电动负载模拟器多余力矩产生机理及抑制

李成功 靳红涛 焦宗夏

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 介绍了直流力矩电机驱动的电动负载模拟器的机械结构和工作原理,建立了电动负载模拟器执行机构的数学模型并用方框图表示.分析了直流力矩电机的机械特性并指出其正常工作的范围.分析了电动负载模拟器在启动过程、正常运行和换向过程中多余力矩产生的机理,提出用基于结构不变性原理的前馈补偿方案来补偿多余力矩.仿真结果从理论上证明了前馈补偿方案可以很好地解决多余力矩带来的干扰,实验结果也证明了前馈补偿方案的有效性和可行性.

关 键 词: 电动负载模拟器; 多余力矩; 结构不变性; 干扰抑制

中图分类号: TP 271^{+}.4

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2006)02-0204-05

Mechanism and suppression of extraneous torque of motor driver load simulator

Li Chenggong Jin Hongtao Jiao Zongxia

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on an introduction to the mechanical structure and operating principle of the load simulator drived by the direct current torque motor, a mathematical model of the actuating mechanism of the electrical loading system was founded and was expressed by means of block diagram. The mechanical characteristic of the direct current torque motor and the operating range were studied. The production mechanism of the extraneous torque during the start-up, operating mode and reversing of the motor-drive load simulator was analyzed. A method of feedforward compensating the extraneous torque based on the principle of structure invariance was promoted. The result of the simulation shows theoretically that the feedforward compensating can reduce the interference caused by the extraneous torque effectively. The feasibility and effectivity of the method are also proved by experiments.

Key words: motor drive load simulator; extraneous torque; structure invariance; interference suppression

负载模拟器是用来模拟飞行器在飞行过程中舵面所受空气动力矩的地面半实物仿真设备,对于缩短系统研制周期,节约研制经费,提高可靠性和成功率有着重要意义.

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,其主要用于大转矩、大功率领域[1,2].有必要研制在小转矩范围内应用的负载模拟器.电动负载模拟器是一种转矩控制系统,它避免了电液伺服系统的缺点,又充分发挥电机伺服系统的优势,降低了成本,方便维护,对于负载模拟器的研制有重要意义.

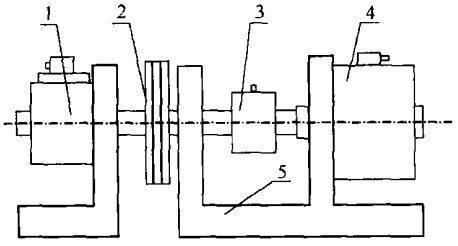
随着国防和军事工业的发展,对负载模拟器性能指标的要求越来越高.但在动态加载过程中,由舵机运动引起的多余力矩会严重影响系统的载荷谱跟踪精度.因此,弄清电动负载模拟器多余力矩的产生机理并采取合理的抑制措施是设计、改善系统控制性能的关键.

收稿日期: 2004-12-24

作者简介: 李成功(1980-),男,吉林松原人,博士生, cario@vip.sina.com.

1　系统介绍

电动负载模拟器的结构原理如图 1 所示, 它是以转矩为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, 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[3,4].



1—舵机系统; 2—可调惯量盘; 3—力矩传感器; 4—力矩电机; 5—底座

图 1　电动负载模拟器示意图

由系统结构原理图可得电动负载模拟器的执行机构模型方框图, 如图 2 所示. 其中, u_m、M、θ_l、θ_m 分别为电枢电压、电动负载模拟器输出转矩、力矩传感器角位移和电机角位移; K_a、K_r、K_t 和 K_e 分别为电机控制器电压放大倍数、电机控制调理电路增益、电机转矩系数和电机反电动势常数; B_m、J_m、L_m 和 R_m 分别为电机阻尼系数、电机电枢的转动惯量、电枢回路总电感和电枢回路总电阻; J_l、B_l、G_l 和 G_ε 分别为负载等效转动惯量、负载等效粘性阻尼系数、负载等效扭转刚度和力矩传感器扭转刚度.

