

射流管电液伺服阀在发动机温度控制中的应用

王兆铭¹, 渠立鹏³, 张东², 巴德纯¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110004

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 辽宁 沈阳 110015; 3. 中船重工集团 第七〇四研究所, 上海 200070)

摘 要: 燃气温度是直接影响发动机性能及寿命的重要参数, 某型航空发动机的温度控制系统原采用直动式调节阀对燃气温度进行限制, 该阀精度较低, 导致系统性能不理想。为解决这一问题, 提出了一种以射流管电液伺服阀替换原有调节阀温控系统的改进方案。试验和试车结果表明, 射流管电液伺服阀控制精度高、滞环小, 低压状态工作性能稳定; 应用该阀的方案能够显著提高系统的性能, 满足发动机的使用要求, 具有较高的可行性。

关 键 词: 航空发动机; 射流管电液伺服阀; 压强控制/恢复; 温度控制系统

中图分类号: V 233.7; V 233.91

文献标识码: A

文章编号: 1005-3026(2009)10-1485-04

Application of Jet-Pipe Electrohydraulic Servovalve to Temperature Control of Aeroengine

WANG Zhao-ming¹, QU Li-peng³, ZHANG Dong², BA De-chun¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Shenyang Aeroengine Research Institute, China Aviation Industry Corporation, Shenyang 110015, China; 3. The No. 704 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Shanghai 200070, China. Correspondent: WANG Zhao-ming, E-mail: wzm606@126.com)

Abstract: Gas temperature is crucial to aeroengine, since it directly affects the performance and service life of the latter. For instance, a direct regulating valve was once used in the temperature control system of a certain aeroengine to constrain gas temperature, which resulted in an unideal state of system performance due to its low precision. To solve the problem, an improvement scheme is proposed, i. e., a jet-pipe electrohydraulic servovalve is used instead of the direct regulating valve for gas temperature control. Testing and commissioning results showed that the jet-pipe electrohydraulic servovalve has the advantages of high control precision, low hysteresis loop and high stabilization under low pressure, thus improving remarkably the system performance to satisfy the requirements of the aeroengine with high feasibility.

Key words: aeroengine; jet-pipe electrohydraulic servovalve; pressure control/recovery; temperature control system

燃气温度控制是动力装置控制中的一个重要通道, 其控制的品质直接影响发动机的使用寿命和飞机机动性能^[1]。机动性高是歼击机的使用特点, 20 世纪 90 年代, 美军用发动机的寿命期内统计表明, 慢车至中间状态循环次数约 11 000 次, 接通加力约 8 000 次, “冷起飞”约 1 200 ~ 1 800 次, 装备 F100 发动机的 F-15 飞机 1 min 空战中, 在中间状态附近急速推拉油门杆达 10 次之多。发动机频繁而快速转换工作状态, 对热端部

件造成热损伤, 不利于发动机的寿命, 因此对燃气温度控制既要求良好的稳态控制精度, 又要求对过渡态的超温能快速响应, 保护发动机。这对延长发动机的使用寿命尤为重要, 也是控制设计的难题之一^[2]。

1 现有系统及改进方案

图 1 为某一航空温控系统的一部分, 其中热电偶感受发动机温度信号, 通过温度放大器把温

收稿日期: 2009-02-25

基金项目: 航空科学基金资助项目(2007ZB06003)。

作者简介: 王兆铭(1962—), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学博士研究生, 沈阳发动机设计研究所研究员; 巴德纯(1954—), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师。

度信号放大为电流信号以作为控制阀的输入信号,控制阀根据输入电流信号大小调节控制油腔压强的 p_k ,改变控制油缸活塞位置,从而改变燃油调节系统的供油流量。图1中的控制阀就是用于调节 p_k 值。系统要求 p_k 的变化范围为0.5~1.5 MPa,控制阀的回油压强为 $p_c=0.38$ MPa。

该系统原本是用直动式调节阀来控制 p_k ,实践发现直动式调节阀的控制精度太低,达不到系统要求,因此考虑用其他产品来替代。由于射流管电液伺服阀在抗污染、低压工作性能、灵敏度、分辨率和线性度方面的优越性^[3-6],压强控制系统可以获得较好的控制性能^[7-8]。采用中船重工集团第704所的CSDY系列射流管电液伺服阀替换直动阀,所选阀额定流量为15 L/min。

