

注：山西省科技攻关项目（项目编号：20100321056-01）

摘要：简要叙述了研究电动负载模拟器的必要性，介绍了目前国内外电动负载模拟器的研究情况，以及应用于负载模拟器的典型控制方法，并分析了它们的特性，结构简单、体积小、成本低，具有小信号跟踪能力强，加载分辨率高，特性稳定，集成度高适合试验研究，成为新型负载系统的探索研究方向。

关键词：电动负载模拟器；伺服系统；控制方法

中图分类号：TP271 文献标识码：A 文章编号：1006-883X (2012) 11-0007-05

收稿日期：2012-09-05

电动负载模拟器的研究进展

郭晓乐 杨瑞峰 贾建芳

中北大学 信息与通信工程学院，山西 太原 030051

一、引言

随着国防现代化和军事科学的发展，人们对航空飞行器、精确制导武器的精度、可靠性和可控制性等整体性能要求更加严格。尤其是近年来，我国的航空航天事业发展迅速，神八飞船与天宫一号在太空中的成功对接，更标志着我国航天技术的发展进入一个新的阶段，这就对飞行器的控制系统有了更高的要求。

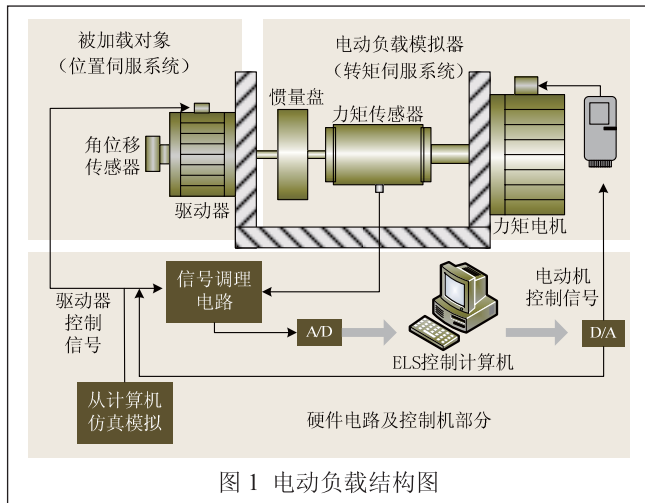
由于飞行器和导弹等武器系统的机动性、快速性、可靠性及准确性与其飞行控制系统的性能好坏有直接关系在新型飞行器或者导弹的研发过程中，需要在各种复杂条件下对产品的性能进行测试，以确保所研制的飞行器的性能严格达到指标要求。但是经典的自破坏全实物试验破坏性较大，实验过程中造成许多财力、物力、人力的浪费，以及一定的危险性，且数据的获取也有不易。鉴于此，迫切需要一种新型的加载实验平台来满足实时高效的获取高精度、高可靠性和高频率响应试验数据，同时使试验数据可重复性更强，以达到缩短研究周期、节约研制经费、提高可靠性和成功率的目的，负载模拟器就是这样一种平台。而电动伺服负载模拟器以其结构简单、体积小、成本低，具有小信号跟踪能力强，加载分辨率高，特性稳定，适

合试验研究等特点成为负载模拟器的一个新的发展方向^[1-3]。

二、电动负载模拟器的基本原理

电动负载模拟器就是利用伺服电机作为“电能—机械能”的转换元件，将电能转换成电机转子的机械能，以转矩形式对承载设备加载，通过对加载转矩的控制实现对负载的模拟^[3]。一般电动负载系统基本结构如图1所示。

一般电动负载系统工作流程如下：控制机（上位机）发送指令使加载控制器上电进入待工作状态，判断检测系统各相关装置状态无误后将反馈信号传给控制机通知用户准备就绪并等待试验。当加载控制器接收到启动指令时，启动信号并通过DAC对加载控制器输出转矩控制信号控制伺服驱动器，输出模拟载荷。期间，加载控制器接收电机反馈信号（包括角度传感器信号和转矩传感器信号等），对工作状态进行判别，对电机进行实时控制。同时实验过程中，将各项重要的实验数据上传至控制机，由控制机处理，显示各种曲线，并结合多次实验结果分析得出实验结论^[5]。



三、电动负载模拟器国内外发展现状

1、负载模拟器的发展

负载模拟系统的发展主要经历了机械式系统和电液式系统两个阶段，电动式系统是它的一个新的发展方向。首先出现的飞行器负载模拟器是机械式负载模拟器，文献 [8]~[9] 分别介绍了扭杆式和悬臂梁式机械式负载模拟系统，这种负载模拟器的优点是结构简单，加载精度高，不产生多余力矩，可靠性高，但其缺点是灵活性弱，不易实现对任意力函数加载，无法实现连续变化的载荷谱^[7]。

