

阀泵联合电动静液作动器的变压力控制研究

纪友哲, 裘丽华, 王占林

(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: 分析了采用变压力提高飞行器作动系统效率的可行性, 针对单向泵 + 阀联合电动静液作动器 (EHA) 方案, 提出了分级压力控制和负载敏感控制, 并详细论述了工作原理。对变压力控制带来的系统特性改变问题, 采用模糊 PID 控制算法对控制参数进行实时整定, 仿真分析表明, 系统的动特性得到了明显的改善。

关键词: 变压力; 分级压力; 负载敏感; 模糊 PID

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881 (2008) 1-098-2

Research on Variable Pressure Control of Pump and Valve Combined Scheme of Electrical Hydrostatic Actuator

Ji Youzhe, Qiu Lihua, Wand Zhanlin

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

Abstract: The feasibility of applying variable supply pressure to improve the efficiency of actuation system was analyzed. After compared some scheme of pump and valve combined, the multistage supply pressure control mode and load feedback control mode were presented, and their principles of work were discussed. In order to solve the problem of actuation system dynamic characteristic getting worse which is caused by variable supply pressure, fuzzy-PID was used to adjust control parameters. The results of simulation indicate that the actuation system dynamic characteristic is improved at different supply pressure.

Keywords: Variable pressure; Multistage supply pressure; Load feedback; Fuzzy-PID

0 前言

EHA (电动静液作动器) 与传统液压作动系统相比具有体积小、重量轻、效率高等优点, 是当前研究的热点。其容积控制方式, 不存在节流损失, 能很大程度上提高系统效率, 但响应取决于电机或泵的响应, 在短期内还无法满足高响应系统的要求; 其阀泵联合控制方式是将阀控与泵控系统结合起来, 其设计思想是根据不同飞行状态对作动系统响应要求的不同, 调节泵阀的工作过程, 从而使作动系统可以兼顾效率和响应。因此, 采用泵阀联合控制方案对现阶段作动系统的设计更具有实际的意义。

1 变压力控制的引出

当前的航空、航天作动系统的大部分作动机构还是采用恒压泵作为液压源, 恒压泵的压力设定值是按负载峰值确定的。在理想情况下, 恒压变量泵的输出流量 Q_p 可与负载流量 Q_f 相等, 由液压系统功率公式可知系统的效率为:

$$\eta = \frac{p_f Q_f}{p_s Q_s} = \frac{p_f}{p_s} \quad (1)$$

由式 (1) 可见, 理想情况下系统效率直接决定于油源压力 p_s 与负载压力 p_f 的比值。事实上大多数飞机或导弹只在很小的时间段内需要最高压力, 大部分

时间只需要低压就足够了。根据 Rockwell 实施的军用飞机某项研究计划得到的典型飞行任务的统计结果, 通过计算控制面气动负载引起的铰链力矩, 可以得到图 1 所示的控制压力参考输入。

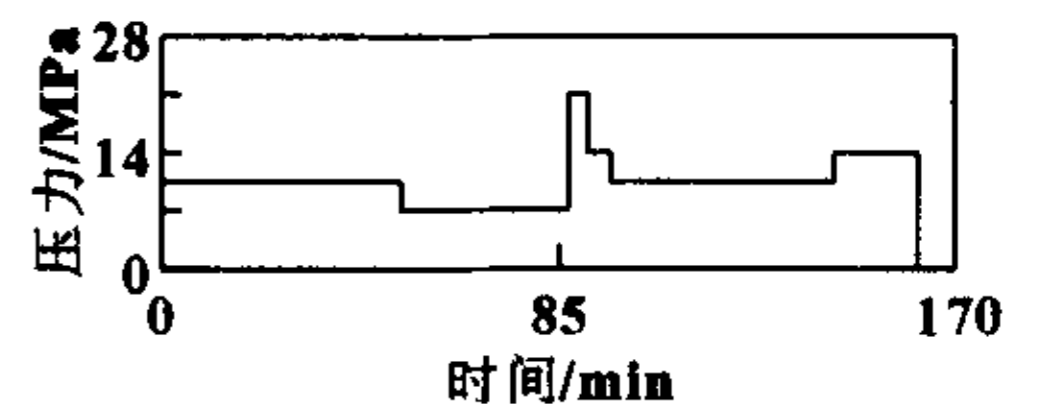


图 1 飞行各时段的压力控制参考输入

从图中可看出, 泵源系统在 95% 的时间内工作压力低于最高压力 21MPa, 并且大多数时间内工作压力在 10.5MPa 和 7MPa 以下。在 7MPa 下液压泵的热损耗可以减少 50%, 而对于锐边节流阀来说由于内部泄漏引起的系统发热可以减少 80%。因此, 若能根据系统负载与响应的要求调节阀前压力, 则可有效提高系统的效率。

