

六自由度运动平台的动态响应特性分析 及 AMESim 仿真

谢远党¹, 李维嘉^{2*}

(1. 浙江海洋学院 机电工程学院, 浙江 舟山 316004; 2. 华中科技大学 轮机工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了解决液压伺服系统中存在负载干扰等的不确定因素对系统造成不稳定性的问题, 以伺服系统中的六自由度液压运动平台试验样机为研究对象, 通过对伺服系统动态响应特性进行分析的基础上, 提出了动态压力输出补偿的鲁棒 H^∞ 控制策略, 并进行了物理模型的 AMESim 仿真。研究表明: 该方法可在较大摄动的情况下获得好的鲁棒性, 并且可以满足设计要求的响应频宽, 从而保证平台运动的响应速度和精度。

关键词: 六自由度; 液压伺服; AMESim; H^∞ 控制策略

中图分类号: TH112; TH137; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)03-0290-04

Analysis on response characteristics of 6-DOF platform and its simulation with AMESim

XIE Yuan-dang¹, LI Wei-jia²

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316004, China;

2. College of Marine Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to solve the unstable problems in hydraulic servo system due to some uncertain factors (load disturbance, etc.), an experimental prototype on a hydraulic motion platform with six degrees of freedom in a servo system was studied. A robust control strategy for dynamic pressure output back-off was put forward by analyzing dynamic response characteristics in the servo system and simulating with AMESim. The results show that, using this method, a better robustness is obtained under a larger disturbance, and the response bandwidth meets the design requirement which will ensure the response speed and accuracy of the platform motion.

Key words: six degrees of freedom; hydraulic servo; AMESim; H^∞ control strategy

0 引 言

六自由度平台有很广阔的应用前景, 近几年, 很多科研单位都作了研究。六自由度运动平台是模拟器的关键部件, 它是一个空间并联运动机构, 通过改变 6 个可伸缩支撑杆的长度来实现平台的 6 种基本运动及其组合, 它也是一个集多领域技术于一体的运动控制机构。六自由运动平台是由 6 只液压缸, 上、下各 6 个万向铰链和上、下两个平台组成。下平台为固定的基座,

借助 6 只液压缸的伸缩运动, 完成上平台在空间 6 个自由度的运动, 从而可以模拟出各种空间运动姿态, 广泛用于飞行模拟、舰船模拟、汽车模拟、航空等众多领域^[1]。六自由度运动平台涉及到机械、液压、电子电气、计算机控制、传感器、空间运动建模、信号、图形处理等一系列领域, 因而研究出高性能的运动平台系统, 成为了液压和控制领域水平的标志性象征。目前为止, 世界上所有的国家研制单位, 大型平台基本上采用液压伺服控制系统^[2], 而对液压控制系统的研究有很多方法。

收稿日期: 2011-12-21

作者简介: 谢远党 (1975-), 男, 浙江宁海人, 主要从事机械制造及其自动化方面的研究。E-mail: xieyd168@163.com

通信联系人: 李维嘉, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: whlwj@vip.163.com

本研究要阐述一种新的基于工程应用的鲁棒 H_∞ 控制策略及动压力输出补偿方法。本研究通过 AMESim 仿真,获得满意的控制效果,有力地证明了这种控制策略在提高系统响应频率和鲁棒效果方面有很好的实用性。

1 Stewart 平台仿真系统总体结构

Stewart 平台的结构如图 1 所示,它由上、下平台及 6 根驱动杆组成。这 6 根驱动杆可以独立地上、下伸缩,它们分别由球铰和虎克铰与上、下平台链接。通常下平台是固定的,上平台可以进行 6 个自由度的独立运动,在三维空间可以做任意方向的移动和绕任何方向、位置的轴线转动。