随后，科研人员开始了改善机械式加载系统缺陷的研究。七十年代初，日本学者池谷光荣研发出电液伺服负载模拟系统，之后许多国家也都研制了用于模拟飞行器舵面所受空气动力的力矩负载模拟器。我国也在七十年代开始了对负载模拟器以及被动式电液伺服系统的研究工作，并取得了一定的成果^[8]。通过文献 [8] 和 [9] 对电液负载系统的结构及其工作原理进行了介绍可以看出，与机械式加载器相比，电液式加载系统具有大力矩、宽频带、高精度，连续加载的载荷曲线等显著优点。但该系统加压动力复杂，体积大，且需定时专业清洗，应用成本较高。与此同时由其结构特点所产生的多余力矩，严重地影响加载精度及系统的频带宽度^[11]。目前系统主要适用于高频、大幅值、直线加载的场合。

除了上述两种负载系统，在上世纪八十年代研发出一种磁粉离合/制动器加载系统，该系统是根据电

磁学原理使用特制的氧化铁合金磁性粉末传递转矩压凹凸，通过调节联轴器磁性线圈电流的大小，调整转矩的输出。它加载平稳、无噪音但加载精度低，无法正反快速加载，只适用于一般的扭矩模拟。此外，在运动过程中会出现“卡死”现象，还需定期维护操作不方便^{[5][10]}。

2、电动加载相关技术的发展

(1) 伺服系统的发展

随着电机制造技术，电力电子技术的进步和微处理器技术的进步使计算机控制技术取得显著进步，交流电机伺服系统具备了调速范围宽、稳态精度高、动态性能灵敏及四象限运行良好的技术性能，且可与直流伺服电机性能相媲美^[11]。特别是钕铁硼永磁材料的问世，给电力传动带来重大变化，使其具有运行精度高、噪声小、运行可靠、过载能力大、效率高等特点，成为高动态运动标准的最佳选择，因而交流伺服系统逐步取代直流伺服系统已成为一种趋势^[12-19]。

目前，永磁同步电机按其工作原理、驱动电流和控制方式的不同，可分为具有正弦波反电动势的永磁同步电机（PMSM）和具有梯形波反电动势的永磁同步电机，后者又称为无刷直流电机（BLDCM）。通过文献 [12] 和 [14] 的介绍，可以看出，BLDCM 和 PMSM 相比，具有更加明显的优越性：控制结构更为简便，单位电流产生的力矩 BLDCM 较 PMSM 的大，能够使电机和逆变器各自的潜力得到更充分的发挥，在高性能、高精度的伺服驱动领域具有广阔的应用前景。BLDCM 交流伺服系统是高性能交流伺服系统发展的主要方向，高性能化、集成化和模块化、通用化、网络化、智能化将成为今后伺服驱动系统的新发展趋势。

由于位置传感器使得电机系统体积增大，电机与控制系统间的导线增多，系统易受外界干扰；在恶劣工况下灵敏度差，可靠性降低；同时安装偏差会引起换相不准确。文献 [15]-[18] 中提出了无位置传感器的无刷直流电机控制方式，如反电动势法、续流二极管法、电感法、磁链观测法、状态观测器法等位置检测方法，更加完善了无刷直流电机，使其更小、更精准、应用更广泛。

(2) 电力电子技术的发展

对于驱动电机而言，电力电子器件是弱电与强电之间功率变换的接口，由高性能电力电子开关器件组成的逆变电路是永磁同步电机高效使用的不可或缺的必要条件。自 1958 年世界上第一个功率半导体开关晶闸管发明以来至今，电力电子元件已经历了从第一代半控式晶闸管，到如今第四代将微电子集成电路、功率器件集成在一起的功率集成电路和智能功率模块 IPM。电力电子器件始终朝着大功率、高速、集成化、智能化、网络化、数字化方向迅猛发展，极大地推动了各类电动机控制技术的革新^[15]。

(3) 数字驱动器应用的发展

在控制技术方面，交流调速系统从初期的采用电路十分复杂的模拟控制器，20 世纪 80 年代，大规模集成电路技术和 COMS 技术的发展控制器经历了从 8 位到 32 位微机及 DSP（高速数字信号处理器）发展，实现了系统的全数字化控制，同时向高性能、可重构阵列结构、多核技术、高集成、运算能力快方向发展。DSP 以其高速计算能力和特殊的硬件结构已经在许多应用系统中取代了工控机和单片机，成为控制系统的核心。不但使控制电路简化，而且使系统控制高精度、高可靠性、高灵活性、强存储能力、强逻辑运算能力，交流调速系统的功能更加完善，同时使用更加方便，应用更广。^[16-17]