2 泵阀联合控制方案设计

当前泵阀联合控制主要有并联控制方案和串联控制方案。并联方案将阀控与泵控系统并联起来, 工作时以泵控或阀控为主, 在保证快速性的同时也有较高的传动效率, 但该方案的阀控系统仍为恒压系统, 损失较大, 系统的体积和重量也较大。串联方案是在泵控系统的管路上串连阀, 根据泵流量方向不同又可分为双向串联和单向串联方案。双向泵与阀串联方案可

收稿日期: 2007-01-26

作者简介: 纪友哲 (1978—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 主要从事作动器联合控制等方面的研究。电话: 010-82339707, E-mail: ssm@163.com。

以实现泵控和变压力控制，但泵控时要求阀具有双向通导的能力，阀控时要求阀具有高响应，当前还没有阀可以同时满足这两种要求。单向泵与阀串联方案采用变压力控制，结构设计上充分考虑现有技术，方案中的关键元部件是直流调速电机、定量泵、伺服阀和DSP控制器在现阶段应用较为广泛。结构原理图如图2所示。

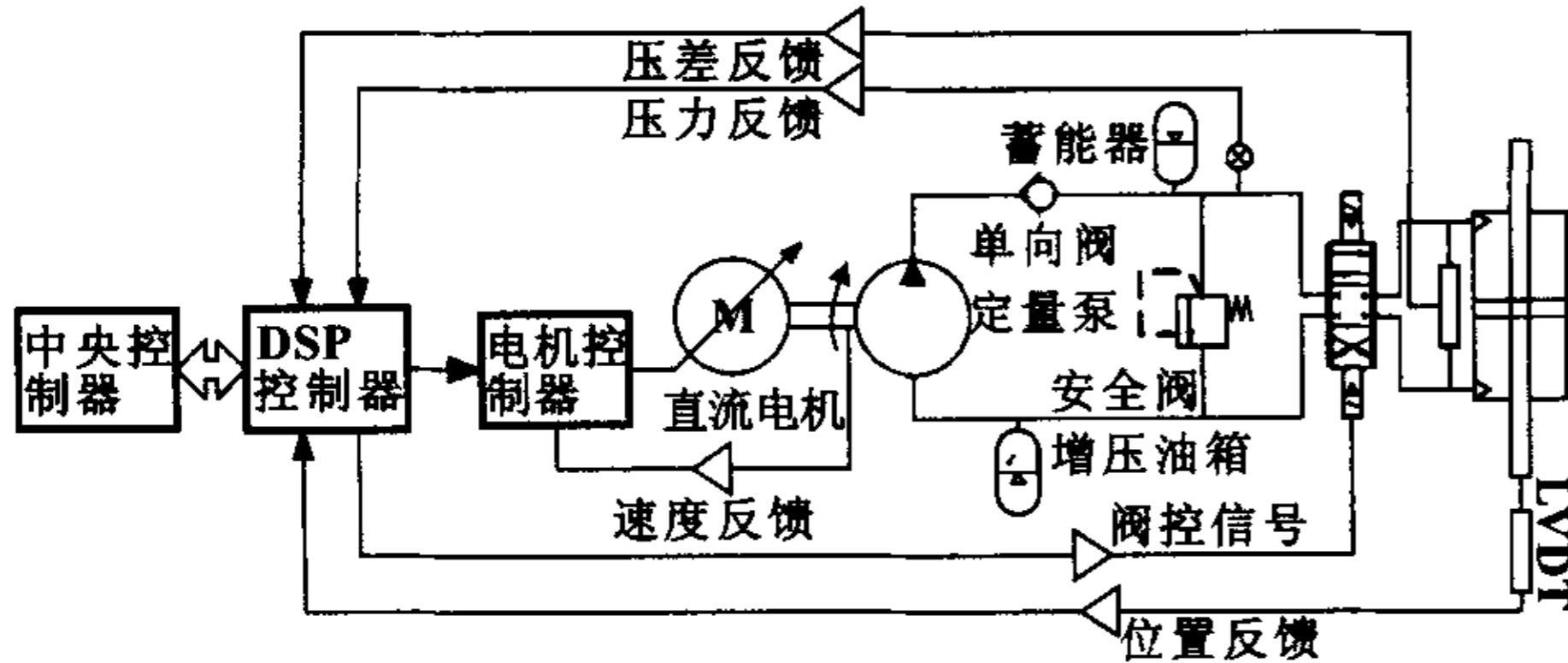


图2 电机+阀联合控制方案原理图

