

# 一种航空发动机多变量自抗扰解耦控制律设计\*

张海波, 王健康, 王日先, 孙健国

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 研究了航空发动机多变量解耦控制律设计问题。提出了一种用于航空发动机多回路控制的多变量自抗扰解耦控制算法: 首先通过静态解耦算法实现多变量耦合系统的静态解耦, 而后通过 ADRC 非线性扩张观测器的补偿控制实现各回路的动态解耦, 最终实现复杂多变量耦合系统的解耦控制。以某涡扇发动机非线性部件级实时数学模型为被控对象, 基于上述多变量自抗扰解耦控制算法设计了发动机中间状态以上多变量控制律。在全包线内, 与基于增广 LQR 控制方法设计发动机闭环系统, 进行了对比研究。数字仿真结果表明, 前者使得发动机闭环系统具有更好的指令跟踪和多回路解耦能力。

**关键词:** 航空发动机; 自抗扰控制; 解耦控制; 鲁棒性

**中图分类号:** V233.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2012) 01-0078-06

## Design of an Active Disturbance Rejection Decoupling Multivariable Control Scheme for Aero-Engine

ZHANG Hai-bo, WANG Jian-kang, WANG Ri-xian, SUN Jian-guo

(College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The way to design multivariable decoupling control scheme for aero-engine is mainly discussed. A new active disturbance rejection decoupling multivariable control algorithm is proposed based on the basic Active Disturbance Rejection Control (ADRC) principle. Firstly, a necessary static decoupling process is carried out to diminish static coupling among the controlled loops, and then the dynamic decoupling is realized to compensate each other by the nonlinear Extended System Observer (ESO). Then, an ADRC decoupling controller for turbofan engines is implemented and designed. It is compared with ALQR controller in full flight envelope through nonlinear simulation tests. Simulation results show clearly that the decoupling controller ADRC has good dynamic tracking performance and decoupling properties.

**Key words:** Aero-engine; Active Disturbance Rejection Control (ADRC); Decoupling control; Robustness

## 1 引 言

航空发动机是一类复杂的多变量非线性系统。对其进行多变量解耦控制, 抑制各回路间的消极耦合效应显得尤为重要<sup>[1-2]</sup>。国内外有许多专家都尝试用多变量控制方法设计航空发动机控制规律, 并取得了许多成果<sup>[3-4]</sup>, 但大都未见投入现役机种的报道。真正用于发动机控制的仍然多为单回路 PID 或增强单回路的串级 PID 方式。如美国 NASA、美国空军和 PW 公司联合研制的数字-电子发动机控制器 (DEEC) 其基本控制算法就是变增益 PI 控制, 国内在

实际航空发动机控制中也依然采用 PID 控制。PID 控制虽物理意义明显, 易于工程实现, 但对于航空发动机这种强耦合多变量对象越发显出其局限性。因此, 需要谋求一种既保留类似 PID 结构简单、参数易于整定、不依赖精确数学模型等优点, 同时又可针对被控对象多变量、耦合强等特性进行多回路解耦设计的控制方法, 使之可以更加有效地提高发动机控制性能。自抗扰控制理论 (Active Disturbance Rejection Control, 以下简称 ADRC) 的出现为发动机多变量控制律设计问题提供了一种新的思路<sup>[5-7]</sup>。

\* 收稿日期: 2010-08-18; 修订日期: 2011-04-12。

基金项目: 航空科学基金项目 (2010ZB52011); 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目 (Ns2010055)。

作者简介: 张海波 (1976—), 男, 博士后, 副教授, 研究领域为航空发动机控制。E-mail: zh\_zhbb@163.com

自抗扰控制基本结构由微分跟踪器、扩张状态观测器、非线性状态误差组合三个独立的部分组成。其功能在于:一是通过安排过渡过程使反馈误差渐进变化,解决快速性与超调之间的矛盾。二是利用扩张状态观测器实时估计系统扰动,并进行扰动补偿,提高了控制器的鲁棒性能。三是采用的非线性状态误差组合含有多种智能功能,可以显著提高控制性能。自抗扰控制在电力系统、精密机械加工车床、化工过程等领域中已得到不少成功的应用<sup>[8~11]</sup>。

由于航空发动机对象的复杂性,迄今还少见自抗扰控制理论在该领域的应用。本文基于自抗扰控制理论,提出了一种针对对象回路间动静态耦合,进行分别解耦的多变量自抗扰解耦控制算法,并将这种算法应用于航空发动机多变量稳态与过渡态控制仿真中。

