

文章编号: 1000-8055(2007)07-1195-05

基于 LMI 活塞式发动机恒转速 H_∞ 动态输出反馈控制

邵金菊, 魏民祥, 温卫东

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 汽油发动机具有非线性、时变时滞等特点, 传统 PID 控制方法很难保证发动机整个工作范围内恒转速控制的稳定性及性能要求。采用基于 LMI (linear matrix inequality) 的输出反馈 H_∞ 控制算法, 来实现活塞式汽油发动机的恒转速控制, 使其在负载扰动、工况变化和可变时间延迟的情况下都能保持期望的参考转速。离线仿真结果表明, 所设计的控制器满足小型无人直升机对发动机控制的抗干扰性、跟踪性要求, 并具有一定鲁棒性。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 活塞式发动机; 无人直升机; H_∞ 控制; 时滞; 干扰抑制

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

Piston engine speed H_∞ dynamic output feedback regulation based on LMI

SHAO Jin-ju, WEI Min-xiang, WEN Wei-dong

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Classical proportional integral derivative (PID) speed regulation method provides no guarantees for closed-loop system stability or performances for the full operating range of a piston engine due to the existence of nonlinear behavior, and time varying dead time. In this work, an H_∞ dynamic output feedback approach is employed for the control of the piston engine based on linear matrix inequality (LMI), which can provide reference speed tracking despite the presence of torque load disturbances, operating condition changes and variable time delays. The off-line simulations show that the proposed controller can meet the performance requirements for the unmanned helicopter engine use, namely, tracking performance, disturbance rejection and robustness.

Key words: aerospace propulsion system; piston engine; unmanned helicopter;

H_∞ control; time delay; disturbance rejection

活塞式发动机, 特别是电控汽油喷射二冲程汽油机, 能满足小型无人直升机高空性和续航时间较长等要求, 具有较高的功重比、低油耗、安装灵活、油门响应灵敏等特点, 是近年来小型无人直升机动力系统首选机型之一^[1]。

某小型无人直升机采用双缸双冲程风冷活塞

式电喷汽油发动机, 要求发动机转速在旋翼总距变化、外界阵风扰动时, 能跟随期望的参考轨迹, 具有快速的动态响应以及良好的干扰抑制能力。由汽油发动机工作原理可知, 发动机在进气-做功之间存在着时间延迟, 这一延迟是时变的、不确定的, 是发动机工况和转速的复杂函数。另外, 发动

收稿日期: 2006-06-07; 修订日期: 2006-10-25

作者简介: 邵金菊(1979-), 女, 山东莱芜人, 博士生, 主要从事航空发动机鲁棒控制及仿真的研究。

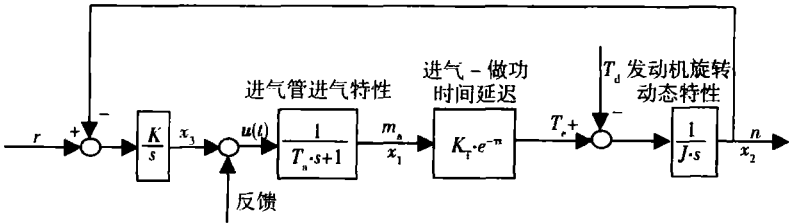


图 1 简化的发动机模型

Fig. 1 Simplified model structure

机还存在一些不确定的系统参数,这极大降低了负载扰动条件下发动机的性能,使得发动机恒转速控制变得十分困难。

在一定工况范围内,PID 算法容易实现发动机恒转速控制,并取得了令人满意的效果^[2]。但这种方法对被控对象的参数变化比较敏感,在某一条条件下设计的最优控制参数通用性差,很难保证所有工况范围内转速控制的稳定性要求。因此,一些先进控制算法逐步应用于发动机恒转速控制,如滑模控制、自适应控制^[3-4]等,但目前大部分工作都集中于如何确定发动机的延迟,以及如何得到发动机动态特性的精确描述。