此方案的泵控系统采用调速电机带动定量泵，靠阀换向，回避了电机换向或泵换向的非灵敏区及大惯量；用电机调速改变流量的方式与斜盘调节方式相比，降低了结构复杂性，斜盘调节机构转化成功率调节器既降低了结构的质量又减少了斜盘调节机构自身的功率损耗。方案中蓄能器的容积直接决定作动器的响应，根据系统响应与负载的要求选择不同容积的蓄能器，变压力控制又可分为分级压力控制方式和负载敏感控制方式。

2.1 分级压力控制方案

当系统负载变化在整个工作过程中划分较为清晰，对响应要求较高时，采用较大的蓄能器，针对工况要求，分级设置工作压力，蓄能器压力在一定范围内波动以提供瞬时流量缓冲和吸收多余流量，工作原理如图3所示。

工作过程中，控制器接收中央计算机的指令，指令包括工作状态信息和摆动角度信息，控制器根据状态信息调节工作压力，压力值根据电机的响应特性，在保证最大瞬时流量，使蓄能器体积和压力波动尽可能小的前提下优化设计。作动系统通过阀前压力反馈和位置反馈调节电机转速控制泵的输出流量，当阀前压力低于波动范围内的某一值时，电机开始工作补充油量，维持阀前压力，保持泵输出流量和蓄能器可提供流量满足当前工况的最大功率要求；当阀前压力达到设定上限时，电机停止工作。

