

全飞行包线 LQG/LTR 多变量控制器设计

郭迎清 吴 丹 张 华
(西北工业大学, 西安 710072)

摘要:根据某型涡喷发动机不同飞行条件、不同工作状态设计了一组双变量 LQG/LTR 控制器,同时利用一个神经网络对这组控制器的控制参数进行拟合,以使发动机在全飞行包线内各工作状态都有良好的控制性能。仿真结果表明,在整个飞行包线内,控制系统不但有良好的鲁棒性,而且调节性能良好,能满足发动机控制的要求。

关键词:航空发动机 LQG/LTR 方法 神经网络 多变量反馈控制

Design of LQG/LTR Multivariable Feedback Controller

Guo Yingqing Wu Dan Zhang Hua

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: Design of LQG/LTR multivariable feedback controller was discussed in the paper. A group of BIBO (Binary In and Binary Out) LQG/LTR controller was designed based on various operating points at a typical aeroengine flight condition. In order to meet the control requirements at those operating points, a nerve network was used to approximate the control parameters of the LQG/LTR controller. The simulated results have showed that the control system is robust and the regulating process is also good.

Key words: aeroengine control; LQG/LTR; nerve network; multivariable feedback controller

1 引言

航空发动机工作在一个宽广的飞行包线内,工况差别很大,而且又有着复杂的气动和热力过程,建立其精确的数学模型往往比较困难,系统存在严重的不确定性。因此,航空发动机控制系统必须具有很强的鲁棒性。LQG/LTR (Linear Quadratic Gaussian With Loop Transfer Recovery) 方法是鲁棒控制系统设计中研究较多的方法,这种设计方法具有设计简捷、计算量小、控制器结构比较简单、系统鲁棒性好等优点,具有很高的工程应用价值^[1],在航空推进控制系统中得到了实际应用^[2]。

以某型航空涡轮喷气发动机作为研究对象,设计了 LQG/LTR 多变量控制器。利用神经网络来拟合飞行条件、发动机工况与控制器参数^[3],使所设计的控制器适用于发动机全飞行包线、全工况条件,且计算量小,易于实时控制。

2 LQG/LTR 设计方法

LQG/LTR 方法是一种常用的现代鲁棒控制器设计方法,它以分离定理为核心,包括设计一个反馈控制器和一个 Kalman 滤波器。

设系统的状态方程为:

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Gw(t) \\ x &\in R^n, u \in R^n\end{aligned}$$

$$z(t) = Cx(t) + v(t) \quad z \in R^r \quad (1)$$

式中: $x(t)$ ——状态向量;

$u(t)$ ——控制向量;

$z(t)$ ——观测向量。

$w(t), v(t)$ 为零均值高斯随机噪声,且

$$E[w(t)w^T(t)] = W \geq 0$$

$$E[v(t)v^T(t)] = V \geq 0$$

$$E[w(t)v^T(t)] = 0 \quad (2)$$

系统的性能指标函数为:

收稿日期:2002-08-30

第一作者简介:郭迎清,博士,副教授,1964 年出生,研究领域为控制理论及应用、航空发动机控制等。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

4 系统闭环仿真及结果

以飞行高度 $H=17000\text{ m}$ 、飞行马赫数 $Ma=2.3$ 、发动机 $n_L=0.98$ 为例进行计算机仿真。图2和图3分别为低压转子转速、涡轮后温度输入指令为阶跃信号时 \bar{n}_L 和 \bar{T}_4^* 的响应曲线。