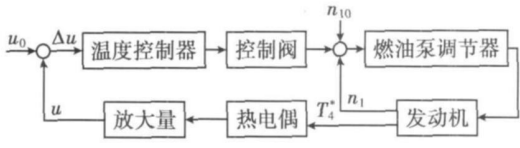


图 1 系统工作原理图

Fig. 1 Working principle of temperature control system

2 CSDY 射流管电液伺服阀原理

CSDY 系列射流管电液伺服阀是力反馈两级流量控制阀(见图2),力矩马达采用永磁结构,弹簧管支撑着衔铁射流管组件,并使马达与液压部分隔离,所以力矩马达是干式的。前置级为射流放大器,它由射流管与接受器组成。当马达线圈输入控制电流,在衔铁上生成的控制磁通与永磁磁通相互作用,于是衔铁上产生一个力矩,促使衔铁、弹簧管、喷嘴组件偏转一个正比于力矩的小角度。经过喷嘴高速射流的偏转,使得接受器一腔压强升高,另一腔压强降低,连接这两腔的阀芯两端形成压差,阀芯运动直到反馈组件产生的力矩与马

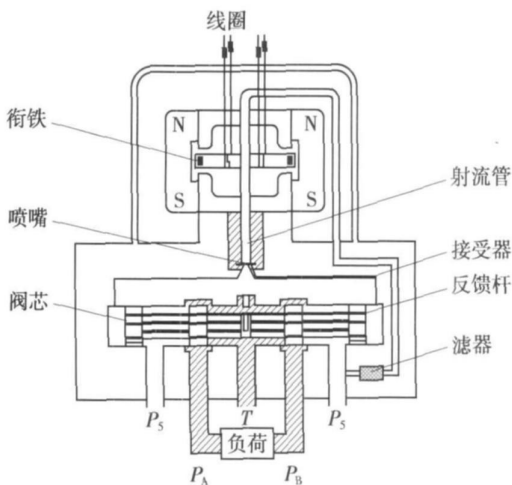


图 2 CSDY 型伺服阀结构原理图

Fig. 2 Schematic of construction of CSDY servovalve

达力矩相平衡,使喷嘴又回到两接受器的中间位置为止。这样阀芯的位移与控制电流的大小成正比^[9]。

3 试验研究

CSDY 阀在试验系统中的连接情况如图3所示。P口供油恒定为1.5 MPa,油口B堵死,当有电流输入时阀口打开,P、A、T三口相通。该工况下伺服阀射流放大器的恢复压强约为供油压强的30%,能保证阀正常工作。

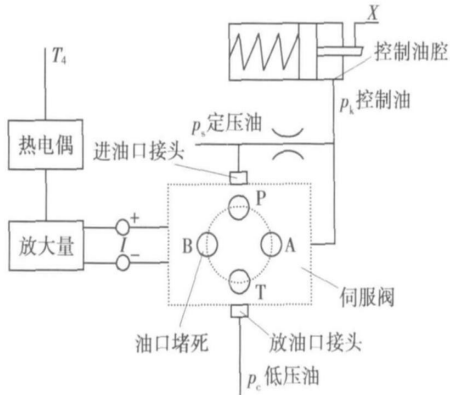


图 3 试验系统示意图

Fig. 3 Schematic of test system

该系统是通过改变可变节流孔的方法来达到控制压强的目的,CSDY 阀在此系统中就起到这个作用。以下验算该阀能否满足系统中控制压强 p_k 的要求。根据该伺服阀的工作原理及系统的连接情况可知,油液经过阀前节流孔的流量为

$$Q_1 = C_d A_1 \sqrt{\frac{p_s - p_k}{2\rho}}, \tag{1}$$

经过射流管伺服阀喷嘴的流量为

$$Q_2 = C_d A_2 \sqrt{\frac{p_k - p_c}{2\rho}}, \tag{2}$$

伺服阀的滑阀级的工作流量为

$$Q_3 = C_d A_3 \sqrt{\frac{p_k - p_c}{2\rho}}. \tag{3}$$

式中: C_d 为截流口流量系数; ρ 为油液密度; A_1 为节流孔面积; A_2 为喷嘴面积; A_3 为射流管伺服阀滑阀级的最大工作面积。

当伺服阀滑阀级阀口打开时, $Q_1 = Q_2 + Q_3$; 阀口完全关闭时, $Q_1 = Q_2$ 。经计算,阀额定流量为15 L/min,可使 p_k 值控制在0.45~1.48 MPa范围内变化,满足发动机温度控制系统的性能需要。

