

天然气发动机怠速鲁棒控制^{*}

李西秦¹ 刘冰² 范承德³

(1. 浙江科技学院机械与汽车工程学院, 杭州 310023; 2. 浙江科技学院图书馆, 杭州 310023;
3. 上海大众汽车有限公司质量部, 上海 201805)

【摘要】 将 H_∞ 鲁棒控制理论应用于天然气(CNG)发动机的怠速控制,建立了 CNG 发动机动力学模型,描述了发动机的不确定性。应用 Matlab 鲁棒控制工具箱,设计出基于 H_∞ 理论的 CNG 发动机怠速控制器,并进行了仿真分析和试验。仿真和台架试验表明, H_∞ 控制具有很好的鲁棒性,提高了 CNG 发动机怠速工况的稳定性。

关键词: 天然气发动机 怠速 H_∞ 鲁棒控制 仿真 试验

中图分类号: TK432 **文献标识码:** A

Idle Speed Control of CNG Engine Based on Robust Control Theory

Li Xiqin¹ Liu Bing² Fan Chengde³

(1. School of Mechanical & Automotive Engineering, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310023, China 2. Library, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310023, China
3. Department of Quality, Shanghai Volkswagen Automotive Company Ltd., Shanghai 201805, China)

Abstract

The basic methods of H -infinity control theory and model of standard H -infinity design problem were described. The H -infinity robust control theory was applied to the design process of CNG engine idle speed control. The dynamic model of CNG engine was established. The diagram of engine uncertainty was stated. A controller of CNG engine idle speed was successfully developed based on H -infinity control theory and Matlab robust toolbox. The simulations and experiments about the CNG engine were done and the results show that the H -infinity controller possesses good robust features and can improve the stability of CNG engine idling operation.

Key words Compressed natural gas engine, Idle speed, H -infinity robust control, Simulation, Experiment

引言

天然气(CNG)发动机在怠速工况运行时,空调装置、自动变速器、动力转向机构等的联接都可能改变怠速转速,使得发动机转速不稳定。许多控制理论和方法,如经典控制理论、现代控制理论和自适应控制理论等,都要求控制对象有精确的模型或模型的不确定性满足特殊的假定,然而在许多实际控制领域,如 CNG 发动机的怠速控制中,由于系统的不确定性,要获得控制对象的精确模型是困难的,甚至不可能。因此基于系统的精确模型是不现实的,控制系统的设计必须考虑在存在不确定性的情况下,

使得反馈控制器仍然能使系统稳定并满足所希望的要求。 H_∞ 鲁棒控制理论是一种分析和处理具有不确定性系统的理论。

文献[1]提出发动机怠速控制的神经网络方法,并将带遗忘因子的梯度下降法应用于 RBF 神经网络的参数调整。研究表明,神经网络控制响应快,可有效提高发动机怠速品质。本文采用 H_∞ 鲁棒控制方法控制 CNG 发动机的怠速转速。

1 H_∞ 标准设计问题模型

控制系统的鲁棒性是指系统在其参数或结构发生摄动时保持稳定的能力。 H_∞ 鲁棒控制理论是在

实有理函数空间,以系统传递函数的 H_∞ 范数作为性能指标,通过对控制器进行优化设计,使闭环系统获得一定鲁棒性的控制理论。其实质是为多输入、多输出且具有模型摄动的系统提供一种鲁棒控制器设计方法。CNG 发动机怠速系统 H_∞ 标准设计问题的模型如图 1 所示。

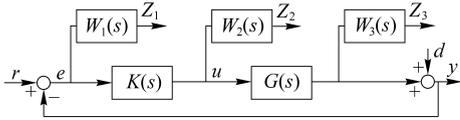


图 1 H_∞ 标准设计问题模型

Fig. 1 Model of standard H -infinity design problem

图 1 中, r 为参考输入信号, e 为转速误差, u 为控制输出, d 为外部干扰, y 为系统输出信号; $G(s)$ 为受控对象 CNG 发动机, $K(s)$ 为 H_∞ 控制器。加权函数 $W_1(s)$ 表示对系统性能要求的约束, 通过调整可以有效地抑制干扰的影响, 获得希望的输出信号; 加权函数 $W_2(s)$ 反映了对加性不确定性的限制, 这里可以看作是对控制信号幅值的约束; 加权函数 $W_3(s)$ 反映了对乘性不确定性的限制, 由控制对象本身特性决定; Z_1 、 Z_2 、 Z_3 为系统的评价信号。在存在外部干扰和模型自身不确定性的情况下, CNG 发动机怠速系统 H_∞ 怠速控制器的设计可以归结为混合灵敏度问题。考虑加混合灵敏度问题的标准框架为^[2]

