文章编号 1004-924X(2006)02-0274-05

大型天文望远镜摩擦传动系统低速特性的研究

汪达兴[1], 杜福嘉[1,2]
(1. 中国科学院 国家天文台 南京天文光学技术研究所,江苏 南京 210042;
2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

摘要:研究了大型天文望远镜摩擦传动系统的运行原理和特性,并进行了实验。结果表明,影响摩擦传动低速稳定运行的因素很多,主要有:编码器的测量误差,环境变化引起的误差,摩擦力矩和电机波动力矩等引起的误差,以及加工制造和安装引起的误差。另外在整个传动链中其它部分的摩擦力矩也不可能是一个定值,也存在力矩波动。结果还表明,利用非线性 PID 控制算法增益参数非线性变化的特性,可以使得控制系统既能达到响应速度快,无超调的目的,又能增强抵抗影响摩擦传动低速稳定运行因素的能力。实验中,低速可以达到 0.2″/s,位置精度为 0.032″(RMS),证明了这种方法是行之有效的。

关 键 词:天文望远镜;摩擦传动;超低速;非线性 PID 控制
中图分类号:TH751 **文献标识码**:A

Ultra-low speed research on friction drive for astronomical telescope

WANG Da-xing[1], DU Fu-jia[1,2]

(1. *Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210042, *China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*)

Abstract: The theory and characteristics of friction drive for a large astronomical telescope were presented. The results of experiment indicate that there are many factors influencing on the stability of low speed of friction drive. The main factors include: measuring error of encoder; error of environment variance; errors of friction torque and motor fluctuating torque and error of manufacturing and installing. In addition, the friction torque of total drive chain is fluctuation also. The results of experiments also indicate that the nonlinear characteristic of increment parameter of nonlinear PID control algorithm can achieve prompt response and non-overshooting of the control system. The nonlinear PID also enhances the stability to resist the influence of friction drive low speed. In this experiment, the low speed is 0.2″/s and position precision is 0.032″(RMS), which proved that this method is effective.

Key words: astronomical telescope; friction drive; ultra-low speed; nonlinear PID control

---

收稿日期:2005-12-22;**修订日期**:2006-01-16.
基金项目:国家重大科学工程项目 LAMOST 资助课题(No. 0983)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　引　言

随着天文科学的发展,人们希望看到更远、更暗的星,因此望远镜的口径越来越大,同时对望远镜跟踪精度的要求也越来越高。传统的中、小型望远镜传动一般采用齿轮传动、蜗轮蜗杆副传动或直接传动,这些方式在传动大型望远镜时在加工、技术和资金上有许多不足之处,不能满足实际的设计要求[1],因此必须有新的性价比高的传动方式来满足要求。摩擦传动由于机构响应速度快,低噪声和可以减小高频误差等优点,在大型天文望远镜中得到了越来越多的应用。由于望远镜在跟踪星体时速度非常低,这样摩擦传动必须工作在超低速状态,因此研究摩擦传动在超低速运行下的特性就成为迫切需要解决的问题。

2　摩擦传动原理和特性

摩擦是两物体在外力作用下所形成的实际接触区内作相对切向运动时所发生的能量施放过程。摩擦与人类的生产活动和日常生活有着极为密切的关系。例如在相互作用的表面之间如果没有摩擦存在,人就不能行走,车辆也无法运动。摩擦传动就是利用两轮直接接触所产生的摩擦力来传递运动和动力的一种机械运动。

摩擦传动对控制系统的挑战主要是摩擦模型的非线性,摩擦非线性能引起系统产生极限环和爬行振荡,对系统的低速特性影响很大。摩擦系统的动态特性非常复杂且充满了不确定性。目前已提出了许多摩擦模型,这其中 Stribeck 曲线是比较著名的摩擦模型[2],其模型曲线如图 1 所示。该图表明了在不同的摩擦阶段,摩擦力矩和速度之间的关系,摩擦模型主要把摩擦分为四个阶段,即静摩擦区和预滑位移区、边界润滑区、部分润滑区以及全润滑区。