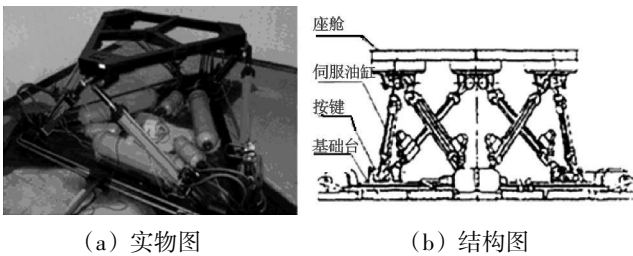


图 1 Stewart 平台结构

2 动态压力输出补偿的鲁棒 H_∞ 控制策略

在液压控制系统中,有几种以检测并反馈油压力为主要特征的反馈校正方法。压力反馈是其中一种。该方法用压差(对称缸而言)或压力传感器测取液压缸的负载压降 P_L ,反馈到伺服阀的输入端,构成压力反馈^[3]。本研究中设计的方法是采用动态压力反馈补偿。系统简化方框图如图 2 所示。

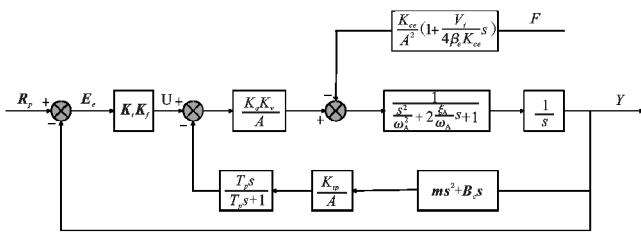


图 2 动态压力反馈方框图

由图 2 可见,压力反馈产生附加流量-压力系数,其值为 K_a, K_v, K_{fp} ,数值上很小,不改变数学模型的结构情况,其数学模型与不带压力反馈的系数数学模型基本一致。按照用 $K_{ce} + K_a K_{fp} K_v$ 代替 K_{ce} ,就可以得到系统开环传递函数的各个参数,不失一般性。

系统的固有频率:

$$\omega_h' = \omega_h \sqrt{1 + \frac{B_c K_a K_v K_{fp}}{A^2}} \quad (1)$$

液压阻尼比:

$$\xi_h' = \frac{(\xi_h + \frac{K_a K_v K_{fp} m \omega_h}{2A^2})}{\sqrt{1 + \frac{B_c K_a K_v K_{fp}}{A^2}}} \approx \frac{K_a K_v K_{fp} m \omega_h}{2A^2} \quad (2)$$

动态压力反馈校正的优点是系统的阻尼比和固有频率明显提高,改善了系统的动态品质,具有较好的稳定性。但也给系统带来不利影响,即开环和闭环柔度增大,刚度降低,使干扰引起的误差增加。

H_∞ 鲁棒控制理论是 H_∞ 空间通过某些性能指标的无穷范数优化而获得具有鲁棒性能控制器的一种控制理论。 H_∞ 范数为矩阵函数 $F(s)$ 在开右半平面的最大奇异值的上界,其物理意义是它代表系统获得的最大能量增益。

H_∞ 鲁棒控制理论解决了模型具有不确定性或扰动的一类系统的鲁棒控制问题,模型不确定性指模型和实际过程之间的误差,它是由参数变化、被忽略的动态或其他未定义影响引起的。不确定性可作为外部输入或作为扰动加到名义模型上。

本研究对于 H_∞ 的设计方法采用闭环回路增益算法,其核心是直接构造的系统闭环传递函数矩阵表示式设计控制器^[4],用于构造 T 的 4 个参数如最大奇异值、带宽频率、关门斜率及闭环频谱峰值都具有实际的工程意义。

标准反馈结构图如图 3 所示,图 3 中 K 为 H_∞ 鲁棒控制控制器,引入灵敏度函数为 $S = [I + GK]^{-1}$,补灵敏度函数 $T = I - S = GK[I + GK]^{-1}$,由于 S 和 T 的相关性间接确定了 S 的形状,进而保证了系统的鲁棒性能和鲁棒稳定性,其特点是立论的物理概念清晰,求解过程异常简单,闭环增益算法是一种从工程意义上简化的 H_∞ 鲁棒控制算法。

