

文章编号:1000-8055(2008)11-2128-05

基于 LMI 的二冲程发动机转速鲁棒 PI 控制

潘 松, 魏民祥

(南京航空航天大学 能源与动力学院 南京 210016)

摘 要: 针对某型航空用二冲程发动机,用逐步回归的方法建立发动机非线性稳态模型,在平衡点附近进行泰勒级数展开,得到了发动机在平衡点附近的线性模型;基于线性矩阵不等式(LMI)的方法进行鲁棒控制算法研究,得到了鲁棒 PI 控制参数,实现了系统的鲁棒控制;基于模糊 T-S 模型并行分配补偿控制策略,设计了控制算法切换策略.经系统仿真和发动机台架实验验证,在负载 11 % 的扰动下转速控制精度稳定在 2.3 % 之内,控制器对于外界干扰有较强的鲁棒性,得到了期望的控制效果.

关 键 词: 二冲程发动机模型;泰勒级数展开;鲁棒 PI 控制算法;模糊 T-S 模型

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

Robust PI speed control of two-stroke engine via LMI approach

PAN Song, WEI Min-xiang

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: A nonlinear two-stroke engine model was constructed using a mathematical tool of stepwise regression. Taylor expansion method was used around an equilibrium point during the linearizing process, and the linearized model was reached. A method for designing robust proportional-integral (PI) controller was presented. The problem of parameter designing of the robust PI controller was solved with linear matrix inequalities (LMIs) approach. The controller switching was designed based on the idea of parallel distributed compensation (PDC) to Takagi-Sugeno fuzzy model. Simulation and experiments on the engine dynamometer show that the proposed controller can keep the engine speed in 2.3 % under 11 % disturbance and can achieve the anticipated robust performance.

Key words: two-stroke engine model; Taylor expansion method; robust PI controller; Takagi-Sugeno fuzzy model

由于小型二冲程活塞式发动机具有功重比高、安装方便等优点^[1]在无人飞行器中得到了广泛的应用.无人飞行器要实现发动机自动控制,需要对发动机控制模型进行研究.采用机理分析^[2-3]的方法对二冲程发动机建模,进行模型验证和参数确定时需要安装比较多的传感器来测量数据,实验成本昂贵,模型的阶数较高,控制算法的设计比较复杂,影响了在工程实际中的应用.同时由于

存在参数变化、未建模动力学特性等因素,所建立模型是不精确的^[4].

采用逐步回归^[5]的方法建立发动机模型,实际上就是通过实验数据建模,只反映输入和输出之间的特性,可以简化建模过程.该模型在平衡点进行线性化后可以采用现代控制理论的方法进行控制算法的设计和分析,特别适合于发动机等复杂非线性系统.

收稿日期:2007-10-19; **修订日期:**2008-05-13

作者简介:潘松(1978-),男,山东邹平人,博士生,主要研究方向为发动机控制、车辆电子控制及自动化.

E-mail: pansong@nuaa.edu.cn

经典的 PID 控制器设计简单,在控制中得到了广泛的应用^[6],PID 参数整定是人们关注的焦点,在不同系统参数或外界条件下 PID 控制参数不具有普遍适用性.鲁棒系统设计^[7-8]的目标就是要在模型不精确或存在其它变化因素的条件下,使系统仍能够保持预期的性能.针对非线性模型在不同平衡点的线性化,需要采用一种包含非线性特性的设计方法进行系统研究.近年来,基于模糊 T-S 模型的并行分配补偿控制策略(PDC)^[9]提供了一种可以适应非线性多平衡点模型控制的研究方法.

本文将以某型二冲程活塞式发动机为研究对象,采用基于多元逐步回归分析的方法建立发动机非线性模型,在平衡点进行线性化;根据鲁棒控制理论,设计具有时滞的非线性系统 PI 控制算法,采用线性矩阵不等式的处理方法得到控制参数;基于模糊 T-S 模型的并行分配补偿控制策略思想,设计控制算法切换策略,实现转速较宽范围内的稳定控制.

1 发动机模型建立及线性化

1.1 模型建立

发动机在大多数工况下是带负荷工作的,在不同的负荷状态下发动机特性不同,可以建立其有载模型以描述发动机的工作状态^[10].

外特性是指 $T_e = f(n) |_{\alpha=\alpha_{\max}}$,引入部分负荷则有

$$T_e = f(n, \alpha) \quad (1)$$

其中 T_e 是发动机扭矩(N·m), n 是发动机转速(r/min), α 是油门开度(%).

