小转矩电动式负载模拟器的设计

任志婷 焦宗夏
(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院)

摘 要: 设计了适用于小转矩范围的电动式负载模拟器,并分析了其结构和动态性能. 介绍了电动式负载模拟器的结构和工作原理,建立了电动式负载模拟器的数学模型,并对系统稳定性进行了理论分析和仿真研究. 在系统中引入多重反馈和前馈,再辅以控制方法进行电机控制,收到了良好的效果. 仿真数据表明,所设计的电动式负载模拟器在小转矩范围内能够达到电液负载模拟器的控制性能指标.

关 键 词: 直流电机; 稳定性; 复合控制; 多余转矩
中图分类号: TP 271^{+}. 4
文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2003)01-0091-04

目前,国内外研制的各种负载模拟器大多是采用液压马达作为执行机构的电液伺服控制系统,而且应用的领域也是大转矩、大功率的范围居多[1]. 因此,研制在小转矩范围内应用的电动式负载模拟器,既可以避免电液伺服系统的缺点,又可以充分发挥电机伺服系统的优势,降低成本,方便维护,对于负载模拟器的研制很有意义.

转矩控制系统的应用十分广泛. 如:机器人技术中的握力控制系统[2]及人感系统[3](即杆力模拟系统). 电动式负载模拟器实质上就是一种转矩控制系统,其缺点是系统稳定性差,多余转矩带来很强的干扰.

本文针对电机转矩控制系统普遍存在着系统稳定性差、多余转矩和跟踪精度等关键问题进行研究,并深入探讨了其作为负载模拟器的潜力.

1 电动式负载模拟器的结构

电动式负载模拟器是以转矩做被控量的直流电机伺服系统,采用 PWM 驱动装置,产生大功率电流驱动直流力矩电机对被加载对象加载[4]. 整个系统的构成见图 1.

直流力矩电机具有转速低、启动转矩大、力矩波动小、机械特性硬度大及线性度好等特点,且其调速方便,可长期在堵转状态下工作. 因此,直流力矩电机是加载的理想执行机构.

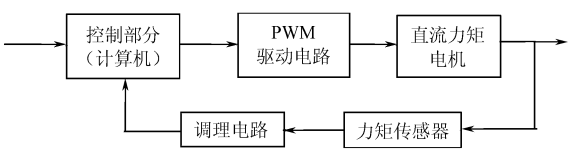


图 1 加载系统原理方块图

加载系统通过连接机构与承载对象相连,对其加载并随之运动,构成电动式负载模拟器.

在加载过程中,加载力矩对承载对象的位置输出产生很强的干扰,严重影响系统的精度和刚度. 加载仿真就是要研究测试舵机受加载力矩的影响情况. 同时,舵机的运动对加载电机的力矩输出也产生很强的干扰,同样影响系统的动态品质和控制精度;性能良好的负载模拟器就是在舵机的位置变化影响下,仍能保持给定的力矩输出.

2 电动式负载模拟器的数学模型

根据图 2 所示的模型建立电动式负载模拟器的数学模型.

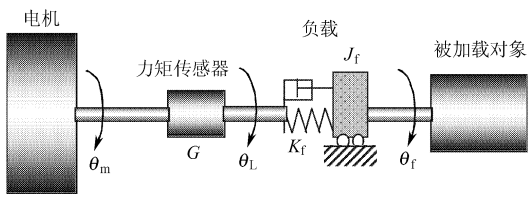


图 2 加载原理示意图

1) 直流力矩电机的电压平衡方程式

$$u_m = R_m i_m + L_m \frac{di_m}{dt} + K_e \frac{d\theta_m}{dt} \qquad (1)$$

式中 u_m,R_m,i_m 和 L_m 分别是电机的电枢电压、电阻、电流和电感;θ_m 是电机的转动角位移;K_e 是电机的反电动势常数.

2) 电机端转矩平衡方程式

收稿日期: 2001-11-05
作者简介: 任志婷(1976-),女,辽宁鞍山人,硕士生,100083,北京.

$$T_m = J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} + T_L \quad (2)$$

$$T_m = K_T i_m \quad (3)$$

式中 J_m,B_m 分别是电机的转动惯量和阻尼系数;T_m,T_L 分别是电机的电磁转矩和输出转矩;K_T 是电机的转矩常数.