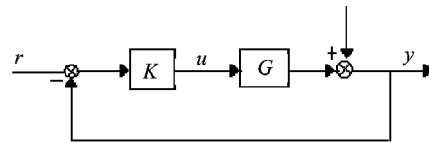


图 3 标准反馈结构图

典型的 S&T 奇异值曲线如图 4 所示,为使系统鲁棒稳定,要求系统闭环频率谱为低通的,且奇异值为 1,以保证无静差的跟随参考信号 r ,系统的带宽频率

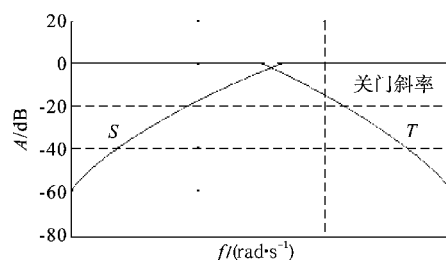


图 4 典型的 S&T 奇异值曲线

决定了系统的控制性能;而频谱的关门斜率决定系统对有效频带以外的敏感程度,斜率越大,对干扰的影响越不敏感,系统的鲁棒性能越强,但如果关门斜率过高,设计控制器的阶数越高,不利于控制器的实现且控制效果并无明显改善。

一般说来,关门斜率取 -20 db/dec, -40 db/dec, -60 db/dec, 设闭环系统的带宽频率为 $1/T_1$ (rad/s)。本研究中关门斜率取 -60 db/dec, 抽样时间为 1 ms。系统的闭环传函频谱的关门斜率为 -60 db/dec 时, 本研究将 T 的奇异值曲线近似表示为最大奇异值为 1 的 3 阶惯性系统的频谱曲线, 则控制器:

$$\frac{1}{(T_1s+1)^3} = \frac{GK}{1+GK} \Rightarrow K = \frac{1}{G_s(T_1^3s^2 + 3T_1^2s + 3T_1)} \quad (3)$$

可得 H^∞ 控制器的传递函数:

$$K(s) = \frac{2.21}{2097} \times \frac{s^2 + 41.36s + 10692.3}{1.526e^{-005}s^2 + 1.875e^{-003}s + 0.075} \quad (4)$$

3 平台单自由度执行器运动特性

该样机采用的是非对称阀控非对称缸的非对称动力机构,油缸采用静压轴承式设计,其技术指标为:最大有效负荷 $50\,000$ N,最大径向承载力 $2\,000$ N,液压缸的有效行程为 860 mm,缸长 $1\,000$ mm,最大速度为 0.5 m/s;加速度扰动值低于 0.02 g,库伦摩擦力 400 N。静摩擦力 500 N。位移传感器采用内置式,选用的是康宇测控仪器仪表公司的KYCML磁致伸缩线性位移传感器,可以比较方便地给出物体的位移和速度模拟信号;由于本研究采用非接触测量方式,不致由于摩擦、磨损等造成传感器的使用寿命降低。

平台单自由度执行器设计频宽要求达到 3 Hz以上,约为 32 rad/s;常规PID控制模式下六自由度运动系统响应频宽不足 2 Hz。

4 AMESim 建模仿真

法国IMAGINE公司开发的系统工程高级建模和仿真软件AMESim,能够从元件设计出发,可以考虑摩擦、油液和气体的本身特性,环境温度等非常难以建模的部分,直到组成部件和系统进行功能性能仿真和优化,并能够联合其他优秀软件(如Matlab)进行联合仿真和优化,还可以考虑控制器的环构成闭环系统进行仿真,使设计出的产品完全满足实际应用环境的要求^[5]。这一强大的系统仿真工具在世界范围内得到了广泛的应用。

对于六自由度运动平台这样一个复杂的液压控制系统,很难用单纯的数学仿真软件把系统中很多不确定因素给建立出模型,因此为了提高实际系统的仿真效果,AMESim是一款非常合适的仿真软件,这一点