活塞式发动机的输出特性可以用三次多项式得到较满意的拟合精度.对发动机在不同油门开度下的稳态特性进行试验,就可以得到发动机的稳态实验数据.然后采用逐步回归的方法经过变量的选取与剔除后确定多项式系数.针对实验所用二冲程发动机,测量不同油门开度下扭矩和转速的对应数据,进行逐步回归后得到的模型如式(2)所示.详细的建模过程另文阐述.

$$\begin{aligned} \bar{T}_e = & -0.1229 - 0.1916 \bar{n}^2 \bar{\alpha} - 5.8896 \bar{n} \bar{\alpha}^2 + \\ & 4.0420 \bar{\alpha}^3 - 1.3444 \bar{n}^2 + 10.4149 \bar{n} \bar{\alpha} - \\ & 7.1054 \bar{\alpha}^2 - 2.1002 \bar{n} + 3.2182 \bar{\alpha} \end{aligned} \quad (2)$$

式中对所采用的数据进行归一化处理,即

$$\bar{T}_e = \frac{T_e}{63}, \bar{n} = \frac{n-3000}{3100}, \bar{\alpha} = \frac{\alpha}{245},$$

其中 $\bar{T}_e$ 是归一化的扭矩, $\bar{n}$ 是归一化的转速, $\bar{\alpha}$

是归一化的油门开度.

发动机动力传动系统的动态特性可以由发动机旋转系统惯量、发动机转速、发动机产生的扭矩和负载扭矩来表述,所以系统模型可以表述为

$$T_e - T_L = J_e \dot{n} \quad (3)$$

其中 T_L 是负载扭矩(N·m), J_e 是发动机旋转系统惯量(kg·m²), n 是曲轴输出转速(r/min).

1.2 模型线性化

在部分负荷下发动机的扭矩可以由油门开度和发动机转速来表示,具有强非线性特性,设计控制算法很不方便.如果研究发动机在一个平衡点的小偏差运动,可以假设在小偏差范围内发动机是线性的,将非线性的函数做线性化处理,可以方便地设计控制算法.

通常采用的线性化方法是将非线性函数按照泰勒级数公式在平衡点展开为幂级数,并只取级数的一次项,得到线性函数,将发动机的稳态扭矩公式在稳态工作点线性化得到

$$T_e = T_{e0} + \left(\frac{\partial T_e}{\partial n} \right)_0 \Delta n + \left(\frac{\partial T_e}{\partial \alpha} \right)_0 \Delta \alpha \quad (4)$$

其中下标“0”表示稳定状态,(表示相对稳定状态的小偏差量,称为增量 $\Delta n = n - n_0$, $\Delta \alpha = \alpha - \alpha_0$.为分析方便,通常采用无因次相对增量形式.所谓的相对增量就是参数的绝对增量与基准值之比.基准值可以选取原稳定状态参数值或取最大状态稳定值等.令转速和油门的相对增量为 $\delta n = \frac{\Delta n}{n_j}$,

$\delta \alpha = \frac{\Delta \alpha}{\alpha_j}$ (下标 j 表示基准值),并且在稳定状态

$T_{e0} = T_L$,可以得到

$$T_m \frac{d\delta n}{dt} + \delta n = K_m \delta \alpha \quad (5)$$

其中 T_m 是发动机时间常数, K_m 是发动机放大系数,即

$$T_m = \frac{\pi J_e}{30 \frac{\partial T_e}{\partial n}}, K_m = \frac{\frac{\partial T_e}{\partial \alpha} \alpha_j}{\frac{\partial T_e}{\partial n} n_j}.$$

将式(5)在零初始条件下取拉氏变换,得传递函数为

$$G(s) = \frac{\delta N(s)}{\delta \alpha(s)} = \frac{K_m}{T_m s + 1} \quad (6)$$

发动机的扭矩和转速响应油门开度会有一些的滞后,该滞后不是常量,它与发动机转速成反比,所以在发动机的模型中可以认为串入了一个时滞环节 $e^{-\tau s}$,线性化后的简单发动机模型如图

1 所示.

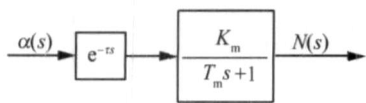


图 1 线性化发动机模型

Fig. 1 Linearized model of engine

2 鲁棒 PI 控制算法

考虑图 1 所示的一阶具有输入延迟的系统, 其中参数: $K_m \in [\underline{K}_m, \overline{K}_m]$, $T_m \in [\underline{T}_m, \overline{T}_m]$, $\tau \in [\underline{\tau}, \overline{\tau}]$

采用 PI 控制算法形成的闭环系统如图 2 所示.

