

文章编号:1000-8055(2011)04-0942-05

航空发动机导叶模糊控制器设计与参数优化

彭 凯, 樊 丁, 李 杰, 吴天翼

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 选用 AMESim 构建导叶调节机构液压部分的模型, 在 Simulink 中搭建模糊控制器模型, 在 iSIGHT 中用混合优化算法对控制器的参数进行优化. 所采用的多软件联合仿真效率高, 相较于常规比例积分微分(PID)控制的导叶调节机构, 数值仿真最终形成的导叶调节机构响应快且超调不明显, 对扰动敏感度小, 动静特性良好, 有一定的实用价值.

关 键 词: 压气机导叶调节机构; 模糊控制; 参数优化; AMESim; iSIGHT; Matlab/Simulink

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Fuzzy controller design and parameter optimization for aero-engine compressor guide vane system

PENG Kai, FAN Ding, LI Jie, WU Tian-yi

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The hydraulic part of aero-engine compressor guide vane regulator was modeled in AMESim, the fuzzy controller was built in Simulink, and then hybrid optimization algorithms was used to optimize the parameters of the controller in iSIGHT. Co-simulation based on multi-software is highly efficient, the ultimate guide vane regulator formed by numerical simulation is of good static and dynamic characteristics, such as quick response and unobvious overshoot and small disturbance sensitivity, so its performance better than that controlled by standard PID (proportion integration differentiation) is of practical value.

Key words: compressor guide vane regulator; fuzzy control; parameter optimization; AMESim; iSIGHT; Matlab/Simulink

随着飞行条件和发动机工作状态的变化, 航空涡扇发动机特性将发生很大的变化, 现代战斗机多采用航空推进系统综合控制系统 IPCS(integrated propulsion control system), 对进气道、发动机及喷管进行综合控制, 以保证发动机在各种工况下获得某种意义下的性能最优. 几何通道控制中的压气机导叶角度调节是发动机的一个控制点, 通过对导叶角度的控制可改变压气机的工作特性, 比如使压气机的喘振边界向左上方移动, 使发动机的喘振裕度增加, 同时也对发动机的节流

特性的改善及推力的增大有积极的影响. 在导叶控制方面, 国内外已渐渐由机械液压控制向数字电子控制转变^[1-2]. 因此, 开展航空涡扇发动机导叶(电子)调节机构的建模仿真及参数优化对于提高飞行的安全性和可靠性具有重要的意义.

1 压气机导叶调节机构工作原理 简介

压气机导流叶片调节机构的作用是, 根据转子转速及发动机进口空气的温度, 调节高压压气

收稿日期: 2010-03-06; 修订日期: 2010-05-30

作者简介: 彭凯(1984—), 男, 陕西富平人, 博士生, 研究方向为航空推进系统控制. E-mail: 330993652@qq.com

机进口导流叶片角度 α_e , 以保证航空压气机的稳定工作裕度. 该调节机构的结构及工作原理如图 1 所示.

发动机工作时, 控制系统依据发动机转速 N_2 和进气温度 T_1^* 经数字电子控制器计算得到压气

机导流叶片角位移希望值 α_{e0} ; 数字电子控制器再根据当前的导叶角度 α_e , 经相关控制算法计算, 向电液伺服机构发出控制信号, 从而改变导叶作动筒左右腔油压, 使作动筒驱动导叶转动机构带动导叶旋转, 形成导叶角度闭环控制回路^[1-2].

