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。 行真结果表明,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 requiements 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:

$$\dot{X}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Gw(t)$$

$$x \in R^{n}, u \in R^{n}$$

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

$$\dot{x} \div x(t) - \chi \div \dot{x}$$

$$u(t) - \dot{x}$$

$$\dot{x} \div \dot{y}$$

$$\dot{y} \leftarrow \dot{$$

z(t)——观测向量。

w(t), v(t)为零均值高斯随机噪声,且 $E[w(t)w^{T}(t)] = W \geqslant 0$

$$E[v(t)v^{T}(t)] = V \geqslant 0$$

$$E[w(t)v^{T}(t)] = 0$$
(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。

$$J = E \left\{ \int_{0}^{\infty} \left[z^{T}(t) Qz(t) + u^{T}(t) Ru(t) \right] dt \right\} (3)$$

要求最优控制使得性能指标函数 J 最小。其中 Q 和 R 为半正定矩阵。

LQG/LTR 方法将奇异值理论用于多变量控制系统的设计。首先设计好状态反馈回路的奇异值曲线的形状,使其具有良好的稳定性和性能鲁棒性。然后采用下述"第二步"使整个系统开环传递函数的形状逼近于全状态反馈回路的形状,从而使整个闭环具有良好的鲁棒性。

在设计 LQG/LTR 调节器时,通常采用对象输出端的回比函数,这种方法使设计所要求的灵敏度函数和鲁棒性能更为方便。其具体设计步骤如下:

第一步:设计卡尔曼滤波器。适当调节参数 Γ , W 和 V 式的卡尔曼滤波器的回比函数的奇异值形状满足要求,即使卡尔曼滤波器的开环传递函数 C $(SI-A)^{-1}K_{\rm f}$ 满足系统的鲁棒性要求。

第二步:设计一个 LQR 调节器,令 $Q = Q_0 + qI$, R = I。不断调节 q, 直至 G(s)K(s)的奇异值曲线在所考虑的频率范围内足够逼近 $C(SI - A)^{-1}$ K_1 的奇异值曲线。

根据 LQG/LTR 理论,回路传递恢复后的系统 具有接近最优反馈控制系统的鲁棒性,即增益裕度 无穷大,相位裕度至少为 60°。

3 发动机双变量 LQG/LTR 控制器设计

所研究发动机的被控制量是低压转子转速 n_L ,涡轮出口总温 T_4^* ,控制中介是主供油量 m_I ,尾喷口面积 A_a 。

控制器设计步骤如下:

(1)选取一个发动机的稳态工作点(确定的飞行高度和飞行马赫数),设其状态空间模型为:

$$\dot{X} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du \tag{4}$$

其中: $\mathbf{x} = (\Delta \overline{n}_L, \Delta \overline{n}_H)^T$), $u = (\Delta \overline{m}_f, \Delta \overline{A}_e)^T$, $y = (\Delta \overline{n}_L, \Delta \overline{T}_A^*)^T$ 。

由于发动机模型为零型系统,它对阶跃响应有 稳态误差。根据内模原理,为了消除稳态误差,需要 在每个输入端加入一个积分器。加入积分器后的增 广系统状态空间方程为:

$$\dot{X}_{a} = A_{a}x_{a} + B_{a}u$$

$$y = C_{a}x_{a} \tag{5}$$

其中: $x_a = (\Delta \bar{n}_1, \Delta \bar{n}_H \Delta \bar{m}_f, \Delta \bar{A}_e)^T$ $A_a = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_a = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}, C_a = \begin{bmatrix} C & D \end{bmatrix}$

以后的设计都是针对增广系统即式(5)进行的。 控制器的系统结构图如图 1 所示。

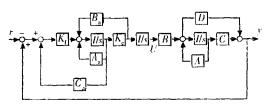


图 1 发动机控制系统结构图

(2) 设计一个目标反馈回路 $G_{tf} = C_a \Phi_a \Gamma$, 一般取 $G_{tf} = \frac{1}{S}I$, 这时 G_{tf} 为正规矩阵且完全解耦。由于这是一型系统,可以保证对阶跃响应的稳态误差为零,同时由于 G_{tf} 的奇异值曲线的衰减速率为一20dB/dec,这可以保证系统的鲁棒性。 Γ 选取的效果要求 G_{tf} 的两个回路的奇异值曲线完全重合,即要求这两个回路是完全解耦的。

