

基于IMC原理的电子节气门控制策略

徐金榜, 赵泓昊[†], 熊文羽, 龚齐昶翼

(华中科技大学 自动化学院, 武汉 430074)

摘要: 发动机系统中的电子节气门是一种典型的非线性控制对象,特别是节气门运动过程中的弹簧扭矩和摩擦阻力十分复杂,其数学模型很难精确建立,参数不易获取.针对电子节气门的非线性因素,提出一种内模控制器的设计方法.首先分析电子节气门系统的数学模型,在Matlab/Simulink仿真平台上对模型的有效性进行验证,进而以内模控制结构为基础,建立电子节气门复域模型,分析系统的非线性干扰,设计针对时变参数的内模控制器.仿真结果显示,在模型较精确的情况下,内模控制器具有优于传统PID和一般滑模控制的控制性能,而在模型失配的情况下,内模控制器的鲁棒性能够保证它的控制性能仍然优于传统PID.在所提出的内模控制器设计方法中,前馈滤波器的设计并未用到任何系统参数,但仍然能够保证理想的稳态响应和扰动响应,因此所提出方法相比于很多针对具体模型的控制策略,具有更好的实用价值.

关键词: 电子节气门; 非线性干扰; 内模控制原理; 时变参数; 模型失配; 阶跃响应; 扰动响应

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Electronic throttle control strategy based on IMC principle

XU Jin-bang, ZHAO Hong-hao[†], XIONG Wen-yu, GONG Qi-chang-yi

(School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The electronic throttle of engine is a typical nonlinear object, especially the spring torque and frictional resistance during the rotation process is very complex. Its mathematical model is difficult to be accurately established, and the parameters are not easy to be got. This paper proposes a design method of the internal model controller to solve the nonlinear factor of the electronic throttle. Firstly, the mathematical model of the electronic throttle system is analyzed, and the validity of the model is verified on the Matlab/Simulink simulation platform. Then, the electronic throttle complex field model is established based on the internal model control structure. The nonlinear interference of the system is analyzed, and the internal model controller is designed for the time-varying parameters. The simulation results show that the internal model controller has better performance than the traditional PID and the ordinary sliding mode control in the case of relatively accurate model, and the robustness of the internal model controller guarantees that its performance is still better than the traditional PID in the case of mismatched model. In the design method of the internal model controller proposed in this paper, system parameters are not required to design the feedforward filter, but the ideal steady-state response and disturbance response is still guaranteed. Therefore, this method has better practical significance compared with many model-specific control strategies.

Keywords: electronic throttle; nonlinear interference; internal model control principle; time-varying parameters; model mismatch; step response; disturbance response

0 引言

在汽车工业不断发展的今天,电子技术在汽车上的应用越来越广泛,电控系统已经成为汽车系统的核心.电子节气门作为汽车电子中不可缺少的一环,在发动机动力控制、最优空燃比控制、提高车辆经济性、减少有害物质排放等方面起着至关重要的作用,

在一些比较简单的应用场合,电子节气门可以作为唯一执行器来控制发动机的运行状况.

对电子节气门控制(ETC)的研究在近年来变得越来越重要,很多研究者都提出了自己的方法来提升电子节气门的控制效果,且多数控制策略都是以PID控制器为基础.电子节气门包含很多典型的非线性

收稿日期: 2017-06-26; 修回日期: 2017-12-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61472154); 武器装备预研基金项目(9140A33010115JW05013).

责任编委: 关治洪.

作者简介: 徐金榜(1973—),男,教授,博士生导师,从事电力电子与运动控制以及新能源汽车相关技术等研究; 赵泓昊(1992—),男,硕士生,从事发动机控制系统关键技术的研究.