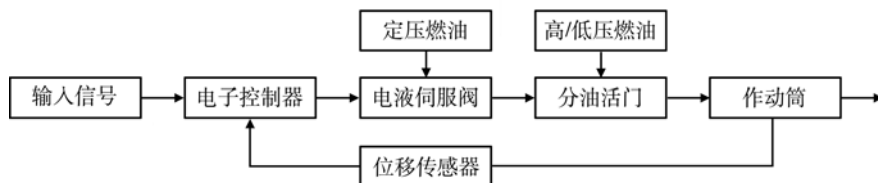


图1 压气机导叶调节系统工作原理简图

Fig. 1 Simplified diagram of guide vane regulating system

2 所用软件概述

本文选用 AMESim 4.2.0 软件构建导叶调节机构中液压部分的仿真模型, 在 Simulink 7.1 中设计模糊控制器模型, 两者联合仿真, 并在 iSIGHT 8.0 中用混合优化算法对控制器的参数进行了优化.

AMESim 软件是基于直观的图形界面的仿真平台. 它包含了法国 IMAGINE S. A. 公司的专业建模技术并为流体(液体及气动)、机械、控制、电磁等工程提供较为完善的综合仿真及灵活的解决方案^[3].

iSIGHT 是由美国 Engineous Software 公司开发的、可整合设计流程中各种软件的工具, 并且可以进行优化设计、可靠性设计与分析、函数逼近等工作^[4].

Matlab 最初是由 Cleve Moler 博士基于 LINPACK 和 EISPACK 软件包, 用 FORTRAN 语言设计开发的. 第二代改用 C 语言开发, 和 Mathematica, Maple 并称为三大数学软件, 是国际控制界公认的标准计算软件.

3 压气机导叶调节机构建模仿真分析及参数优化

在 Matlab 中命令窗口执行 mex-setup 命令, 设置 MEX (Matlab executable) 文件编译器, 建议选择 Visual C++ 编译器. 以便 AMESim 生成 Simulink 可以调用的 S-function 文件.

3.1 导叶调节机构机械液压部分建模^[5-7]

此调节机构机械液压部分包含电液伺服阀、分油活门、随动活塞及导叶作动筒等部件. 在对调

节机构工作原理分析的基础上, 应用 AMESim 软件所搭建的导叶调节机构机械液压部分的仿真模型如图 2 所示. 在建模时选择 SimuCosim 接口类型, 将 AMESim 中的模型编译成供 Simulink 调用的 S-function.

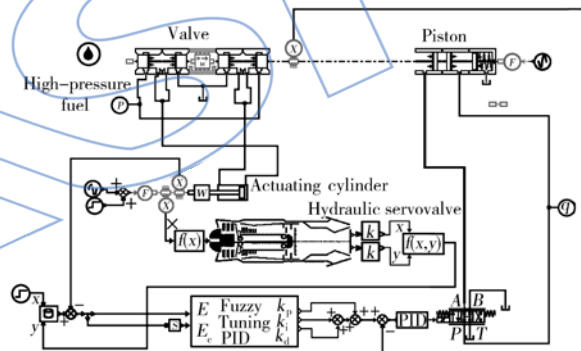


图2 压气机导叶调节系统模型

Fig. 2 Simulation model in AMESim

3.2 导叶调节机构控制部分建模

鉴于常规 PID 控制器(proportional-integral-derivative controller)的参数设计好之后一般为常值, 很难在整个飞行包线内都有效地工作, 在本文中, 控制部分采用模糊自适应整定 PID 控制器, 结构原理图如图 3 所示, 它以误差 e 和误差的变化 e_c 作为输入, 利用模糊控制规则在线对 PID

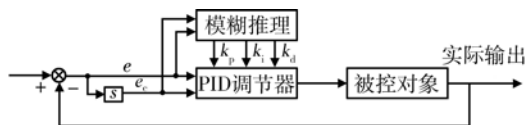


图3 模糊自适应整定 PID 控制器结构原理图

Fig. 3 Block diagram of the control loop containing fuzzy controller

参数进行修改,以满足不同时刻的 e 和 e_c 对控制参数的要求,使控制对象具有良好的动静态性能。

模糊规则表的输入语言变量 E, E_c 及输出语言变量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$, 它们的论域分别为 $[-R_e, R_e], [-R_{e_c}, R_{e_c}], [-R_{k_p}, R_{k_p}], [-R_{k_i}, R_{k_i}], [-R_{k_d}, R_{k_d}]$, 均选取 7 个语言值 {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB}, 隶属度函数如图 4 所示。

