

文章编号:1671-8879(2009)01-0103-04

基于变参数 PID 的航空发动机电调技术

罗 凯,党建军,王育才

(西北工业大学 航海学院,陕西 西安 710072)

摘 要:为了满足现代高性能航空发动机对控制系统的较高要求,基于数字电子控制技术,利用发动机转速测量信号解除了转速对被控燃油流量的耦合作用,利用燃油流量信号补偿了由飞行高度、马赫数和转速等因素引起的发动机增益的变化,采用变参数 PID 算法实现了系统转速的无静差控制,同时保证了燃油流量不发生超调。结果表明:采用该项电调技术进行发动机控制,可以有效地提高系统的控制精度、快速性和平稳性;控制效果全面优于机械液压调节器。

关键词:航空发动机;数字电子控制器;电子调节;PID 控制;变参数

中图分类号:TJ630.32

文献标志码:A

Electronic adjust for turbojet engine based on variable parameters PID control

LUO Kai, DANG Jian-jun, WANG Yu-cai

(School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

Abstract: In order to satisfy the high capability of modern aviation turbojet engine, a new aeroengine control system was developed with digital electronic control technique. A turbine rotate speed measure signal was used to unchain the coupling affect between the rotate speed and controlled fuel flux. A fuel flux measure signal was used to compensate the variable gain parameter of turbine rotate speed which influenced by the flight altitude, mach number and rotate speed of turbine. A variable parameters PID control algorithm was used to achieve the zero static error of turbine rotate speed and non-overshooting adjusting of controlled fuel flux. The results show that; the control precision, speed and stability can be improved obviously by using this method; the control effect of electronic adjusted system is better than the one of mechanical hydraulic adjuster. 4 figs, 8 refs.

Key words: turbojet engine; digital electronic controller; electronic adjust; PID control; variable parameter

0 引 言

自航空发动机问世以来,机械液压式控制器就随之得到发展而发展着^[1-2],目前,该类控制器已可以实现较复杂的控制规律并取得较高的控制精度,

但是该类控制器难以实现多变量控制和多回路解耦。20 世纪 70 年代以后,各航空大国都聚焦于使用电子计算机作为航空推进系统核心控制器的研究。应用于全权限数字电子控制器(FADEC)的控制方法一直是研究的热点,并取得了极大的成

收稿日期:2008-07-15

基金项目:船舶工业科技预研基金项目(07J412)

作者简介:罗 凯(1972-),男,陕西渭南人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:nwpu_wyh@nwpu.edu.cn.

就^[3-4];电调技术在 JT9D、F100、F119 等发动机上的成功试验,证实了数字电子控制器(DEEC)能够满足发动机控制的要求^[5-6]。当前,国外发展的新型无人机动力系统多采用 DEEC 技术,而中国目前还为机械液压式调节。因此,发展新型高性能电调技术十分迫切。针对 DEEC 技术,国内外对先进的控制方法进行了大量的研究,例如线性二次型最优控制、自适应控制、鲁棒控制、线性变参数控制以及模糊和神经网络控制^[7-10]。其中,线性变参数(LPV)技术是利用线性系统理论解决非线性系统控制问题的有效方法。本文给出的变参数 PID 控制方法与 LPV 方法拥有相似的思路,然而取得的算法更简捷、实现更方便,更适用于无人机的推进控制。

1 电调发动机系统的核心控制功能

作为航空发动机电调系统的核心,DEEC 的控制功能包含底层位置、燃油流量和发动机转速控制共 3 类控制功能。底层位置控制本身既是独立的功能模块,它完成尾喷口面积和进气道斜板位置控制功能,又是流量控制和转速控制的执行机构,完成燃油泵的排量控制。当发动机运行于较低转速时实施流量控制,相应的在 DEEC 的顶层控制功能分配中,对应油门杆角度较小时实施流量控制,而在角度较大时实施转速控制。

