

交通运输

基于滑模控制的发动机电子节气门研究

张 帅 孙仁云 单玉梅 付 博

(西华大学交通与汽车工程学院,成都 610039)

摘 要 电子节气门是车用发动机的一个十分重要的装置,为提高汽车行驶的动力性、平稳性、经济性以及降低排放,已经广泛应用于汽车发动机上。电子节气门是一个典型的非线性系统,结合电子节气门的结构特点,在 MATLAB/Simulink 平台上建立了动态仿真模型。建立了节气门控制器的数学模型,设计了基于滑模控制的电子节气门控制器,并与 PID 控制结果进行比较。结果表明,采用滑模控制能克服系统中的非线性和不确定性。节气门开度从小到大的阶跃变化时,无超调,而且稳态误差小,能迅速地获得预期节气门的开度。

关键词 发动机 电子节气门 PID 控制 滑模控制 仿真研究

中图法分类号 U461.6; **文献标志码** A

传统的节气门与加速踏板之间通过拉索(杆)连接,节气门的开度完全由驾驶员通过加速踏板来控制。这种机械控制方式只能使发动机电子控制系统完全按驾驶员加速踏板的操作控制发动机的工作,不能确保发动机的工作状态与汽车的运行情况形成最佳的匹配。电子节气门控制系统使加速踏板与节气门之间无机械连接,而是通过传感器、电子控制器及节气门驱动装置实现电子控制方式的连接,可使发动机节气门的开度不完全取决于驾驶员对加速踏板的操纵,控制系统可根据发动机的工况、汽车的行驶状态等对节气门的开度做出实时的调节,使发动机在最适当的状态下工作,从而提高了汽车的动力性、安全性及舒适性^[1]。本文通过对电子节气门控制系统的研究,实现对电子节气门的模拟的控制效果,设计出比较合适的控制算法,实现节气门迅速地获得预期的开度。

1 电子节气门体系统分析与建模

电子节气门控制系统是发动机管理系统(Engine Management System)EMS 中的一部分,电子节气门的控制在基于转矩控制的发动机管理系统中起着举足轻重的作用^[2],负责进气控制。如图 1 所示给出了(Electronic Throttle Control)ETC 系统示意图,加速踏板给出一个基本的节气门转角信号,节气门体中反馈回节气门位置信号及电机电流信号,其它传感器送来各种工况信号,如进气量、转速、冷却液温度等信号,经过调整、补偿后,输入节气门控制器,由电子节气门控制器根据运行模式,确定控制策略,计算出相应电机驱动电流,产生 PWM 控制信号,再由驱动电路功率放大,来驱动电机来精确控制节气门,达到要求的节气门位置。在本文中,直接以踏板的输入位置作为节气门的目标位置,设计控制算法,以实现节气门开度相对踏板开度的跟随。

电子节气门系统实际上是一个机电传动系统。直流电机是执行元件,减速齿轮组、复位弹簧、节气门阀组成了执行机构。电机输入电压在电枢回路

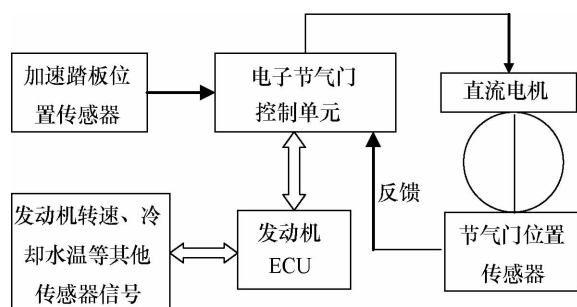


图1 ETC系统示意图

中产生电枢电流,电枢电流与激磁磁通相互作用产生电磁转矩。电磁转矩克服节气门转轴上的负载,带动节气门运动,实现节气门的位置控制。因此节气门数学模型的微分方程主要由两部分组成:描述直流电机电器特性的微分方程和描述执行机构机械特性的微分方程。由节气门数学模型的微分方程可以得到系统的状态方程及传递函数,以便对系统进行性能分析^[3]。