3) 负载受力情况分析

通常情况下,传感器的扭转刚度与电机和被加载对象的扭转刚度在相近的数量级上. 这种条件下力矩传感器的扭转刚度 G 对系统的动态特性影响很小,所以在数学模型中可以忽略其作用. 因此,认为传感器两端的角位移是相等的,即 $\theta_m = \theta_L$. 力矩传感器和被加载对象端的转矩平衡方程式如下:

$$T_L = J_f \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + K_f(\theta_m - \theta_f) \quad (4)$$

式中 J_f,K_f 分别是负载的等效转动惯量和扭转刚度;θ_f 是被加载对象的转动角位移.

4) PWM 驱动部分的传递函数

PWM 驱动部分的频宽一般在 1 000 Hz 以上,而加载系统的工作频率在几十赫兹左右,所以可以把 PWM 驱动部分看成是具有饱和特性的比例环节. 比例系数为 K_{PWM},饱和特性的上下限由力矩电机的最高供电电压决定.

将式(1)~式(4)进行拉氏变换,可得系统的传递函数如下:

$$T_L = \{(J_f S^2 + K_f) K_T u_m - K_f S[(L_m S + R_m)(J_m S + B_m) + K_e K_T]\theta_f\} / D(S) \quad (5)$$

其中 $D(S)$ 是一个三阶多项式:

$$D(S) = (R_m + L_m S)(J_f S^2 + K_f) + SK_e K_T + S(R_m + L_m S)(J_m S + B_m) \quad (6)$$

由式(6)可知角位移引起的力矩输出就是干扰造成的输出效果,即多余转矩.

数学模型中的各个参数取值如表 1 所示.

表 1 仿真参数值

参数	取值	参数	取值
R_m/Ω	3.72	L_m/mH	7.9
K_e/(V·s·rad^{-1})	4.375	K_T/(N·m·A^{-1})	4.375
J_m/(kg·m^2)	0.038	J_f/(kg·m^2)	0.02
B_m/(N·m·s·rad^{-1})	0.232	K_f/(N·m·rad^{-1})	24 000

3 电动加载的特点及控制方法

仿真过程中,发现电动加载系统的稳定性较差,容易产生振荡. 加载系统的传递函数表明该系统是一个三阶系统,其特征方程式的根依次为:6.28±608j、-4 820. 有 2 个根位于 S 平面的右半部分.

与电液式负载模拟器相比较,直流力矩电机自身的转动惯量较大且机械阻尼系数较小,而负载的弹簧刚度很大. 于是,电机部分就成为一个比较软的环节. 这种情况就造成了整个系统的阻尼太小,系统的稳定性差,非常容易振荡.

为了改善系统的稳定性,引入被控量转矩的微分反馈. 微分反馈增加了系统整体的阻尼系数,提高了系统的扭转刚度,改善了系统的稳定性. 引入反馈后,系统特征方程式的根变为:-5.6±616j、-9 180,均位于 S 平面的左半部分.

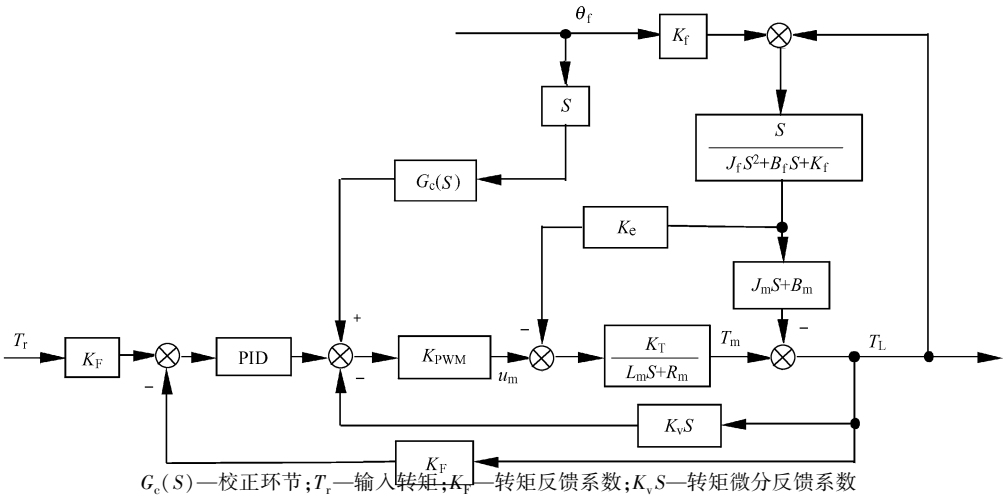
加载过程中,加载系统与被加载的位置系统耦合在一起,彼此的输入和输出都互相影响. 尤其是被加载系统的运动使加载系统也随之运动,这个多余的运动使电机产生一个多余的反电动势,因此会削弱或增强电机输出的电磁转矩. 由被加载系统的运动产生的转矩,通常称之为多余转矩. 多余转矩有时会很大,甚至大于给定的加载力矩. 所以在负载模拟器的研究中,如何补偿多余转矩是非常关键的. 从系统的传递函数可以得到多余转矩的传递函数如下:

$$T_L = -\frac{K_f S[(L_m S + R_m)(J_m S + B_m) + K_e K_T]}{D(S)}\theta_f \quad (7)$$