[†]通讯作者. E-mail: 363832475@qq.com

环节,传统的PID控制仅对三阶以下系统具有较好的控制效果,且无法很好地应对电子节气门的非线性因素.文献[1]和文献[2]分别提出了模糊PID算法和智能PID算法,但两者都是对传统PID的一种细化,需要划分多个参数区间,控制过程较复杂,实用性不足;文献[3]提出了滑模变结构控制方法,取得了优于传统PID的控制效果,但并没有具体分析滑模趋近率参数产生的抖振问题.除此之外,绝大多数研究都把节气门复位弹簧参数视为常数,没有考虑金属疲软造成的参数变化.

针对以上问题,本文提出一种基于内模控制(IMC)原理的电子节气门控制策略,以前馈控制器的设计为核心,补偿了库伦摩擦、复位弹簧等非线性因素,并考虑了复位弹簧参数的时变性.内模控制器采用单自由度结构,前馈控制器参数可调,反馈滤波器采用单位反馈,控制结构清晰,实现难度较低,能够保证系统对阶跃指令及系统扰动的理想响应,同时提高

模型失配情况下系统的鲁棒性.本文首先分析了电子节气门的数学模型,并以此为基础搭建Simulink仿真模型,得到了理想的仿真结果.最后以实际电子节气门为对象,采用MC9S12XDT256为主控芯片,通过INCA上位机在线标定参数,采集实验数据,在硬件平台上验证实际控制效果.

1 电子节气门模型分析

1.1 电子节气门数学模型建立

典型的电子节气门结构如图1所示,其主要执行器是一个伺服电机,电机后端包括减速齿轮组、复位弹簧、节气门阀体等机构,节气门阀体上装有节气门位置传感器.当驾驶员有加速需求时,电控系统(ECU)会接收到驾驶员踏下的油门踏板开度信号,并将其转换成节气门开度信号需求,该需求与节气门位置传感器测量的实际节气门开度相比较,产生伺服电机脉宽调制(PWM)信号,并调整节气门开度,从而形成整个闭环控制系统^[4].

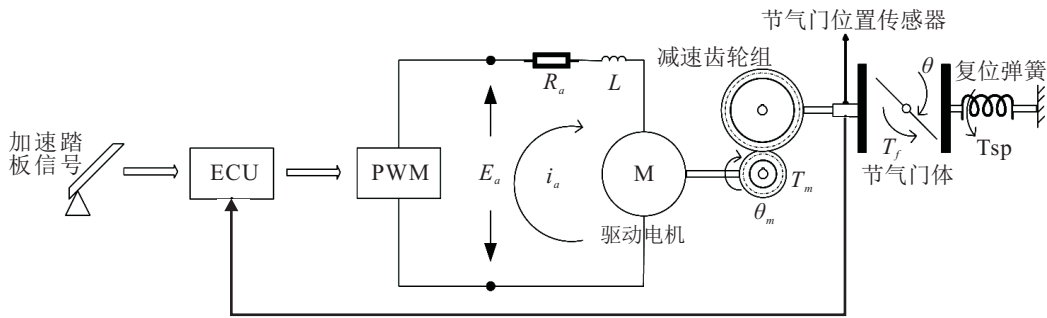


图1 电子节气门系统结构

整个节气门系统包含库伦摩擦、复位弹簧、齿轮间隙等非线性因素,本文仅考虑其中最典型的两种:摩擦非线性和复位弹簧非线性^[5],由此可建立电子节气门系统的数学模型.首先,忽略电机绕组回路中影响很小的电感 L ,根据基尔霍夫定律建立直流驱动电机侧的电压平衡方程^[6]

$$R_a i + k_b \dot{\theta}_m(t) = E_a, \quad (1)$$

$$E_a = V_{bat} u(t). \quad (2)$$

其中: R_a 为电机电阻, i 为绕组电流, k_b 为电机反电动势常数, θ_m 为电机旋转角度, E_a 为电机输入电压, V_{bat} 为电源电压, $u(t)$ 为占空比.