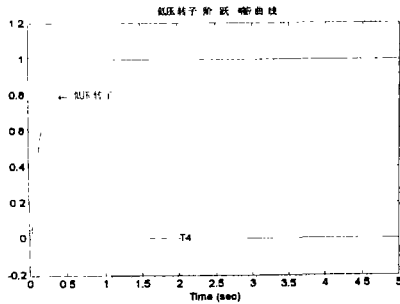


图2 \bar{n}_L 和 \bar{T}_4^* 对低压转子转速阶跃指令响应

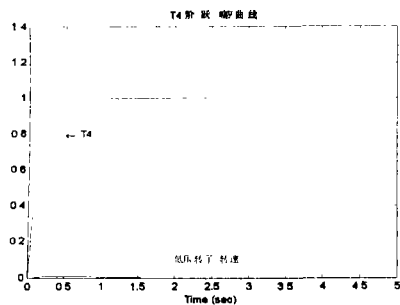


图3 \bar{n}_L 和 \bar{T}_4^* 对涡轮后温度阶跃指令响应

仿真结果表明,系统有很好的调节性能,调节时间短(约为0.6s),调节过程无超调,满足控制要求。

下面通过仿真考察控制系统对模型不确定性的鲁棒性。图4为模型参数变化5%时系统阶跃信号的响应曲线,图5为模型参数变化10%时系统阶跃信号的响应曲线。其中虚线为低压转子转速,实线为 T_4^* 的响应曲线。

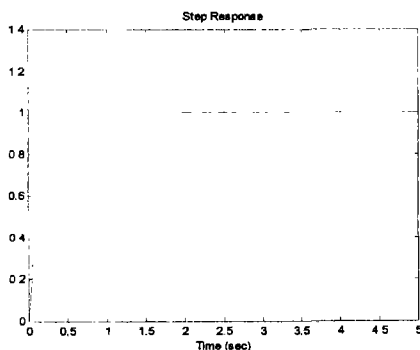


图4 模型参数变化5%时的响应曲线

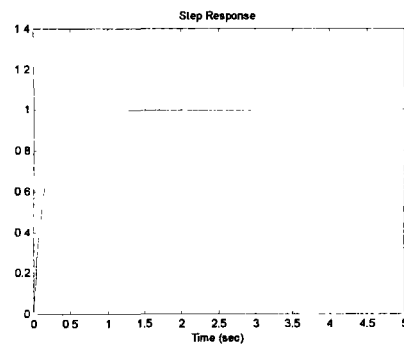


图5 模型参数变化10%时的响应曲线

以上仿真结果表明,当模型参数发生大范围变化时,控制系统不但能保持稳定性,而且对控制性能的影响也不大。这一点是很有价值的。LQG/LTR控制的优点也在于它优良的鲁棒性。

5 利用神经网络实现全飞行包线控制器设计

利用神经网络拟合飞行条件、发动机状态与控制器参数之间的关系,可实现全飞行包线控制器设计^[3]。控制系统结构图如图6所示。网络采用离线训练,训练结束后在线拟合。

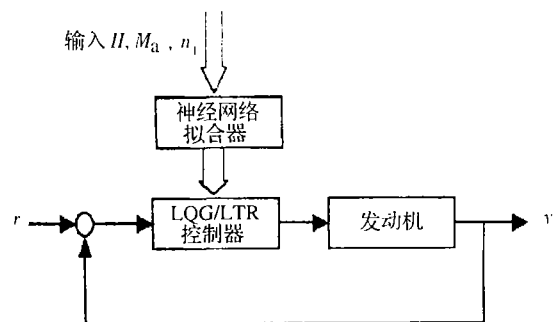


图6 全飞行包线控制器系统结构图

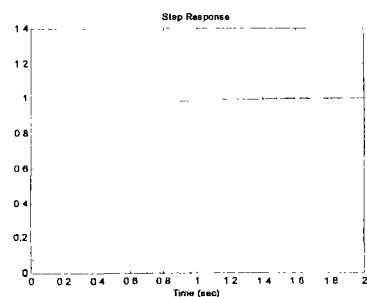


图7 输出阶跃响应

选取单隐层的BP前向网络,网络的学习算法采用 Levenberg - Marquardt (L - M)算法。网络结

构图为 341 型。运用 Matlab 神经网络工具箱对选取的神经网络进行训练^[4]。为了考察该控制器特性,选取非样本点 $H = 13\text{km}$, $Ma = 1.5$, $n_L = 0.85$ 进行仿真,阶跃响应曲线如图 7 所示。其中虚线为低压转子转速的响应曲线,实线为 T_4^* 的响应曲线。可以看出,系统性能良好,完全可以实现全飞行包线内的最优控制。