$$\begin{bmatrix} W_1(s)e \\ W_2(s)u \\ W_3(s)y \\ \vdots \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1(s) & \cdots & -W_1(s)G(s) \\ 0 & \cdots & W_2(s) \\ 0 & \cdots & W_3(s)G(s) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I & \cdots & -G(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ u \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$G(s) = \begin{bmatrix} A_g & B_g \\ C_g & D_g \end{bmatrix}$$

$$W_1(s) = \frac{0.1(s+35)}{s+0.001}$$

$$W_2(s) = 0.01 \quad W_3(s) = 0.001(2s+0.01) \quad u = K(s)e$$

式中 $W_1(s)$ 、 $W_2(s)$ 、 $W_3(s)$ ——加权矩阵

I ——单位矩阵

$K(s)$ ——控制器增益矩阵

由式(1)可以得到 CNG 发动机的广义对象为

$$P_0 = \begin{bmatrix} W_1(s) & \cdots & -W_1(s)G(s) \\ 0 & \cdots & W_2(s) \\ 0 & \cdots & W_3(s)G(s) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I & \cdots & -G(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(1)构成的闭环系统传递函数阵为

$$P = \begin{bmatrix} W_1(s)S \\ W_2(s)R \\ W_3(s)T \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $W_1(s)S$ 代表对系统性能的要求, $W_2(s)R$ 和 $W_3(s)T$ 代表对系统鲁棒稳定性的要求。混合灵敏度问题将系统的鲁棒稳定性要求和性能要求转化为 H_∞ 范数意义下的最优控制问题。混合灵敏度问题就是求一有理函数控制器 $K(s)$, 使得闭环系统稳定, 且满足 P 的无穷范数 $\|P\|_\infty < 1$ 。

2 CNG 发动机动力学模型

2.1 进气歧管动力学模型

基于文献[3~4]所描述的发动机充气模型, 进气歧管被看作是一个具有常值体积的容器, 进气歧管压力的变化率与进入进气歧管的空气质量的变化率和从进气歧管进入气缸的空气质量的变化率之差呈正比, 其关系为

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V} \left(\frac{dm_{in}}{dt} - \frac{dm_{out}}{dt} \right) \quad (4)$$

其中

$$\frac{dm_{out}}{dt} = \frac{n\eta V_d p}{120RT} = \frac{\omega\eta V_d p}{4\pi RT}$$

式中

p 、 T 、 V ——进气歧管压力、温度、体积

R ——空气常数

m_{in} ——由节气门进入进气歧管的空气质量

m_{out} ——由进气歧管进入气缸的空气质量

η ——气缸容积效率

V_d ——气缸总体积

n 、 ω ——发动机转速、角速度

2.2 CNG 发动机动力学模型

发动机的输出转矩与进入气缸的空气质量、空燃比、发动机转速、气缸摩擦力矩等有关, 表示为^[3]

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{C_T(t-\tau)dm_{out}}{\omega} - T_{load} - T_{fric} = \frac{C_T\eta V_d p(t-\tau)}{4\pi RT} - T_{load} - T_{fric} \quad (5)$$