近年来,时滞线性系统的 H_∞ 控制受到了众多学者的关注^[5-6],其 H_∞ 控制综合问题可以用线性矩阵不等式约束条件来表示,而线性矩阵不等式可以由内点法来求解。相对于传统 PID 控制,这种 H_∞ 控制方法能保证系统在发动机整个工作范围内的稳定性及性能要求,并且无须知道延迟的确切值。本文采用 H_∞ 输出反馈控制实现发动机大工作范围内的转速控制,在设计过程中考虑发动机不确定时滞及不确定参数。为验证所设计 H_∞ 输出反馈控制器的性能,本文进行了离线仿真。

1 活塞式发动机模型

活塞式发动机由化学、热、机械、流体等子系统组成,若要完整反映发动机的动态特性,需要建立一个高阶的复杂数学模型。为简化发动机恒转速控制设计,本文仅考虑了简化的单自由度的发动机-负载动态系统,没有考虑发动机燃烧及燃油喷射模型^[7-8]。在空燃比保持不变的情况下,活塞式发动机的动态特性主要有进气管进气特性、进气-做功时间延迟、发动机曲轴旋转动态特性三部分组成,简化的模型结构如图 1 所示。

图 1 中,进气管进气特性由一阶惯性环节来表示, T_a 为时间常数,是不确定系统参数。当控制量 $u(t)$,即节气门开度变化时,进气管内的空气

质量 m_a 发生变化,继而导致进入气缸的混合气量相应变化。混合气量增加时,发动机输出扭矩增大,补偿外界负载扭矩的扰动,使发动机转速稳定在目标转速允许误差范围内。

发动机扭矩输出部分传递函数主要由汽油机的燃烧过程组成。火花塞点燃压缩后的混合气,产生高温、高压气体推动活塞运动进而输出扭矩 T_e 。发动机的燃烧过程由时间延迟 e^{-s} 与发动机扭矩常数 K_T 的乘积来表示。这里考虑的延迟主要是进气-做功之间的时间延迟,是发动机转速的非线性函数(低速时,滞后较大),构成发动机的主要动态特性,不能忽略。

发动机曲轴旋转动力学模型实际上是发动机转动惯量 J 、发动机转速 n 及旋翼负载扰动 T_d 之间复杂动态效应的逼近。忽略摩擦因素的影响,其表达式为 $n = 1/J \cdot (T_e - T_d)$ 。

发动机全部的不确定参数标称值及其变化范围如表 1 所示。

表 1 汽油活塞式发动机的系统参数		
Table 1 System uncertain parameters of the piston engine		
系统参数	取值范围	标称值
时间常数 T_a	2.20~5.90	4.05
发动机扭矩常数 K_T	65.2~133.3	99.25
发动机时滞 τ	0.0~1.0	0.5

为使转速调节器在各种负载状态下都能保持发动机输出轴转速恒定,基于内模原理,图 1 中在参考转速输入 r 与发动机之间加了一个积分器来消除稳态跟踪误差, K 为积分系数。将积分器的输出 x_3 视为一个附加状态量,并用于输出反馈控制器中。积分器的加入会增加整个系统的阶数,但是这对消除稳态工况下转速偏差是必不可少的。

令状态量 $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T = [m_a \ n(t) \ x_3(t)]^T$,控制输入量为 $u(t)$,外部输入量 $w(t) = [d(t) \ r]^T$,则发动机的状态空间模型表示如下

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t - \tau) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \quad (1)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} -1/T_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K & 0 \end{bmatrix}, \quad A_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ K_T/J & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1/J & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 1/T_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

2 H_∞ 控制器设计

2.1 基于线性矩阵不等式的 H_∞ 控制器设计

考虑以下的时滞系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t - \tau) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z(t) = C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \\ y(t) = C_2 x(t) + D_{21} w(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $x(t) \in R^n$ 是系统的状态向量, $u(t) \in R^m$ 是控制输入, $w(t) \in R^q$ 是有限能量的平方可积的外部输入, $z(t) \in R^p$ 是被调输出, $y(t) \in R^r$ 是测量输出, τ 是滞后时间, $A, A_d, B_i, C_i, D_{ij} (i, j = 1, 2)$ 是适当维数的常数矩阵.