## 2 一种新的多变量解耦控制设计思路<sup>[7,12]</sup>

对于如下  $m$  维输入- $m$  维输出非线性时变仿射系统

$$\begin{cases} \dot{X} = F(x, t) + G(x, t) U \\ Y = X \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} X &= [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_m]^T \\ F &= [f_1(x, t) \quad f_2(x, t) \quad \cdots \quad f_m(x, t)]^T \\ U &= [u_1 \quad u_2 \quad \cdots \quad u_m]^T \\ G &= \begin{bmatrix} g_{11}(x, t) & \cdots & g_{1m}(x, t) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{m1}(x, t) & \cdots & g_{mm}(x, t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

把系统控制输入之外的模型部分  $F$  称为“动态耦合”部分,而把  $G \cdot U$  部分称为“静态耦合”部分。

接下来,对系统(1)进行解耦控制律设计,设计步骤如下:

步骤1:若存在解耦补偿矩阵  $Q$ ,使得  $QG = I_{m \times m}$ ,那么可认为初步实现系统静态解耦。然而精确地控制量系数矩阵  $G$  很难得到。因此,令

$$\hat{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{m1} & \cdots & g_{mm} \end{bmatrix} \quad \hat{G} \text{可逆}$$

$\hat{G}$ 用来近似估计控制量系数矩阵  $G$ ,其中  $g_{ij} \approx g_{ij}(x, \dot{x}, t)$ 。只需要使  $Q\hat{G} = I_{m \times m}$ ,这样近似实现静态解耦。对应的静态解耦矩阵为  $Q = \hat{G}^{-1}$ ,对应的静态

解耦表达式为

$$U = Q\tilde{U} \quad (2)$$

其中虚拟控制量  $\tilde{U} = [\tilde{u}_1 \quad \tilde{u}_2 \quad \cdots \quad \tilde{u}_m]$ 。

步骤2:令  $\Delta G = G - \hat{G}$ 表示控制输入矩阵的估计误差。将未考虑到的“静态耦合” $\Delta G \cdot U$ 作为另一部分系统摄动,加入到“动态耦合”中,则系统(1)可转化为如下形式

$$\begin{cases} \dot{X} = \tilde{F}(x, t) + \tilde{U} \\ Y = X \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\tilde{F}(x, t) = F(x, t) + \Delta G \cdot U$

那么系统  $i$  通道上新的输入输出关系为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = \tilde{F}_i(x, t) + \tilde{u}_i \\ y_i = x_i \end{cases} \quad (4)$$

即第  $i$  通道上的输入为  $\tilde{u}_i$ ,而其输出为  $y_i = x_i$ 。显然“动态耦合”部分  $\tilde{F}_i(x, \dot{x}, t)$ 可看作为新系统附加的扰动,包括系统参数时变和外部条件变化引起的扰动,以及各通道之间的动态耦合。

接下来,可把合适的 ADRC 控制器串联到这个通道时,通过其非线性扩张状态观测器 ESO(Extended State Observer)估计上述系统的扰动,实时补偿到控制回路中,消除系统回路间的动态耦合,并把静态解耦矩阵、控制对象和估计的扰动部分合并成一个“积分器串联型”的广义对象。例如,第  $i$  通道最终可以表示成如下形式

$$\begin{cases} \dot{x}_i = \tilde{F}_i(x, t) + (\tilde{u}_i - \hat{\tilde{F}}_i(x, t)) \approx \tilde{u}_{i0} \\ y_i = x_i \end{cases} \quad (5)$$

$\hat{\tilde{F}}_i(x, t)$ 为非线性扩张状态观测器估计的第  $i$  通道总扰动。这样每个通道的控制量  $\tilde{u}_{i0}$ 与被控输出  $y_i$ 之间是单输入-单输出关系,即第  $i$  通道的被控输出  $y_i$ 和控制量  $\tilde{u}_{i0}$ 之间已被完全解耦了。接下来只需要对每个通道单独设计 ADRC 控制器。以第  $i$  通道为例,ADRC 解耦控制器结构图如图1所示。不失一般性,均以二阶 SISO 对象的 ADRC 控制器设计为例。ADRC 控制结构中包含:微分跟踪器(Tracking Differentiator-TD)、扩张状态观测器(Extended State Observer-ESO)以及非线性状态误差组合(Nonlinear State Error Feedback-NLSEF)。