根据刚体转动力学,节气门阀片的运动学微分方程^[6]为

$$J_t n^2 \ddot{\theta} = n k_t i - T_f - T_s. \quad (3)$$

其中: J_t 为折算到电机侧的系统总转动惯量, n 为齿轮传动比, θ 为节气门开度,且 $n = \theta_m / \theta$, k_t 为电机扭矩常数, T_f 和 T_s 分别为摩擦转矩和复位弹簧转矩.摩

擦转矩仅考虑库伦摩擦和滑动摩擦,可以表示为

$$T_f = k_{tf} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + k_f \dot{\theta}. \quad (4)$$

其中: k_{tf} 为库伦摩擦系数, k_f 为滑动摩擦系数.复位弹簧转矩与节气门相对于默认开度的位置有关,在此假设两个复位弹簧都是理想弹簧,且忽略默认开度两侧预紧力矩的不对称性,得到复位弹簧转矩的数学表达式^[6]

$$T_s = k_{pre} \operatorname{sgn}(\theta - \theta_0) + k_s(\theta - \theta_0). \quad (5)$$

其中: k_{pre} 为复位弹簧预紧扭矩, k_s 为弹簧弹性系数, θ_0 为节气门默认开度.结合式(1)~(5),可得到电子节气门的动力学方程^[6]

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = & \frac{1}{n^2 J_t} \left[\frac{n k_t V_{bat}}{R_a} u(t) - k_s(\theta - \theta_0) - \right. \\ & \left. k_{pre} \operatorname{sgn}(\theta - \theta_0) - \left(\frac{n^2 k_b k_t}{R_a} + k_f \right) \dot{\theta} - k_{tf} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

1.2 电子节气门模型校验

根据式(1)~(5),在Matlab/Simulink环境下搭建电子节气门仿真模型,模型中需要标定的参数有 V_{bat} 、 n 、 R_a 、 θ_0 、 k_s 、 k_{pre} 、 k_f 、 k_b 、 k_t 、 J_t 、 k_{tf} ,通过直接测量以及查阅相关资料,得到上述参数取值如表1所示。

表1 模型参数取值表

参数	数值	参数	数值
V_{bat}/V	12	$k_f/(\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s}))$	0.000 45
n	21	$k_b/(\text{V}/(\text{rad}/\text{s}))$	0.015
R_a/Ω	3.5	$k_t/(\text{N}\cdot\text{m}/\text{A})$	0.022
θ_0/rad	0.1	$J_t/\text{Kg}\cdot\text{m}^2$	0.001 2
$k_s/(\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad})$	0.001 8	$k_{tf}/(\text{N}\cdot\text{m})$	0.005
$k_{\text{pre}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	0.142 2		

为了保证上述数学模型能够接近真实的电气节气门系统,需要对该仿真模型进行校验。在相同的输入下,观察比较模型与电子节气门实物的输出响应,即可验证模型的准确性^[7]。模型与实物的输入电压信号均采用0V~12V的三角波,图2为实物与模型的输出响应对比。

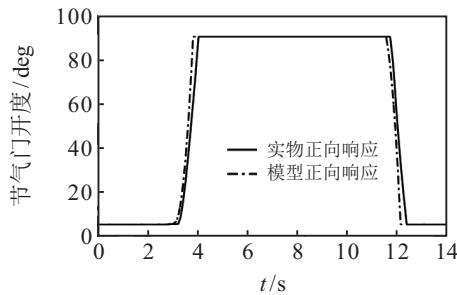


图2 实物与模型输出响应对比

由于对整个系统的非线性因素无法完全估计准确,模型与实物的输出响应仍存在很小的差异,但从综合效果来看,上述模型基本符合节气门特征,可用于节气门控制策略的设计。

2 电子节气门控制器设计

2.1 内模控制原理简介

典型的二自由度IMC系统结构如图3所示。其中: P 为控制对象, M 为对象模型, Q 为前馈控制器, F 为反馈控制器, r 、 u 、 d 、 y 、 y_m 和 e 分别为指令输入、控制量输入、扰动输入、控制对象输出、模型输出、对象和模型输出误差^[8]。典型IMC控制器包含 Q 和 F 两个控制自由度,其中前馈控制器 Q 通过对模型 M 的最小相位部分求逆得到,用来实现对指令输入的良好跟踪; F 是参数与阶数可调的滤波器,针对模型失配以及非线性因素,反馈滤波器可以提高系统的鲁棒性和抗扰性^[9]。