对系统(2), 考虑具有以下状态空间实现的动态输出反馈控制器

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + B_c y(t) \\ u(t) = C_c x_c(t) + D_c y(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $x_c(t) \in R^k$ 是控制器的状态向量, $A_c, B_c, C_c,$

D_c 是待定的具有适当维数的实常数矩阵. 将控制器(3)应用到时滞系统(2)中, 得到的闭环系统如公式(4)所示

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = (A_0 + B_{00} KC_{00}) \tilde{x}(t) + \tilde{A}_d E \tilde{x}(t - \tau) + (B_0 + B_{00} KD_2) w(t) \\ z(t) = (C_0 + D_1 KC_{00}) \tilde{x}(t) + (D_{11} + D_1 KD_2) w(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中

$$A_0 = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C_{00} = \begin{bmatrix} C_2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_0 = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{00} = \begin{bmatrix} B_2 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, C_0^T = \begin{bmatrix} C_1^T \\ 0 \end{bmatrix}, C_{00} = \begin{bmatrix} C_2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D_{11}^T = \begin{bmatrix} D_{12}^T \\ 0 \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} D_{21} \\ 0 \end{bmatrix}, \tilde{A}_d = \begin{bmatrix} A_d \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$E^T = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} D_c & C_c \\ B_c & A_c \end{bmatrix}, \tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ x_c(t) \end{bmatrix}$$

则从 w 到 z 的闭环传递函数 $T_{zw}(s)$ 为

$$T_{zw}(s) = \tilde{C}(sI - \tilde{A} - \tilde{A}_d E e^{-s\tau})^{-1} \tilde{B} + \tilde{D} \quad (5)$$

式中

$$\tilde{A} = A_0 + B_{00} KC_{00}, \tilde{B} = B_0 + B_{00} KD_2$$

$$\tilde{C} = C_0 + D_1 KC_{00}, \tilde{D} = D_{11} + D_1 KD_2$$

对于给定的性能指标 γ , 存在公式(3)输出反馈控制器, 使得公式(5)闭环系统渐进稳定且 $\|T_{zw}(s)\|_\infty \leq \gamma$ 成立的充分条件是存在对称正定矩阵 X 和 Y , 使得以下 3 个线性矩阵不等式成立^[9]

$$\begin{bmatrix} W_1 & 0 & 0 & 0 \\ W_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} XA^T + AX & XC_1^T & B_1 & A_d & X \\ C_1 X & -YI & D_{11} & 0 & 0 \\ B_1^T & D_{11}^T & -YI & 0 & 0 \\ A_d^T & 0 & 0 & -S & 0 \\ X & 0 & 0 & 0 & -S^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 & 0 & 0 & 0 \\ W_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} < 0 \quad (6a)$$

$$\begin{bmatrix} W_3 & 0 & 0 \\ W_4 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} A^T Y + YA + S & YB_1 & C_1^T & YA_d \\ B_1^T Y & -YI & D_{11}^T & 0 \\ C_1 & D_{11} & -YI & 0 \\ A_d^T Y & 0 & 0 & -S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_3 & 0 & 0 \\ W_4 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} < 0 \quad (6b)$$

$$\begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} \geq 0 \quad (6c)$$

式中 $[W_1^T \ W_2^T]^T, [W_3^T \ W_4^T]^T$ 分别是 $[B_2^T \ D_{12}^T]^T, [C_2 \ D_{21}]^T$ 的正交补矩阵, 而 S 是任意给定的 $n \times n$ 对称正定矩阵.