Stribeck 摩擦模型如下:

当$|\theta(t)| < \alpha$时,静摩擦为

$$F_f(t)=\begin{cases} -F_m & F(t) > F_m \\ -F(t) & -F_m < F(t) < F_m \\ F_m & F(t) < -F_m \end{cases},$$

当$|\theta(t)| > \alpha$时,动摩擦为

$$F_f(t)=\left(F_c+(F_m-F_c)e^{-\alpha_1|\theta(t)|}\right)\operatorname{sgn}(\theta(t))$$

式中,$F(t)=-J\theta(t)$为驱动力,F_m为最大静摩擦力,F_c为库仑摩擦力,$\theta(t)$为转动角速度,α和α_1为非常小的、正的常数。

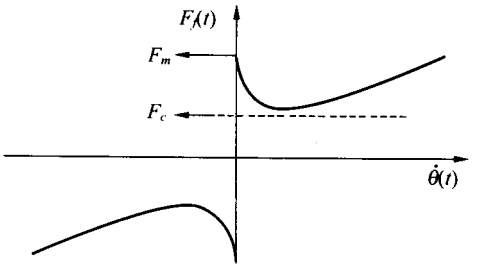

图 1　摩擦—速度曲线(Stribeck 曲线)

Fig. 1　Relationship between friction and velocity (Stribeck curve)

目前国内外有很多机构开展了摩擦传动系统的研究,在传动控制方面也提出了许多有效的控制方法,例如模糊控制加 PID 控制、自适应控制、鲁棒控制等等。这些方法不仅在理论上证明是可行的,而且在实际的控制系统中也得到了很好的应用[2-4]。本文根据摩擦系统的特性,并结合本系统的实际情况,控制方法采用非线性 PID 控制,也取得了良好的控制效果。

3　摩擦传动实验系统介绍

摩擦传动实验装置如图 2 所示,这是一个圆柱形滚动—滚动摩擦传动(R—R 型摩擦传动),此系统的摩擦传动是靠加在主动轮和从动轮上的正压力所诱生的摩擦力来传递动力的。实验装置主要包括:主动轮(小摩擦轮)、从动轮(大摩擦盘)、力矩电机、反馈控制系统(测速电机、码盘)和检测、调整机构。加力机构通过加力电机把主动轮压紧到大摩擦盘上,力矩电机驱动主动轮旋转,主动轮通过摩擦力驱动大摩擦盘旋转。

此系统摩擦盘的直径为 1 m,转动惯量为 34.54 kg·m^2。力矩电机的连续堵转转矩为 21.02 N·m(电枢电流为 4.1 A 时),测速机的输出斜率为 13.2 V/(r/min)。位置检测编码器与从动轮同轴安装,编码器选择德国海德汉(HEIDENHAIN)公司生产的 RON 905 增量式编码器,刻线数为 36000,系统准确度为 ±0.4″。编码器的输出信号在记数卡中进行了 4096 细分,因此位置分辨率为 0.0086″。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

此传动控制系统采用经典的三闭环控制,内环为电流环,中环为速度环,外环为位置环。其中转速和电流控制器采用模拟控制器,而位置控制器由数字控制器来实现。模拟控制器被校正为典型的 II型系统,以获得良好的快速和稳态性能。