(3) 设计卡尔曼滤波器

卡尔曼滤波器的增益矩阵 $K_i = \frac{1}{\sqrt{n}} P_i C_a^T$

其中,P,为下列代数 Riccati 方程的解:

$$\mu_a P_t + P_t A_a^T - u P_t C_a^T C_a P_t + \Gamma^T \Gamma = 0 \quad (6)$$

 μ 为一个可调参数,它相当于一个增益因子,可以改变 $G_{\rm ff}$ 的穿越频率,但不改变其回路形状。考虑到发动机的特性和性能鲁棒性的要求,这里选择回路的穿越频率为 $5\sim12{\rm rad/s}$ 。大量计算数据表明,当 μ 在 $0.05\sim0.5$ 之间变化时,增大 μ 的值可以使卡尔曼滤波回路奇异值曲线的穿越频率减小。

(4) 设计 LQR 控制器增益矩阵 K_c

通过 LQR 步骤使整个开环传递函数 G(s)K(s) 逼近卡尔曼滤波器的回比函数 $C_a\Phi_aK_f$ 。解最优状态反馈问题的 Riccati 方程

 $P_cA_s + A_s^TP_c - P_cB_sR^{-1}B_s^TP_c + qC^TC = 0$ (7) 可得正定矩阵 P_c ,因此控制器增益矩阵 $K_c = R^{-1}B^TP_c(R=I)$ 。

当 $q \rightarrow \infty$ 时,在理论上开环传递函数 $GK \rightarrow C_a \Phi_a K_f$ 。当 $q = 10^8$ 时,系统开环传递函数的奇异值曲线与当初设计的开环传递函数的奇异值曲线已经非常接近,而且在高频段的衰减速率可达到 -60 dB/dec,这可以有效地抑制高频噪声。

4 系统闭环仿真及结果

以飞行高度 H=17000 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。

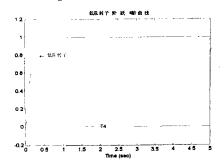


图 $2 = \overline{n_1}$ 和 \overline{T} 对低压转子转速阶跃指令响应

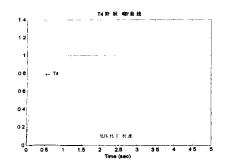


图 3 \overline{n}_1 和 \overline{T}_4^* 对涡轮后温度阶跃指令响应

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。

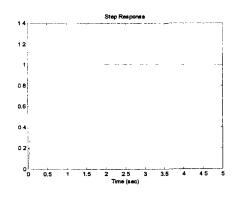


图 4 模型参数变化 5% 时的响应曲线

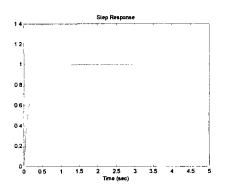


图 5 模型参数变化 10% 时的响应曲线

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。

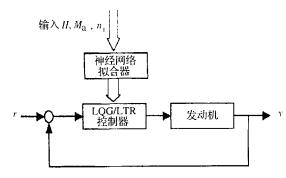


图 6 全飞行包线控制器系统结构图

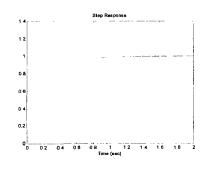


图 7 输出阶跃响应

选取单隐层的 BP 前向网络, 网络的学习算法 采用 Levenberg - Marqardt (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=13km, 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

- Maciejowski J M. Multivariable feedback design. british: Addisom – Wesley Publishers Ltd, 1989.
- 2 Michael Athans, Petros Kapasouris, Efthimios Kappos, and H. Austing Spang III, Multivarible 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。其中期发动机制造公司、变中客车公司、罗尔斯·罗伊期发动机制造公司、苏霍伊、俄航技等国外知名前天公司踊跃参展,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。在技术交流和高规格的研讨会上,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)