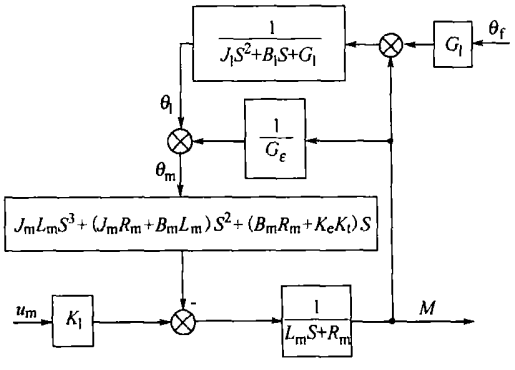


图 2　电动负载模拟器执行机构方框图

2　多余力矩产生原因

从物理概念上讲, 舵机是被加载对象[5], 它是按照位置指令进行运动的, 负载模拟器的连接轴通过连接机构被迫与舵机一同运动, 也就是说加载电机的运动规律与舵机轴的运动规律基本一致, 与加载系统的控制作用无关.

要理解电动负载模拟器多余力矩产生机理, 首先要了解加载电机的机械特性. 图 3 为加载电机在不同工作状态的机械特性曲线, 图中横坐标为电机转矩; 纵坐标为电机转速; T_d 为连续堵转转矩; T_p 为峰值堵转转矩; U_1 为顺向峰值堵转电枢电压; U_5 为逆向峰值堵转电枢电压.

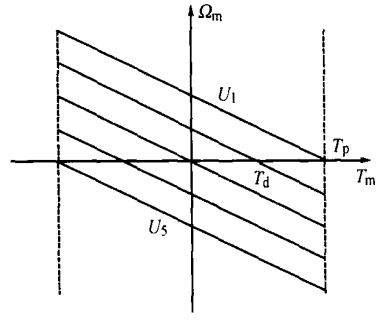


图 3　力矩电机机械特性曲线

电机峰值堵转转矩是受电机磁铁去磁条件所限制的最大堵转转矩, 对应电枢电流称为峰值电流. 电枢电流不能超过峰值电流, 否则电机磁铁将失磁. 同时, 由于受到峰值堵转电压的限制, 电机只能工作在斜线包含区域, 其形状由电机本身特性决定, 只能在电机的设计中加以考虑, 电机一旦出厂, 斜线包含区域的形状就确定了. 用户在使用时, 必须保证电枢电流在允许的范围内. 为了使电动负载模拟器能够正常工作, 舵机角速度不能超过斜线包含区域对应的最大转速.

下面对电动负载模拟器在启动过程、正常运行和换向过程中多余力矩产生的机理分别加以分析.

1) 启动过程

在负载模拟器启动前, 加载电机和舵机均处于静止状态, 此时多余力矩为零. 当舵机顺时针转动时负载模拟器启动, 电机电枢被迫顺时针转动, 从而产生反电动势. 反电动势作用于电枢, 产生电枢电流, 进而产生电磁转矩. 此电磁转矩方向为逆时针, 与电机运动方向相反, 即为瞬态多余力矩.

其产生过程可以从力矩电机机械特性曲线上解释, 负载模拟器未启动时电机处于 O 点, 突然启动时带动电机, 使其有一转角, 由于控制电压不能突变, 此时电机处于 A 点, 在电机控制器控制电压作用下, 回复到 B 点. 在此过程中偏离纵坐标的值即为多余力矩值. 由于舵机的角速度、力矩信号传输的延迟、电枢电阻、电机电枢电感、电机控制电路的滞后等因素的影响, 实际过渡过程为

曲线 *OCB*, 如图 4 所示.

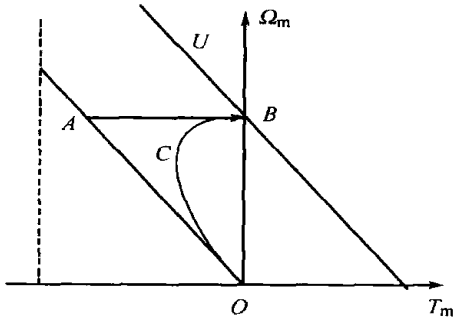


图 4 启动过程中多余力矩的产生

2) 正常运动

与启动过程相似, 在负载模拟器和舵机正常运动中, 当舵机有一角位移变化时也会产生多余力矩, 如图 5 所示. 为了抵消多余力矩, 电机有一定的电枢电压变化. 但由于滞后的存在, 导致电枢电压与其反电动势之差随电枢速度的增大而增大, 从而导致舵机速度越快, 多余力矩越大, 在图 5 中即曲线 O_1CB 曲率越大, 顶点 C 与纵坐标轴距离越远.