在以后的样机试验中得到了更好的证明。

本研究根据实际控制系统模型进行单缸建模仿真,在控制系统图标库和液压元件库中找出相应的对象模块。本研究在AMESim中建立的仿真图如图5所示。

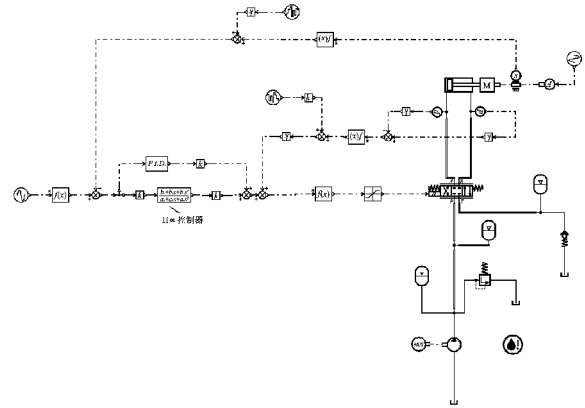


图5 液压伺服控制系统 AMESim 仿真图

仿真框图中的油缸、伺服阀及蓄能器、泵站均采用实际系统参数进行设置,为了方便比较,图中除了 H^∞ 控制器外,还并行加入了PID控制,并通过开关 K 进行切换比对试验^[6-7]。

PID控制模式下(未加负载干扰)运动系统的 1 Hz, 2 Hz正弦升降响应曲线如图6所示。未加动态压力补

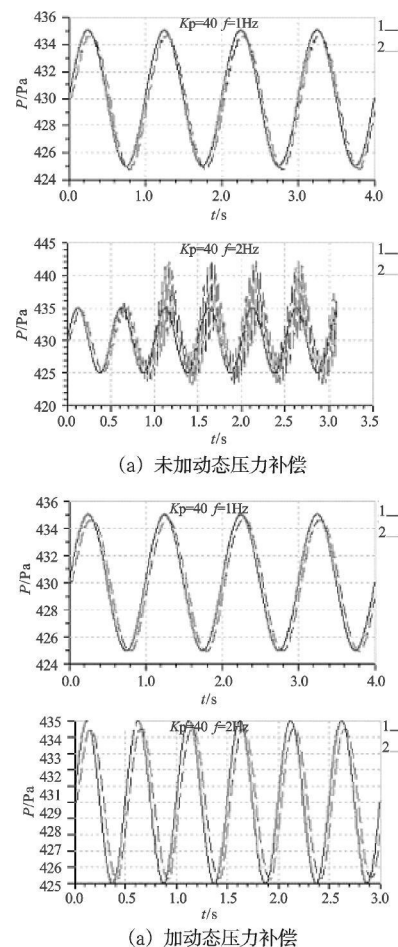


图6 运动系统的 1 Hz与 2 Hz正弦升降响应曲线

偿的曲线如图 6(a)所示,加了动态压力补偿的曲线如图 6(b)所示,可以看出当运动频率为 2 Hz,未加动态补偿时,系统出现了不稳定情况,而加了补偿后系统保持稳定。