其中 $T_{fric} = 0.0001\omega^2 + 0.0102\omega + 11.207$

式中 J ——发动机转动部分的转动惯量

τ ——从燃料喷射到转矩输出的延迟时间, 稳态时为常数

T_{load} ——空调、发电机等负载的扭矩

T_{fric} ——发动机摩擦扭矩

C_T ——燃烧力矩系数

发动机怠速旁通阀执行器为步进电动机, 执行器将 H_∞ 控制器信号 u 转换成怠速旁通阀输出轴的位移 L 。设执行器时间常数为 τ_1 , 增益为 K , 则其传递函数为

$$G(s) = \frac{L(s)}{u(s)} = \frac{K}{1 + \tau_1 s}$$

3 发动机的不确定性

在实际工程控制中,由于种种原因总是存在着不确定性,这种不确定性通常分为2类:外部的不确定性,如干扰等;内部的不确定性,如测量误差、参数估计误差以及未建模动态等。

图2所示为CNG发动机不确定性控制系统框图,图中 r_1 为参考输入; d_1 为干扰输入; n_1 为噪声输入; y_1 为控制输出; e_1 为控制误差; u_1 为控制器输出; m_1 为未建模动态不确定性及状态空间模型不确定性对系统的输入; $\Delta m(s)$ 为不确定性相对误差,表示了被控对象的未建模动态摄动和状态空间模型摄动对系统的影响,在这里采用乘法不确定性来表示。如图2所示,在发动机的运行过程中,进气、供油、点火、燃烧以及负荷变化等因素都会导致怠速转速发生变化,影响发动机的怠速稳定性。这些内部的不确定性包含在发动机的未建模动态来考虑,发动机在运行过程中的不确定的滞后时间等都视为发动机的建模不确定性;而由于发动机老化、磨损等原因造成的发动机参数的不确定性和由于传感器的噪声输入以及发动机运转过程中的干扰输入都看作是参数的不确定性。

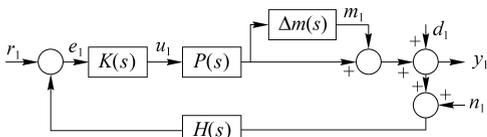


图2 CNG发动机不确定性控制系统框图

Fig.2 Control system diagram of CNG engine uncertainty

4 H_∞ 优化控制器的求解

对于时间滞后问题可以采用时间滞后函数的pade近似和闭环系统的近似分布^[4]。本文中CNG发动机模型采用Matlab控制工具箱中pade函数来近似计算其传递函数的时间迟滞环节,将其近似为线性系统来处理,这里采用简化的分子为一阶、分母为二阶的pade近似。编写Matlab程序可直接求得近似的时间迟滞环节为

$$K_2(s) = \frac{-14.02s + 294.6}{s^2 + 28.03s + 294.6} \quad (6)$$

在计算过程中,取 τ 的期望值为0.1427,怠速转速为1000 r/min,则标称对象模型为

$$K_0(s) = \frac{-14.02s + 294.6}{0.088s^3 + 3.467s^2 + 53.95s + 294.6} \quad (7)$$

状态方程的系数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -39.4 & -19.16 & -13.08 \\ 32 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad -1.245 \quad -3.269] \quad D = [0]$$

广义被控对象模型为

$$P(s) = \begin{bmatrix} -39.4 & -19.16 & -13.08 & 0 & 0 & 4 \\ 32 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.245 & -3.26 & -0.001 & 1 & 0 \\ 0 & 0.6101 & -1.6018 & 2.7795 & 0.49 & 0 \\ 0 & 1.245 & -3.269 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据Matlab中的鲁棒控制工具箱,可以计算出控制器为

$$K(s) = \frac{656563.13(s + 11.38)(s^2 + 28.02s + 294.3)}{(s + 1.028 \times 10^6)(s + 0.001)(s^2 + 40.99s + 681.4)} \quad (9)$$

5 仿真分析

为了验证 H_∞ 控制器的有效性,对以上求解的 H_∞ 控制器利用Matlab中的Simulink进行仿真分析,以初始的单位阶跃信号为输入信号,并在仿真的第5s时加入干扰信号来模拟发动机载荷的突变情况,加入噪声信号作为测量噪声,并对参数变化时的控制器分别进行了仿真,仿真结果如图3所示。图4为单位阶跃输入信号,在加入基本振幅干扰信号和1.2倍振幅干扰信号作用下的仿真结果。