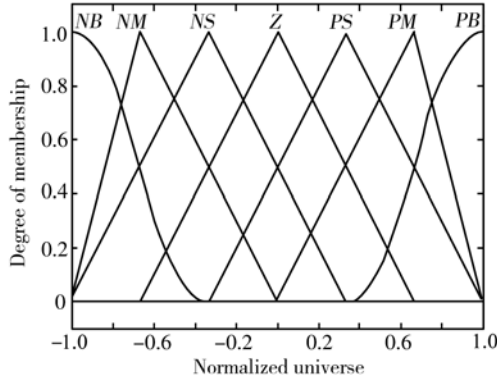


图 4 输入输出语言变量隶属度函数示意图

Fig. 4 Schematic diagram of membership function

$\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的模糊控制规则表用图形依次表示为图 5~图 7。

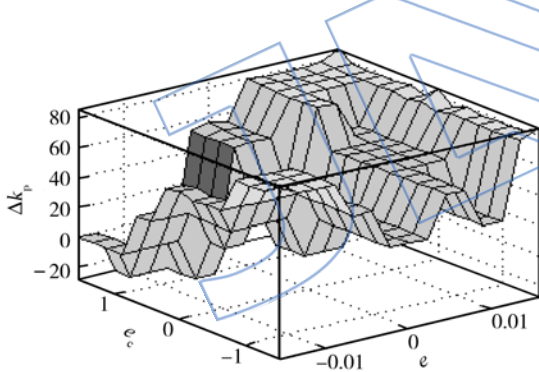


图 5 Δk_p 的模糊控制规则表

Fig. 5 Graphic fuzzy control rule table of Δk_p

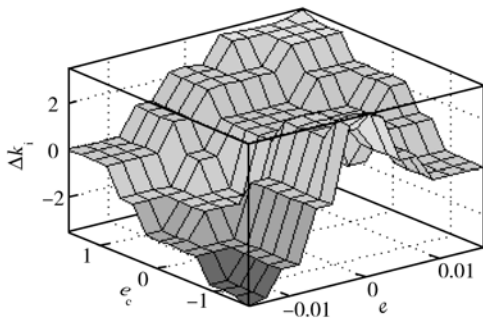


图 6 Δk_i 的模糊控制规则表

Fig. 6 Graphic fuzzy control rule table of Δk_i

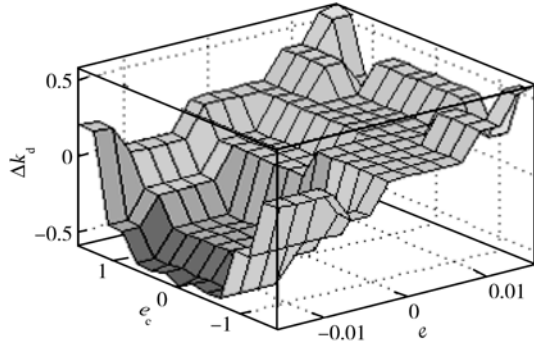


图 7 Δk_d 的模糊控制规则表

Fig. 7 Graphic fuzzy control rule table of Δk_d

定义 k_p, k_i, k_d 调整算式如下:

$$\begin{cases} k_p = k'_p + \Delta k_p \\ k_i = k'_i + \Delta k_i \\ k_d = k'_d + \Delta k_d \end{cases} \quad (1)$$