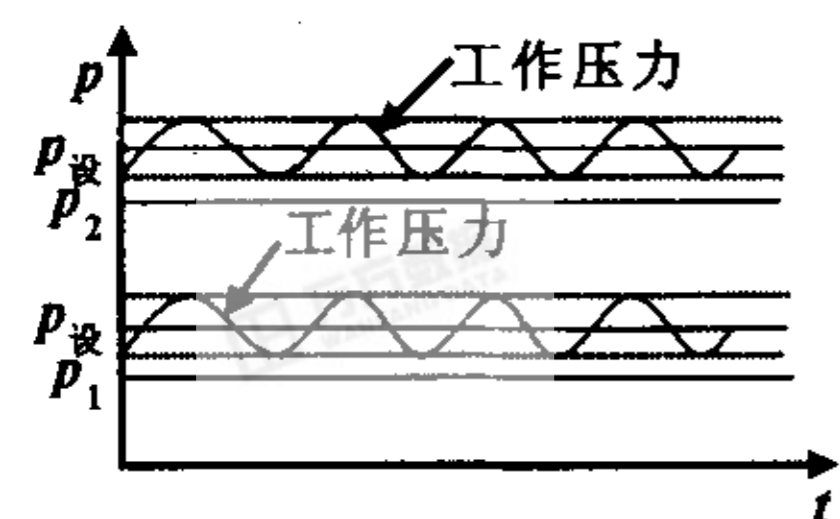


图3 分级压力控制原理

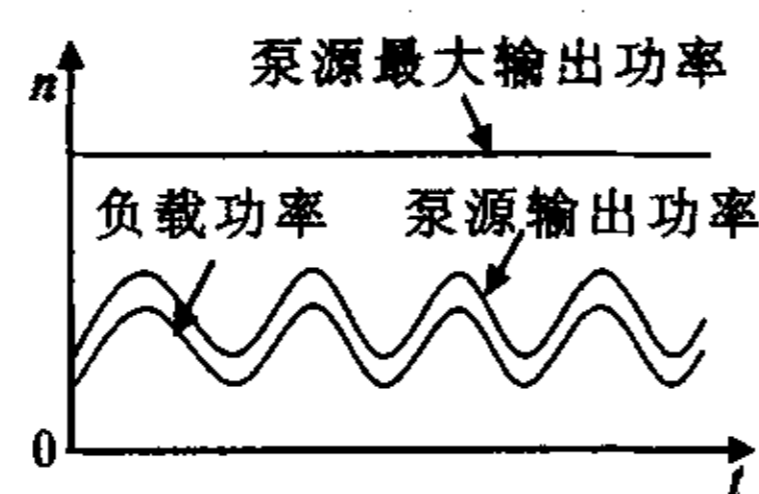


图4 负载敏感控制原理

2.2 负载敏感式控制方案

当系统对响应要求在工作过程中划分较为明确，选用较小蓄能器，蓄能器起吸收压力脉动和阀换向时冲击的作用。工作原理如图4所示。

当系统工作在较低响应状态时，控制器检测负载压差、阀前压力和位置信号，通过判断设定位置信号与当前位置信号差和负载压差与阀前信号差的大小，调整电机转速，使泵输出流量尽可能满足负载流量和泄漏流量要求，使阀前压力与负载压力之差满足伺服阀正常工作的最低要求，即通过电机转速调整使泵源输出功率尽可能随负载功率要求变化。当系统工作在高响应状态时，电机全功率输出，舵面调节完全由伺服阀控制完成。

3 变压力控制分析及仿真

典型阀控缸系统的线性化负载流量方程为：

$$\Delta Q_f = K_Q \Delta x_v - K_c \Delta p_f \tag{2}$$

其中：

$$K_Q = C_v W x_v \sqrt{\frac{1}{\rho} (p_s - p_f)} \tag{3}$$

$$K_c = \frac{C_v W x_v \sqrt{\frac{1}{\rho} (p_s - p_f)}}{2(p_s - p_f)} \tag{4}$$

在恒压阀控位置系统中， K_Q 、 K_c 多取为常数。在变压力系统中，阀前压力 p_s 的改变会导致 K_Q 、 K_c 的变化， K_c 变化会改变系统的阻尼特性， K_Q 的变化会改变系统的开环增益，常规PID控制器可在系统参数小变化范围内进行精确控制，但无法满足大范围压力变化系统的控制要求，模糊控制算法，不需要被控对象的数学模型，具有适应性好、系统鲁棒性好等优点，可在系统参数大范围变化时取得较好的控制效果，但精确控制效果不佳。模糊PID控制器结合模糊控制和PID控制的各自优点，通过实时整定PID参数从而使控制器可以在大范围压力波动的情况下对系统进行精确控制。