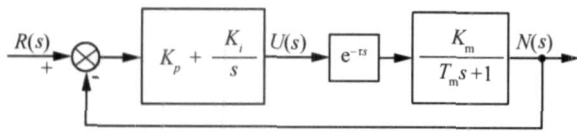


图 2 闭环控制系统

Fig. 2 Close-loop control system

把传递函数形式的闭环控制系统转换为状态空间的形式,可以得到

$\dot{x} = Ax + Bu(t - \tau) + B_r r$ (7a)

$y = Cx$ (7b)

$u = -Kx + K_p r$ (7c)

其中 y 是系统的输出, $x = [x_1 \ x_2]^T$ 是状态变量

$x_1 = y$, $x_2 = -\int e dt$, $e = r - y$, r 是参考输入.

$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_m} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} \frac{K_m}{T_m} \\ 0 \end{bmatrix}$, $B_r = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$,

$C = [1 \ 0]$, $K = [K_p \ K]$, 在实际的系统中 $[A, B] \in \Omega$ 不是精确可知的, 但属于一个凸集. 式 (7) 描述的系统含有 K_m , T_m 和 τ 三个参数, 根据凸集的定义有

$\Omega \in \text{Cov}\{[A_1, B_1], [A_2, B_2], \cdots, [A_8, B_8]\}$, 其中 Cov 指的是一个凸包. 还可以表述为

$[A, B] \in \Omega$, 如果 $[A, B] = \sum_{i=1}^{N_m} w_i(x, u) [A_i, B_i]$,

其中 N_m 是多模型的数量; w_i 是介于 0 到 1 的权函数, 并且满足: $\sum_{i=1}^{N_m} w_i(x, u) = 1, \forall (x, u) \in R^{n_x} \times R^{n_u}$.

对于式 (7) 所描述的系统, 根据鲁棒控制理论, 如果矩阵对 $[A, B]$ 可以稳定, 且存在对称正定矩阵 P 、矩阵 Y 和标量 β 、 β 满足下面的不等式

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} PA^T + AP + BY + Y^T B^T + (\beta + \beta) P \\ Y^T B^T \end{bmatrix} & BY \\ & -\frac{1}{2} P \end{bmatrix} < 0$$
 (8a)

$$-\beta P + APA^T \leq 0$$
 (8b)

$$\beta \begin{bmatrix} -P & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & BY \\ Y^T B^T & -P \end{bmatrix} \leq 0$$
 (8c)

那么该闭环系统在状态反馈 $K = -YP^{-1}$ 输入下是一致渐近稳定的.

由此可知, 在一个平衡点附近的线性化模型上可以设计出具有鲁棒性能的控制算法. 但是对于航空发动机这种宽工作范围的非线性系统, 实际应用中因飞行任务的需要, 发动机状态参数会变化比较大, 那么在一个平衡点设计的控制算法的参数不具有普遍适用性. 基于模糊 T-S 模型的控制算法提供了一个较好的解决方案.

根据模糊 T-S 模型的并行分配补偿策略, 模糊状态方程可以表示为

R_i
if: $p_1(t)$ is M_{i1} , ..., and $p_l(t)$ is M_{il}
then:
 $\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t)$ (9a)

$u = -K_i x(t), i = 1, \cdots, r$ (9b)

其中 R_i 表示第 i 条规则, $p_i(t)$ 是参数向量, M_i 是模糊成员函数.

可以得到整个系统状态方程为

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(p) [A_i x(t) + B_i u(t)]$$
 (10a)

$$u(t) = -\sum_{i=1}^r h_i(p) K_i x(t)$$
 (10b)

其中 $h_i(p) = \frac{\mu_i(p)}{\sum_j \mu_j(p)}$, $\mu(x) = \prod_{j=1}^n \mu_j(x)$, $\mu_j(x)$

表示 x 属于 M_i 的隶属度函数, 同时也表示第 i 条规则的适用度.

从该控制方程输出看, 该控制策略提供了一个平滑的控制算法切换, 选取适当的隶属度函数就可以得到控制算法参数的平滑过渡.