2 发动机转速控制

转速控制是发动机控制中最重要也是最困难的部分。作为转速控制系统的执行机构,底层位置控制系统是一个阀控缸式液压位置伺服系统,它由数字控制器、伺服阀、液压缸和位置传感器构成,其输入为指令排量信号,输出为燃油泵的排量。通过合理设计,可实现小惯性环节特性的响应特性 $G(s)$,即

$$G(s) = 1/(T_s s + 1) \quad (1)$$

式中: T_s 为位置控制闭环系统的时间常数; s 为拉氏算子。该小闭环系统的响应速度要远快于发动机转速系统的响应速度,即 T_s 要足够小。

航空发动机具有非线性特性,在实际工作中不易精确描述其特性规律,但可采取分段线性化的方法对其进行描述。发动机转速 n 对于燃油流量 Q 的响应特性,可近似地描述为惯性环节,即

$$G_e(s) = k_e/(T_e s + 1) \quad (2)$$

式中: $G_e(s)$ 为转速响应传递函数; k_e 为增益; T_e 为被控系统时间常数。

k_e 和 T_e 均随运行工况的变化而变化,相对而言, T_e 的变化相对较小,而 k_e 的变化相对就剧烈许

多。在诸多影响因素(飞行高度、马赫数和发动机转速等)中,飞行高度的影响最大,当转速高于 80% 最大转速时, k_e 与 Q 的稳态值之间可近似地描述为

$$k_e = c_k/Q \quad (3)$$

式中: Q 为燃油流量; c_k 为常数。

转速控制系统的执行机构为位置控制子系统,系统的受控燃油流量是由受控主燃油泵排量与发动机转速相乘耦合后得出,可采集转速反馈信号,在算法中除掉转速以消除耦合。考虑到执行机构的小惯性特性,可暂时忽略执行机构的惯性特性,则转速控制系统就可以简化变形如图 1 所示,图 1 中 k_{ps} 为泵角机构的增益; n_c 为期望转速; G_{n_c} 为期望转速响应传递函数。

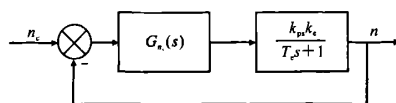


图 1 转速控制系统简化结构

本文采取的研究思路是:首先在典型工况下进行控制规律综合,获取算法的核心结构;其次分析控制参数的选择方法,根据参考变量进行变参数修正,获取变参数算法以适应不同的运行工况;最后将算法除以转速测量值以消除转速对燃油流量的耦合。

为保证发动机各部件的安全可靠运行,不仅要保证系统输出——发动机转速不超调,还要求控制量——燃油流量也基本不超调,同时还要保证足够的快速性。于是这里就引出一个控制命题,即要求图 1 所示系统对于阶跃输入的响应不超调、无静差,且控制量不超调。为简化书写,将图 1 所示被控对象传递函数重写为 $k/(T_e s + 1)$ 。对于单位阶跃信号输入,如果闭环系统是无差的,则闭环系统稳定后,控制量 Q 必然等于 $1/k$;而在 Q 不超调的条件下,闭环系统的响应速度不可能超过被控对象的响应速度。

假设

$$G_{n_c}(s) = (T_e s + 1)/(T_e k s) \quad (4)$$

式中: $k = k_{ps}k_e$ 。

则系统闭环传递函数为

$$[G_{n_c}(s)G_e(s)]/[1 + G_{n_c}(s)G_e(s)] = 1/(T_e s + 1) \quad (5)$$

式(5)表示闭环系统响应速度与被控对象响应速度一致,此时期望输入至 Q 的传递函数为

$$G_{n_c}(s)/[1 + G_{n_c}(s)G_e(s)] = 1/k \quad (6)$$

显然,对于阶跃输入 Q 将为常数。此时 Q 不超调,且闭环系统响应速度达到了此条件下的最大值,控制规律式(4)取得最优效果,为理想控制规律。考虑被控对象和执行机构特性等因素后,设实际控制

规律为

$$G_{n_c}(s) = (s + m)/(ks) \quad (7)$$

式中: $m \approx 1/T_c$ 。

此时,前向通道 $G_{n_c}(s)G_e(s)$ 拥有一个零值极点,为 I 型系统,对于阶跃输入闭环系统必然无差,而期望输入至控制量的传递函数为

$$\frac{G_{n_c}(s)}{1 + G_{n_c}(s)G_e(s)} = \frac{1}{k} \left[1 + \frac{(T_c m - 1)s}{T_c s^2 + 2s + m} \right] \quad (8)$$

当 $T_c m = 1$ 时,式(8)蜕变为式(6),从而式(7)成为理想控制律,闭环系统响应达到 Q 不超调时的最快值,此时 $Q = 1/k$ 为常数;当 $T_c m > 1$ 时, Q 在某些时间段内, $Q > 1/k$, 即 Q 发生超调;当 $T_c m < 1$ 时, Q 不超调,但响应速度变慢。