PID 控制模式下(未加负载干扰)液压缸的活塞杆速度和加速度曲线如图 7 所示,由图 7(b)、图 7(d)可以看出加了动态压力补偿后,运动平滑性变好。

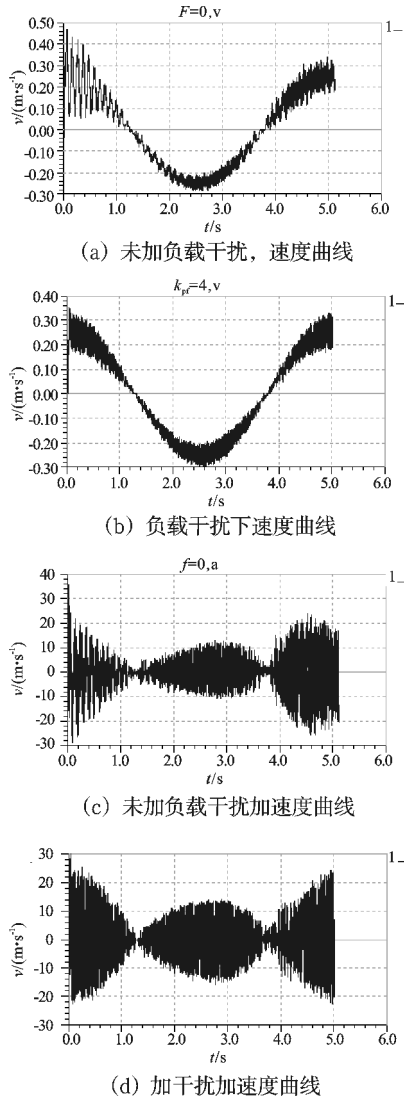
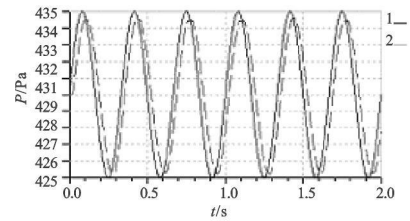


图 7 活塞杆速度和加速度曲线

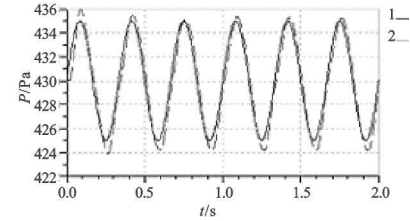
3 Hz 运动系统(未加负载干扰,加动态压力补偿)时的正弦升降曲线如图 8 所示,PID 控制模式下的曲线如图 8(a)所示, H^∞ 控制模式下的曲线如图 8(b)所示,可以看出 H^∞ 控制模式跟踪效果要好于 PID 控制模式。

5 结束语

本研究通过对六自由度运动平台的动态响应特性分析及 AMESim 仿真得出:具有动态压力输出补偿的 H^∞ 鲁棒控制器系统不仅具有良好的跟踪效果,较好的提高了系统的响应频宽,而且很好的解决了存在较



(a) PID控制曲线



(b) H^∞ 控制曲线

图 8 运动系统的 3 Hz 的正弦升降曲线

大不确定因素(负载干扰等)对系统造成不稳定性的问题。因此具有很好的鲁棒性。以上结论可以归结于以下几点^[8-9]:

(1) 动态压力输出反馈,提高了液压系统的固有频率和液压阻尼比,有助于改善系统的动态特性,运动平滑性。

(2) 动态压力输出反馈,增大了系统总的增益系数了,提高了系统的响应频率。

(3) H^∞ 鲁棒控制器很好的克服了系统中不确定因素造成的影响,提高了系统的鲁棒性。

(4) H^∞ 鲁棒控制系统较大的响应频宽,保证了控制系统较好的跟踪效果。

参考文献(References):

- [1] 刘长年. 液压伺服系统优化设计理论[M]. 北京:冶金工业出版社,1989.
- [2] PARK H, MLEE J. Adaptive impedance control of a haptic interface[J]. *Mechatronics*, 2004, 14(3): 237-253.
- [3] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [4] 杨泉. 液压六自由度并联机器人控制策略的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 26(3): 6-10.
- [5] 张显库, 贾欣乐. 船舶运动控制[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
- [6] 赵献丹, 赵虎. 六自由度串联机械手运动学逆解研究[J]. 现代制造技术与装备, 2010(3): 11-13.
- [7] 梁利华. 液压传动与电液伺服控制系统[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2005.
- [8] 司震鹏, 曹西京, 姜小放. 4 自由度模块化机器人的设计[J]. 轻工机械, 2010, 28(4): 39-42.
- [9] SLEE S, MLEE J. Design of a general purpose 6-DOF a haptic interface[J]. *Mechatronics*, 2003, 13(4): 697-720.

[编辑:张翔]