## 3 各回路自抗扰控制器设计<sup>[13]</sup>

对于系统(1),以第  $i$  通道为例,可以采取如下步骤获得该通道的 ADRC 控制器,具体步骤如下:



$$h_1 = h$$

(d) 静态耦合矩阵

$$Q \approx \begin{bmatrix} 0.56 & 0.145 \\ 0.11 & 0.67 \end{bmatrix}$$

## 5.2 数字仿真验证

为了说明所设计多变量自抗扰控制器的控制品质,在发动机工作基准点  $H=0\text{km}$ ,  $Ma=0$  设计了增广 LQR 控制器以作对比,具体的设计过程可参考文献[14],此处不再赘述。下文图中所涉及到的物理变量除  $H$ ,  $Ma$ ,  $PLA$  外均为相对于发动机设计点的归一化量。

### 5.2.1 系统解耦性能验证

为了验证本方法所设计的控制系统的解耦性能,分别对闭环系统转速  $PNF$  回路、发动机压比  $EPR$  回路作指令阶跃响应,以包线中一点为例:在  $H=0\text{km}$ ,  $Ma=0$  时,发动机闭环系统  $PNF$  回路阶跃响应曲线以及  $EPR$  回路阶跃响应曲线如图 4(a)~(d) 所示。

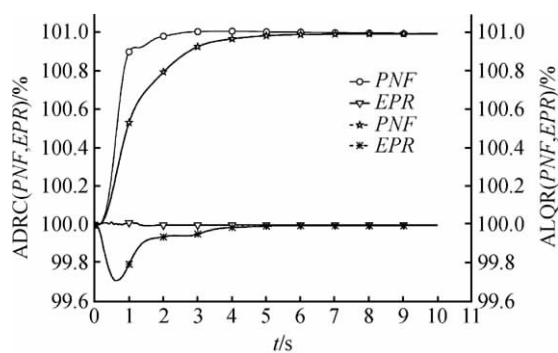
由图 3 可以看到,当闭环系统采用 ADRC 解耦控制器时,转速回路阶跃响应导致压比回路大约 0.02% (相对设计值) 的耦合波动,如图 3(a) 所示,而压比回路指令阶跃引起转速回路大约 0.06% 的耦合

波动,如图 3(c) 所示,显然优于采用 ALQR 控制器的解耦效果,且控制输入  $WFB$ 、 $A8$  动静态品质满足控制系统设计要求,如图 3(b) 及 (d) 所示。

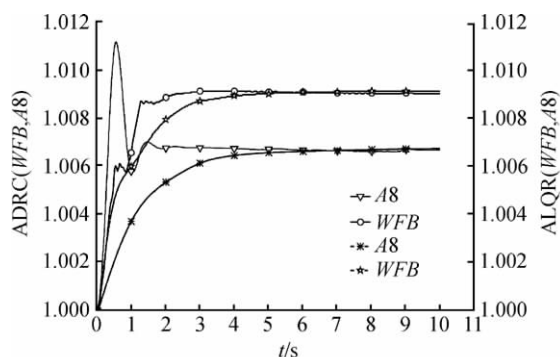
包线内其它点的仿真效果类似,限于篇幅这里不再列出。由此可见,采用自抗扰解耦控制器有效抑制了发动机闭环系统两回路间的耦合作用,具有良好的动、静态解耦性能。

### 5.2.2 系统抗干扰性能验证

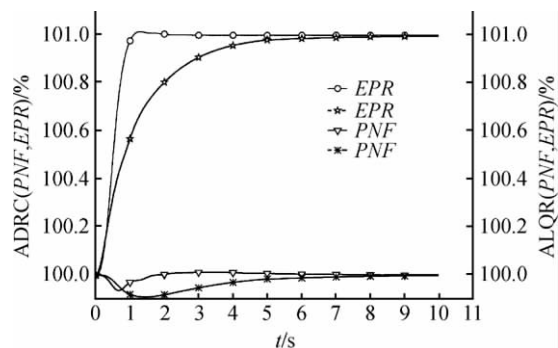
发动机接通和断开加力对发动机主控制系统来说是一种强扰动,若不采取额外的补偿控制,会造成发动机工作状态大的波动,从而影响发动机的正常工作。常用的加力过渡态控制为“主回路反馈控制+加力燃油前馈补偿”的复合控制策略,由于发动机工作包线大,非线性强,因而这种控制方式只能在较小的包线范围内有好的控制效果。ADRC 控制通过引入扩张状态观测器实时跟踪估计扰动,不需要事先知道关于扰动的任何先验知识就可以用估计的扰动补偿消除其影响,因此其更加适合于发动机这种复杂被控对象的大包线、变状态非线性扰动补偿控制。而且采用 ADRC 控制无需再加入超前补偿环节,相比上述的复合控制,控制结构简化了许多。