其中 k'_p 为比例系数的基值, Δk_p 为调整量, k_p 为模糊推理最终给出的比例系数, k_i, k_d 的含义与此类似。

在 Simulink 中搭建的控制部分及相关的模型如图 8 所示。

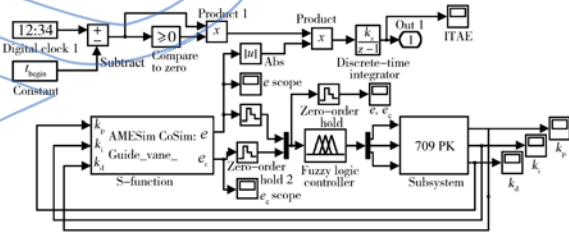


图 8 Simulink 中搭建的控制部分及相关的模型

Fig. 8 Model of the control and other parts in Simulink

3.3 压气机导叶调节机构参数优化^[8-13]

本节中用优化工具 iSIGHT 中定制的混合优化算法对 3.2 节中的模糊控制器进行参数优化。

性能指标采用式(2)的 J 积分, 对模糊控制器中量化论域的边界值 ($R_e, R_{e_c}, R_{k_p}, R_{k_i}, R_{k_d}$) 进行寻优。

$$J = \int_{t_{\text{begin}}}^{t_{\text{end}}} t |e(t)| dt \quad (2)$$

该性能指标能够较好地反映出系统的响应速度、调节时间、稳态误差和超调量的大小。它的计算用图 8 中上半部分来完成。本节中的优化问题用数学表达式表示如下:

$$\min J = \int_{t_{\text{begin}}}^{t_{\text{end}}} (t - t_{\text{begin}}) |e(t)| dt$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} 0 \leq R_e \leq 0.1 \\ 0 \leq R_{e_c} \leq 5 \\ 0 \leq R_{k_p} \leq 100 \\ 0 \leq R_{k_i} \leq 10 \\ 0 \leq R_{k_d} \leq 3.0 \end{cases} \quad (3)$$

在进行参数优化之前,先对 iSIGHT 与 Matlab 的集成方式及有关设置加以简述。

iSIGHT 对 Matlab 的集成(integration)大体上可分为两种方式,两种方式不同点在于 iSIGHT 与 Matlab 的数据交互方式①文件读写;② iSIGHT 经通道(channel)发送 RPC(remote procedure call,这种方式又称为无缝集成),两种方式实质上都是后台启动 Matlab engine, iSIGHT 与 Matlab 各自执行各自的命令,方式②的优点是在整个优化过程中只启动一次 Matlab engine,避免方式①中 Matlab engine 反复启动以及 Matlab workspace 不能及时销毁等问题。另外 Matlab 安装路径中不要含有空格,否则方式②中 iSIGHT 不能有效配置 Matlab engine。

iSIGHT 与 Matlab 的无缝集成的步骤大概如下:①在 iSIGHT 的 process integration 中插入 Matlab 模块;②建立从 iSIGHT 到 Matlab 的变量映射(mapping);③输入供 Matlab engine 执行的命令脚本(M-script);④建立从 Matlab 到 iSIGHT 的变量映射;⑤设置优化问题的相关参数等;⑥定制优化算法;⑦执行优化算法。

在这里选用混合优化算法(hybrid optimization algorithm),由以下三种优化算法组合:multi-island genetic algorithm, sequential quadratic programming, mixed integer optimization,并对各算法的基本参数及高级参数做相应的配置。先选用全局搜索算法粗选最优解的所在区域,再用局部搜索算法精细最优解。执行优化计划,优化过程如图9、图10所示,图9为 $(R_e, R_{e_c}, R_{k_p}, R_{k_i}, R_{k_d})$ 的进化情况,图10为 J 积分的进化情况,最后得优化结果 $(R_e, R_{e_c}, R_{k_p}, R_{k_i}, R_{k_d}) = (0.0141, 2.7543, 58.8918, 8.7776, 0.7201)$,将优化结果代入模糊控制器,运行模型得仿真结果如图11所示,图11中曲线1表示期望位置,曲线2为参数优化后模糊控制器控制作用下的导叶作动筒位置响应(导叶作动筒负载为服从 $N(10100, 500)$ 的随机噪声),曲线3为标准PID(已用遗传算法进行了优化)控制作用下导叶作动筒的位置响应。由图11可见,相较标准PID控

