

直驱式电液伺服主动质量驱动系统

刘军龙¹, 姜继海¹, 卢天日², 刘庆和¹, 张春巍³, 许宏光¹

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 150001 哈尔滨, civil_liu@126.com; 2. 北京南车时代重工机械有限责任公司, 102249 北京; 3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨)

摘要: 针对传统液压驱动主动质量驱动系统(AMD)装置复杂、体积大、能源利用效率低等缺点,提出了采用直驱容控电液伺服作动器(DAMD)驱动的AMD控制系统.分别建立了直驱容控电液驱动系统的电动机控制、液压力机构和液压执行机构等子系统的数学模型,进一步建立直驱容控电液伺服作动器的数学模型;以某实际工程的试验样机为标准,进行参数优化及匹配计算,设计并加工了DAMD控制系统;对DAMD控制系统进行了性能试验.试验结果表明,直驱式系统本身动态特性较低,其根本原因是泵控动力机构的动态特性不高.DAMD控制系统在一定范围内可以代替传统的液压驱动AMD控制系统,实现对高耸、大跨等长周期结构振动的主动控制.

关键词: 主动质量驱动系统;直驱容控电液伺服作动器;数值仿真;性能试验

中图分类号: TP271.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)09-0051-05

Direct drive volume control electro-hydraulic servo active mass driver system

LIU Jun-long¹, JIANG Ji-hai¹, LU Tian-ri², LIU Qing-he¹, ZHANG Chun-wei³, XU Hong-guang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, civil_liu@126.com;
2. Beijing CSR Times Heavy Industry Machinery Co., LTD., 102249 Beijing, China;
3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: Aiming at the disadvantages of traditional AMD drive device, such as large volume, high cost, complex system, more energy consumption, an innovative driver-Direct Driving Volume Control (DDVC) servo system for AMD is proposed based on the volume control of electro-hydraulic servo system. The mechanical models of motor control, hydraulic power mechanism, hydraulic actuator and other sub-structures of DDVC electro-hydraulic servo system were separately established as well as the mathematical model of direct drive volume control electro-hydraulic servo actuator. Taking an actual project's experimental prototype as a standard, the parameter optimization and the match computation were carried out, and the DAMD control system are designed and processed. The dynamic characteristics of the power mechanism controlled by pump are not high because the DAMD system dynamic characteristics are low. DAMD control system can be used to substitute the traditional AMD control system for high-rise structure or large-span structure to realize active control of structural vibration.

Key words: active mass drive; DDVC electro-hydraulic servo actuator; numerical simulation; performance experiment

收稿日期: 2010-04-12.

基金项目: 国家基础研究发展规范化资助项目(2007CB714204);
国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ03B06); 博士后科学基金面上项目(20100481002).

作者简介: 刘军龙(1979—),男,博士;
姜继海(1957—),男,教授,博士生导师;
张春巍(1977—),男,副教授,博士生导师.

土木工程结构振动控制的研究与应用经过半个世纪的发展已日臻成熟,并已有多种振动控制装置逐步在实际工程中得到推广应用^[1].主动质量驱动装置(Active Mass Driver, AMD)由于控制效果好、作动器少等优点在高层建筑、高耸结构抗

风抗震反应控制的应用中获得了巨大成功.但传统的 AMD 体积大、造价高,系统复杂,能源利用率低等问题也日益突出^[2].

本文针对 AMD 控制系统传统作动器存在的弊端,在电液系统容积控制的启示下,利用直驱容积控制电液伺服系统作为作动器,它具有交流伺服电动机控制灵活和液压系统出力大的双重优点^[3].研究新型的结构振动主动控制系统,既能继承传统控制系统的优势,又能合理解决传统主动控制系统的突出问题,有效克服传统液压 AMD 系统效率低、能耗大的不足.实现体积小、出力大、能效好、利环保的结构振动节能型主动控制系统,将具有重要的学术价值和广阔的应用前景.

1 传统阀控 AMD 系统及存在弊端

大量研究结果和实践都证明了结构振动主动质量阻尼/驱动(Active Mass Damper/Drive, AMD)控制系统是迄今为止最为有效的结构振动主动控制技术和手段^[1,4-7],其传统的驱动控制装置如同服液压驱动,存在系统庞大复杂,能源利用率低,运行时噪声污染等缺陷或不足,极大地限制了 AMD 主动控制技术的应用和发展.

AMD 控制系统中最重要的部件就是驱动装置,它是给结构施加主动控制力的执行机构,其工作性能直接影响到 AMD 系统对结构振动的控制效果.图 1 为传统阀控 AMD 控制系统构成示意图.

