

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.04.003

弹性多质点共轴运动系统的控制算法研究*

杨海强, 张得礼*, 安鲁陵
(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对工业机械弹性传动系统中出现的复杂速度波动问题, 根据弹性多质点共轴运动系统的传动特性推导了机械部分的运动微分方程, 再由直流电机的动态特性方程组建立了整个系统的数学模型。然后根据给定的系统输入转速, 利用简化后的系统数学模型估算出了负载质量体的输出转速。在此基础上, 实时计算了相邻质量体之间的速度差值, 并利用比例调节器和比例积分调节器分别对其进行了动态调整, 再把调整后的总速度补偿量叠加到系统输入速度给定端, 为机械传动系统提供了电子阻尼作用, 达到了抑制速度波动的目的。最后, 通过搭建三质点共轴运动系统试验台验证了该算法的有效性。研究结果表明: 应用基于模型的控制算法, 在开环情况下控制弹性多质点共轴传动系统, 达到了很好的控制效果。

关键词: 弹性传动系统; 控制算法; 速度控制; 开环控制; 数学模型

中图分类号: TP29; TH132 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)04-0395-04

Study of control algorithm for multi-mass elastic transmission system

YANG Hai-qiang, ZHANG De-li, AN Lu-ling

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210037, China)

Abstract: Aiming at solving the complicated speed fluctuation problem in the elastic mechanical transmission system, differential equations of motion of the multi-mass elastic system were deduced and the mathematical model of the system was established according to its transmission characteristic. Using the reduced model of the system, the velocities of the loads are estimated according to the input velocity. Velocity differences between adjacent masses were calculated dynamically. P and PI controllers were used to regulate the velocity differences. The total velocity difference calculated was added to the velocity command to increase the damping ratio and suppress the speed fluctuation of the driven machine part. At last, 3-mass elastic transmission experimental platform was set up to verify the effectiveness of the control algorithm. Experimental results indicate that multi-mass elastic transmission system is open-loop controlled effectively with model-based control algorithm.

Key words: elastic mechanical transmission system; control algorithm; speed control; open loop control; mathematical model

0 引言

许多工业机械传动系统(例如凹版印刷长轴驱动、纺纱机械中的罗拉传动、全电型注塑机等设备)中大量使用的滚珠丝杠传动、风力发电变桨传动等, 都

会由于传动系统的刚性不足而产生速度波动问题。针对弹性传动系统的研究与速度波动控制, 国内外专家学者已经做了大量的工作。Krzysztof Szabat 等人^[1]将卡尔曼滤波器应用于弹性连接的高性能传动系统。Jaroslaw Guzinski 等人^[2]采用速度和转矩观测器

收稿日期: 2012-11-15

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NS2012101)

作者简介: 杨海强(1988-), 男, 江苏无锡人, 主要从事机电控制方面的研究。E-mail: yanghqnuaa@sina.com

通信联系人: 张得礼, 男, 博士后。E-mail: nuaazdl@126.com

对高速列车的弹性传动系统进行了控制。A. Hace 等人^[3]对输送带弹性传动系统的速度波动进行了控制。伍建国等人^[4]基于 Riccati 传递矩阵法建立了内圆磨床传动系统的动力学模型。余丹萍等人^[5]建立了 CRH3 动车组牵引传动系统仿真模型并对其直接转矩控制方法的有效性进行了验证。猴春芳^[6]建立了风力发电机传动系统模型并对齿轮部件进行了模态分析。

目前,许多弹性传动系统都被简化为两质点系统,因此很多速度波动控制算法都是基于简化后的二质量体传动系统模型。

本研究在两质点系统模型的基础上,考虑更为复杂的三质点机械传动系统模型。笔者采用基于模型控制的算法思想,在只用一个编码器的情况下对三质量体系统的速度进行控制,达到很好的控制效果,为开环情况下解决复杂传动系统速度波动问题提供有效的控制方法。

1 系统描述

三质点共轴弹性传动系统模型结构如图 1 所示。



图1 系统结构示意图

图1中,3块大小不一的圆柱形质量体分别通过中心轴固定在立式支撑架上,并且3个质量体的中心轴线处在一条水平线上。质量体从左数起:第1块和第2块、第2块和第3块之间通过具有一定柔性的弹簧连接(弹簧的柔性和弹性可足以带动轴和质量体的运动)。第1块质量体的左端直接与直流电机(带减速器)连接,电机转动则可以驱动3块质量体转动。

由于弹簧柔性较大,电机、减速器和第1块质量体可以看成刚性连接。当电机开始运转,由于弹簧的柔性作用,第2、第3个质量块需要经过很长时间的振动才能渐渐平稳,以相对稳定的速度运转。