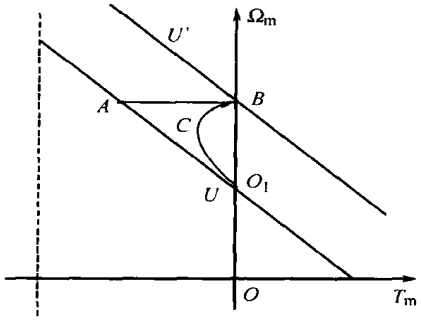


图 5 运行过程中多余力矩的产生

3) 换向过程

当舵机运动换向, 电枢反电动势也跟着换向. 然而由于滞后的存在, 电机电枢电压还来不及换向, 从而导致二者之差很大, 使电枢电流非常大. 电枢电压需要改变方向才能消除多余力矩. 可见舵机换向时的多余力矩比负载模拟器启动时的多余力矩还要大, 如图 6 所示.

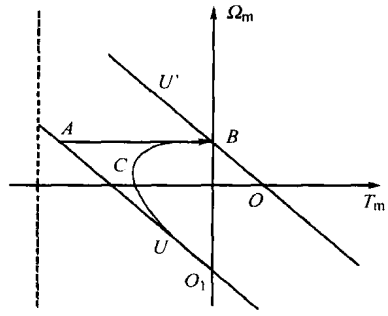


图 6 换向过程中多余力矩的产生

3 多余力矩的抑制

在动态加载过程中, 由舵机运动引起的多余力矩会严重影响系统的加载精度, 使系统的稳定性变坏、频宽变窄、加载灵敏度降低. 因此必须设法对其进行抑制. 要消除多余力矩可以采取被动式和主动补偿两种方案.

1) 被动式方案

被动式方案其基本原理是增大电流或机械机构的滤波作用, 从而在结构上减小多余力矩的影响程度, 增加电机电枢电阻、降低连接刚度、增大电枢电感等. 由于受到物理条件的限制, 只能把多余力矩消除到某种程度, 并且它们都是以增加能源损耗作为代价, 因而不宜单独使用.

2) 主动补偿方案.

主动补偿方案通过某种途径来预测强迫电流, 依靠控制策略进行主动补偿. 本文主要介绍基于结构不变性原理的主动补偿方案.

力矩电机的力矩输出中除了与电机电枢电压 U_m 相关的部分为可控输出以外, 其他部分为干扰力矩. 从动力执行机构的简单模型来看, 系统的干扰就是舵机的角速度 $\dot{\theta}_f$, 根据结构不变性原理只要加入该角速度的固定系数前馈补偿就完全可以消除干扰.

由电动负载模拟器执行机构方框图表示的动力学方程, 经拉普拉斯变换可得其传递函数关系式

$$M(S)=\frac{\dfrac{K_t}{R_m}U_c(S)-\left[\dfrac{J_mL_m}{R_m}S^2+\left(J_m+\dfrac{L_mB_m}{R_m}\right)S+\left(B_m+\dfrac{K_eK_t}{R_m}\right)\right]S\cdot\theta_l(S)}{\dfrac{J_mL_m}{R_mG\varepsilon}S^3+\left(\dfrac{J_m}{G\varepsilon}+\dfrac{B_mL_m}{R_mG\varepsilon}\right)S^2+\left(\dfrac{B_m}{G\varepsilon}+\dfrac{L_m}{R_m}+\dfrac{K_eK_t}{G\varepsilon R_m}\right)S+1}$$

从上式可知, 可以使用力矩传感器角速度 $\dot{\theta}_l$ 完全补偿干扰力矩, 且补偿后的动力机构传递函数将不受负载部分机械谐振频率的制约, 故可以大大提高系统的闭环频宽.

将执行机构的传递函数表达成不同的形式, 可以看出从力矩电机角速度 $\dot{\theta}_m$ 和舵机的角速度 $\dot{\theta}_f$ 引入前馈补偿也可以补偿干扰力矩. 综合考虑补偿后系统的频宽、实现难易程度等因素, 本文选择使用力矩传感器输出轴角速度 $\dot{\theta}_l$ 进行前馈补偿, 该方案的系统方框图如图 7 所示.