所以,考虑误差、系统特性变化等因素,实际使用的偏保守的控制规律应为式(7),且 $m \leq 1/T_c$, 即实际控制规律的零点 $-m$ 在被控对象极点 $-1/T_c$ 的右侧;再考虑到实际控制规律增加的一个零值极点,系统根轨迹将完全位于负实轴上,其闭环系统传递函数为

$$\frac{G_{n_c}(s)G_e(s)}{1 + G_{n_c}(s)G_e(s)} = \frac{s + m}{T_c s^2 + 2s + m} \quad (9)$$

式(9)为过阻尼特性,其响应必然无振荡,而 Q 不超调,则满足本命题“控制量、被控量均无超调”之要求。

以上的分析实际上已经给出了控制参数的选择方法,以 T_c 最大值为准选择参数可满足整个飞行包线内的控制要求。再考虑到式(3)发动机增益的变化特性,实际控制规律式(7)最终可以表达为

$$G_{n_c}(s) = Q(s + m)/(c_k k_{ps} s) \quad (10)$$

在实际应用中, Q 可由当前燃油流量测量值来代替。这样,对变增益被控对象实施有效控制的变参数 PID 控制算法就基本完成,最后,在控制指令输出时再除以转速测量值,就可完成对转速变化的解耦。

这种思路的物理实质可以解释如下:发动机转速对于燃油流量的响应可以用变参数的惯性环节来近似描述,在不同的工况下其增益和时间常数都是变化的。为了在整个飞行包线范围内都能够维持闭环控制系统的良好性能,考虑采用变参数控制算法,即当流量减小时,减小控制算法的放大系数,而流量增大时,增大其放大系数。这样就可以补偿发动机特性的增益变化,维持系统前向通道的开环增益基本不变,同时也可维持系统的闭环传递函数基本不变。应遵循 $m \leq 1/T_c$ 的原则选取参数 m , 显然, T_c 应按照发动机特性的最大量值选取。

最后需要指出的是,在控制算法式(10)中,对参考流量进行控制增益修正的初衷主要是为了补偿

由于飞行高度变化而带来的被控对象增益的变化。这样做还带来了另外一个好处,即在发动机做大幅度变速的过程中,由于流量是逐步变化的,控制增益也是逐渐变化的,所以实际的流量变化是比较平稳的。另外,在具体实用算法中,应采用增量式控制算法,算法中还应设置软件限位,以限制燃油泵的排量范围。

3 试验验证

基于以上理论分析,航空发动机 DEEC 作为一个核心子系统,已被用于发动机动态半物理仿真试验台的构建中,该试验台得以成功研制。数字仿真和半物理联调试验台研制表明,DEEC 的底层位置控制、顶层燃油流量控制以及发动机转速控制达到了较好的控制和模拟效果。其中的关键控制技术——转速控制算法,采用式(10)描述的根据流量和转速进行补偿的变参数比例积分控制算法可获得良好的控制效果,系统的快速性、无差性很好。

半物理仿真试验台实测试验结果表明,在发动机进行由慢车大幅度加速至额定工况时,图2~图4给出了油门杆角度、主燃油泵流量以及发动机转速的半物理模拟试验实测过程。作为指令输入环节,由慢车升速至额定状态,油门杆角度变化时间约为 1.5 s。作为响应,燃油流量过渡过程时间约为 8 s,

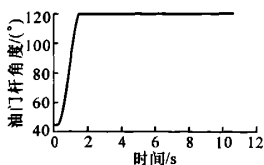


图2 油门杆角度

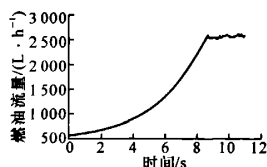


图3 主燃油泵流量

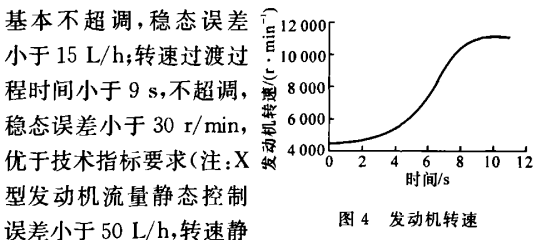


图4 发动机转速

基本不超调,稳态误差小于 15 L/h;转速过渡过程时间小于 9 s,不超调,稳态误差小于 30 r/min,优于技术指标要求(注:X 型发动机流量静态控制误差小于 50 L/h,转速静态控制误差小于 50 r/min,升速时间 9~12 s,超调量不大于 100 r/min)。整个系统动态、静态控制品质全面优于 X 型原型发动机的机械液压调节器的控制品质。