2 系统建模

2.1 机械部分建模

根据系统机械传动特性,本研究对机械部分进行数学建模。建模时对系统进行如下简化:

①把电机转子、减速器、质量体1看成一个整体进行转动惯量的计算;②忽略质量体与支座之间的摩擦力。

机械部分动力学方程可表示为:

$$T_1 = J_1 \ddot{\theta}_1 + C_1(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + K_1(\theta_1 - \theta_2) \quad (1)$$

$$J_2 \ddot{\theta}_2 + C_1(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + K_1(\theta_2 - \theta_1) + C_2(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) + K_2(\theta_2 - \theta_3) = 0 \quad (2)$$

$$J_3 \ddot{\theta}_3 + C_2(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2) + K_2(\theta_3 - \theta_2) = 0 \quad (3)$$

式中: T_1 —减速器输出的扭矩; J_1 —电机+减速器+联轴器+质量块1的等效到质量体1轴上的转动惯量; J_2 —质量块2轴上的转动惯量; J_3 —质量块3轴上的转动惯量; θ_1 —质量块1的角位移; θ_2 —质量块2的角位移; θ_3 —质量块3的角位移; C_1, C_2 —弹簧阻尼系数, $C_1 = C_2 = C_s$; K_1, K_2 —弹簧扭转刚度系数, $K_1 = K_2 = K_s$ 。

2.2 直流电机部分建模

根据直流电动机电枢回路电压平衡方程式和电机轴上的转矩平衡方程式^[7-8],建立直流电机数学模型:

$$L_a \frac{di}{dt} = u_a(t) - R_a i(t) - E_a(t) \quad (4)$$

$$E_a(t) = K_e \dot{\theta}(t) \quad (5)$$

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (6)$$

$$T_m(t) = J \ddot{\theta}(t) + B \dot{\theta}(t) + T_d(t) \quad (7)$$

式中: L_a —电枢电感, u_a —电枢电压, i —电枢电流, E_a —反电动势, R_a —电枢电阻, K_e —反电动势系数, K_t —电机电磁转矩系数, T_m —电机电磁转矩, T_d —电机负载转矩, θ —电机转子角位移, B —等效在电动机轴上的阻尼系数, J —电机转子转动惯量。

2.3 系统传递函数

本研究要实现无刷直流电机高精度和高动态性能的控制,不仅要控制电机转速,同时还要控制速度的变化率也就是加速度。由直流电机的运动方程可知,加速度与电机转矩成正比,而转矩又与电动机的电流成正比。因而需要同时对电动机的速度和电流进行控制。为了实现高动态性能的速度控制系统,无刷直流电机采用转速、电流双闭环的控制模式。设直流电机速度环控制器传递函数为 $G(s)$,由式(1~7)可以得到系统传递函数。在该系统模型中,系统输入为质量体3目标角速度 $\dot{\theta}_i$,输出为质量体3的实际角速度 $\dot{\theta}_3$ 。

3 控制算法

3.1 系统模型的简化

一般无刷直流电机的电气时间常数远小于其机电时间常数,因此电流环的动态响应性能远大于速度环的动态响应性能,也就是电流的变化要比速度的变化快得多。而电机反电动势与转速成正比,因此在直

流电机有合适的电流负反馈条件下,电机反电动势对电流环的影响很小,可以忽略。本研究忽略电机电感 L_a 以及电机转子阻尼系数 B 的影响,简化电机部分传

递函数^[9]。

简化后系统传递函数可表示为如图2所示的框图。

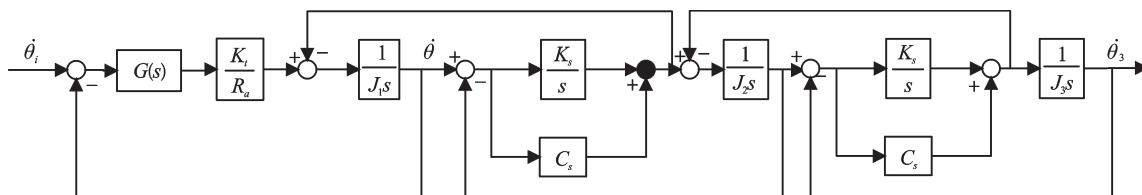


图2 简化后系统传递函数框图

3.2 质量体3转速闭环控制方式

对质量体3转速 w_3 的控制是通过调节质量体2的转速 w_2 实现的,而质量体2的转速是通过控制质量体1的转速 w_1 来进行调节。

本研究把质量体2和质量体3看成一个整体子系统,要使系统稳定,质量体2和质量体3必须以相同的速度进行运转。本研究把质量体2和质量体3的速度差看作是子系统的输出量,即质量体3需要补偿的速度量,设为 Δw_{23} 。本研究把 Δw_{23} 乘以比例系数 k ,与质量体2的转速相加,得到新的质量体2的转速 w'_2 , w'_2 中包含了质量体3所需补偿的速度量。再用PI控制器调节质量体1与质量体2的速度差 Δw_{12} ,补偿电机给定转速,达到间接调节质量体3的输出转速的目的。

