的检测设备中,普通电机驱动检测系统时,运转平稳性较差,且控制不够精确,将直接影响最终的测量结果。

2 系统软、硬件实现方法

系统的硬件包括动力模块(伺服电机+伺服电机控制器)、信号采集模块(采集卡)和计算机;软件采用美国国家仪器(NI)公司的LabVIEW,在系统中的作用是存储采集的信号数据并进行运算处理,然后以图形化方式显示处理结果。

三菱伺服电机集成的编码器是采用空心轴的方式安装,其编码器的同轴度误差可忽略,多年工业现场应用(文献)证明,三菱伺服电机性能稳定,精度高。其MR-J3系列相比MR-J2S系列,其编码器分辨率更高,电机低速时稳定性更好;J3系列中HF系列的电机拥有比HC系列更小的体积、更高的转速。本研究针对精密小功率减速箱,选用的伺服放大器型号为MR-J3-20A,电机型号为HF-KP23,200 W的低惯量电机。低惯量电机有更好的速度控制性。电机编码器

信号分辨率经过伺服放大器倍频后,最高达到262 144线,输出脉冲的形式为差分形式。

由于伺服电机通过伺服放大器就可以便捷地控制电机正、反转,测量齿轮箱在正、反转时的传动误差时,不需要通过软件对编码器的A、B相脉冲进行方向辨别,只需采集A相的脉冲得到电机的位置信息,进行比较后就得到传动误差。

伺服放大器的实际输出脉冲数可输出的最大实际脉冲为65 536 n/r,脉冲当量为19.775"。研究者通过软件可以设置伺服放大器每转实际输出脉冲数,对应不同的电机转速,输出脉冲的频率为可调的,从而提高采集卡内部时基信号对编码器脉冲的细分数,获得更高的分辨率 K ,即:

$$K = \frac{1\ 296\ 000 N_1}{60 f_H} = \frac{60\ 000 N_1}{f_H} \quad (2)$$

式中: N_1 —高速端转速, f_H —高频时钟脉冲的频率, I —减速箱的理论传动比。

采集卡用于编码器信号的采集^[10]以及脉冲的计数。该设计选用NI公司的PCI-6221(37Pin)采集卡,其采样速率250 kS/s(多通道),拥有8路差分通道,16路单端模拟输入,10条I/O线和2个计数器/定时器,计数器的时基信号达80 MHz,两个模拟输出通道。本研究利用采集卡达到80 MHz时基信号,在伺服电机50转速下,分辨率可达0.013 5"。

计算机提供采集卡插槽以及软件环境,在采集卡的采集过程中,LabVIEW^[11]实现对数据的存储和处理,得到传动误差值。

针对传动误差 $\Delta\phi_i$,在系统检测实现时,具体处理方法如下:

整数部分 $\sum P_1$ 通过采集卡的模拟通道进行采集,在电脑中实现软件脉冲计数。在数据采集时,系统首先判断低速端的前后两个上升沿的数组索引和数组长度,然后按照这个数组索引以及数组长度去截取高速端的同样位置和长度的数据,判断这些采样点数中的脉冲数,就是整数部分 $\sum P_1$ 的值。然后依次计数每个 P_2 脉冲周期内的 $\sum P_1$,并形成一数组。

小数部分 $\delta_i + \delta'_{i-1}$ 利用采集卡两个计数器的功能(测量两个脉冲边沿间隔和脉冲周期测量),并借助于整数部分 $\sum P_1$ 实现。计数器1实现测量两个脉冲边沿的间隔的时钟脉冲计数 $N_{1i} = t_2 - t_1$;计数器2测量高速端的时钟脉冲 P_1 的每个周期所对应的时钟脉冲数 $N_{2i} = t_2 - t_1$ 。小数部分为:

$$\delta'_{i-1} + \delta_i = 1 - \delta_{i+1} + \frac{N_{1i}}{N_{2i} \sum P_1} \quad (3)$$

其中:

$$\delta_i = 1 - \delta_{i+1};$$

$$\delta'_{i-1} = N_{ii} / N_{2 \sum_i P_1}.$$

式中: $\sum_i P_1$ —当前小数部分所对应的第几个 P_1 脉冲数; N_2 —对应于第 i 的 P_2 脉冲内的小数分时, 对应 P_1 脉冲时钟脉冲值。