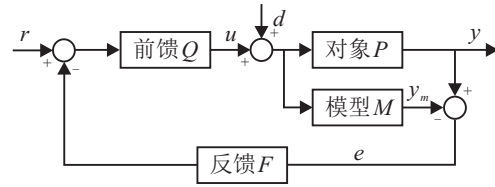


图3 IMC系统结构

理想的情况下,模型能够准确描述对象,且模型可完全求逆,控制效果达到理想状态,即任意时间和任何干扰作用下,系统输出都能无偏差地跟踪指令输入。实际系统显然比理想情况复杂很多,不仅存在模型失配情况,控制器往往也不能直接对模型求逆得到,除此之外,系统的稳态误差与抗扰性受对象的积分器阶数影响^[10],因此内模控制器的设计要根据对象具体分析。

2.2 基于内模原理的控制策略设计

在2.1节中,推导了包含非线性因素的节气门动力学方程,为了方便对式(6)描述的对象求逆来推导IMC控制器,需要将模型最终整理成传递函数模式。首先,将式(6)作如下修改:

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{n^2 J_t} \left[\frac{n k_t V_{\text{bat}}}{R_a} u(t) - k_s \theta - \left(\frac{n^2 k_b k_t}{R_a} + k_f \right) \dot{\theta} \right] - \frac{1}{n^2 J_t} [k_{\text{pre}} \text{sgn}(\theta - \theta_0) + k_{tf} \text{sgn}(\dot{\theta}) + k_s \theta_0]. \quad (7)$$

上式将表达式分为与输入输出状态空间相关的线性部分和非线性扰动部分,进一步整理为如下形式:

$$a_0 \theta + a_1 \dot{\theta} + a_2 \ddot{\theta} = u(t) + b d, \quad (8)$$

$$d = \frac{-1}{n^2 J_t} [k_{\text{pre}} \text{sgn}(\theta - \theta_0) + k_{tf} \text{sgn}(\dot{\theta}) + k_s \theta_0]. \quad (9)$$

其中: a_0 、 a_1 、 a_2 、 b 都为与已知参数有关的常数项,可直接求出; d 为输入扰动量; $u(t)$ 为控制量; θ 为控制对象输出 y 。该形式与图3所示IMC系统结构已经十分吻合,再将式(8)改写成如下传递函数模式:

$$(a_0 + a_1 s + a_2 s^2) \theta(s) = U(s) + b d(s). \quad (10)$$

由此可得对象模型 M 的传递函数为

$$M(s) = \frac{1}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2}. \quad (11)$$

考虑到模型可能存在一定程度的失配现象,实际控制对象的传递函数采用如下形式:

$$P(s) = \frac{1}{\bar{a}_0 + \bar{a}_1 s + \bar{a}_2 s^2 + o(s^2)}. \quad (12)$$

其中: $\bar{a}_0$ 、 $\bar{a}_1$ 、 $\bar{a}_2$ 表示实际控制对象的参数, $o(s^2)$ 表示高阶环节。上小节介绍了IMC控制器的求解方法,即对 $M(s)$ 最小相位部分求逆可得到前馈控制器 $Q(s)$

的表达式,且 $M(s)$ 本身是最小相位系统,因此可对 $M(s)$ 直接求逆,得到 $Q(s)$ 为

$$Q(s) = M^{-1}(s)f(s) = (a_0 + a_1s + a_2s^2)f(s). \quad (13)$$

其中: $f(s)$ 为前馈滤波器,当对象模型 $M(s)$ 严格有理时,对其求逆得到的 $Q(s)$ 会出现一阶甚至多阶微分器,这会使控制器对噪声十分敏感,失去实际意义.设计适当形式的滤波器 $f(s)$ 不仅可以解决这个问题,还能保证系统对特定的输入与扰动都不存在稳态误差.