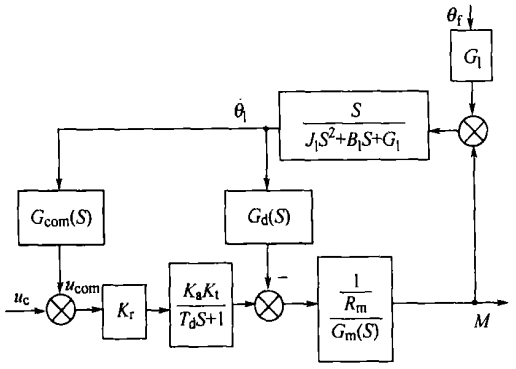


图 7　使用 $\dot{\theta}_1$ 的消扰原理方框图

图中:

$$G_m(S) = \frac{J_m L_m}{R_m G_\varepsilon} S^3 + \left(\frac{J_m}{G_\varepsilon} + \frac{B_m L_m}{R_m G_\varepsilon}\right) S^2 + \left(\frac{B_m}{G_\varepsilon} + \frac{L_m}{R_m} + \frac{K_e K_t}{G_\varepsilon R_m}\right) S + 1$$

根据不变性原理有 $G_{com}(S) = \dfrac{G_d(S)(T_a S + 1)}{K_r \cdot K_a \cdot K_t}$, 这就使补偿后的动力机构传递函数为三阶环节. 因为角速度信号中已经包含了负载部分的影响因素, 经补偿的控制系统可以不受负载变化的影响.

4　仿真及试验结果

根据电动负载模拟器的数学模型, 使用 Matlab 进行了计算机仿真, 并进行了试验分析, 比较了加入前馈补偿环节后多余力矩的消除情况. 数学模型中的各个参数取值情况如表 1 所示.

表 **1**　参数表

参数	取值	参数	取值
K_a	10	L_m/mH	7.9
K_r	0.8	R_m/Ω	4.0
K_t/(N·m·A^{-1})	4.375	J_f/(kg·m^2)	0.129
K_e/(V·s·rad^{-1})	4.375	B_l/(N·m·s·rad^{-1})	0.6
B_m/(N·m·s·rad^{-1})	0.232	G_f/(N·m·rad^{-1})	48738
J_m/(kg·m^2)	0.038	G_ε/(N·m·rad^{-1})	190985

1) 仿真结果

首先观察电动负载模拟器在没有加入前馈补偿环节前的多余力矩产生情况. 给定转矩输入为零, 干扰输入为 5Hz 的正弦信号, 幅值为 0.2 rad 的角度信号时, 系统产生的多余力矩的仿真结果如图 8 所示.

由上面分析结果可知补偿环节 $G_{com}(S)$ 中含有高阶微分环节, 在仿真时难以实现完全补偿, 根据系统中各结构参数的特点可将其简化成 PD 控制环节, 鉴于纯微分环节在控制系统中的不可用性和在实际应用中的不可实现, $G_{com}(S)$ 用不完全微分 PD 环节来实现. 加入前馈补偿后系统多余力矩的仿真结果如图 9 所示, 图 8 和图 9 的仿真结果对比非常明显, 未进行任何补偿前多余力矩为 15N·m, 引入力矩传感器输出轴角速度前馈补偿信号后多余力矩下降到 0.04 N·m. 因此基于结构不变性原理的前馈补偿很好地解决了多余力矩带来的干扰.

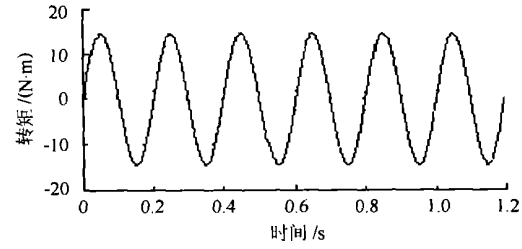


图 8　未补偿时仿真结果

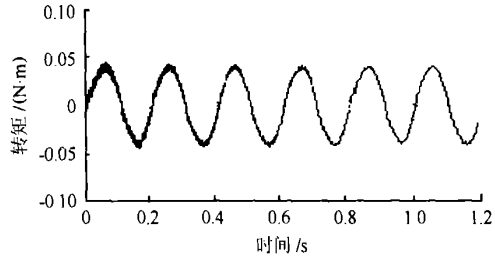


图 9　加入前馈补偿后仿真结果

2) 试验结果

对以上的理论和方法进行了试验验证, 图 10 和图 11 分别为加入补偿前后系统多余力矩试验结果.

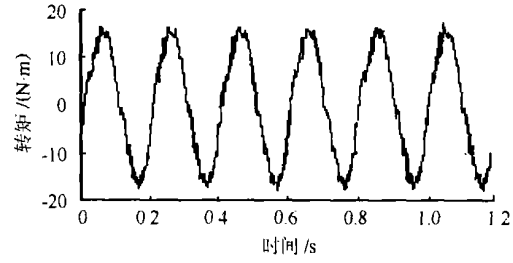


图 10　加入前馈补偿前试验结果

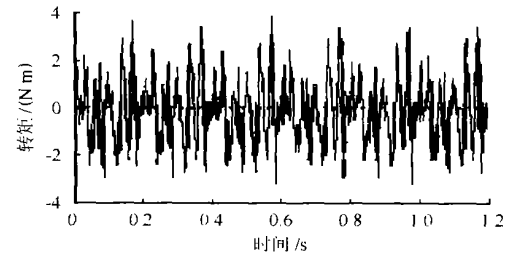


图 11　加入前馈补偿后试验结果

试验结果表明, 采用前馈补偿以后, 减小了多余力矩, 与仿真结果是基本一致的. 但由于试验过

程中干扰信号和非线形因素的存在, 试验效果不如仿真效果明显.