本文采用压力 p 和位置偏差 e 作为模糊控制器的输入量，控制方框图如图5所示。

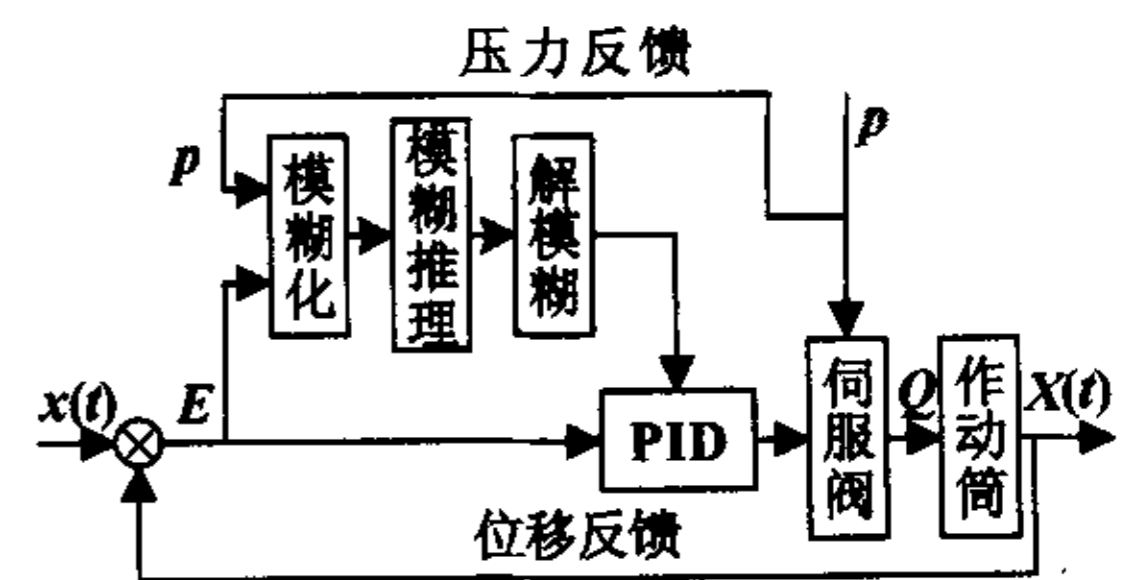


图5 模糊PID控制方框图

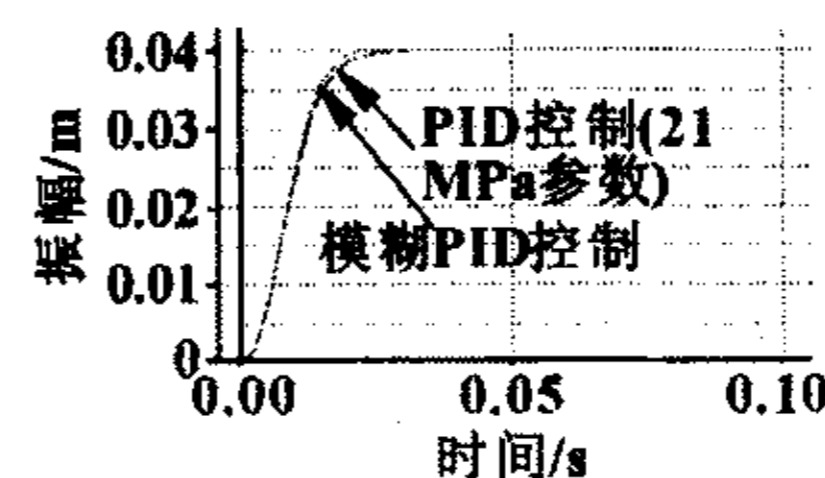


图6 阀前压力160MPa时控制结果对比

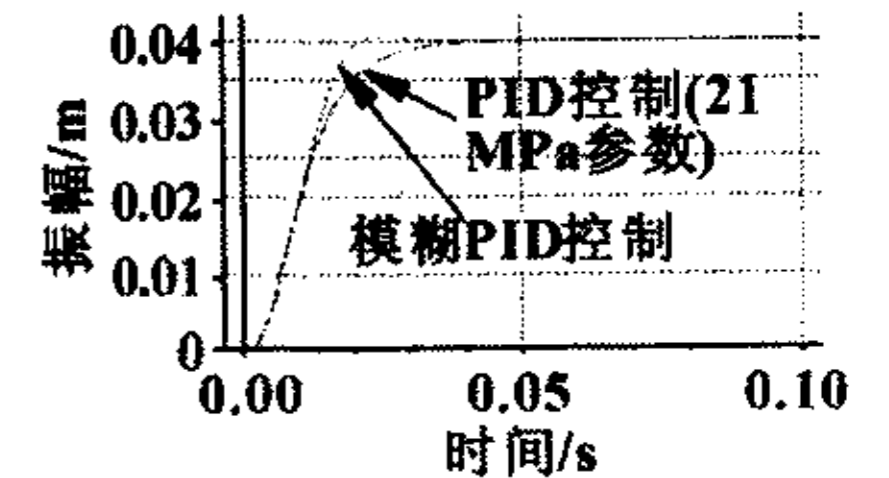


图7 阀前压力110MPa时控制结果对比

(下转第103页)

以上从理论上推导得出了单个抽气过程中真空容器压力变化过程，还需通过实验对之进行验证，以确定理论推导的正确性，比较实验结果与理论计算的差异。

4 模型验证

在理论分析的基础上，笔者对多组动力腔直径、供给压力、供给流量的样机模型进行了实验，将测得的真空容器压力与理论计算结果进行对比，图8为部分对比结果，对应的实验参数见表1。