(4) 运动控制器发展

运动控制即对机械运动部件的位置、速度等进行实时的控制管理，使其按照预定运动轨迹和规定参数运动。文献 [3][23][24] 对运动控制器进行了详尽的研究，目前的运动控制器可分成三类：

以单片机或微处理器作为核心的运动控制器：成本低但是处理器运行速度有限，处理能力弱，且单片机系统比较复杂，软件编程的难度较大，精度不高，因此这类控制器在一些只需要低速点位运动控制和轨迹要求不高的运动控制场合应用；

以专用芯片 (ASIC) 作为核心处理器的运动控制器：开放式智能电机控制卡，如 PMAC 或者 TRIO 电机控制卡，这类运动控制器结构比较简单，控制也较为精确，但成本高且灵活性不强，这类控制器适合对单轴的点

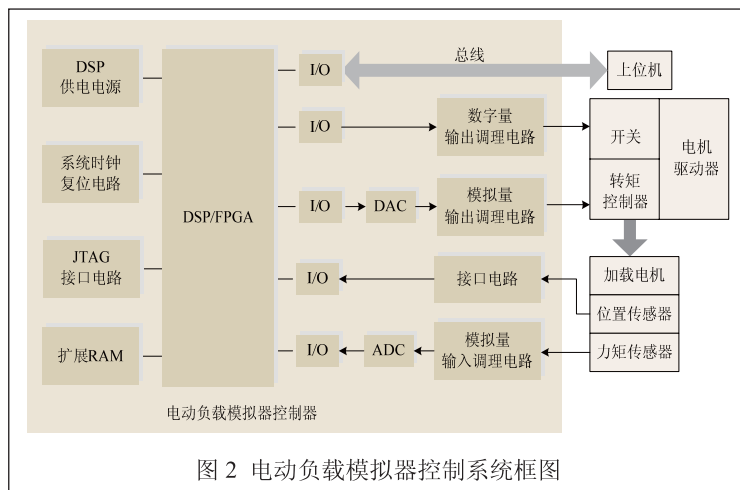


图 2 电动负载模拟器控制系统框图

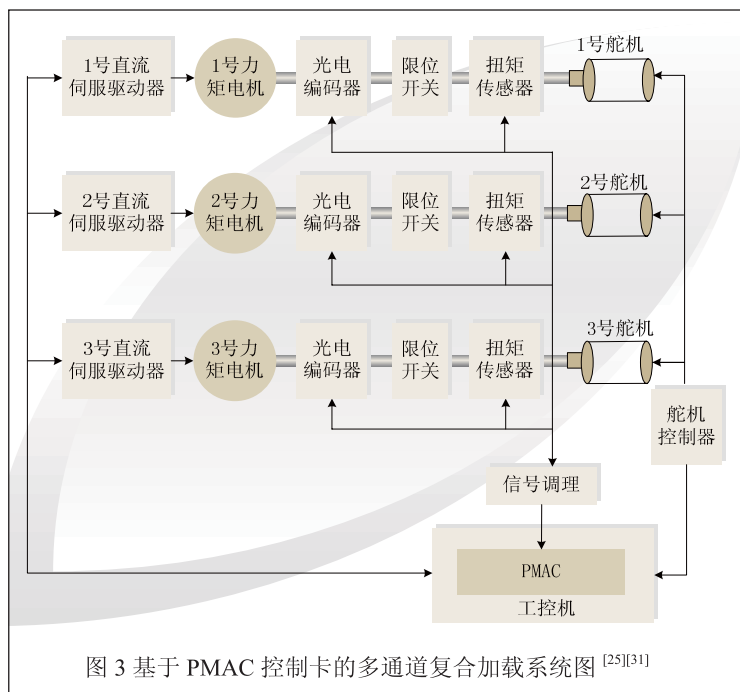


图 3 基于 PMAC 控制卡的多通道复合加载系统图^{[25][31]}

位控制场合；

“PC+ 运动控制器”：即基于 PC 总线的以 DSP 和 FPGA/CPLD 为核心处理器，I/O、操作界面以及通讯集成于一个独立的单元中的开放式运动控制，如图 2 所示，为单通道的电动负载模拟器控制系统结构框图。这类控制器将工控机的信息处理能力和开放式的特点与运动控制器的运动轨迹控制有机地结合在一起，具有强大的信息处理能力、高度的开放性、精准的运动轨迹控制、优良的通用性的特点。还可以提供板上的多轴协调运动控制与复杂的运动轨迹规划、实