4 结语

(1)利用数字电子控制系统实现了位置控制、流量控制和转速控制 3 类控制功能,3 类控制功能及

其良好的匹配构成了发动机电调系统的框架。

(2)利用发动机转速信号解除了发动机转速对燃油流量的耦合作用,利用流量信号补偿了发动机增益的变化,采用变参数比例积分控制模式,获得了良好的控制效果。

(3)半物理仿真试验结果证明,采用变参数 PID 和解耦方法,电子控制器取得的动态、静态控制品质全面优于原型发动机机械液压调节器的控制品质。该方法也可应用于涡扇、涡桨等其他类型的航空发动机的控制系统设计。

参考文献:

References:

- [1] 张绍基. 航空发动机控制系统的研发与展望[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 375-382.
ZHANG Shao-ji. A review of aeroengine control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 375-382.
- [2] 樊思齐. 航空发动机控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [3] 孙健国. 面向 21 世纪航空动力控制展望[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 97-102.
SUN Jian-guo. Prospects of the aeroengine control de-

(上接第 90 页)

酸值略有增大,过氧化值迅速增大。

(3)生物柴油的氧化安定性比 0# 柴油差,其混合燃料的氧化安定性随生物柴油掺混比的增大而逐渐变差。

(4)通过筛选确定了 T502A 是一种效果良好的抗氧化剂,对生物柴油的氧化过程具有明显的抑制作用。

参考文献:

References:

- [1] 李昌珠,蒋丽娟,程树棋. 生物柴油: 绿色能源[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 司利增,边耀璋,蔡永江. 柴油机燃用生物柴油的特性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(5): 83-85.
SI Li-zeng, BIAN Yao-zhang, CAI Yong-jiang. Performances of diesel engine fueled with bio-diesel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(5): 83-85.
- [3] 葛蕴珊,张世鹰,郝利君,等. 生物柴油在柴油机中的应用研究[J]. 内燃机工程, 2004, 25(2): 12-14.
GE Yun-shan, ZHANG Shi-ying, HAO Li-jun, et al. Application investigation of bio-diesel on a diesel en-

velopment in the early time of the 21st century[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 97-102.

- [4] 刘大响,程荣辉. 世界航空动力技术的现状及发展动向[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 490-496.
LIU Da-xiang, CHENG Rong-hui. Current status and development direction of aircraft power technology in the world[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(5): 490-496.
- [5] 杨育武. 某型小涡喷发动机数控系统设计与试验[J]. 推进技术, 2004, 25(6): 526-529.
YANG Yu-wu. A digital electronic control system design and test for a certain small turbojet engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(6): 526-529.
- [6] Kumar K K, Kulkarni N. Inverse adaptive neural-control of a turbopfan engine[R]. Houston: AIAA, 1999.
- [7] Turner M C, Walker D J, Alford G. Design and ground-based simulation of an H_{∞} limited authority flight control system for the Westland Lynx Helicopter[J]. Aerospace Science and Technology, 2001, 5(3): 221-234.
- [8] Giarre L, Bauso D, Falugi P, et al. LPV model identification for gain scheduling control: an application to rotating stall and surge control problem[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(4): 351-361.
- gine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(2): 12-14.
- [4] 蔺建民,张永光,杨国勋,等. 柴油机燃料调和用生物柴油国家标准的编制[J]. 石油炼制与化工, 2007, 38(3): 27-32.
LIN Jian-min, ZHANG Yong-guang, YANG Guo-xun, et al. Establishment of national standard of biodiesel blend stock for diesel engine fuels[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2007, 38(3): 27-32.
- [5] Paolo B, Ada G, Laura D B, et al. Biodiesel stability under commercial storage conditions over one year[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2003, 105(12): 735-741.
- [6] Paolo B, Ada G, Laura D B, et al. The prediction of biodiesel storage stability: proposal for a quick test[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2004, 106(12): 822-830.
- [7] Meher L C, Sagar D V, Naik S N. Technical aspects of biodiesel production by transesterification: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006, 10(3): 248-268.
- [8] Robert O D. Effect of antioxidants on the oxidative stability of methyl soyate(biodiesel)[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(10): 1071-1085.