闭环控制理论框图如图3所示。

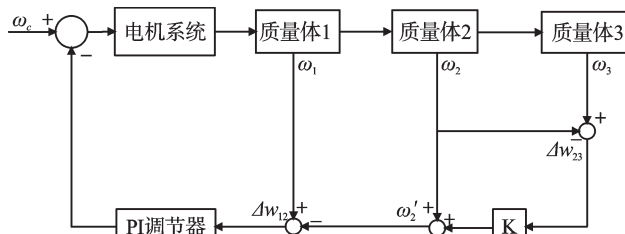


图3 闭环控制理论框图

3.3 基于模型算法的质量体3转速开环控制

在很多工业自动化控制环境下,在被控设备的末端执行器往往难以安装测速传感器,上述的全闭环控制很难实现。基于模型算法的思想就在于避免在控制回路中使用传感器难以采集的末端执行器的速度信号(在图1所示的系统中可认为是质量体2和3的速度信号),而用简化后的系统数学模型预估出质量体2的转速 w_2^m 和质量体3的转速 w_3^m ,再用闭环控制的速度补偿方式对速度进行控制。

控制理论框图如图4所示。

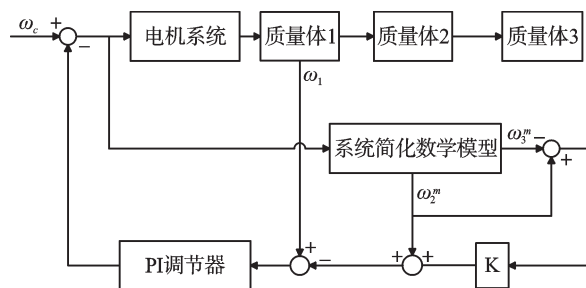


图4 基于模型算法的控制理论框图

质量体弹性扭转系统试验台,实物图如图5所示。

实验装置由PLC、减速器、编码器、转动质量体、弹簧组成,其中PLC部分使用了以下模块:使用贝加莱X20系列标准型CPU作为PLC系统的控制器;使用X20系列的直流电机模块MM2436控制直流电机;使用X20系列的编码器模块X20DC1976接收编码器的反馈信息。其中编码器共有2个,一个位于第一个质量体右端,用于测量质量体1转速,即电机转速;一个位于第三块质量体右端,用于测量第三块质量体的转速,该编码器仅用于观测控制效果。

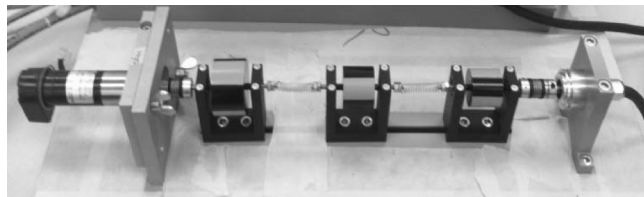


图5 试验台

4.2 实验结果与分析

实验过程中,系统输入转速恒定为2 500 %s,通过质量体3右端的编码器观测质量体3的速度曲线。模型算法控制前质量体3的响应速度曲线如图6所示。此时,系统速度超调量为112%,调整时间为13.4 s。