根据前面的推导,已知对象模型 $M(s)$ 为0型系统,实际控制对象为 $P(s)$,设指令输入为 $R(s)$,扰动输入 $D(s) = bd(s)$,反馈 F 为单位反馈,可得系统的指令单位脉冲响应与扰动单位脉冲响应分别^[9]为

$$G_r(s) = \frac{\theta(s)}{R(s)} = \frac{Q(s)P(s)}{1 + Q(s)[P(s) - M(s)]}, \quad (14)$$

$$G_d(s) = \frac{\theta(s)}{D(s)} = \frac{[1 - Q(s)M(s)]P(s)}{1 + Q(s)[P(s) - M(s)]}. \quad (15)$$

由式(9)可知,扰动输入为复位弹簧参数与符号函数的线性组合,多数情况下弹簧参数 k_{pre} 与 k_s 被视为系统常数,但实际系统中它们很可能会随着时间的推而产生变化.不妨重设弹簧预紧力矩参数与弹性系数为 $k_{\text{pre}}(t) = k_{\text{pre}0} + k_1t$, $k_s(t) = k_{s0} + k_2t$,并设符号函数 $\text{sgn}(\dot{\theta})$ 的符号改变时刻为 $t_1, t_2, \dots$,符号函数 $\text{sgn}(\theta - \theta_0)$ 的符号改变时刻为 $\tau_1, \tau_2, \dots$,则可得到扰动的复域表达式为

$$\begin{aligned} D(s) = & \frac{d_1}{s}(e^{-t_1s} - e^{-t_2s} + e^{-t_3s} + \dots) + \\ & \frac{d_2}{s}(e^{-\tau_1s} - e^{-\tau_2s} + e^{-\tau_3s} + \dots) + \\ & \frac{d_3}{s^2}(e^{-t_1s} - e^{-t_2s} + e^{-t_3s} + \dots) + \frac{d_4}{s^2}, \end{aligned} \quad (16)$$

其中 $d_1 \sim d_4$ 都是常数.由式(16)可知,整个节气门动作过程中的扰动量 $D(s)$ 是 e^{-ts}/s 与 e^{-ts}/s^2 的线性组合,若要达到理想的扰动响应,只需系统对斜坡扰动输入项 e^{-ts}/s^2 的响应为0.综上所述,可以得到在指令输入和扰动输入的单独作用下,输出 $\theta(s)$ 的表达式分别为

$$\begin{aligned} \theta_r(s) &= R(s)G_r(s) = \\ & R(s)(a_0 + a_1s + a_2s^2)f(s)/ \\ & \{[1 - f(s)][\bar{a}_0 + \bar{a}_1s + \bar{a}_2s^2 + o(s^2)] + \\ & (a_0 + a_1s + a_2s^2)f(s)\}, \\ \theta_d(s) &= D(s)G_d(s) = \\ & (e^{-ts}/s^2)[1 - f(s)]/ \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & \{[1 - f(s)][\bar{a}_0 + \bar{a}_1s + \bar{a}_2s^2 + o(s^2)] + \\ & (a_0 + a_1s + a_2s^2)f(s)\}. \end{aligned} \quad (18)$$

利用终值定理,对于系统给定输入 $R(s) = r/s$,要达到理想的稳态响应,需要满足

$$\theta_r(0) = \lim_{s \rightarrow 0} sR(s)G_r(s) = r, \quad (19)$$

即

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_r(s) = 1; \quad (20)$$

以及

$$\theta_d(0) = \lim_{s \rightarrow 0} sD(s)G_d(s) = 0. \quad (21)$$

综合式(17)、(18)、(20)和(21)可得

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{a_0f(s)}{[1 - f(s)]\bar{a}_0 + a_0f(s)} = 1, \quad (22)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{(e^{-ts}/s)[1 - f(s)]}{[1 - f(s)]\bar{a}_0 + a_0f(s)} = 0, \quad (23)$$