1.1 电子节气门驱动电机数学模型

电子节气门驱动电机为永磁直流电机,其等效电路示意图如下图2所示。

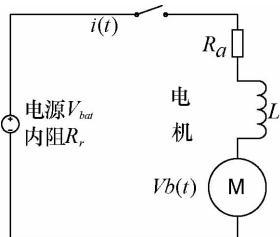


图2 驱动电机等效电路

反电势 $V_b(t)$ 可看作可变电压源,它和电机转速 ω_m 成正比关系;电机转矩 $T(t)$ 与电枢电流 $i(t)$ 呈正比关系,电枢电阻 R_a 和电源内阻 R_r 较小,在电机起动和运转时有一定的限流作用;而电枢电感 L 则对动态性能有较大的影响。

根据电机工作原理,由欧姆定律得出电机控制回路中电压平衡方程式^[4]:

$$E = V_{bat}u(t) = (R_a + R_r)i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + V_b(t) \quad (1)$$

根据直流电动机的性能,有

$$V_b(t) = K_t \omega_m \quad (2)$$

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L} (V_{bat}u(t) - (R_a + R_r)i(t) - K_t \omega_m) \quad (3)$$

由于磁场是常数,电机扭矩与电流成正比:

$$T(t) = K_t i(t) \quad (4)$$

式中, E —电枢电压 (V), 输入量; $u(t)$ —占空比; V_{bat} —电源电压 (V); R_r —电源内阻 (Ω); R_a —电枢电阻 (Ω); $V_b(t)$ —反向电动势 (V); $i(t)$ —电枢电流 (A); L —电枢电感 (H); $T(t)$ —电机扭矩 ($N \cdot m$); K_t —电机扭矩系数 ($N \cdot m/A$); ω_m —电机转速 ($1/s$), 输出量。

1.2 机械执行机构数学模型

1.2.1 复位弹簧的扭矩

节气门轴上有两个复位弹簧在相反方向起作用,保证需在电子节气门控制系统出故障时,节气门能够回复到平衡位置 θ_{eq} ,可以跛行回家。复位弹簧的扭矩在跛行回家位置 θ_{eq} 的附近工作区域有跳变,出现了非线性,且两个方向的弹簧扭矩系统也不同。弹簧的扭矩方程为^[4]:

$$T_s = K_s (\theta - \theta_{eq}) + D \text{sgn}(\theta - \theta_{eq}) \quad (5)$$

式(5)中: T_s 为弹簧扭矩; K_s 为弹簧扭矩系数; θ 为节气门开度; θ_{eq} 节气门静态平衡开度; D 复位弹簧预紧力矩;

1.2.2 摩擦力矩

节气门阀片运动过程中,要受到摩擦力的作用。摩擦力在动态过程中变化复杂,不仅存在粘性摩擦,还存在库伦摩擦。粘性摩擦与节气门阀片的转速有关,而库伦摩擦则与阀片的运动方向有关。

$$T_f = K_d \omega(t) + K_f \text{sgn} \omega(t) \quad (6)$$

式(6)中: T_f 为摩擦力矩; ω 为节气门角速度; K_d 滑动摩擦系数; K_f 库伦摩擦系数。

根据牛顿运动定律,在节气门轴上建立方程为^[4]

$$J \frac{d\omega}{dt} = T(t) - K_s (\theta - \theta_{eq}) - D \text{sgn}(\theta - \theta_{eq}) - K_d \omega(t) - K_f \text{sgn} \omega(t) \quad (7)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (8)$$

式(7)中: $T(t)$ 电机的驱动力矩。

节气门体总的数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} K_t Ni(t) - K_s(\theta - \theta_{eq}) \\ - Dsgn(\theta - \theta_{eq}) - K_d\omega \\ - K_fsgn(\omega) \end{pmatrix} \\ \frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(V_{bat}u(t) - (R_a + R_r)i(t) - K_tN\omega) \end{cases} \quad (9)$$

2 PID 控制器的设计

PID 控制是现代控制技术中最经典的控制方法,由于PID控制算法简单、各个控制器参数容易调整、鲁棒性好和可靠性高,被广泛应用于过程控制和运动控制中^[5]。而且PID控制方法不需要了解被控对象的数学模型,只要计算目标值与控制值之间的误差,控制方法容易实现。常规的模拟PID控制系统原理框图如图3所示。