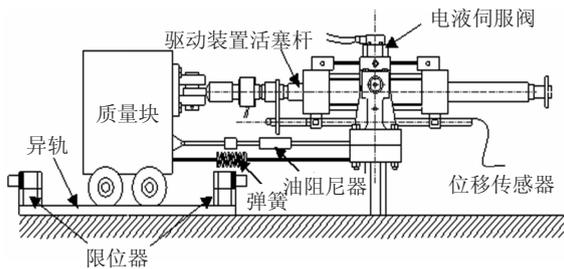


图 1 传统阀控 AMD 控制系统构成

目前,大量应用于 AMD 控制系统中的电液伺服阀控作动器(传统电液伺服系统)存在以下问题^[2]: 1) 电液伺服阀价格昂贵,对油液污染特别敏感,需强化和完善过滤系统的精度,相应提高了电液伺服系统的成本,增大了系统的体积和集成复杂程度. 2) 伺服阀所提供的负载压力最大仅为油源压力的三分之二,能源利用率低.需要一套泵站系统提供恒压油源,进一步增大系统的体积和复杂程度,增加系统的成本.整个系统需要在高油压状态下工作,即使系统处于非工作待机状态也需全部环路包括泵站、管路、液压缸等维持高压

才能保证及时启动并快速驱动,并且高压待机将消耗巨大能量,带来系统组件密封、耐久性、噪声大以及油液泄漏污染环境等一系列问题. 3) 电液伺服系统效率低,使系统液压油温度升高,需另配冷却系统,使系统体积再一次增大和集成复杂化,成本增加.

2 直驱式主动质量(DAMD)控制系统

DDVC 电液伺服系统是交流伺服技术和液压技术相结合的产物^[8-11],该系统由交流伺服电动机驱动,伺服电动机按照输入的指令进行变转速驱动、变向驱动和限转矩驱动.图 2 是采用直驱式的电液伺服主动质量驱动系统原理图,由图可知,它是液压闭式回路:电动机变速→油泵变量→执行器变速;电动机变向→油路变向→执行器变向;执行器压力超限→油泵转矩超限→电动机输出转矩超限→电动机停止.

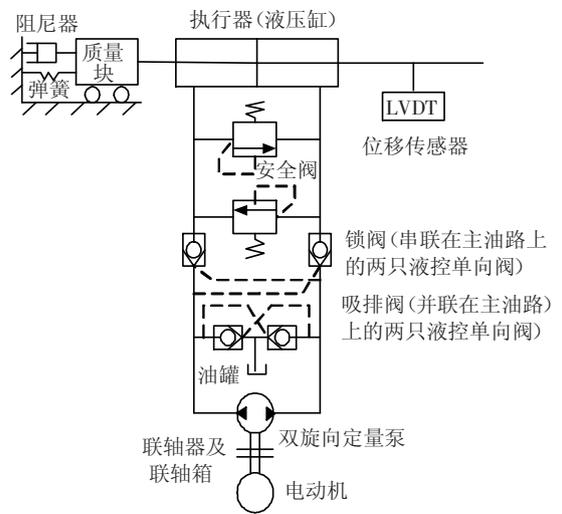


图 2 直驱式主动质量控制系统原理图

DDVC 电液伺服系统的最大特点是充分发挥交流伺服电动机的特性而不用电液伺服阀,通过改变电动机的正反转、电动机的速度、电动机的限转矩和运转时间来控制油缸的正反向、油缸速度、作用力和位置^[12-13].同时,DDVC 电液伺服系统中的电动机与执行元件油缸可以做到较为理想的功率匹配.油箱的体积也可以很小.其优点除了节能外,还去掉了对环境要求较高的液压伺服元件,从而对传动介质及过滤要求可适当降低;可以大范围调速,提高了系统可靠性;大大减少了泵的磨损,延长了使用寿命等.在一般技术性能要求的伺服装置上,已经可以代替使用电液伺服阀的传统型电液伺服系统.

3 DAMD 控制系统数学建模

基于能量转换观点,DDVC 系统实现电能→电动机→机械能→液压泵→液压能→执行机构→机械能→负载质量块的传递过程.结合图2,系统理论建模主要围绕电动部分——电动机数学模型,液压动力部分——泵控缸数学模型,液压执行部分——液压缸驱动负载的数学模型三部分展开.