且 $f(s)$ 的常用形式为

$$f(s) = \frac{(T_{f2}s + 1)^q}{(T_{f1}s + 1)^r}, \quad q \leq r. \quad (24)$$

观察式(22)~(24),若要保证 $Q(s)$ 为有理式,则取 $f(s)$ 的最简形式如下:

$$f(s) = \frac{3T_f s + 1}{(T_f s + 1)^3}. \quad (25)$$

结合式(13)和(25),可以得到IMC前馈控制器 $Q(s)$ 的最终形式为

$$Q(s) = \frac{(a_0 + a_1s + a_2s^2)(3T_f s + 1)}{(T_f s + 1)^3}. \quad (26)$$

其中

$$\begin{aligned} a_0 &= k_s R_a / nk_t V_{\text{bat}}, \\ a_1 &= (n^2 k_b k_t + k_f R_a) / nk_t V_{\text{bat}}, \\ a_2 &= n J_t R_a / k_t V_{\text{bat}}; \end{aligned}$$

T_f 的大小会影响系统响应的快速性、控制强度和鲁棒性,可以在仿真和实验中根据具体控制效果来标定.

在对象模型和控制对象有较大失配的情况下,反馈滤波器 F 可以保证系统响应仍然能够跟踪指令输入.由之前的模型校验可知,本文建立的对象模型和实际控制对象失配程度很低,因此设定 F 为单位反馈.

3 仿真与实验分析

3.1 Simulink模型仿真

为了验证上小节设计的IMC控制器对电子节气门的控制效果,首先在Matlab/Simulink平台上搭建电子节气门IMC仿真模型,IMC控制器形式由式(26)给

出,控制对象为第2小节建立的电子节气门模型. 模型中采用的参数与表1一致,指令输入采用阶跃信号,IMC控制器的输出对应电子节气门输入占空比,因此需要保证IMC的输出范围符合驱动电路的输出能力,再结合系统响应的快速性与稳定性,最后选取参数 T_f 的值为0.07. 将IMC控制器与传统PID控制器以及文献[3]中的滑模控制器分别进行比较,PID控制器参数 k_p 的值为3, k_i 的值为8, k_d 的值为0.2,滑模控制器参数 c 的值为30,仿真结果如图4~图6所示.

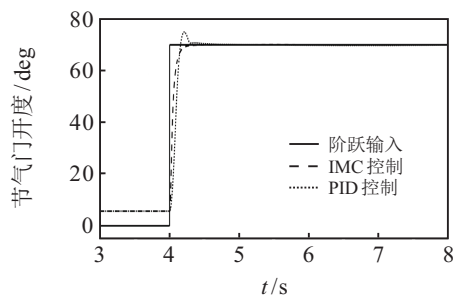


图4 IMC控制与PID控制阶跃响应比较

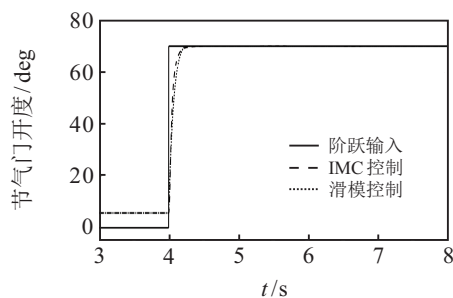


图5 IMC控制与滑模控制阶跃响应比较

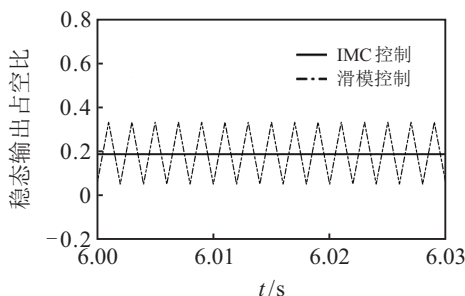


图6 IMC控制与滑模控制稳态输出比较

仿真结果显示:IMC控制与PID控制在响应速度上相差不大,但IMC控制的响应曲线更加平滑,没有超调,稳定性更高;IMC控制与滑模控制的效果十分接近,IMC控制的响应速度略微优于滑模控制,但在采用指数趋近率的情况下,离散滑模控制的输出存在一定程度的抖动问题. 为了进一步说明IMC控制对于传统PID控制的优势,分别在模型较精确和模型失配的情况下加入稳态扭矩扰动,扰动大小为 $0.035\text{ N}\cdot\text{m}$,输入指令与PID参数不变,仿真结果如图7和图8所示.