由公式(6)求得可行解 X, Y 后, 控制增益矩阵 K 可通过求解不等式(7)得到

$$\Phi + \Sigma \Pi K \Theta^T + \Theta K^T \Pi^T \Sigma^T < 0 \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} \Sigma &= \text{diag}\{P, I, I, I\} \\ \Pi &= [B_{00}^T \ 0 \ D_1^T \ 0]^T \\ \Theta &= [C_{00} \ D_2 \ 0 \ 0]^T \\ \Phi &= \begin{bmatrix} A_0^T P + PA_0 + E^T S E & PB_0 & C_0^T & PA_1 \\ B_0^T P & -\gamma I & D_{11}^T & 0 \\ C_0 & D_{11} & -\gamma I & 0 \\ A_1^T P & 0 & 0 & -S \end{bmatrix} \end{aligned}$$

如果 $\text{Rank}(I - XY) = k < n$, 那么公式 (2) 系统存在一个 k 阶的 H_∞ 输出反馈控制器. 如果 $k = 0$, 那么可令 $P = Y$, 否则通过计算满足 $MN^T = I - XY$ 的满秩矩阵 $M, N \in R^{n \times k}$ 来计算对称正定矩阵 P , 其线性方程表示如下

$$\begin{bmatrix} Y & I \\ N^T & 0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} I & X \\ 0 & M^T \end{bmatrix} \tag{8}$$

2.2 塞式发动机 H_∞ 控制器的设计

由公式 (2) 可得汽油发动机的增广状态空间方程, 其中, $x(t)$ 是 (1) 中定义的状态向量, $z(t) = x_2(t)$ 表示被调输出, $y(t) = [x_2(t) \ x_3(t)]^T$ 表示测量输出, $w(t) = [d(t) \ r]^T$ 是外界扰动输入, A, A_d, B_1, B_2 同公式 (1), $C_1 = [0 \ 1 \ 0]$, $D_{11} = [0 \ 0]$, $D_{12} = 0$, $C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $D_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, 各系统参数均取标称值.

令 $S = \text{diag}\{1 \ 1 \ 1\}$, $\gamma = 1$, 则按上述算法, 得到的一阶控制器 K 的状态空间实现为

$$K = \left[\begin{array}{c|c} D_c & C_c \\ \hline B_c & A_c \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} -5.1827 & 3.0064 \\ \hline 30.26 & -15.54 \end{array} \middle| \begin{array}{c} -0.1232 \\ -27.36 \end{array} \right] \tag{9}$$

3 仿真结果

活塞式发动机恒转速控制系统须满足如下性能要求: (1) 跟踪性能: 发动机能以尽可能快的速度跟踪参考转速, 在阶跃输入下的稳态误差低于 1%; (2) 瞬态响应: 节气门阶跃输入时, 发动机转速的超调量低于 3%; (3) 抗干扰能力: 阶跃负载扰动下, 转速的最大下降值低于 5%, 并能迅速恢复到参考值, 调节时间小于 5 s. 基于以上发动机恒转速控制闭环系统的性能要求, 将所设计输出反馈控制器 (9) 应用到具有不确定参数的活塞式发动机的线性模型上, 在不同的条件下对其进行数字仿真验证. 发动机参考转速选择从 3 000 r/min 阶跃增加到 3 500 r/min, 再阶跃增加到 4 000 r/min. 在仿真

时刻 30 s 时, 加阶跃负载扰动, 模拟旋翼总距变化时发动机外界负载扭矩的变化. 为了验证所设计 H_∞ 控制器的有效性, 将其控制效果与传统 PID 控制进行了比较. 仿真中 PID 控制参数采用 Ziegler-Nichols 整定方法获得.