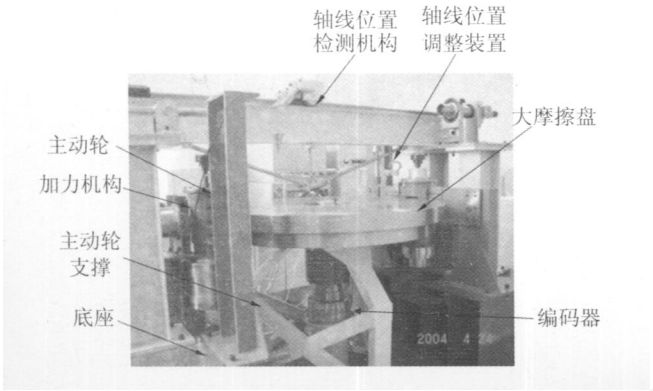

图 2　摩擦传动实验装置

Fig. 2　Friction drive experiment equipment

超低速高精度的摩擦传动要能够实现稳定运行,必须克服运行过程中的滑移问题。如果摩擦力矩小于阻力矩,两轮面接触处在传动中会出现相对滑移的现象,这种现象称为"打滑"。"打滑"问题是影响摩擦传动精度的最主要因素。为了避免"打滑"现象的发生,除了减少负载之外,就要增大主动轮和从动轮之间的摩擦力,增加的途径有:(1)增大正压力,但正压力过大可使接触表面产生塑性变形,并导致表面膜的破裂而粘着;(2)增大摩擦系数,这主要通过增加摩擦副材料的摩擦系数来实现。当一套传动系统设计完成后,摩擦系数的影响因素就确定了。对于本实验系统,解决"打滑"问题主要是通过调节正压力来解决。由参考文献 1 可知,在匀速运动和加速度小于 5″/s^2 时,正压力只要在一定的压力范围内则对传动精度的影响不大,但当加速度高于 10″/s^2 时,正压力对传动精度有较大影响。对于大型天文望远镜来说,加速度要求比较低,因此摩擦传动的"打滑"问题对大型天文望远镜的传动系统影响较小。本实验所加恒定力为 150 N。

4　计算机数字控制算法

由于要求摩擦盘的速度非常低,角速度转换为线速度时都是纳米级,因此影响系统运行平稳性的因素很多。例如速度给定为 0.2″/s 时对应摩擦盘的线速度为:484 nm/s,摩擦盘旋转一周所需要的时间为 75 天。

传统的传动控制大多采用常规 PID 串级控制策略。PID 控制是最早发展起来的工业过程控制方法,目前 PID 控制仍然是应用最为广泛的控制策略之一,因为它所涉及的算法和控制结构非常简单,易于参数调整。但常规线性 PID 调节器增益参数是固定的,因而这种纯线性的控制器有其根本性的难以克服的矛盾:若要超调量小,则难以保证快速性;而若要动态过程快,则超调量必然增大。如果对系统的动态特性要求相对比较高时,则常规线性 PID 调节器就很难达到设计要求[5]。由于摩擦传动具有时变、不确定和非线性等特性,采用常规 PID 控制就很难取得满意的控制品质。

为了克服常规线性 PID 控制中存在的超调量与响应速度之间的矛盾问题。本系统采用非线性 PID 控制。非线性 PID 控制器是把常规线性 PID 控制器的增益参数使用了一个关于误差的非线性函数,根据误差的大小和变化趋势来决定 PID 的比例、积分和微分增益参数。如果非线性函数选择恰当,可以使得控制系统既能达到响应速度快,无超调的目的,又能增强抗干扰能力。根据各个增益参数对系统性能的影响,兼顾快速性和稳定性,非线性 PID 控制增益参数与误差的关系公式如下:

$$k_p(e(t)) = a_p + b_p(1 - \sec h(c_p e(t))) \quad (1)$$

$$k_d(e(t)) = a_d + b_d(1 + c_d \exp(d_d \cdot e(t))) \quad (2)$$

$$k_i(e(t)) = a_i \sec h(c_i e(t)) . \quad (3)$$

式(1)中,k_p 为比例增益参数,a_p,b_p,c_p 为正实常数。当误差 $e \to \pm\infty$ 时,k_p 取最大值 $a_p + b_p$;当 $e = 0$ 时,k_p 取最小值为 a_p;调整 c_p 的大小可调整 k_p 变化的速率。式(2)中,k_d 为微分增益参数,a_d,b_d,c_d,d_d 为正实常数,a_d 为 k_d 的最小值,$a_d + b_d$ 为 k_d 的最大值,当 $e = 0$ 时,$k_d = a_d + b_d/(1 + c_d)$,调整 d_d 的大小可调整 k_d 的变化速率。式(3)中,k_i 为积分增益参数,a_i,c_i 为正常数,k_i 的取值范围为$(0, a_i)$,当 $e = 0$ 时,k_i 取最大值。c_i 的取值决定了 k_i 的变化快慢程度。图 3、4、5 就分别是比例、微分、积分增益随误差而变化的曲线。非线性 PID 调节器的控制输出为:

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

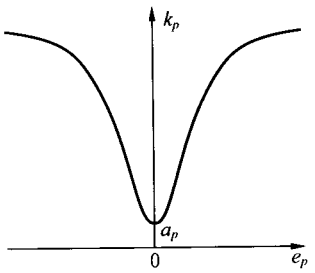

图 3　k_p 变化曲线

Fig. 3　Curve of k_p vs. error

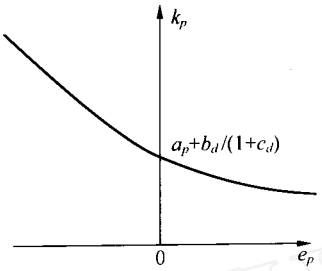

图 4　k_d 变化曲线

Fig. 4　Curve of k_d vs. error

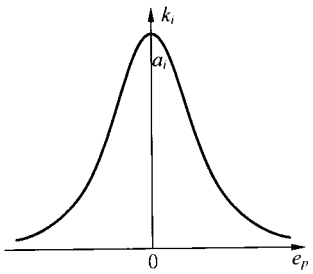

图 5　k_i 变化曲线

Fig. 5　Curve of k_i vs. error

$$u(t) = k_p(e(t))\,e(t) + k_i(e(t))\int_0^t e(t)\,\mathrm{d}t + k_d(e(t))\,\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}$$

5　实验结果和误差分析

5.1　实验结果

应用非线性 PID 控制系统对系统进行控制,根据实际运行情况进行调整,当 $a_p = 300$, $b_p = 100$, $c_p = 30$; $a_d = 0.5$, $b_d = 1.5$, $c_d = 3.5$, $d_d = 3$; $a_i = 100$, $c_i = 40$ 时,取得了良好的控制效果,图 6、7 就是摩擦盘速度设定为 0.2″/s 时采集的编码器输出信号和位置误差信号。为了看出长期运行的效果,特采集了 5 min 的数据,采样频率为 100 Hz。计算得出位置精度的 RMS 值为:0.032″,达到了用户的要求。

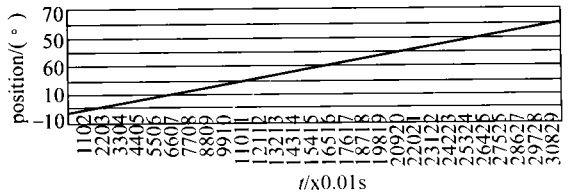

图 6　0.2″位置采样值

Fig. 6　Position curve (0.2″/s)

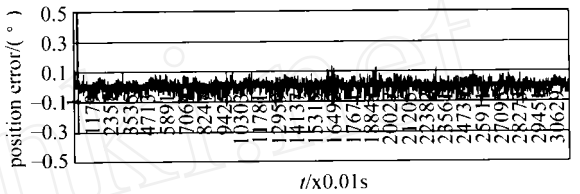

图 7　0.2″位置误差曲线

Fig. 7　Position error curve (0.2″/s)

5.2　位置误差分析

引起位置误差的因素很多,其中主要的有:⑴编码器的测量误差:编码器由于受到外界干扰和系统设计的问题,输出信号的随机干扰比较严重,图 8 即为电机严格不动时编码器的输出信号,从中可以看出,编码器输出信号的随机干扰信号峰峰值可达 0.2″。由于本系统要求的速度非常低,这种随机的干扰信号已经淹没了实际的位置信息。因此本实验应用二阶巴特沃思数字滤波器对输出信号进行滤波处理。⑵环境变化的影响:由于编码器的输出信号受温度的影响比较大,输出信号会随温度的上升而增加。并且湿度也影响摩擦传动的摩擦系数,因此本系统应处在一个恒温恒湿的环境中才能得到好的结果。⑶摩擦力矩和电机波动力矩的影响:这两个因素是引起伺服系统低速抖动或爬行的主要原因,这只能通过选择更高级的硬件设备才能减小这两方面的影响,但不能完全消除[6]。⑷加工制造和安装的影响:系统主动轮和从动轮的面形精度以及相应的安装精度不可能完全理想,所以不可避免的存在径向跳动,这一跳动会引起主动轮和从动轮之间摩擦力矩的波动,而且整个传动链中其它部分的摩擦力矩也不可能是一个定值,也存在力矩波动。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