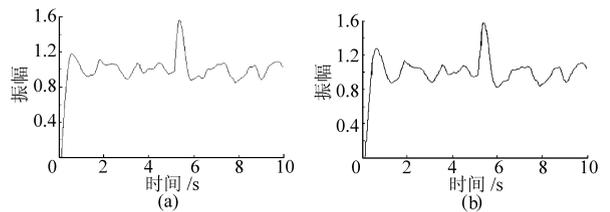


图3 系统仿真结果

Fig.3 System simulation results

(a) $\tau = 0.1136$ s (b) $\tau = 0.1427$ s

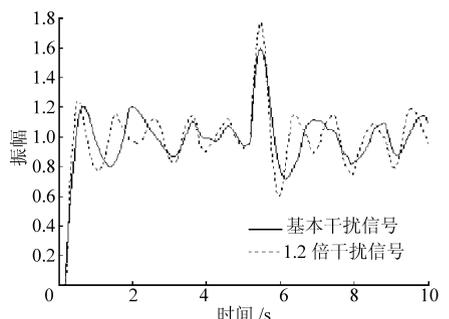


图4 不同幅值干扰信号仿真结果

Fig.4 Simulation results at different disturbing signal

发动机运行条件的改变使得发动机参数发生变化,从而影响发动机的转速。这也导致了建立的发动机模型的不确定性。基于 H_∞ 理论设计的发动机怠速控制器考虑了怠速运行时的不确定因素,因而具有很好的鲁棒稳定性。由仿真结果可以看出 H_∞ 控制器对于参数的变动具有较强的鲁棒性,系统的输出量变化平缓,并且很快达到了稳定值,过渡的时间较短,超调量较小,在受到扰动干扰时,系统可以很快恢复到稳定值。对于不同振幅的干扰信号在振荡一个周期后,也迅速趋于稳定。

6 台架试验

试验采用四缸 CNG 发动机,发动机的主要性能参数:压缩比 10.5, 标定转速 2 600 r/min, 标定功率 74 kW。为防止突加的载荷使得 CNG 发动机停转,试验将怠速转速调高到了 1 000 r/min 附近,使得怠速的稳定性更好,由测功机加载,在 0 s 时刻加载,2~3 s 后转速下降,当转速降至 820 r/min 时程序自动卸载,通过两种调节方法来进行转速调节:通过 CNG 发动机的自调节;通过基于 H_∞ 控制的控制器调节。

从图 5 曲线可以看出,CNG 发动机自调节时,卸载后大约历经 15 s CNG 发动机调节到稳定转速,

而基于 H_∞ 理论的控制器调节需要约 8 s,其转速的恢复时间远小于 CNG 发动机的自调节方式。

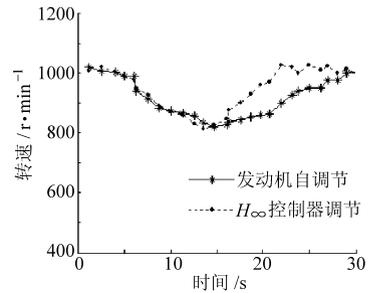


图 5 突加载荷时 CNG 发动机的怠速稳定性比较
Fig. 5 Comparison of idle speed performance when CNG engine load changing

7 结束语

由于发动机运行条件的改变,使得 CNG 发动机参数会发生变化从而影响到 CNG 发动机的转速,模型的近似也导致 CNG 发动机模型的不确定性。基于 H_∞ 理论设计的 CNG 发动机怠速控制器将这些不确定因素考虑在内,因而具有很好的鲁棒性能。仿真研究和试验结果表明,所设计的鲁棒控制器对外界干扰造成的 CNG 发动机怠速转速的波动具有良好的抑制作用,可将怠速转速有效控制在一定的范围之内,提高了怠速的稳定性。

参 考 文 献

- 张金龙,赵芙生. 电控发动机怠速 RBF 神经网络控制[J]. 农业机械学报, 2005, 36(8): 20~22, 12.
Zhang Jinlong, Zhao Fusheng. Idle speed control of the electronic control engine based on RBF neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(8): 20~22, 12. (in Chinese)
- 黄曼磊. 鲁棒控制理论及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
- Hendricks E, Chevalier A, Jensen M. Modeling of the intake manifold filling dynamics[C]. SAE Paper 960037, 1996.
- Heywood J B. Internal combustion engine fundamentals[M]. London: McGraw-Hill, 1988.
- 薛定宇,陈阳泉. 基于 matlab/simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.