为验证控制系统对时变时间延迟的鲁棒性, 选取时间延迟 τ 分别为 0.4 s, 0.6 s, 0.7 s, 系统参数取其标称值, 其仿真响应曲线如图 2 所示. 为验

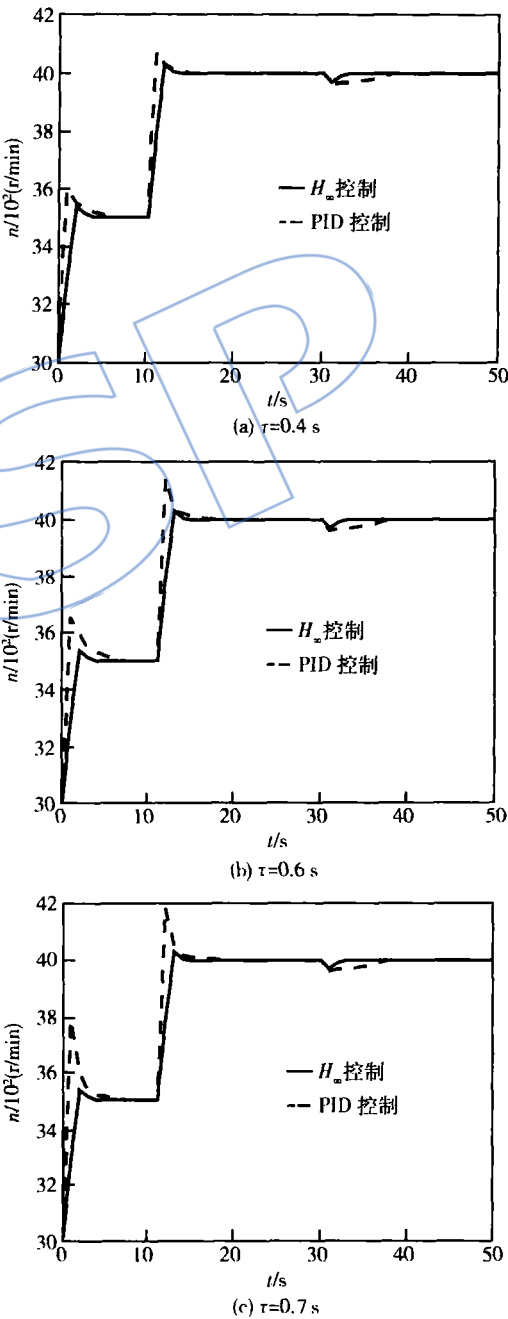


图 2 活塞式发动机在不同时间延迟下的动态响应曲线

Fig. 2 Dynamic responses of piston engine under various time delay values

证控制系统对模型不确定系统参数的鲁棒性,分别选取 3 组参数数值即最大值、标称值、最小值,取时间延迟为标称值.最大值代表参数变化的上限,最小值代表参数变化的下限,整个闭环系统在取最大、最小系统参数条件下的动态响应曲线如图 3 所示.

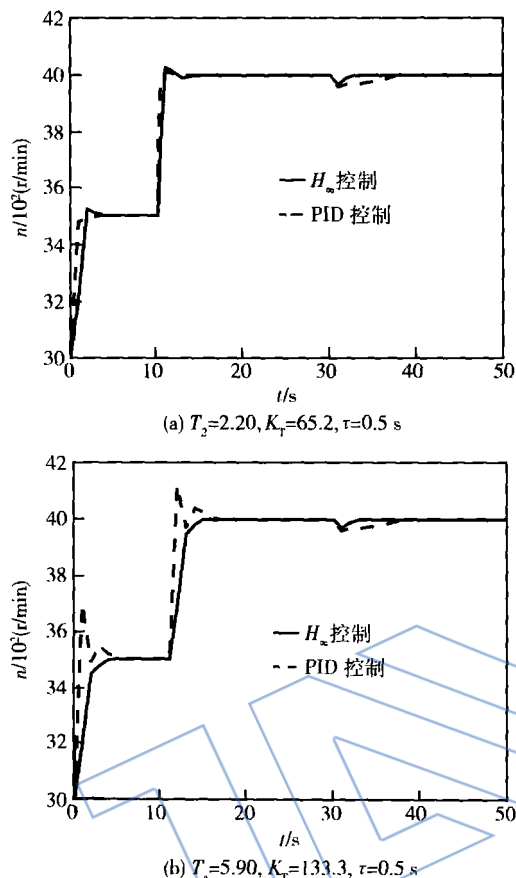


图 3 活塞式发动机在取不同系统参数值时的动态响应曲线

Fig. 3 Dynamic responses of piston engine under different sets of system parameters