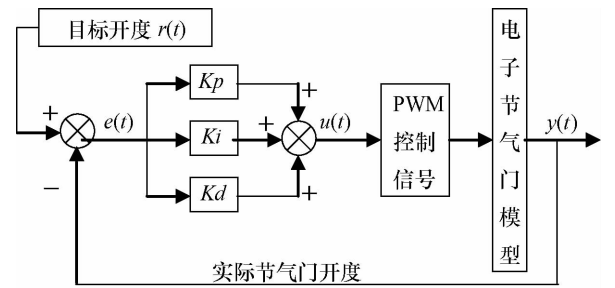


图3 模拟PID控制系统原理图

图3中, $r(t)$ 是给定目标开度值, $y(t)$ 是实际节气门开度输出值,给定值与实际输出值构成控制偏差 $e(t) = r(t) - y(t)$ 。 $e(t)$ 作为PID控制器的输入, $u(t)$ 作为PID控制器的输出和被控对象的输入。模拟PID的控制规律为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

式(10)中: K_p, K_I, K_D 分别为比例系数、积分系数和微分系数。

2.1 比例环节

成比例地反映控制系统的偏差信号 $e_{error}(t)$,偏

差一旦产生,控制器立即产生控制作用,以减少偏差。

2.2 积分环节

主要用于消除静差,提高系统的无差度。积分作用的强弱取决于积分时间 T_I, T_I 越大,积分作用越弱,反之则越强。

2.3 微分环节

反映偏差信号的变化趋势(变化速率),并能在偏差信号变得太大之前,在系统中引入一个有效的早期修正信号,从而加快系统的动作速度,减少调节时间^[5]。

通过对电子节气门进行PID控制仿真,反复试凑得出当($K_p = 1\ 500, K_i = 0.1, K_d = 4\ 500$)时,节气门达到一定程度的跟踪效果。

PID控制器模块如下图4所示。图5是加速踏板从全关闭到全开的变化在PID控制下节气门的跟踪情况,图6是从全闭到50%开度下跟踪情况。

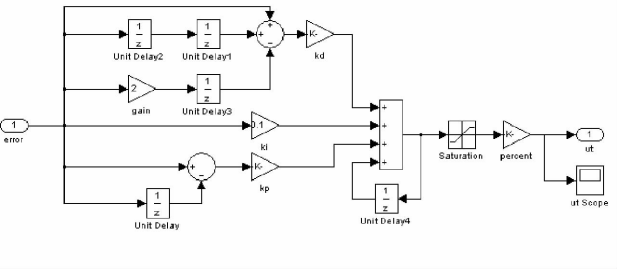


图4 PID控制器模块

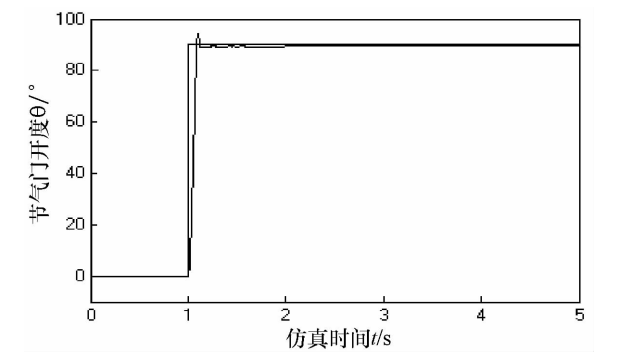


图5 PID控制节气门开度阶跃响应

结合图5、图6可以看出PID控制对阶跃信号的跟踪响应,对节气门有一定的跟踪效果,但是出

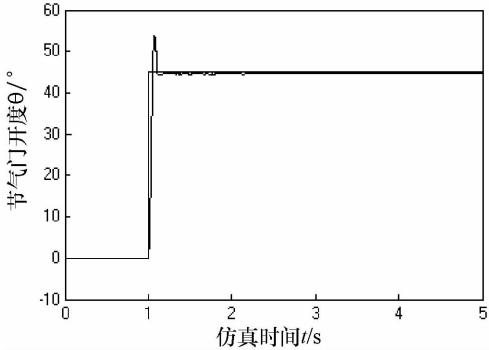


图6 PID控制节气门开度阶跃响应(0—50%)