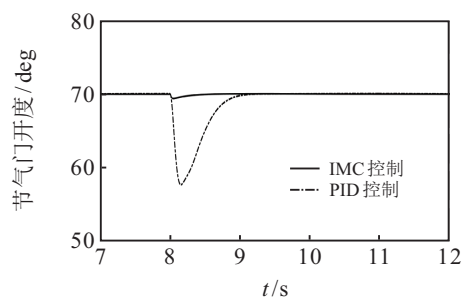


图7 模型适配IMC控制与PID控制扰动响应比较

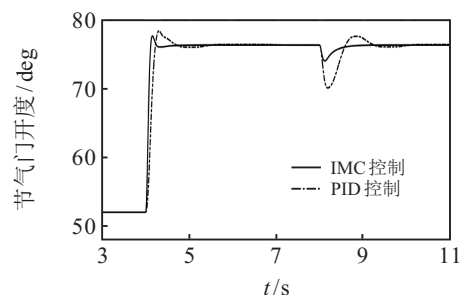


图8 模型失配IMC控制与PID控制性能比较

图7清晰地说明了在模型适配的情况下,IMC控制的抗扰性远优于PID控制;图8表示在模型失配的情况下,不考虑节气门复位弹簧的弹性系数,即去掉IMC控制结构中 $M(s)$ 和 $Q(s)$ 的 a_0 项,并使实物模型中的电池电压值下降到 8 V ,IMC控制与PID控制的性能对比,可以发现模型的不精确会降低IMC的控制性能,对阶跃信号的响应产生了超调,稳态扰动响应增大,但是仍优于PID控制,这说明IMC对于控制对象的参数变化具有一定程度的鲁棒性.

3.2 电子节气门实物验证

为了进一步验证IMC的控制效果,需要搭建电子节气门实物硬件实验平台. 本文采用的硬件平台是以燃气发电机为控制对象的ECU,该ECU采用MC9S12XDT256为主控芯片,集成了电子节气门的驱动电路和位置信号采集电路,节气门内部集成有H桥驱动电路,ECU驱动电路只需要输出PWM控制信号,整个实验过程通过INCA上位机采集实时数据. 指令输入采用频率为 1 Hz 的方波信号,IMC控制器参数和PID控制器参数都与仿真模型相同,分别得到两种控制器的电子节气门实物响应曲线,如图9和图10所示.

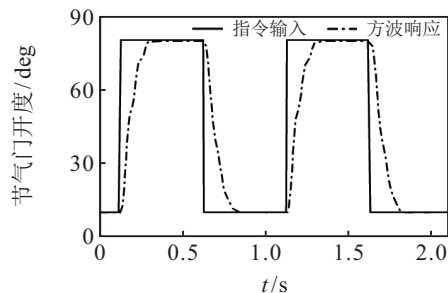


图9 IMC控制器方波响应

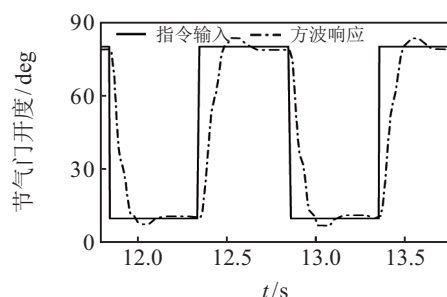


图10 PID控制器方波响应

4 结论

针对电子节气门的非线性因素,本文提出了一种基于内模控制原理的电子节气门控制策略,根据具体实物参数设计了IMC控制器,并以仿真模型和节气门实物为对象进行了验证实验.所提控制策略将节气门的非线性因素化归为内模控制结构的扰动响应问题,在对象的数学模型接近对象实物的情况下,采用单自由度控制结构,并将IMC控制器设计的重点放在前馈滤波器的设计上,最后通过终值定理得到理想的滤波器结构.