压强—电流特性曲线见图4中A曲线。由试验可知,当电流信号逐渐减弱到0时,控制油压只能恢复到1.2 MPa。原因是阀口逐渐关小后,阀芯阻力不断增大,关闭到一定程度后,控制腔产生的

压强差不足以克服阀芯的阻力；所以即使电流减小到 0，阀口也不能完全关闭。此外可以发现曲线滞环很大，究其原因也是恢复压强低及阀芯阻力大所导致。

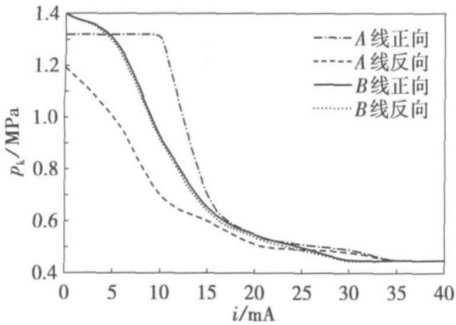


图 4 压强—电流关系曲线
Fig. 4 Pressure vs. electric current

在供油压强不变的前提下，缩短喷嘴与接受器之间的距离 l_c 提高前置级的恢复压强^[10]。同时增加一个 100 Hz 的颤震信号，其作用是给伺服阀一个高于工作频率的扰动量，改善阀芯的静态及低频摩擦性能，减小伺服阀的滞环^[11]。

图 4 中 B 曲线为改进后的试验曲线。改进后，试验曲线都基本无滞环，线性度也有所改善，试验说明 CSDY 型射流管电液伺服阀能达到预期效果，能有效控制温控系统的温度。

4 试车验证

为检验设计方案的有效性，将射流管电液伺服阀装配某型航空发动机进行了地面台架试车。试车时，当发动机达到中间状态，设计人员手动给伺服阀输入电流，检查燃油泵调节器液压延迟器右腔 p_k 的变化情况，伺服阀装配发动机试车曲线见图 5。然后又进行了动态进气加温试车，加温试车曲线见图 6。

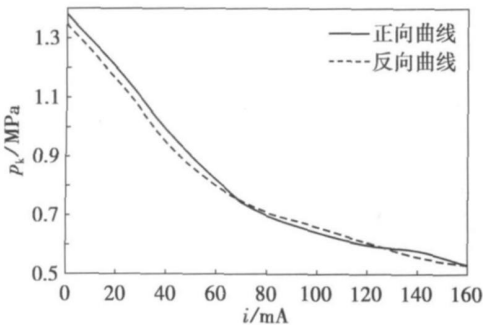


图 5 限温试车曲线
Fig. 5 Temperature control curve from commissioning

从图 6 可以看出，采用射流管电液伺服阀方案后，发动机限温系统的响应速度、线性度都大大提高，系统的滞环明显减小。而且，在伺服阀投入工作后，发动机工作稳定，未出现转速、压强波动

情况，分析认为，设计方案基本满足设计指标要求。

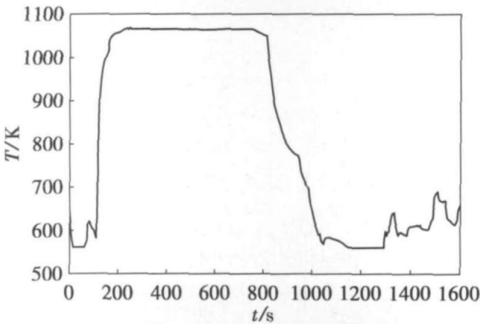


图 6 伺服阀装配发动机最大状态高温试车曲线
Fig. 6 High-temperature commissioning result of an aeroengine with servovalve mounted on under highest load

5 结 语

CSDY 型射流管电液伺服阀低压工作性能稳定，但必需保证恢复压强在一定值（一般需在 30% 以上），以便可以克服阀芯的阻尼。系统工作时为克服摩擦等因素的影响，有时需叠加一颤振信号。从试验分析可知，在某航空温控系统压强控制中，使用该型伺服阀控制精度高，能取得较好控制效果。

参考文献：

[1] Thompson H A, Benitez P H, Lee D, et al. A CAN bus-based safety-critical distributed aeroengine control systems architecture demonstrator [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 1999, 23(6): 345—355.