现一定的超调量,而且超调量不容易消除,跟踪的误差带比较大,对节气门的跟踪效果并不是很理想。

3 滑膜变结构控制器设计

变结构控制理论是一种控制比较容易实现的综合方法,既使用于线性系统,也使用于非线性系统。它的一大优点是其滑动模态对加给系统的干扰和系统的摄动具有完全的自适应性,也就是说,设计的滑动模态不受系统的变化和不确定参数及外部环境扰动的影响。这样处于滑膜运动的系统就具有很好的鲁棒性^[6]。研究的电子节气门存在非线性弹簧、粘性摩擦、进气扰动及齿隙冲击^[7]等,这些都适于应用变结构控制。

电子节气门系统中要求节气门按照给定的目标值准确及时地变化,因此需要跟踪控制,根据目标值与实际值的误差 $e = \theta_d - \theta$ 。建立切换面 $s = 0$ 。采用分散滑膜变结构控制^[8]。

设切换函数为 $s = \dot{e} + ce$ (11)

则有 $\dot{s} = \ddot{e} + c\dot{e}$ (12)

根据滑膜运动趋近于0,可知: $s\dot{s} < 0$ (13)

为使趋近过程快速良好,可选取趋近率为:

$\dot{s} = -h\text{sgn}(s) - ks$ (14)

根据上面的节气门模型可推出电流信号为:

$$i(t) = \frac{K_s}{K_t N}(\theta - \theta_{eq}) + \frac{D}{K_t N}\text{sgn}(\theta - \theta_{eq}) + \frac{K_d}{K_t N}\dot{\theta} + \frac{K_f}{K_t N}\text{sgn}(\dot{\theta}) +$$

$$\frac{J}{K_t N}(\ddot{\theta}_d + c(\dot{\theta}_d - \dot{\theta})) + \frac{Jh}{K_t N} \times \text{sgn}((\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + c(\theta_d - \theta)) + \frac{Jk}{K_t N}((\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + c(\theta_d - \theta)) \quad (15)$$

电流作为滑膜控制器的输出信号。

SMC 控制器模块如图 7 所示。图 8 是加速踏板从全关闭到全开的变化在滑膜控制下节气门的跟踪情况,图 9 是从全闭到 50% 开度下跟踪情况。

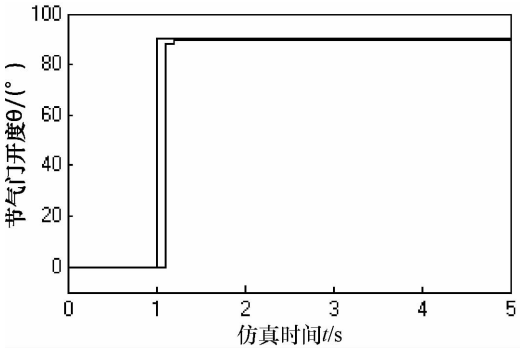


图8 滑膜控制节气门开度阶跃响应

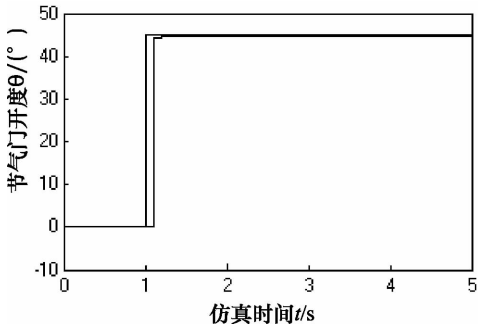


图9 滑膜控制节气门开度阶跃响应(0—50%)

结合图 8、图 9 可以看出滑膜控制的超调量完全消除,因为模型充分考虑了由复位弹簧引起的节气门变结构问题,控制系统无论有无外界干扰都能迅速完成非线性切换抑制了过度超调量。滑模控制可以使稳态误差很小几乎趋近零,对节气门的跟踪达到了很好的要求,满足节气门比较理想的控制效果。