制,模糊控制器作用下的导叶作动筒响应速度加快了,且没超调,图12为模糊控制器的输入 e, e_c 及输出 k_p, k_i, k_d 的变化曲线。

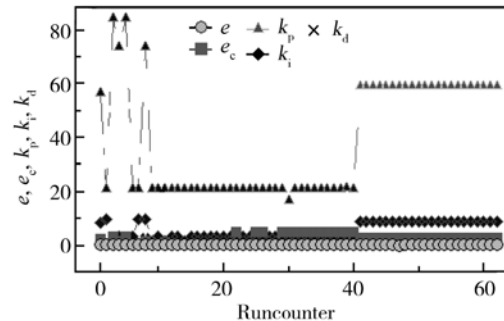


图9 $R_e, R_{e_c}, R_{k_p}, R_{k_i}, R_{k_d}$ 的进化过程

Fig. 9 History graph of $R_e, R_{e_c}, R_{k_p}, R_{k_i}, R_{k_d}$ vs runcounter

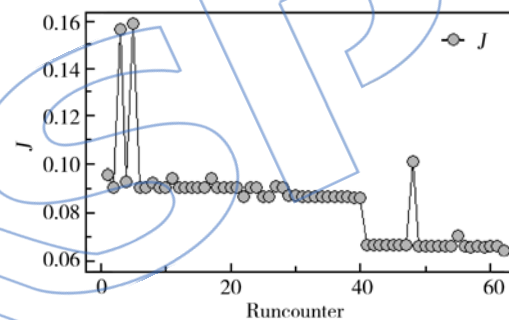


图10 性能函数 J 的进化过程

Fig. 10 History graph of J vs runcounter

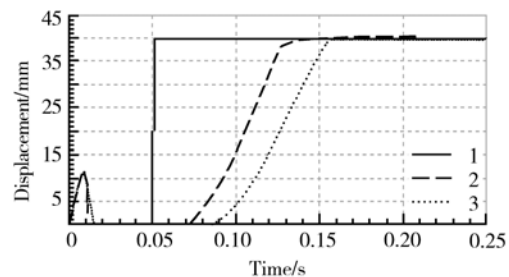


图11 导叶作动筒在模糊自整定PID与标准PID控制下的位置响应对比图

Fig. 11 Displacement comparison curves of the guide cylinder between fuzzy tuning PID and standard PID

最后给出优化过程中的数据交互关系简图,如图13所示。图中方式①即为上述所讨论的利用 iSIGHT 进行的优化,当然也可以在 Matlab 中编写 M-script 进行参数优化,即为图13中的方式②。

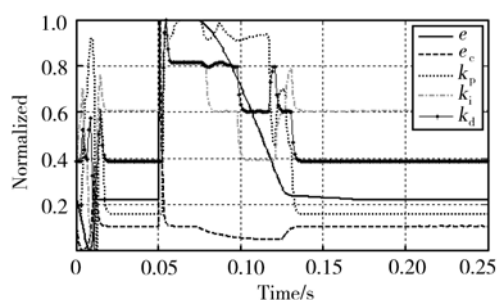


图12 模糊推理系统输入输出变化曲线

Fig. 12 History graph of the inputs and outputs of the fuzzy inference system

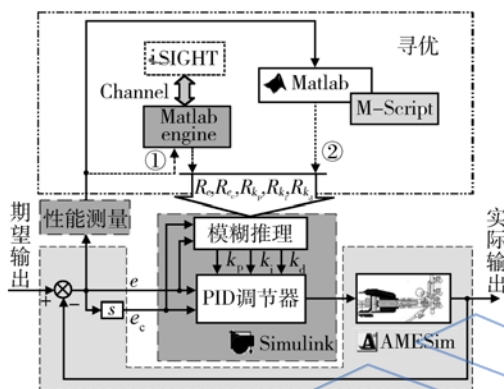


图13 优化过程中数据交互关系简图

Fig. 13 Data flow during the optimization process

4 结论

本文利用 AMESim 构建导叶调节机构液压部分的模型,在 Simulink 中搭建模糊控制器模型,并在 iSIGHT 中用混合优化算法对控制器的参数进行优化,得到了如下结论:

1) Simulink 第一个工具箱即为控制工具箱,配合 M-Script 容易实现复杂的控制算法,而 AMESim 在机械液压仿真等方面比较有优势,AMESim 与 Matlab/Simulink 联合仿真,相互取长补短,能很好地实现多领域复杂的模型。

2) iSIGHT 是比较优秀的优化软件,用其无缝集成 Matlab. 模糊控制器根据系统当前误差信息,实时调节控制参数,满足系统不同状态下的控制需求.在 iSIGHT 中利用混合优化算法对模糊控制器进行参数优化后,最终得到的控制器的控制特性相较常规 PID 良好,被控量响应速度快且无明显超调,对扰动敏感度小,动静特性良好。

参考文献:

[1] 李杰,樊丁,彭凯.航空发动机压气机导流叶片调节器切换

特性研究[J].推进技术,2009,30(5):599-603.

LI Jie, FAN Ding, PENG Kai. Switching performance of control system for aeroengine compressor air-intake guide vanes [J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(5): 599-603. (in Chinese)

[2] 周宗才.某型飞机推进系统控制[M].西安:空军工程学院出版社,1997.

[3] 付永领,祁晓野. AMESim 系统建模和仿真——从入门到精通[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.

[4] 李金从,邓家提.多学科优化集成设计框架[J].现代制造工程报,2003(3):77-79.

LI Jincong, DENG Jiati. Multi-disciplinary optimization integrated design frame [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2003(3): 77-79. (in Chinese)

[5] 李婧,樊丁,梁秋明.某型发动机几何通道控制系统建模与仿真[J].计算机仿真,2009,26(10):52-55.

LI Jing, FAN Ding, LIANG Qiuming. Modeling and simulation of geometric position control system of X-type aero-engine [J]. Computer Simulation, 2009, 26(10): 52-55. (in Chinese)

[6] Palm W J. Modeling, analysis and control of dynamic systems [M]. 2nd ed. US: John Wiley & Sons, Inc., 1999.

[7] Ang K H, Chong G, Li Y. PID control system analysis, design, and technology [J]. IEEE Tran. on Control Systems Technology, 2005, 13(4): 559-576.

[8] Meng A B, Ye L Q, Yin H, et al. Application of genetic algorithm in adaptive governor with variable PID parameters [J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(3): 398-404.

[9] Man K F, Tang K S, Kwong S, et al. Genetic algorithms for control and signal processing [M]. London: Springer, 1997.

[10] Sriniv M, Patnaik L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetic, 1994, 24(4): 656-667.

[11] 王涛,陶薇.基于 iSIGHT 和 AMESim 的挖掘机控制参数集成优化研究[J].金属矿山,2008(12):128-130.

WANG Tao, TAO Wei. Integrated optimization of the control parameters of hydraulic excavator based on iSIGHT and AMESim software [J]. Metal Mine, 2008(12): 128-130. (in Chinese)

[12] 李勇,樊丁,石斌.航空发动机 FADEC 系统双机时钟级同步技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(4): 508-509.

LI Yong, FAN Ding, SHI Bin. Investigation about synchronization of real time clock between the two computers in aeroengine FADEC system [J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14(4): 508-509. (in Chinese)

[13] Sexton W R A. New method to control turbofan engine starting by varying compressor surge valve bleed [D]. Virginia, US: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.