根据模糊 T-S 模型控制理论, 如果存在正定矩阵 P 满足下列不等式

$$\{A_i - B_i K_j\}^T P \{A_i - B_i K_j\} - P < 0$$

($i, j = 1, 2, \cdots, r$) (11)

那么式 (10) 所描述的状态反馈闭环系统是大范围渐近稳定的.

采用 Matlab 中的线性矩阵不等式求解工具箱,利用 feasp 函数求解矩阵不等式 (8) 和 (11), 就可以求得 P 和 Y ,从而可以确定式 (7c) 中的 K 值.所建立的一系列的矩阵不等式条件保证了时滞系统的稳定性与鲁棒性.

3 控制算法仿真

通过上述对发动机线性化模型分析可知,在不同的稳态工作点发动机模型的参数不同.为了与实验中工况进行对比,在仿真中采用了两个稳态工作点作为仿真算例

1) 转速 = 3 800 r/min、油门 = 25.2 %

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.151 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0.102 \\ 0 \end{bmatrix}, \tau_1 = 0.5;$$

2) 转速 = 4 300 r/min、油门 = 28.4 %

$$A_2 = \begin{bmatrix} -0.103 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0.141 \\ 0 \end{bmatrix}, \tau_2 = 0.3.$$

根据两个工作点的系统参数,应用线性矩阵不等式求解工具得到如下控制器参数:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.52862 & -1.58 \\ -1.58 & 6.2677 \end{bmatrix},$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0.49246 & -1.5187 \\ -1.5187 & 6.0543 \end{bmatrix},$$

$$Y_1 = [-0.045587 \quad -0.033832],$$

$$Y_2 = [-0.048827 \quad -0.038701],$$

$$K_1 = [K_{p1} \quad K_{i1}] = [0.4152 \quad 0.1101],$$

$$K_2 = [K_{p2} \quad K_{i2}] = [0.5250 \quad 0.1381].$$

采用 Matlab 对发动机模型和设计的控制器进行了仿真,采用了三角形隶属度函数,参数向量选定的是: $[n \ \alpha]$. 发动机及其相连的旋转系统转动惯量 $J_e = 0.66 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. 仿真结果如图 3 所示.

仿真中设定转速从 3 800 r/min 逐渐升到 4 300 r/min,然后引入 11 %负载波动,转速变化和油门的响应如图 3 所示.图 3(a) 中为发动机输出转速对参考设定转速跟踪,图 3(b) 为对应负载变化的时候油门开度的响应.从仿真结果可以看出控制器可以较好的跟踪设定转速,相对于 11 %负载波动,控制器响应灵敏,转速控制精度在 0.4 % 之内.

4 实验验证

为了进一步验证所设计的控制算法的有效

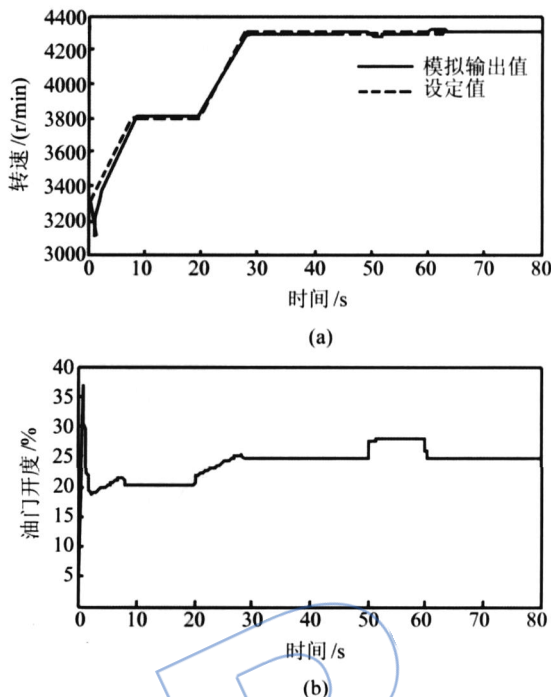


图 3 转速和油门仿真响应

Fig. 3 Speed and throttle response of simulating

性,以某型航空用二冲程汽油发动机为实验研究对象,进行发动机台架实验,台架实验系统结构如图 4 所示.