时插补运算、误差补偿、伺服数字滤波,实现闭环控制,保证驱动器可以复合、独立、精确、实时的加载为加载试验提供更精确、全方位、立体的数据。

目前采用“PC+运动控制器”为体系的产品主要以美国 DeltaTau 公司 PMAC 卡系列和中国固高公司开放式运动控制器系列为主,如图 3 所示,以加载控制器为控制核心,对舵机进行扭矩负载加载、弯矩负载加载和轴向力负载加载。可为上述三种负载的单独加载,也可以任意的弯矩、扭矩和轴向力组合方式进行加载;使系统能够模拟舵机的实际工作负载情况,从而实现对舵机系统的复合加载工作条件下的动、静态性能进行测试,并对给出相应的测试结果。由此,开放性、独立性、智能型,稳定性优良的多轴运动控制器是当前和将来控制器的发展趋向^[20-23]。

三、控制方法研究现状

目前国内外许多学者在研究负载电机控制系统能够实现该实验平台负载动态特性的模拟得以最终实现对各种先进控制算法的验证和测试从而对试验平台中电机电力传动系统及驱动器进行性能测试。

根据控制策略是否需要系统精确数学的模型来分类,电动加载系统的控制方法可分为对基于模型的结构不变性原理法、复合控制法、自适应控制法、多变量解耦控制法、 H_∞ 控制法的传统控制方法,和基于控制决策的学习控制法、带初始控制的学习控制法、神经网络控制法的智能控制方法^[27]。

传统控制是基于被控对象精确模型的控制方式,为了控制而建模,而且通常仅考虑线性模型结构,忽略系统中的非线性因素。这对于模型精确、非线性因素可以忽略的简单线性系统,是一种适用的控制方法,若充分考虑系统的各种非线性因素,这使系统控制器设计的难度和复杂程度加大。

随着智能控制的发展,利用神经网络构建自适应控制器成为一些论文研究的热点,其原理是把稳健自适应系统理论和神经网络理论相结合,利用神经网络能以任意精度逼近在紧密集上的任意连续实函数,为非线性动态系统的辨识和控制提供了一种很有利的新工具^{[26][27]}。

文献 [28][29] 采用了直接转矩的控制方式,使用高度集成化的 ABB 公司的 ACS800,贝加莱公司 ACOPOS 系列的高精度伺服驱动器对驱动器控制,此方式简单,精准,但是成本太高。许多学者开始把智能控制理论和直接转矩控制理论相结合,如文献 [1][5][19] 等多篇提出了许多基于模糊控制和人工神经网络的直接转矩控制系统,使其控制性能有了进一步的提高,现在它已成为各种交流调速方法中研究最多。文献 [20][25] 等,针对电动负载模拟系统向多通道控制方向发展,提出了多轴运动控制系统,采用带有 PID 控制和前馈控制方式的 PMAC (多轴运动控制器) 卡控制驱动器,保证驱动器可以复合、独立、精确、实时的加载为加载试验提供更精确、全方位、立体的数据。

四、总结

上述是国内外学者对电动负载模拟器的研究概况,从这些研究可以看出,电动负载模拟器以其结构简单,转矩大,控制精准等优点在航空,武器,机械等领域发挥着更为重要的作用。因此,结构简单、体积小、成本低,具有小信号跟踪能力强,加载分辨率高,特性稳定,集成度高适合试验研究,成为新型负载系统的探索研究方向。当前飞速发展的电动负载器正在不断的满足这些需求,而且趋向于多驱动器、多通道多轴控制这样能控制不同类型电机,还可以同时对负载系统进行不同方式的加载实验,将使复合电动加载更为准确,稳定,测试数据更为全面。

参考文献

- [1] 刘健行. 基于 DSP 的舵机电动加载系统研究 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2010
- [2] 兰建功. 基于 DSP 的电动加载控制器设计 [D]. 山西: 中北大学, 2009
- [3] 王明彦. 电动负载模拟技术的研究 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2004.
- [4] Xingjian Wang, Shaoping Wang, Electrical load simulator based on velocity-loop compensation and improved Fuzzy-PID [A]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2009) [C]. Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea July 5-8, 2009, 238-243
- [5] 张虎, 张安年, 姜风华等. 飞行器舵机电动加载测试系统的

研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2009, 30(1): 25~27

[6] Y. Nam. QFT Force Loop Design for the Aerodynamic Load Simulator[A]. IEEE Transaction on aerospace and electronic systems[C]. 2001, 37(4): 230~235

[7] 苏永清等. 国内电液负载仿真台研究与发展现状[J]. 机床与液压, 1998, 5(7):5~15.