本研究依此计算每个 P_2 脉冲周期内 P_1 脉冲的小数个数, 并形成数组。

将整数部分和小数部分相加即可得到实际的传动比数组, 将该数组的每个值与理论传动比的值相减, 再与 P_1 脉冲信号的脉冲当量相乘, 即可得到每个周期的传动误差。

数据整合处理的 LabVIEW 程序如图 3 所示。

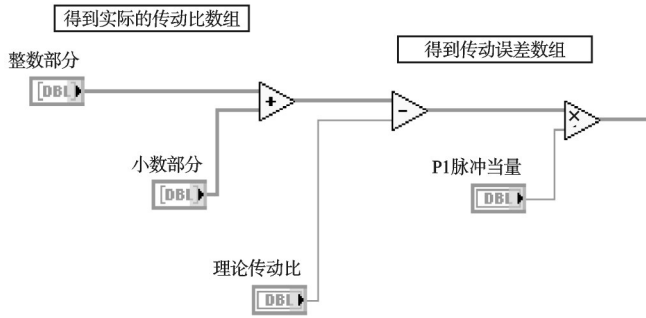


图3 数据处理程序

在对脉冲的计数中, 对脉冲上升沿的检测是准确计数的关键, 本研究在 LabVIEW 中通过采样值与设定的阈值进行比较以确定上升沿, 而为了防止信号中的杂波等干扰对上升沿的判断, 系统要求采集的编码器信号十分干净。

3 实验结果

该实验所用伺服电机的编码器信号经过伺服驱动器的调理整形后, 采集得到的波形如图 4 所示。

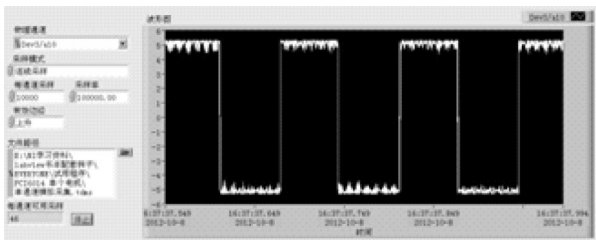


图4 电机编码器信号波形

从伺服电机驱动器上采集的编码器脉冲信号如

图 4 所示, 由图 4 可知该脉冲波形上升沿和下降沿均十分陡峭、光滑, 且在高、低电平期间均只有幅值很小的抖动, 只要设定合理的阈值, 完全可以准确无误地计数脉冲个数。由此可证明, 伺服电机编码器信号的采集与复用是可行的, 因此本研究所提出的利用伺服电机测量齿轮箱传动误差的方法具有可行性。

4 结束语

本研究设计了一套基于伺服电机的齿轮箱传动精度检测系统, 利用伺服电机的集成性, 实现了驱动、角位移信号采集、齿面单向加载的集成, 减小了系统的安装误差。该系统通过控制伺服电机运转速度测量齿轮箱在不同转速下的传动误差。

本研究所设计的测量系统中所用软件、电机等均采用商用产品, 例如美国 NI 软件平台 LabVIEW 及其数据采集卡、三菱伺服电机等, 便于该系统将来的应用和推广。

参考文献 (References):

- [1] 孙 桓, 陈作模, 葛文杰. 机械原理[M]. 7 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 彭东林. 时栅位移传感器与新型机床动态检测系统[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 15-18.
- [3] 张求知, 王 鹏. 光栅角编码器偏心误差修正方法研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(7): 64-67.
- [4] 刘 锋, 李充宁. 精密传动链传动误差测试方法综述[J]. 机电工程技术, 2010, 39(9): 73-76.
- [5] 宋现春, 艾 兴, 张承瑞. 机床传动误差测量方法研究综述[J]. 工具技术, 2003, 39(8): 7-10.
- [6] 张立新, 黄光美, 杨新刚, 等. 基于直驱电机的旋转轴精度检测系统的研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(1): 84-88.
- [7] 郑 永. 基于时栅传感器的精密蜗轮副动态检测技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 2011: 22-26.
- [8] 韩念琛, 薛应芳, 秦 将. 增量式编码器输出信号细分方法研究[J]. 太原理工大学学报, 2011: 51-54.
- [9] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [10] 何正嘉, 瞿艳阳, 张西宁. 现代信号处理及工程应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 27-29.
- [11] 阮奇楨. 我和 LabVIEW: 一个 NI 工程师的十年编程经验[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.

[编辑: 李 辉]