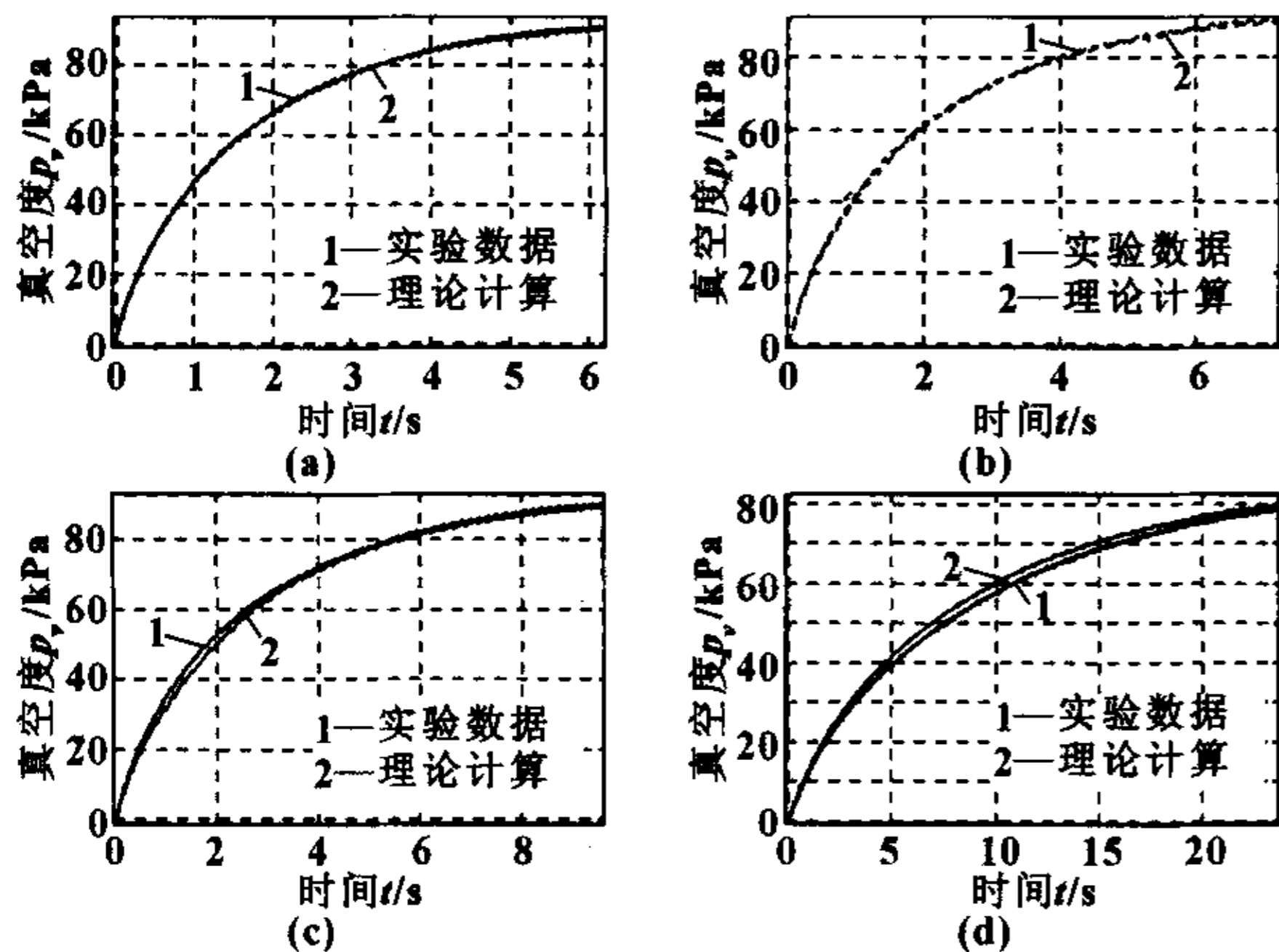


图8 不同参数下真空容器真空度与理论计算对比
表1 图8中各组实验参数

参数	图(a)	图(b)	图(c)	图(d)
动力腔直径/mm	30	34	40	30
供给压力/MPa	0.25	0.20	0.15	0.25
供给流量/(L·min ⁻¹)	82	72	58	72
真空容器容积/L	1	1	1	5

通过图8中的对比可以看出，在不同参数下实验数据与理论计算值在线型和数值上误差均较小，理论计算基本上能够反映出实际真空容器内的真空压力变化过程，说明上述的推导过程是可靠的。

5 结论

通过对双活塞缸式气动真空发生器前期实验研究，将活塞在单个行程内的运动过程简化为匀加速、匀速、匀减速运动，推导出活塞运动速度与系统结构参数和工作参数之间关系，并采用能量补偿的方法对抽气过程实际热交换的影响进行修正，得到了真空容器压力变化过程的近似解析表达式及其真空响应过程，更加明确了各参数对真空响应过程的影响。最后，采用实验的方法进行了验证，结果表明，理论计算结果与多组参数下的实验情况都较为符合，证明了采用文中的假设和推导过程是可行的，可为进一步的优化设计提供了依据。

参考文献

【1】姚朝辉，何枫，等. 真空发生器系统吸附响应时间的

确定[J]. 真空科学与技术, 2002(5): 198-201.

