

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.07.018

免疫反馈策略在电子节气门控制系统中的应用

孙建民^{1,2}, 郑朋涛^{1,2}

(1. 北京建筑大学 机电与车辆工程学院, 北京 100044;
2. 城市轨道交通车辆服役性能保障北京市重点实验室, 北京 100044)

摘要: 为了提高汽车发动机电子节气门控制系统的动态响应特性, 进一步探索改善发动机过渡工况排放性能的控制策略。首先根据电子节气门非线性机电系统建立了对应的数学模型, 以便于对电子节气门控制系统进行研究。随后基于智能控制算法具有抗干扰能力强、鲁棒性强和适用于非线性控制系统等优点, 而且免疫反馈控制算法也具有在控制系统中响应迅速的特点, 将模糊控制算法和免疫反馈控制算法应用于电子节气门系统的运动控制, 探讨电子节气门系统的非线性对控制效果的影响。基于经典控制算法 PID 对系统的控制精度和响应的调节、模糊控制算法对非线性系统的响应性的适应性以及免疫反馈算法对提高控制系统的响应速度有效性的品质, 设计了用于提高电子节气门系统响应特性的模糊免疫 PID 控制器, 进一步进行电子节气门响应特性研究。试验结果表明, 与 PID 和模糊 PID 控制的系统响应特性比较, 模糊免疫 PID 控制系统的响应速度和调整速度等动态特性指标具有明显优势, 有利于电子节气门的响应特性的提高, 对于提高汽车的动力性、经济性以及排放性都有重要的意义。

关键词: 汽车工程; 反馈控制策略; 免疫反馈控制; 电子节气门控制; 非线性系统

中图分类号: TP273⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2019) 07-0143-07

Application of Immune Feedback Strategy in Electronic Throttle Control System

SUN Jian-min^{1,2}, ZHENG Peng-tao^{1,2}

(1. School of Mechanical-Electronic and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 100044, Beijing;
2. Beijing Key Laboratory of Performance Guarantee on Urban Rail Transit Vehicles, 100044, Beijing)

Abstract: In order to improve the dynamic response characteristics of electronic throttle control system of automobile engine, the control strategy for improving the emission performance of engine transition condition is further explored. First, based on the nonlinear electromechanical system of electronic throttle, the corresponding mathematical model is established to study the control system of electronic throttle. Then, based on the advantages of strong anti-disturbance ability, strong robustness and applicability to nonlinear control system of intelligent control algorithm, and the immune feedback control algorithm has the characteristics of rapid response in control system, so fuzzy control algorithm and immune feedback control algorithm are applied to the motion control of electronic throttle system. The influence of the nonlinearity of the electronic throttle system on the control effect is discussed. Based on the adjustment of classical control algorithm PID to control precision and response of the system, the adaptability of fuzzy control algorithm to the response of nonlinear system, and the characteristics of the effectiveness of immune feedback algorithm to improve the response speed of the control system, the fuzzy immune PID controller for improving the response

收稿日期: 2017-08-31

基金项目: 促进高校内涵发展定额项目-建大英才 (21082718034)

作者简介: 孙建民 (1969-), 男, 河北昌黎人, 教授. (sjmlwt@126.com)

performance of the electronic throttle system is designed to further research the response characteristics of electronic throttle. The experimental result shows that compared with the system response characteristics of PID and Fuzzy PID control, the dynamic characteristic indicators of the fuzzy immune PID control system, such as response speed and adjusting speed, have obvious advantages. The control system is conducive to improve the response characteristics of electronic throttle, and has important significance for improving the power, the economy and the emissions of vehicles.

Key words: automobile engineering; strategy of feedback control; immune feedback control; electronic throttle control system; nonlinear system

0 引言

随着车辆保有量的逐渐增加,对石油的需求量也不断上涨,其排放对环境的影响日益受到人们的关注。提高车辆电子节气门动态响应特性和控制精度,以满足发动机在过渡工况时的精确控制,进一步改善发动机的排放性能,受到发动机排放精确控制研究人员的广泛重视。这不仅节省了能源,降低了石油消耗量,而且排入大气中的有害物也会减少。此外,对电子节气门系统进行精确控制,还可通过发动机与底盘协调,在一定程度上提高汽车操纵性能,改善车辆驾驶舒适性^[1]。