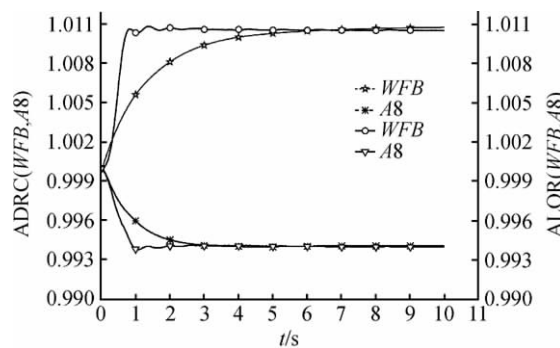
(a) Step response of PNF, EPR for PNF loop



(b) Step response change of WFB, A8 for PNF loop for PNF loop



(c) Step response of PNF, EPR for EPR loop



(d) Step response change of WFB, A8 for EPR loop

Fig. 3 Simulation plots of ADRC decoupling validation

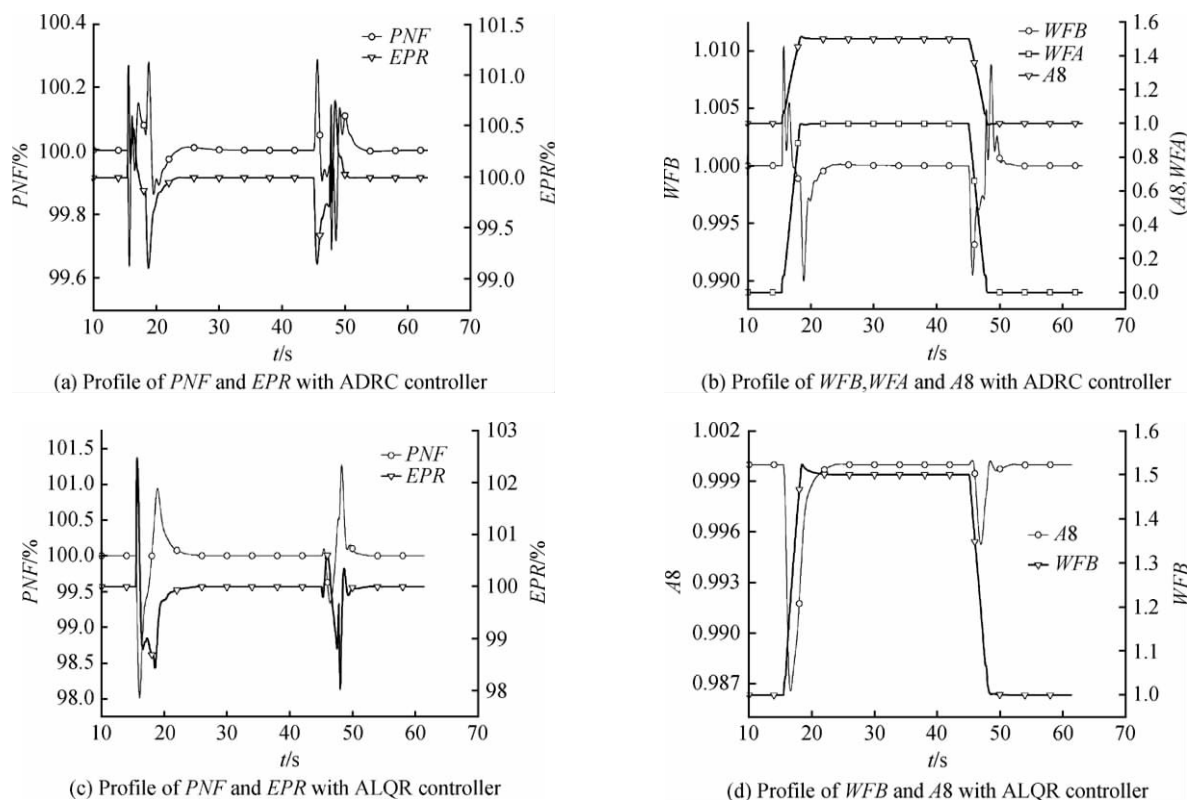


Fig. 4 Simulation curve of disturbance resistant validation

为了验证根据多变量自抗扰解耦控制方法所设计闭环系统的抗干扰性能,特别地,在发动机处于接通和断开加力过渡态时进行仿真验证。以包线中一点为例:在  $H=0\text{km}$ ,  $Ma=0$  状态下,15s 时接通加力,从中间状态经小加力状态过渡到全加力状态,而后 45s 时退出加力,从全加力状态回到中间状态。