[8] 王安敏. 电液伺服负载模拟器加载特性的研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学工学, 1995:6-7.

[9] 刘庆和. 新型电液负载模拟器的研制[J]. 机床与液压, 1997(5):3-5

[10] 周寿增, 董清飞. 超强永磁体一稀土铁系永磁材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004:11-12

[11] W. Rodewald, B. Wall. Extraordinary Strong Nd-Fe-B Magnets by a controlled microstructure[A]. Proceedings of 17th International Workshop on Rare Earth Magnets and Their Applications[C], USA. Aug. 2002:1822

[12] 林河成. 我国稀土永磁材料的新进展[J]. 矿冶, 2005, 14(3):53-58

[13] 李自成. 无刷直流电机无位置传感器控制关键技术研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2010

[14] 叶金虎, 徐思海. 无刷直流电动机[M]. 北京: 科学出版社, 1982:4-11

[15] 盛月华. 无传感器直流无刷电机静止起动控制研究[D]. 黑龙江: 黑龙江大学, 2009:20-25.

[16] 谢宝昌, 任永德. 电机的DSP控制技术及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005:296-346.

[17] 绳伟光, 蒋剑飞. 高性能DSP的发展现状与未来趋势[J]. 中国集成电路, 2011, 20(4):20-25

[18] 朱水娟. 舵机电动复合加载系统的研究与实现[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2010

[19] 赵进军. 基于DSP的力矩电机伺服加载系统研究[D]. 陕西: 西北工业大学, 2003

[20] 吴君. 多轴运动控制系统的设计与应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2011

[21] 丛爽, 李泽湘. 实用运动控制技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[22] 蒋仕龙, 吴宏, 吕恕等. 通用运动控制技术现状、发展及其应用[J]. 电工文摘, 2009, (1):7-11.

[23] 许雄. 基于DSP的多轴运动控制器软件系统的研究与开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.

[24] Qinling Zhang, Jinquan Xu, Hong Guo. The study of an intelligent tri-redundancy electrical load management center based on DSP and FPGA[A]. Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2010 International Conference on 2010[C].

[25] 魏志强, 张咏梅. 多轴运动控制器(PMAC)在直流力矩电机伺服控制中的应用[J]. 光电技术应用, 2004, 19(6):41-43

[26] 刘伟杰. 电动加载器的关键技术研究[D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2009

[27] 宋晶. 电动负载模拟器控制仿真研究[D]. 山西: 中北大学, 2009

[28] 朱丽娜. 基于DSP的弹用电动加载系统研究[D]. 陕西: 西北工业大学, 2005

[29] 杨峰. 基于DSP的舵机电动加载平台的设计[D]. 陕西: 西北工业大学, 2010

[30] Y. Srinivasa Rao, and Mukul C. Chandorkar. Real-time electrical load emulator using optimal feedback control technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(4):1217-1225.

[31] 张红霞, 付明立. 多通道舵机电动伺服加载器测控系统的设计与实现[J]. 机电工程技术, 2009, 38(01):27-30

Research progress of electrical load simulators

GUO Xiao-le, YANG Rui-feng, JIA Jian-fang

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The necessity of developing electrical load simulators is introduced briefly in this paper. The research advances of electrical load simulators at home and abroad are introduced, and some typical control methods applied to electrical load simulators are analyzed. Finally, the future development trends of electrical load simulators are summarized. With simple structure, small volume, low cost, strong ability to tracking small signals, high loading resolution, stable performance, and high integration fitted for test research, electrical load simulator becomes a new research direction of load systems.

Keywords: electrical load simulator; servo system; control method

作者简介

郭晓乐: 中北大学研究生院, 硕士研究生。主要研究方向为仪器仪表工程、自动化测试与控制技术

通信地址: 山西省太原市 中北大学 764 信箱

邮编: 030051 邮箱: lele365@126.com

杨瑞峰: 中北大学信息与通信工程学院, 教授, 博士, 主要研究方向: 计算机测控技术、现代传感技术与系统等

贾建芳: 中北大学信息与通信工程学院, 博士, 副教授。主要研究方向: 计算机测控技术、非线性系统故障诊断与容错控制