3.1 电动机模型

根据达朗贝尔原理建立电动机模型并简化得

$$\frac{\omega_p(s)}{U_c(s)} = \frac{K_v}{T_m s + 1}$$

式中: K_v 为电机系统的速度增益,且

$$K_v = \frac{K_f K_u K_{T1}}{(D + K_{T2})}, \text{rad/s/V};$$

T_m 为电机系统的机电时间常数,

$$T_m = \frac{J_T}{(D + K_{T2})}, \text{s}.$$

3.2 泵控缸数学模型

根据流量连续性结合质量守恒定律,建立泵控液压缸的方程,考虑篇幅,在此不表述中间推导过程,可得

$$Q_p = D_p \omega_p - C_{ip}(p_1 - p_2) - C_{ep} p_1,$$

$$Q_p = C_{ic}(p_1 - p_2) + C_{ec} p_1 + A_p \frac{dx_p}{dt} + \frac{V_0}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt}.$$

3.3 液压缸执行机构力平衡方程

忽略库仑摩擦等非线性负载和油液的质量,结合牛顿第二运动定律,可得作动器产生的驱动力为

$$F_1 = A_1(p_1 - p_2) = M \frac{d^2 x}{dt^2} + B_m \frac{dx_p}{dt} + kx.$$

由上述分析可得 DAMD 的传递函数框图如图3所示,控制器的传递函数用 K_{PID} 代替.

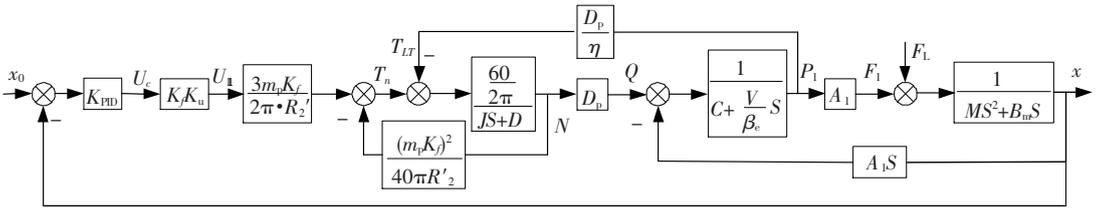


图3 直驱式电液伺服系统传递函数方框图

图中: x 为油缸活塞位移(m); K_f 为频率电压转换系数(V/Hz); K_u 为电压频率转换系数(Hz/V); m_p 为电动机极对数; R_2' 为电动机折算到定子侧的转子每相电阻(Ω); J 为系统折算到电动机转子轴上的转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); D 为电动机转轴阻尼系数($\text{N} \cdot \text{ms/rad}$); D_p 为定量泵的排量(mL/r); η 为机械传动效率; C 为系统总的泄漏系数($\text{m}^3/\text{Pa} \cdot \text{s}$); V 为非对称液压缸油腔的总容积(m^3); β_e 为液压油的体积弹性模量(N/m^2); A_c 为液压油缸工作腔面积(m^2); M 为负载及活塞杆质量(kg); B_m 为粘性阻力系数($\text{N}/(\text{m/s})$); F_L 为外干扰力(N).

4 DAMD 控制系统试验研究

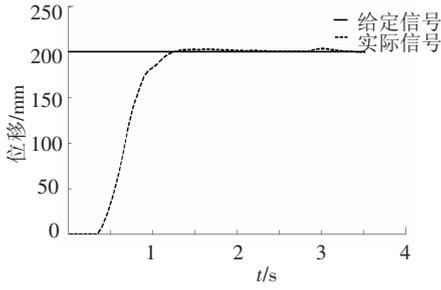
对直驱式电液伺服系统进行位置闭环试验研究,分别输入阶跃信号、斜坡信号和正弦信号,在空载和带载两种不同情况下进行多工况试验.试验结果如图4.

试验结论:

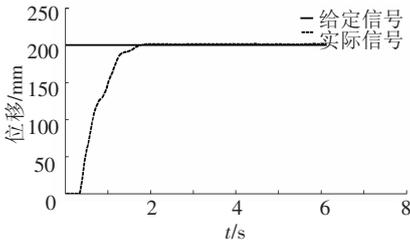
1) 输入为阶跃信号时,带负载与空载比较,上升时间基本相同,定位精度也较接近,这表明直驱式系统刚度较好,抗负载能力较强.随着质量增加,系统超调减小,这是由于负载质量增加,液压固有频率降低,液压阻尼比提高的缘故.

2) 输入为斜坡信号时,对斜坡信号的响应存在静态误差.带负载系统跟踪误差比空载时要大些,但平稳性相对较好,加上负载后,液压固有频率降低,液压阻尼比提高,使得泵控缸系统稳定性有所提高,能够有效抑制油液压力脉动、导轨摩擦等外界干扰,活塞杆运行更加平稳.