由图 4 可知,接通加力和断开加力给主控制系统带来一种强扰动,造成转速、压比指令剧烈波动。采用 ADRC 解耦控制器后,闭环系统 PNF 回路波动不超过 0.5%,EPR 回路波动则控制在 1.4% 以内(图 4(a))。与之相对的是,采用 ALQR 控制器设计的闭环系统 PNF 回路波动大于 1.4%,EPR 回路波动则超过 2.3% (图 4(c))。

图 4(b)、(d) 也反映出系统控制输入 WFB、A8 变化均是满足设计要求的。可见,采用 ADRC 解耦控制器所带来的闭环系统抗扰能力明显优于 ALQR 控制器,可有效地抑制接通、断开加力时,加力燃烧对主控制回路的干扰。以上的仿真结果在其他包线点也有类似的结果,限于篇幅这里不再给出。

需要特别说明的是,A8 受到最大、最小尺寸限制时,若不施以附加的饱和控制,则会出现控制量饱和现象,影响系统的动态性能,本文所采用发动机控制

系统结构中具有独立的控制量饱和处理逻辑部分,若出现饱和,则记录状态量、控制量,重新初始化 ADRC 控制器相关参数,使得其控制计算输出始终等于限制值。通过测试,该逻辑也可以与本文提出 ADRC 控制器有效融合,避免饱和现象出现对过程动态的消极影响。控制量饱和处理是任何一种控制方法在实际应用时所必须增加的修正环节,由于不是本文研究的重点,而且上述仿真中也没有达到 A8 饱和限制,因此这里不再给出相应的测试结果。

## 6 结论

基于自抗扰控制理论,本文提出了一种自抗扰解耦控制(ADRC)的算法,并用于航空发动机多变量控制器设计。通过与 ALQR 控制器所构成闭环系统的数字仿真对比,可以看出,ADRC 解耦控制在多变量系统抗扰性、解耦性方面具有较为明显的优势,是一种具有优良工程应用前景的航空发动机多变量控制律设计方法。

## 参考文献:

- [1] 樊丁,梁春燕. 航空发动非理想解耦自适应控制[J]. 航空动力学报, 2000, 15(3): 328-330.

- [2] 刘建勋,李应红,陈永刚,等.航空发动机递归神经网络分路式解耦控制[J].航空动力学报,2005,20(2):287-292.
- [3] Soeder J F. F100 Multivariable Control Synthesis Program-Computer Implementation of the F100 Multivariable Control Algorithm[R]. NASA TP-2231,1983.
- [4] Sanjay Garg. Robust Integrated Flight/Propulsion Control Design for a STOVL Aircraft Using H-Infinity Control Design Techniques[J]. Automatics,1993,29(1):129-145.
- [5] 韩京清.自抗扰控制器及其应用[J].控制与决策,1998,13(1):19-23.
- [6] 韩京清,金奎焕.自抗扰算法在聚丙烯反应釜过程控制中的应用[J].计算技术与自动化,2003,22(2):43-45.
- [7] 韩京清.自抗扰控制技术[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [8] 黄焕袍,武利强,高峰,等.火电单元机组协调系统的自抗扰控制方案研究[J].中国电机工程学报,2004,24(10):168-173.
- [9] 陈忻彦,黄一,韩京清,等.基于自抗扰控制思想的动力调谐陀螺力平衡回路控制的实验研究[M].武汉:武汉理工大学出版社,2003:283-286.
- [10] 李壮举,刘贺平,王健安.基于ESO的动态解耦方法及其应用仿真[J].计算机应用研究,2009,26(11).
- [11] 张海波,孙健国,孙立国.一种新的涡轴发动机转速抗扰控制器设计及应用[J].航空动力学报,2009,7(3):328-330.
- [12] Zhiqiang Gao. Active Disturbance Rejection Control: A Paradigm Shift in Feedback Control System Design[C]. USA: American Control Conference,2006:2399-2405.
- [13] Goforth F J,Zhiqiang Gao. An Active Disturbance Rejection Control Solution for Hysteresis Compensation[C]. USA: American Control Conference,2008:2202-2208.
- [14] 杨刚,孙健国,李秋红.航空发动机控制系统中的推广LQR方法[J].航空动力学报,2004,19(1):153-158.

(编辑:张荣莉)