【2】潘孝斌，李小宁，等. 双活塞缸式气动真空发生系统的建模与仿真[J]. 机床与液压, 2006(8): 111-112.
 【3】王继常. 第八讲：真空系统设计[J]. 真空, 1999(2): 45-48.
 【4】陈志勇. 大容积真空抽吸时间的计算[J]. 磷肥与复肥, 2003(2): 75-76.
 【5】叶元烈. 机械优化理论与设计[M]. 北京：中国计量出版社, 2001.
 【6】Y. Kawakami, J. Akao, et al. Some Considerations on Dynamic Characteristics of Pneumatic Cylinders[J]. Journal of Fluid Control, 1988, 19(2): 22-36.
 【7】SMC(中国)有限公司. 现代实用气动技术[M]. 北京：机械工业出版社, 1998.

(上接第99页)

建立泵阀联合作动器的数学模型后，应用 Matlab 的 Simulink 模块，采用常规 PID 和模糊 PID 算法对其进行了仿真，部分结果如图6—8所示。

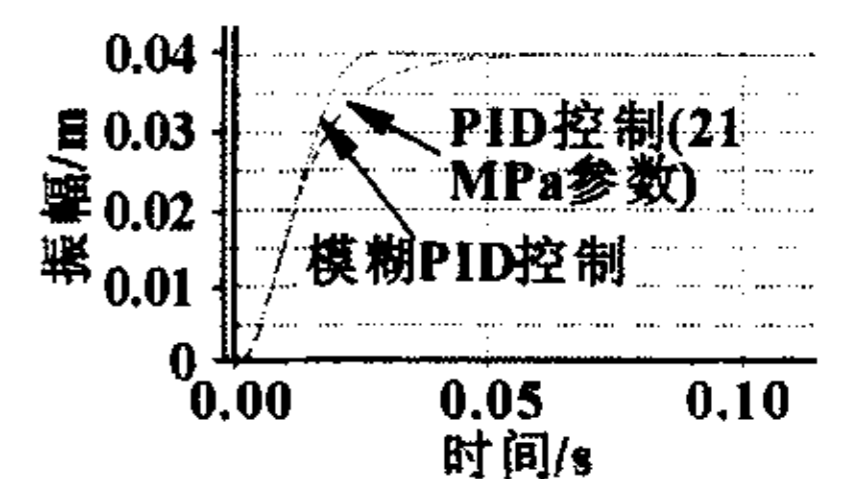


图8 阀前压力70MPa时控制结果对比

从图中可以看出，当阀前压力降低后，在PID控制下，系统响应变慢，动特性变差，采用模糊PID后，系统响应得到了有效的提高，动特性得到了改善。

4 结束语

本文分析了采用变压力提高飞行器作动系统效率的可行性，结合现阶段的技术水平，提出了分级压力控制和负载敏感控制，并详细论述了工作原理。对变压力控制带来的系统特性改变问题，采用模糊PID控制算法对控制参数进行实时整定，仿真分析表明，系统的动特性得到了明显的改善。该方案兼顾效率与响应并充分考虑现有技术，对目前作动系统设计具有更为实际的意义。

参考文献

【1】王占林. 近代电气液压伺服控制[M]. 北京：北京航空航天大学出版社, 2004.
 【2】王世富. 智能泵源系统关键技术的研究[D]. 北京航空航天大学, 2004.
 【3】C J Stephen. Flight test experience with an electro mechanical actuator on the F-18 systems research aircraft[R]. NASA, 1998.
 【4】胡务弄. 电静液作动器新概念[C]. 飞行控制与操纵第十一次学术交流会论文集, 2005.
 【5】祁晓野. 新型飞机机载作动系统的原理研究[D]. 燕山大学, 1998.