从式(7)可以看出系统的多余转矩是由被加载对象的转动产生的.

电液加载方案中,有很多种补偿多余转矩的方法. 根据电机加载的特点,本文采用了结构不变性原理,通过使用被加载对象的速度进行前馈控制来达到消除多余转矩的目的. 这种方案的优点在于,系统结构简单,便于用计算机实现,跟踪载荷谱的快速性比较好.

PID 控制是最早发展起来的控制策略之一,由于其算法简单、有效、可靠,被广泛应用于工业过程控制. 本文选择 PID 控制方法,可以简单、准确地验证电动加载方案的可行性. 将上述改善稳定性的反馈环节、补偿多余转矩的前馈环节和 PID 控制算法综合起来,得到系统最终的方块图,如图 3 所示.



$G_c(S)$—校正环节;T_r—输入转矩;K_F—转矩反馈系数;K_vS—转矩微分反馈系数

图 3　电动负载模拟器的控制原理方框图

4　仿真结果及其比较

根据数学模型,进行计算机仿真. 详细的分析了在系统中加入控制规律、提高阻尼的反馈和前馈以后所产生的效果. 下面分不同情况进行讨论.

1）改善系统稳定性和精度

首先,整个系统没有加入任何校正环节,干扰输入为零,此时属于静止加载状态. 给定的转矩输入是 20 N · m 的阶跃信号. 如图 4 所示,此时系统处于等幅振荡状态下,如果没有 PWM 的限幅作用,系统将会发散振荡. 这说明未加校正环节,系统稳定性很差,根本无法正常工作.

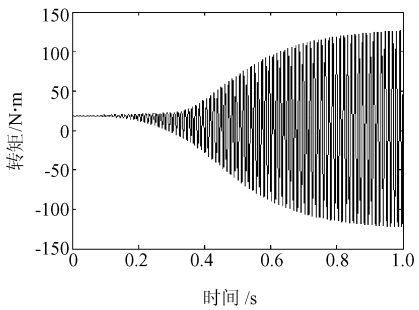
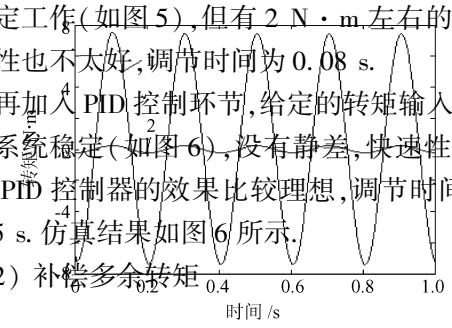


图 4　未加校正环节的系统阶跃响应

然后,给系统加入转矩微分反馈. 此时系统能够稳定工作(如图 5),但有 2 N · m 左右的静差,快速性也不大好,调节时间为 0.08 s.

再加入 PID 控制环节,给定的转矩输入不变. 此时系统稳定(如图 6),没有静差,快速性变好. 说明 PID 控制器的效果比较理想,调节时间只有 0.025 s. 仿真结果如图 6 所示.