5 结束语

电动负载模拟器多余力矩的产生是由于舵机角位移变化引起, 在启动过程、正常运行和换向过程中均会产生多余力矩. 仿真和试验结果表明, 基于结构不变性原理的前馈补偿引入力矩传感器输出轴角速度作为补偿环节, 可以有效地补偿多余力矩的干扰, 且补偿后的动力机构传递函数不受负载部分机械谐振频率的制约, 可以大大提高系统的闭环频宽. 另外这种方式也比较容易实现, 有着较好的工程应用价值, 也有利于电动负载模拟器的应用和推广.

参考文献 (References)

[1] 任志婷, 焦宗夏. 小转矩电动式负载模拟器的设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(1): 91~ 94
Ren Zhiting, Jiao Zongxia. Design of motor drive load simulator with smalltorque outputs[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(1): 91~ 94(in Chinese)

[2] Yoonsu Nam, Jinyoung Lee, Sung Kyung Hong. Force control system design for aerodynamic load simulator[A]. In: Proceeding of the American Control Conference[C]. Chicago: Illinois USA, 2000, 7: 3043~ 3047

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

[4] 李运华. 负载模拟器的多余力矩的抑制方法研究[J]. 机床与液压, 1999, 2: 27~ 30
Li Yunhua. Research on method to reject to extraneous momental of load simulator[J]. Machine & Hydraulics, 1999, 2: 27~ 30(in Chinese)

[5] 于慈远, 赵克定, 耿春明, 等. 飞行器负载仿真台速度反馈克服多余力矩的仿真研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(6): 126~ 129
Yu Ciyuan, Zhao Keding, Geng Chunming, *et al*. Study on speed feedback applied to craft load simulator to overcome disturbance torque[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1997, 29(6): 126~ 129(in Chinese)

(上接第 **166** 页)

参考文献 (References)

[1] 陈桂彬, 邹丛青, 杨 超. 气动弹性设计基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004. 78
Chen Guibin, Zou Congqing, Yang Chao. Elements of aeroelastic dynamics[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2004. 78(in Chinese)

[2] 李 健. 遗传算法在复合材料气动弹性优化中的应用[D]. 北京: 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 2002
Li Jian. Aeroelastic optimization of composite wing structure using genetic algorithms[D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002(in Chinese)

[3] 向锦武, 张呈林, 周传荣, 等. 有频率、振型节线位置要求的结构动力学优化设计[J]. 计算结构力学及其应用, 1995, 12(4): 401~ 408
Xiang Jinwu, Zhang Chenglin, Zhou Chuanrong, *et al*. Structural dynamics optimum design with given frequencies and position of mode shape node lines[J]. Computational Structural Mechanics and Applications, 1995, 12(4): 401~ 408(in Chinese)

[4] 张世基. 振动学基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990. 2
Zhang Shiji. Elements of libration[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1990. 2(in Chinese)

[5] 管 德. 飞机气动弹性力学手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1994. 126
Guan De. Aircraft aeroelastic dynamic handbook[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1994. 126(in Chinese)

[6] Wan Z, Yang C, Zou C. Design studies of aeroelastic tailoring of forward-swept composite aircraft using hybrid genetic algorithm[R]. AIAA-2003-1491, 2003

[7] Sahoo D, Cesnic C E S. Roll maneuver control of UCAV wing using anisotropic piezoelectric actuators[R]. AIAA-2002-1720, 2002

[8] Guan J, Aral M M. Progressive genetic algorithm for solution of optimization problems with nonlinear equality and inequality constraints[J]. Elseview Science, 1999, 24(3): 329~ 343

[9] 万志强, 杨 超, 郦正能. 混合遗传算法在气动弹性多学科优化中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(12): 1142~ 1146
Wan Zhiqiang, Yang Chao, Li Zhengneng. Application of hybrid genetic algorithm in aeroelastic multidisciplinary optimization[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(12): 1142~ 1146(in Chinese)