从图 2 可以看出,相对于传统 PID 控制而言, H_∞ 控制下发动机转速的超调量及调节时间都得到了明显的改善.发动机转速的超调量降低到了 1%,在不同的时间延迟 τ 分别降低了 2%, 4%, 9%. 从 30 s 处的阶跃负载扰动响应可以看出,转速的最大下降值没有明显变化,但是恢复到参考值的调节时间明显缩短,由 9 s 降低到了 3 s. 另外,所设计 H_∞ 控制器的性能在不同时间延迟下几乎保持不变,而传统 PID 控制在时间延迟接近上限值时,转速的超调量明显增大.

从图 3(a) 中可以看出,系统参数取最小值时,与传统 PID 控制相比, H_∞ 控制的调节时间没有明显不同,超调量比较大,但在允许的误差范围

内.而在图 3(b) 中,系统参数取最大值时, H_∞ 控制比传统 PID 控制取得更好的响应曲线.

4 结 论

本文基于 LMI 为无人直升机活塞式发动机设计了一 H_∞ 动态输出反馈恒转速控制器,并在可变时间延迟及不确定系统参数等条件下进行了仿真验证.结果表明,所设计的控制器满足跟踪性、抗干扰性等预期要求,对时变时滞及系统参数的不确定具有一定的鲁棒性,满足无人直升机在各种飞行条件下对转速控制稳定性的要求.

参考文献:

- [1] 李玉珍,高丕周,马震.电控汽油喷射改善小型无人机发动机性能的研究[J].航空学报,2004,25(3):233-236.
LI Yuzhen, GAO Pizhou, MA Zhen. Research on the improvements of performance of mini-UAV's engine by electronically controlled gasoline injection[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2004, 25(3): 233-236.
- [2] 樊林,裴普成,杨武,等.电控汽油机怠速控制方式[J].汽车工程,2002,24(6):490-494.
FAN Lin, PEI Pucheng, YANG Wu, et al. Idling control schemes for electronically controlled gasoline engine [J]. Automotive Engineering, 2002, 24(6): 490-494.
- [3] LI Xiaoqiu, Stephen Y. Sliding mode control of delayed systems with application to engine idle speed control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(6): 802-810.
- [4] 于秀敏,高莹,李雪松,等.汽油机转速反馈自适应控制[J].农业机械学报,2001,32(5):1-3.
YU Xiumin, GAO Ying, LI Xuesong, et al. Adaptive ignition control of a gasoline engine with speed feedback[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2001, 32(5): 1-3.
- [5] Eun T J, Jong H K, Hong B P. H_∞ output feedback controller design for linear systems with time-varying delayed state[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 43(7): 971-974.
- [6] Choi H H, Chung M J. An LMI approach to H_∞ controller design for linear time-delay systems[J]. Automatica, 1997, 33(4): 737-739.
- [7] 杨志家,赵光宙,严兆大.发动机怠速模型及前馈补偿控制[J].小型内燃机,1997,26(5):19-23.
YANG Zhijia, ZHAO Guangzhou, YAN Zhaoda. Engine idle model and feedforward compensation control[J]. Small Internal Combustion Engine, 1997, 26(5): 19-23.
- [8] Williams S J, Hrovat D, Davey C, et al. Idle speed control design using an H_∞ approach[J]. In Proc. Amer. Contr. Conf., Pittsburgh, PA: 1989:1950-1956.
- [9] 俞立.鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M].北京:清华大学出版社,2002.