2）补偿多余转矩



1—未加入速度前馈;2—加入速度前馈

图 7　多余转矩的消除效果

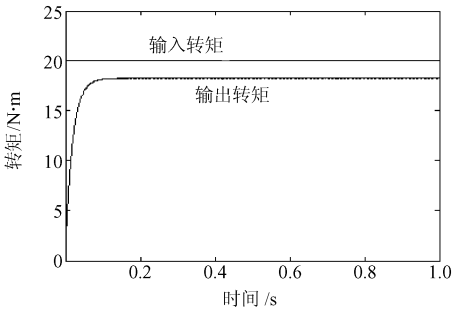


图 5　引入微分反馈的系统阶跃响应

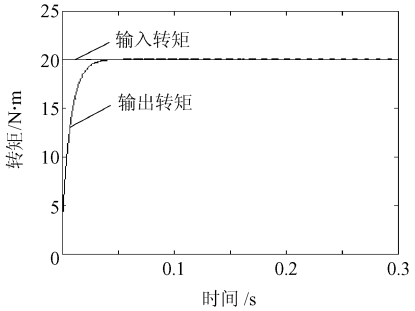


图 6　加入 PID 控制的系统阶跃响应

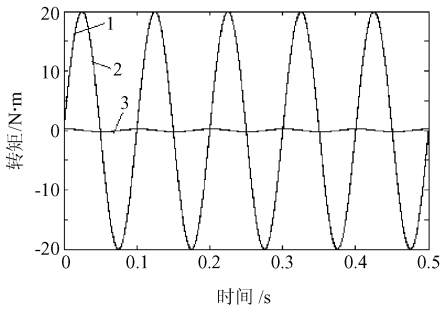
首先,不给输入信号,干扰输入是 10 Hz 的正弦信号,幅值为 4.6 rad/s 的速度信号. 由于系统引入了转矩微分反馈,整个系统的阻尼增大,刚度提高,这样可以抑制部分多余转矩.

然后,加入消除多余转矩的速度前馈环节. 仿真结果见图 7,图中曲线 1 和曲线 2 对比十分明显. 因此,基于结构不变性原理的速度前馈很好地补偿了多余转矩带来的干扰.

3）系统动态加载的正弦响应

所有的控制环节都加入的情况下,给定转矩输入:幅值为 20 N · m、频率为 10 Hz 的正弦信号. 结果如图 8 所示,系统的输出曲线与输入曲线基本一致,说明跟踪精度很高.

误差曲线如图 9,跟踪误差在 0.26 N · m 左



1—输入曲线;2—输出曲线;3—误差曲线

图 8 系统的正弦响应(10 Hz)

右,是输入转矩的 1.3%.

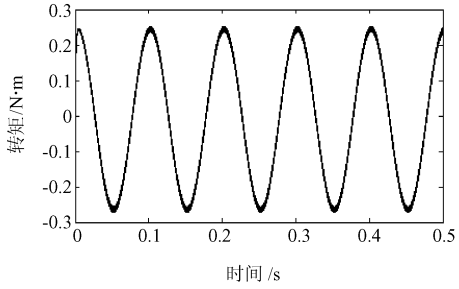


图 9 跟踪误差曲线(10 Hz)

以上仿真结果说明,电动负载模拟器的加载效果比较理想,可以快速、准确地跟踪给定转矩.

5 结 论

上述是对电动式负载模拟器的理论研究和仿真结果分析,发现电动加载方案是可行的,并且在小功率和小力矩的领域内比电液负载模拟器成本低、系统简单、维护方便. 从仿真的结果来看,电机的转矩微分反馈可以解决电机加载过程中特有的振荡问题. 基于结构不变性原理的速度前馈有效地补偿了多余转矩的干扰,而且易于实现. 目前,该方案的实验工作正在进行,如果与仿真的结果基本吻合,将会在负载模拟器领域内打破传统的电液加载方式,引入电气方式.

参考文献 (**References**)

[1] 华 清. 电液负载模拟器的关键技术研究[D]. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,2001
Hua Qing. Studies on the key technology of electro-hydraulic load simulator[D]. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001(in Chinese)

[2] Hitoshi Maekawa. Compact servo driver for torque control of DC-servo motor based on voltage control [A]. Proc of IEEE Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics[C]. Atlanta, USA, 1999

[3] 李玉涛. 数字人感系统的研制[D]. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 2001
Li Yudao. Studies on digital human motion perception system [D]. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2001(in Chinese)

[4] 关静丽. 电动式舵机力矩负载模拟器[D]. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,2001
Guan Jingli. The motor momental load simulator[D]. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2001(in Chinese)

Design of Motor-Drive Load Simulator with Small Torque Outputs

Ren Zhiting Jiao Zongxia

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract: Motor-drive load simulator with small torque outputs was designed, its stability and dynamic performance were analyzed. Based on an introduction to the structure and principle of electrical loading system, a mathematical model of the system was put forward to analyze and to simulate its stability and anti-jamming. By including multi-feedback and feedforward in the system and using control methods to control DC-motor, improved performance of the system was obtained. Simulation results indicated that the performance of the motor-drive load simulator is as good as that of the electro-hydraulic load simulator in the range of small torque.

Key words: D. C. electric machines; stability; compounding control; extraneous torque