6 结论

本文研究了 LQG/LTR 控制器设计方法,根据某涡喷发动机不同飞行条件和工作状态设计了一组 LQG/LTR 双变量鲁棒控制器。该 LQG/LTR 控制器具有优良的鲁棒性,同时其设计过程简捷,控制器结构简单易于实现。利用一个简单的神经网络可以很好地拟合发动机飞行条件、工作状态和控制器参

数的关系,以实现航空发动机全包线控制。这种方法由于是离线训练,精度高,实时性好。采用本文方法可以设计全飞行包线发动机多变量鲁棒控制器。

参考文献

- 1 Maciejowski J M. Multivariable feedback design. british: Addison-Wesley Publishers Ltd, 1989.
- 2 Michael Athans, Petros Kapsouris, Efthimios Kappos, and H. Austing Spang III, Multivariable control for the F-100 using the LQG/LTR methodology, Laboratory for Information and Decision Systems, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Masschusetts 02139.
- 3 郭迎清等. 利用神经网络设计航空发动机全包线最优控制器. 航空动力学报, 2001. (1).
- 4 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计——MATLAB 语言与应用. 北京:清华大学出版社, 1996.

珠海归来话航展

第四届中国航展于 2002 年 11 月 3 日下午举行开幕式, 11 月 7 日落下帷幕。这次蓝天盛会因取消了飞行表演而给观众留下了一些遗憾。但大会紧扣“盛事、创新、腾飞”的主题, 在国际化、专业化、科学化、市场化方面迈上了一个新的台阶, 参展水平、规模及参展面积和参展国家均超过上届, 这些使得参展商和观众纷纷感慨不虚此行。

面对“9·11”事件后国际航空市场的疲软和经济全球化的挑战, 各个国家和地区的航空航天参展商对世界最大市场之一的中国举办的这届航展表现出空前的热情和主动。据统计, 共有来自世界 28 个国家和地区的 370 多家航空航天企业参加航展。其中波音公司、联合技术公司、空中客车公司、罗尔斯·罗伊期发动机制造公司、苏霍伊、俄航技等国外知名航空航天公司踊跃参展, 而荷兰、捷克、摩尔多瓦则是首次以国家展团的形式参加航展。航展期间, 各国各地区的参展商签订了 320 个项目、价值 370 亿美元的各种合同、协议, 达成多项合作意向, 成交了 31 架各种型号飞机。其中, 罗尔斯·罗伊斯公司与维珍航空公司签署了一项为该公司新型远程空中客车 A340-600 机队发动机提供售后支持、价值为 3.25 亿美元的长期合同, 成为本届航展最大的签约项目。

本届航展专业化气氛浓厚。先后接待专业观众 6 万人次。举行的峰会论坛、新闻发布会、项目签约仪式、新产品推介会、市场预测报告会、学术交流研讨

会达 62 场次。在技术交流和规格的研讨会上, 莅临本届航展的各国航空航天界的专家学者纷纷围绕经济全球化带来的机遇和挑战、中国资本市场与航空航天产业的现状和发展、航空企业信息化等主题进行了深入而专业的探讨, 具有极高的学术价值。

中国参展商是本届航展的一大亮点。中国航空工业第一集团公司、中国航空工业第二集团公司、中国航天科技集团公司和中国航天科工集团公司以宏大阵容全新亮相, 给国人以极大的震撼和鼓舞。航展分区展示了“神舟”飞航实物模型、新一代运载火箭、新一代大型静止轨道通信卫星、现代小卫星等为代表的最新技术成果, 以及 FC-1 轻型歼击机, FTC-2000 高级教练机、Z9 武装直升机等一批代表国内先进水平的飞行器, 引起观众的浓厚兴趣。特别是由沈阳发动机设计研究所自行研制的我国首台具有完全自主知识产权的涡轮航空发动机——“昆仑”发动机, 继沈阳国际装备制造业博览会首次撩开神秘面纱后, 再现庐山真面目, 占据了中航第一集团展区的最突出位置, 得到了媒体和观众的极大关注。航展期间同“昆仑”发动机合影留念并询问它的情况的观众络绎不绝。

珠海归来, 世界航空航天尖端技术的最新发展以及中国航空航天界的自强不息, 同旖旎的南国风光一起, 在笔者的脑海中打下深深的烙印。

(吴文生)