理论分析与实验结果表明,本文设计的IMC控制器仅包含一个标定参数,通过调整该参数可以使电子节气门得到良好的响应性能.相比于传统PID控制,该控制器具有更平滑的指令跟随特性和更好的稳定性,在模型失配的情况下,该控制器的抗扰性仍然优于PID控制,说明了其良好的鲁棒性能.相比于较为先进的滑模控制,该控制策略的响应速度更快.除此之外,为了保证鲁棒性,滑模控制器需要在趋近率中加入滑模面的切换函数,这会导致一定程度的抖动问题,而IMC控制器的设计只需对对象模型求逆,并设计合理的滤波器即可,推导过程简单明了,结构清晰,实际应用更加方便.

参考文献(References)

- [1] 于洪洋,吕英军,杨世春.基于位置反馈控制的电子节气门控制系统研究[J].汽车技术,2007(8): 9-12.
(Yu H Y, Lü Y J, Yang S C. Research on electronic throttle control system based on position feedback[J]. Automobile Technology, 2007(8): 9-12.)
- [2] 冯巍,程秀生,祁鹏华,等.基于智能PID控制的电子节气门控制系统研究[J].汽车技术,2009(3): 14-17.
(Feng W, Cheng X S, Qi P H, et al. Research on electronic throttle control system based on intelligent PID control[J]. Automobile Technology, 2009(3): 14-17.)

- [3] 张亚明,孙逢春,杨良会.混合动力汽车电子节气门控制研究[J].北京理工大学学报,2009,29(10): 881-889.
(Zhang Y M, Sun F C, Yang L H. Study on electric throttle control for hybrid electric vehicles[J]. Trans of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(10): 881-889.)
- [4] 孙亮亮.汽车发动机电子节气门控制系统建模与仿真[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学汽车工程学院,2008: 19-21.
(Sun L L. Modeling and simulation of electronic throttle control system on automotive engine[D]. Harbin: School of Automotive Engineering, Harbin Institute of Technology, 2008: 19-21.)
- [5] Jiao X H, Zhang J Y, Shen T L. An adaptive servo control strategy for automotive electronic throttle and experimental validation[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 6275-6284.
- [6] 黄贵芬.汽油发动机气路控制算法研究[D].长春:吉林大学通信工程学院,2011: 11-13.
(Huang G F. Study on air path control algorithm of gasoline engine[D]. Changchun: College of Communication Engineering, Jilin University, 2011: 11-13.)
- [7] 胡云峰.汽油发动机中若干非线性估计与控制问题研究[D].长春:吉林大学通信工程学院,2012: 26-31.
(Hu Y F. Study on nonlinear estimation and control of gasoline engine[D]. Changchun: College of Communication Engineering, Jilin University, 2012: 26-31.)
- [8] 周涌,陈庆伟,胡维礼.内模控制研究的新发展[J].控制理论与应用,2004,12(3): 475-482.
(Zhou Y, Chen Q W, Hu W L. New developments of research on internal model control[J]. Control Theory & Applications, 2004, 12(3): 475-482.)
- [9] 张井岗,秦娜娜.串级不稳定时滞过程的内模控制器设计[J].电子科技大学学报,2017,46(1): 38-45.
(Zhang J G, Qin N N. Design method of IMC controllers for unstable cascade processes with time delay[J]. J of University of Electronic Science and Technology of China. 2017, 46(1): 38-45.)
- [10] 赵志诚,刘志远,张井岗.一种积分时滞过程的内模PID鲁棒整定方法[J].华中科技大学学报:自然科学版,2011,39(12): 72-75.
(Zhao Z C, Liu Z Y, Zhang J G. IMC-PID robust tuning method for integrated process with time-delay[J]. J of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(12): 72-75.)

(责任编辑:齐霖)