图 4 发动机台架实验系统

Fig. 4 Engine dynamometer system

实验中采用了控制器仿真参数和切换策略.限于实验条件,进行了两个工作点的实验验证.发动机起动进入怠速稳定运转一段时间以后,开环调节油门使发动机达到 3 800 r/min 进入转速闭环,然后转速升至 4 300 r/min,调节负载.台架加

载采用 CWF110 电涡流测功器,初始稳定负载扭矩为 $18\text{ N}\cdot\text{m}$,实验过程中调节测功机电流使负载发生变化,即以 $1\text{ N}\cdot\text{m/s}$ 左右的速度快速调节扭矩到 $20\text{ N}\cdot\text{m}$ 保持一段时间,然后扭矩以同样的速度快速降到 $18\text{ N}\cdot\text{m}$.

实验结果如图 5 所示.图 5(a)为转速的变化,图 5(b)为油门的变化.从实验结果分析可知,所设计的控制算法可以较好地跟踪设定转速,并且具有较强的鲁棒性,在负载 11 %左右的扰动下转速稳定在 2.3 %之内,达到了控制的预期目标.

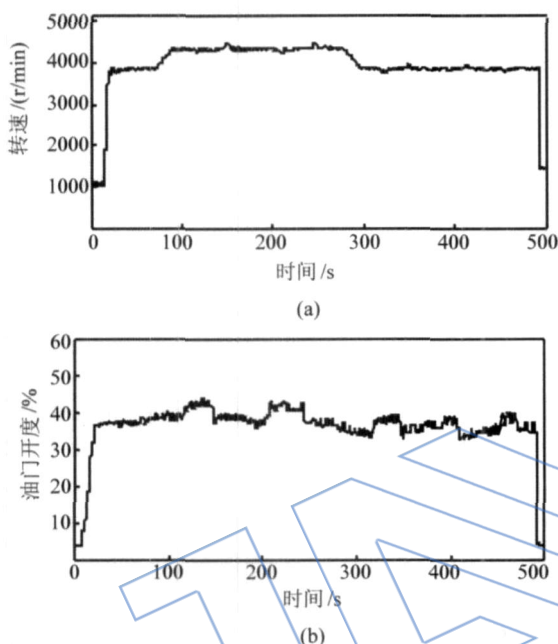


图 5 台架实验中转速和油门变化

Fig.5 Speed and throttle response on the dynamometer system

5 结 论

本文基于某型航空用二冲程活塞式发动机,采用逐步回归的方法建立了非线性稳态模型,采用泰勒级数展开的方法在平衡点附近得到了线性化模型.以线性化后的时滞系统模型为控制对象,

根据鲁棒控制理论采用线性矩阵不等式的方法设计了鲁棒 PI 控制算法.针对模型的非线性特性,基于模糊 T-S 模型研究了控制切换策略;在数字仿真验证之后,进行了发动机台架实验控制,取得了满意的转速控制精度,达到了预期的控制目标.

参考文献:

- [1] 杨振祥,阮红霞.小型无人直升机动力装置活塞发动机的动态效应[J].直升机技术,2006,146(2):32-35.
YANG Zhenxiang, RUAN Hongxia. The dynamic effect for piston engine on mini-unmanned helicopter [J]. Helicopter Technique, 2006,146(2):32-35. (in Chinese)
- [2] Van Leersum J. A numerical model of a high performance two-stroke engine [J]. Applied Numerical Mathematics, 1998 27:83-108.
- [3] Rogers B K, Richard R B, Myers P S, et al. Simulation of a crankcase scavenged, two-stroke, SI engine and comparisons with experimental data [R]. SAE 690135.
- [4] Zeng Y, Strauss S. Modeling of air/fuel mixing in a two stroke direct injection engine [R]. SAE 2003-03P-380.
- [5] 方开泰,全辉,陈庆云.实用回归分析[M].北京:科学出版社,1988.
- [6] Astrom K J, Hagglund T. PID controller[M]. 2nd ed. North Carolina: Instrument of Society of America, Research Triangle Park, 1995.
- [7] Richard C D, Robert H B. Modern control systems [M]. 9th ed. 北京:科学出版社,2002.
- [8] Niculescu S I, Fu M, Li H. Delay-dependent closed-loop stability of linear system with input delay: an LMI approach [R]. Proc. CDC(1997):10-12.
- [9] Wang H O, Tanaka K, Griffin M F. Parallel distributed compensation of nonlinear systems by Takagi-Sugeno fuzzy model [R]. Proc. FUZZ-IEEE / IFES '95:531-538.
- [10] 庄继德.汽车电子控制系统工程[M].北京:北京理工大学出版社,1998.
- [11] Boyd S P, Ghaoui L E, Feron E, et al. Linear matrix inequalities in systems and control theory [M]. Philadelphia: SIAM, 1994.