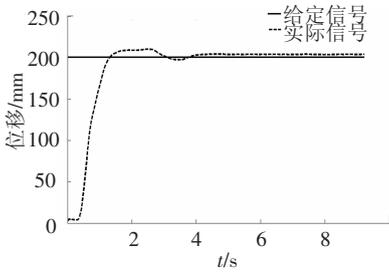
3) 当输入为正弦信号时,随着负载质量增加,系统幅值衰减越大,相位滞后也随之加大;在等频等载时,幅值越大,幅值衰减与相位滞后也越大;加载信号频率越高,系统相位滞后越严重.结果也表征了直驱式系统频率响应不高的固有局限,系统动态特性不高的根本原因是泵控动力机构的动态特性不高.



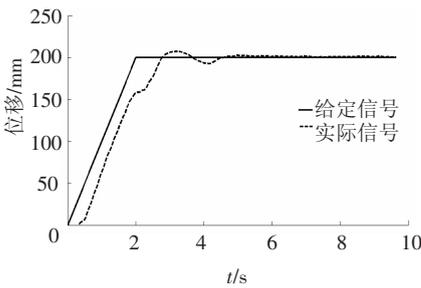
(a) 阶跃响应曲线,幅值 200 mm,空载



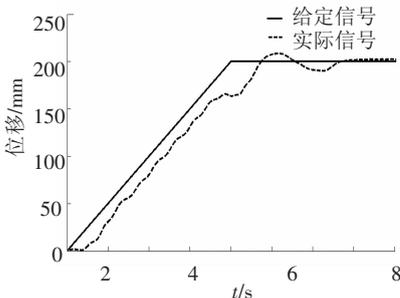
(b) 阶跃响应曲线,幅值 200 mm,负载质量 100 kg



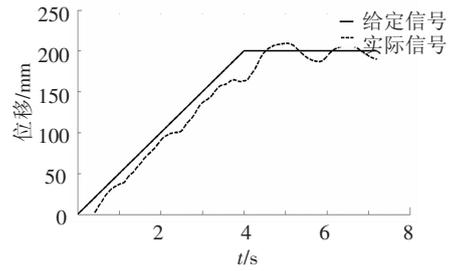
(c) 阶跃响应曲线,幅值 200 mm,负载质量 200 kg



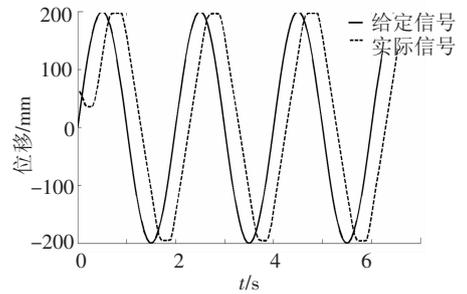
(d) 斜坡响应曲线,速度 50 mm/s,空载



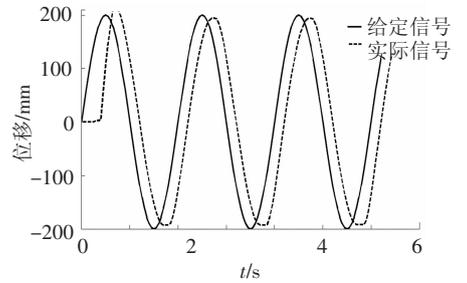
(e) 斜坡响应曲线,速度 50 mm/s,负载质量 100 kg



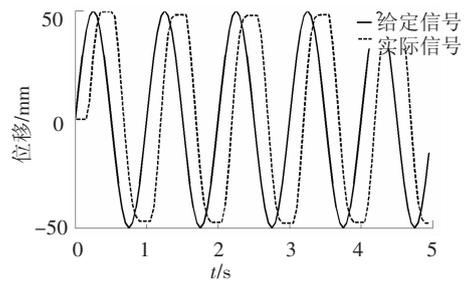
(f) 斜坡响应曲线,速度 50 mm/s,负载质量 200 kg



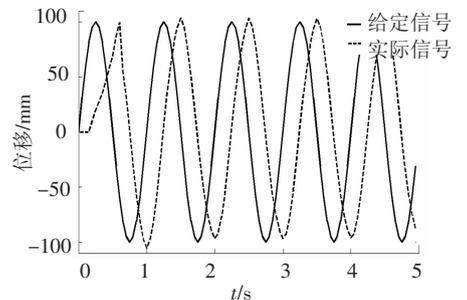
(g) 正弦响应曲线,频率 0.5 Hz,幅值 200 mm,负载质量 50 kg