4 结束语

本文针对节气门非线性特性的分析,采用 PID 控制和滑模控制,通过给定的阶跃信号的跟踪,模拟加速踏板从全关闭到全开以及从全闭到 50% 的开度的过程,可以看出两种控制器都能实现一定控制效果,但是通过对比可以看出,滑模控制具有更

好的控制效果,能够克服系统的非线性和不确定性,不存在超调量的问题,而且稳态误差也比较理想,且进入稳态的时间短,实现了对电子节气门比较理想的控制效果。由于节气门的影响因素比较多,在建模的时候并未考虑所有因素,使节气门在有些时候存在微小震动,为了得到更好的控制效果,可以考虑进气流等对节气门阀片的影响,获得更加稳定控制效果。

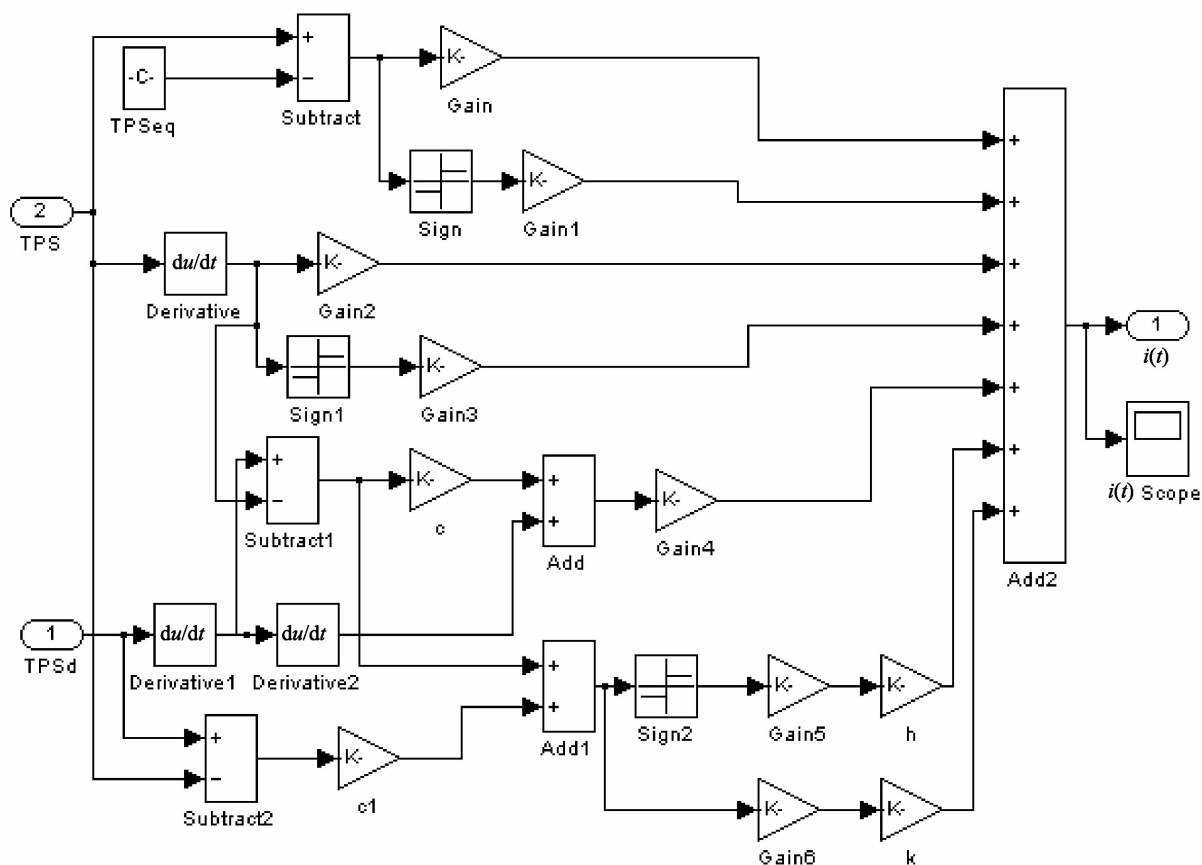


图7 SMC 控制器模块

参考文献

- 1 麻友良,尹华敏,刘国栋.电控发动机电子节气门控制系统.汽车电器,2006;(8):36—40
- 2 Heintz N, Stier M M, Ricardo G G. An approach to torque-Based engine management system. SAE Paper, 2001; 269;
- 3 周云山.汽车电控系统理论与设计.北京:北京理工大学出版社, 1999
- 4 陶国良,郭连,刘昊,等.电子节气门变结构滑模控制及仿真与实验.内燃机工程, 2005; 26(3): 39—42
- 5 刘金琨.先进PID控制及其MATLAB仿真.北京:电子工业出版社, 2003
- 6 刘金琨.滑膜变结构控制MATLAB仿真.北京:清华大学出版社, 2005
- 7 Eriksson L, Nielsen L. Non-linear model based throttle control. SAE Paper, 2000—01—0261
- 8 王玉顺,张振东.电子节气门控制系统研究.传动技术, 2008; 22(1): 29—33

(下转第 6459 页)

4 安柏涛,韩万金,王松涛,等. 大扩张角子午流道型线对损失的影响. 推进技术, 2001; 22(3): 211—214

5 吴 猛,王松涛,王仲奇,等. 子午扩张对涡轮内旋涡结构影响的数值模拟. 航空动力学报, 2000; 15(4): 353—356

6 安柏涛. 涡扇发动机涡轮低压导向器气动性能的实验与数值研究. 博士学位论文, 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 2002

7 安柏涛,王松涛,韩万金,等. 涡轮导向器几何与气动参数对通道涡影响的实验与数值研究. 航空学报, 2004; 25(4): 348—351

8 Wang H P. Flow visualization in a linear turbine cascade in high performance turbine blades. Journal of Turbomachinery, 1997; 119: 1—8

9 安柏涛,韩万金,芦文才,等. 子午扩压对环形叶栅流道内旋涡发生和发展的影响. 航空动力学报, 2000; 15(4): 361—365

10 王仲奇,秦 仁. 透平机械原理. 北京: 机械工业出版社, 1988

Design on Flow Separation and Control in Transition Section of a Large Meridional Expansion Turbine

TANG Hong-fei, YANG Tong, WANG Zhen-feng, HUANG Hong-yan, HAN Wan-jin
(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China)