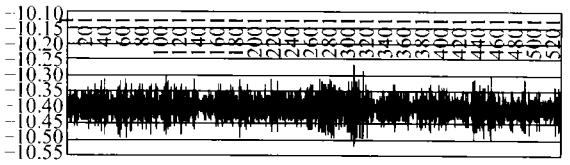

图 8　电机不动时编码器的输出信号

Fig. 8　Encoder output signal while motor still

擦传动低速稳定运行的因素。说明了在摩擦传动中采用常规 PID 控制很难取得理想的效果,利用非线性 PID 控制算法增益参数非线性变化的特性,可以使得控制系统既能达到响应速度快,无超调的目的,又能增强抗干扰能力。实验结果表明,低速可以达到 0. 2″s,位置精度为 0. 032″(RMS),证明了这种方法是行之有效的,对以后大型天文望远镜的摩擦传动研究和其它电机驱动控制都具有很好的借鉴作用。

6　结　论

通过摩擦传动的非线性特性,分析了影响摩

参考文献:

[1] WANG G M, MA L SH, YAO ZH Q, *et al*. Experiment study on friction drive [J]. *SPIE*, 2004, 5495: 419-428.

[2] LIU J K, ER L J, QFT robust control design for 3-axis flight table servo system with large friction[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2004, 17(1): 34-38.

[3] 刘强,扈宏杰,尔联洁. 高精度位置伺服系统的鲁棒非线性摩擦补偿控制[J]. 电气传动, 2002, (6): 10-13.
LIU Q, HU H J, ER L J. Robust nonlinear friction compensation of high precision servo system with time variable parameters[J]. *Electric Driver*, 2002, (6): 10-13. (in Chinese)

[4] 陈涛,陈娟,陈长青. 直流力矩电机低速自适应跟踪控制[J]. 光电工程, 2003. 6: 31-34.
CHEN T, CHEN J, CHEN CH Q. Adaptive tracking control of DC torque motor in low speed[J]. *Opto-Electronic Engineering* 2003. 6: 31-34. (in Chinese)

[5] 綦艳丽,郭庆鼎. 一种非线性 PID 在伺服电机同步传动中的运用[J]. 沈阳工业大学学报 2004, 26(1): 60-63.
QI Y L, GUO Q D. An application of a new class of nonlinear PID controller on synchrodrive [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2004, 26(1): 60-63. (in Chinese)

[6] 陈 娟,张淑梅,黄艳秋,等. 电机波动力矩的重复学习控制补偿[J]. 光学 精密工程, 2003, 8(4): 390-394.
CHEN J, ZHANG SH M, HUANG Y Q, *et al*. Repetitive study control to compensate motor moment fluctuation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 8(4): 390-394. (in Chinese)

[7] 张卫国,曹永刚,陈涛. 用数字滤波器改善光电经纬仪机械谐振频率的方法[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(2): 77-82.
ZHANG W G, CAO Y G, CHEN T. Digital filter approach to improving the resonance frequency of photoelectric theodolite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(2): 77-82. (in Chinese)

作者简介:汪达兴(1941 -),男,江苏南京人,中科院南京天文光学技术研究所研究员,研究方向为自动控制; Email: wdx@niaot.ac.cn

杜福嘉(1975 -),男,山东东营人,中科院南京天文光学技术研究所研究生,研究方向为计算机控制。E-mail: fjdu@niaot.ac.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net