(h) 正弦响应曲线,频率 0.5 Hz,幅值 200 mm,负载质量 500 kg



(i) 正弦响应曲线,频率 1 Hz,幅值 50 mm,负载质量 50 kg



(j) 正弦响应曲线,频率 1 Hz,幅值 10 mm,负载质量 500 kg

图 4 DAMD 控制系统试验曲线

5 结 论

1) 本文针对 AMD 控制系统传统作动器存在的弊端,在电液系统容积控制的启示下,提出一种 AMD 系统的新型作动器——直驱式电液伺服作动器。对 DAMD 控制系统进行了理论分析和试验验证。

2) 该系统动态特性不高,存在一定的时间滞后。

系统动态特性不高的根本原因是泵控动力机构的动态特性不高,通过合理地选择系统结构参数和采用适当的控制方法,可以提高直驱式容积控制电液伺服系统的动态性能。

3) 在对系统动态性能要求不高的场合下(2 Hz 以下),可以代替传统的阀控电液伺服系统。

参考文献:

- [1] 欧进萍. 结构振动控制:主动,半主动与智能控制[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [2] 刘军龙. 结构液压被动耗能与直驱主动控制系统[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [3] 刘庆和. 直接驱动容积控制液压传动原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:12-18.
- [4] SOONG T T, SPENCER B F. Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the practice[J]. *Engineering Structures*, 2000, 24: 243-259.
- [5] SOONG T T, REINHORN A M, WANG Y P, *et al.* Full scale implementation of active control I: design and simulation[J]. *Journal of Engineering Mechanics*,

1991, 117(11):3516-3536.

- [6] SPENCER B F, NAGARAJAIAH S. State of the art of structural control[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(7):845-856.
- [7] HOUSNER G W, BERGMAN L A, CAUGHEY T K, *et al.* Structural control: past, present, and future[J]. *J Engng Mech, ASCE*, 1997, 123(9): 897-971.
- [8] SUN H, GEORGE T, CHIU C. Nonlinear observer based force control of electro-hydraulic actuators[C]// *Proceedings of the American Control Conference, San Diego, California*: [s. n.], 1999: 764-768.
- [9] ITO M, SATO H, MAEDA Y. Direct drive volume control of hydraulic system and its application to the steering system of ship[C]// *FLUCOME'97*. Hayama: [s. n.], 1999: 445-450.
- [10] ITO M, NORIKI, HIROSE. Main engine revolution control for ship with direct drive volume control system[C]// *ISME, TOKYO*: [s. n.], 2000:26-31.
- [11] TOMOICHIRO Y. Apparatus for controlling a hydraulic elevator: United States, 4593792[P]. 1986-6-10. [2010-03-20].
- [12] NAKANO K, TANAKA Y. Energy saving type electro-hydraulic servo system[J]. *Journal of Fluid Control*, 1988, 18(3):35-51.
- [13] NAKANO K, TANAKA Y, YAMAMOTO N. Energy saving hydraulic power source using inverter-motor drive[C]// *First JHPS International Symposium on Fluid Power*. Tokyo: Centennial Memorial Hall Tokyo Institute of Technology, 1989:83-90.

(编辑 杨波)

(上接第50页)

参考文献:

- [1] MALIS E, MEZOUAR Y, RIVES P. Robustness of image-based visual serving with a calibrated camera in the presence of uncertainties in the three-dimensional structure[J]. *IEEE Trans on Robotics*, 2010, 26(1): 112-120.
- [2] WANG Guanghui, HU Zhanyi, WU Fuchao. Single view based measurement on space planes[J]. *J Comput Sci & Technol*, 2004, 19(3): 374-382.
- [3] 孙军华, 吴子彦, 刘谦哲, 等. 大视场双目视觉传感器的现场标定[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 633-640.
- [4] 李为民, 孟昊, 王建平, 等. 单场景摄像机的大视场标定[J]. *中国科学技术大学学报*, 2007, 37(6): 627-630.
- [5] 李瑞峰, 李庆喜. 机器人双目视觉系统的标定与定

位算法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(11): 1719-1722.

- [6] 叶声华, 郑继贵, 王仲, 等. 视觉检测技术及应用[J]. *中国工程科学*, 1999, 1(1): 49-52.
- [7] BIER A, LUCHOWSKI L. Error analysis of stereo calibration and reconstruction[C]// *Proceedings of Computer Vision/Computer Graphics Collaboration Techniques-4th International Conference*. Heidelberg: Springer Verlag, 2009: 230-241.
- [8] ZHANG Song, HUANG Peisen. Novel method for structured light system calibration[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(8): 1-8.
- [9] 顾耀宗. 长度计量基础知识讲座[J]. *上海计量测试*, 2008, 4: 39-41.
- [10] HEIKKILÄ J. Geometric camera calibration using circular control points[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22: 1066-1077.

(编辑 张宏)