[2] Freeman C, Wilson A G, Day I J, et al. Experiments in active control of stall on an aeroengine gas turbine[C] // *ASME Turbo Expo*. Orlando, 1997: 34—38.

[3] Somashekhar S H, Singaperumal M, Krishna K R. Modeling the steady-state analysis of a jet pipe electrohydraulic servo valve[J]. *Journal of Systems and Control Engineering*, 2006, 220(2): 109—129.

[4] Somashekhar S H, Singaperumal M, Krishna K R. Mathematical modeling and simulation of a jet pipe electrohydraulic flow control servo valve[J]. *Journal of Systems and Control Engineering*, 2007, 221(3): 365—382.

[5] Karam M E, Jiao Z X, Zhang H Q. PID controller optimization by GA and its performances on the electrohydraulic servo control system[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, 21(4): 378—384.

[6] 黄增, 方群, 王学星. 射流管式电液伺服阀与喷嘴挡板式电液伺服阀比较[J]. *流体传动与控制*, 2007(4): 43—45. (Huang Zeng, Fang Qun, Wang Xue-xing. A comparison of jet pipe electrohydraulic servovalve and nozzle flapper electrohydraulic servovalve [J]. *Fluid Power Transmission and Control*, 2007(4): 43—45.)

[7] Chen C Y, Liu L Q, Cheng C C, et al. Fuzzy controller

design for synchronous motion in a dual-cylinder electro-hydraulic system[J]. *Control Engineering Practice*, 2008, 16(6): 658—673.

[8] Yanada H, Furuta K. Adaptive control of an electrohydraulic servo system utilizing online estimate of its natural frequency [J]. *Mechatronics*, 2007, 17(6): 337—343.

[9] 雷天觉. 新编液压工程手册 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998: 35—41.

(Lei Tian-jue. New edition hydraulic engineering manual [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998: 35—41.)

[10] 王春行. 液压控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 82—89.

(Wang Chun-xing. Hydraulic control system[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 82—89.)

[11] 吴根茂, 邱敏秀, 王庆丰. 新编实用电液比例技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 12—18.

(Wu Gen-mao, Qiu Min-xiu, Wang Qing-feng. New edition practical electrohydraulic proportion technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 12—18.)

(上接第 1472 页)

[3] Levanon H. Liquid crystals and molecular architecture in studying intermolecular electron transfer in donor-acceptor systems[J]. *Riken Review*, 1999, 24: 38—39.

[4] Kosaka Y, Kato T, Uryu T. Synthesis and the smectic mesophase of copolymers containing a mesogenic (carbazolylmethylene) aniline group as the electron donor and a (4'-nitrobenzy lidene)aniline group as the electron acceptor [J]. *Macromolecules*, 1994, 27(10): 2658—2663.

[5] Kato T, Frechet J M J. New approach to mesophase stabilization through hydrogen-bonding molecular interactions in binary mixtures[J]. *J Am Chem Soc*, 1989, 111(22): 8533—8538.

[6] Kato T, Adachi H, Fujishima A, *et al.* Self-assembly of liquid crystalline complexes having angular structures through intermolecular hydrogen bonding[J]. *Chem Lett*, 1992, 21 (2): 265—268.

[7] Kosaka Y, Kato T, Uryu T. Induction of the smectic phase in the polymer complexes between electron-accepting ionic nitrostilbazoles and electron-donating liquid-crystalline polymers[J]. *Macromolecules*, 1995, 28(20): 7005—7009.

[8] Hu J S, Zhang B Y, Pan W, *et al.* Synthesis and characterization of side-chain cholesteric liquid-crystalline polymers derived from steroid substituents[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, 99(5): 2330—2336.