[Abstract] To improve the economy, larger bypass ratio has been adopted in the turbofan engine design, leading to a larger fan high, larger speed gap between HP and LP turbines. The meridian geometry of the engine will be ex-curvature at a high degree, which brings problem for the design of LP turbines, transition section between HP and LP turbines. In accordance with such characteristics, adopted two ways to redesign a better turbine, and two modi-fied turbines was simulated to study how to control flow separation of LP turbines and the transition section, improve its aerodynamic performance. The results indicate that adopted the two ways to improve the performance is effectual, but the forward-swept and wide-chord blade technology is more effectual.

[Key words] meridional expansion forward-swept and wide-chord low-pressure turbine numerical simulation high-performance

(上接第 6448 页)

Engine Electronic Throttle Study Based on Sliding Mode Control

ZHANG Shuai, SUN Ren-yun, SHAN Yu-mei, FU Bo
(School of Transportation and Automobile Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, P. R. China)

[Abstract] Electronic throttle is a very important device of vehicle engine, in order to improve automotive dy-namics, drivability, fuel economy and to reduce emissions, it has been widely applied in automotive engines. Elec-tronic throttle is a typical non-linear system, combined with the characteristics of electronic throttle structure, dy-namic simulation model was established in MATLAB/Simulink platform, and the mathematical model of the throttle controller was established, electronic throttle controller based on sliding mode control was designed, and the results were compared with PID. The results show that the sliding mode control can overcome the nonlinear and uncertain-ty, when the throttle opening has a step change from small to large, the overshoot is little and the steady-state error is small, and the expected throttle degrees is obtained quickly.

[Key words] engine electronic throttle PID control sliding mode control simulation study