模型算法控制后质量体3速度曲线如图7所示。此时,系统超调量为4.2%,调整时间为1.2 s,质量体3的速度曲线已基本平滑。

实验结果表明,模型算法对弹性三质点共轴运动系统的速度波动有很好的控制作用。

4 实验验证

4.1 实验系统的搭建

为了验证模型算法的控制效果,本研究搭建了三

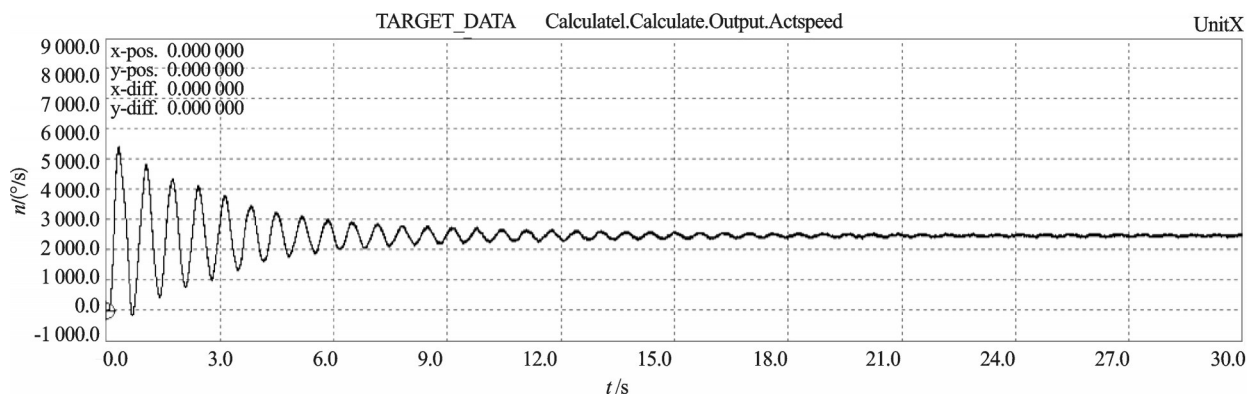


图6 控制前质量体3速度曲线

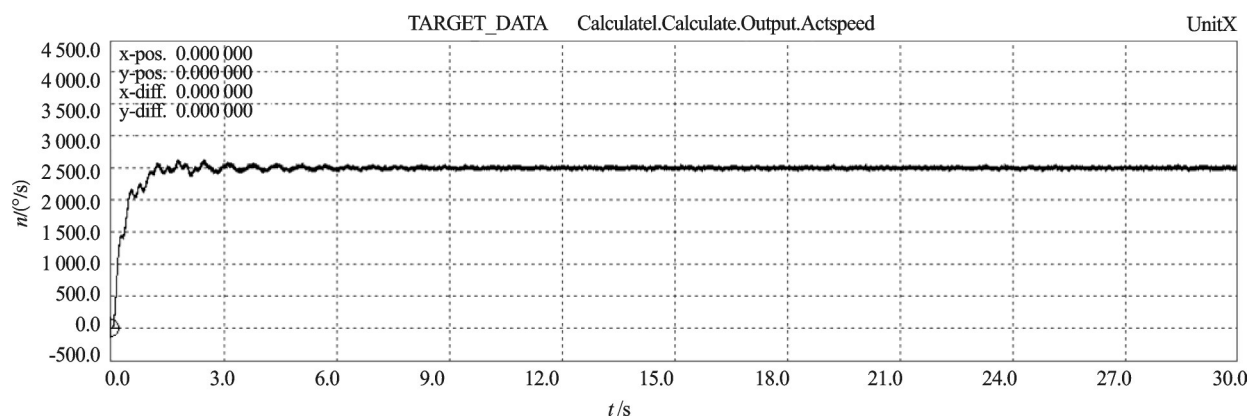


图7 控制后质量体3速度曲线

5 结束语

为了解决工业机械弹性传动系统中出现的复杂速度波动问题,本研究提出了基于模型的弹性多质点共轴运动系统的控制算法,并且通过搭建三质点共轴运动系统试验台,对该算法的有效性进行了实验验证。实验结果表明:在开环情况下,该算法可以对弹性传动系统的速度波动问题进行有效的控制。

在下一阶段,本研究将在实际工业控制场合进一步验证算法的有效性。由于在实际工业控制环境下,被控设备的运行情况将更加复杂,在今后的研究中,研究者可能需要进一步改进控制算法,使之能应用于更为复杂多变的工业控制环境。

参考文献(References):

- [1] KRZYSZTOF S, TERESA O. Application of the Kalman filters to the high-performance drive system with elastic coupling [J]. *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 2012, 59(11): 4226-4235.
- [2] GUZINSKI J, ABU-RUB H, DIGUET M, et al. Speed and load torque observer application in high-speed train electric drive [J]. *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 2010, 57(2): 565-574.
- [3] HACE A, JEZERNIK K, SABANOVIC A. Improved design of VSS controller for a Linear belt-driven servomechanism [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(4): 385-390.
- [4] 伍建国, 庆 鸿, 毛海军, 等. Dynamic Characteristics of Transmission System for the Internal Grinder [J]. *Journal of Southeast University: English Edition*, 2002, 18(4): 302-305.
- [5] 于丹萍, 周 盛, 江全元. CRH3型动车组牵引传动系统的直接转矩控制研究[J]. *机电工程*, 2010, 27(10): 62-67.
- [6] 缙春芳. 风力发电机组传动系统建模分析及齿轮的模式分析[J]. *现代机械*, 2010(1): 22-23.
- [7] 王志新, 罗文广. 电机控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [8] 潘丁丁. 基于正交试验的间歇传动链动力学仿真研究[J]. *轻工机械*, 2011, 29(1): 36-39.
- [9] 高钟毓. 机电控制工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.

[编辑: 罗向阳]