对于传统节气门操纵机构,驾驶员通过加速踏板控制节气门的转角,进而控制节气门的开度,使节气门动态快速响应特性和控制精度很难达到要求,不易满足发动机在过渡工况时性能的提高。对于电子节气门系统,通过应用角度传感器、电控单元与执行器等结构替代传统传动机构^[2],在加速踏板和节气门上均装有传感器,检测控制系统输入与输出信号数据,经电控单元输出指令信号,由直流电机系统控制节气门的阀片转角,以提高节气门的响应速度,满足发动机过渡工况下排放性能的提高。为了改善电子节气门的控制响应,目前对电子节气门控制主要研究方法有 PID^[3]、滑模^[4]、模糊^[5]、反演^[6]、预测^[7-8]、神经网络^[9]等。由于电子节气门机电系统存在较强的非线性环节,因此经典 PID 控制方法的应用受到限制;模糊 PID 虽然不要求系统有非常精确的数学模型,克服了系统的非线性特性,但信号的跟随性和响应速度需要进一步研究。许多行业的专家学者也对模糊控制算法进行了研究,如转弯制动^[10]、交通信号^[11]、混合动力汽车^[12]、悬架^[13]、无人战斗机^[14]等。本研究将免疫算法、模糊算法以及 PID 算法相结合,并应用于电子节气门,以提高电子节气门系统的跟随性和响应速度,以利于改善发动机过渡工况的排放性能。

1 电子节气门非线性机电系统数学模型的建立

电子节气门机电系统如图 1 所示,主要由加速踏板传感器、ECU、电机驱动电路、直流电动机、减速齿轮组、节气门阀片、复位弹簧和角度位置传感器组成^[15]。驾驶员操纵加速踏板后,加速踏板位置传感器将接收到信号传给 ECU, ECU 把控制信号经脉宽调制后,经电机驱动电路控制直流电机动作。随后减速齿轮组被驱动电机驱动,节气门阀片随之转动,以满足发动机各工况下进气的需要。节气门位置传感器将节气门的开度大小转换为电信号,实时反馈给 ECU,形成闭环控制,以提高系统的控制效果。

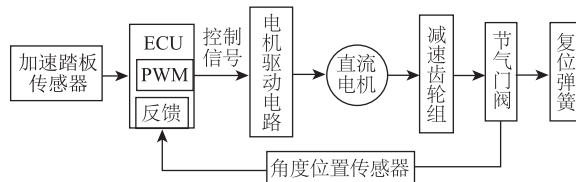


图1 电子节气门机电系统

Fig.1 Electromechanical system of electronic throttle

电子节气门的驱动元件一般采用永磁式直流电动机,其等效电路如图 2 所示,定子是永久磁铁,等效为电阻 R_a ; 转子是电枢线圈,等效为电感 L 。

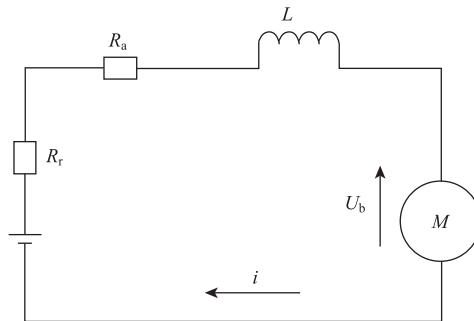


图2 电子节气门直流电机等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of electronic throttle DC motor

根据基尔霍夫电压定律^[16],若等效电路中的电

流为 i , 电源电压为 E , 电源内阻 R_r , 则电子节气门系统的驱动电机数学模型如下:

$$(R_a + R_r)i + L \frac{di}{dt} + U_b = E. \quad (1)$$

永磁直流电动机在工作过程中会产生反向电动势 U_b , 设节气门阀的旋转角速度为 ω , 齿轮减速比为 N , 反向电动势系数为 k_b , 则:

$$U_b = k_b N \omega. \quad (2)$$

电机转矩 T 与电路中的电流成正比, 电机扭矩系数为 k_t , 则:

$$T = k_t i. \quad (3)$$

电子节气门存在较强的非线性环节, 主要表现为节气门阀片轴在运动过程中受黏滞、库伦摩擦, 导致节气门动态时摩擦力变化不稳定, 同时回位弹簧的转矩变化不连续。因此电子节气门的非线性包括黏滞非线性、摩擦非线性和回位弹簧非线性等^[5]。其中, 回位弹簧的非线性影响较大, 其次是黏滞非线性和摩擦非线性。

节气门轴上设置两个回位弹簧, 在相反方向起作用, 以保证电子节气门在出现故障时仍能安全停车。考虑到回位弹簧存在非线性, 则其扭矩方程可表达为:

$$T_s = k_s(\theta - \theta_0) + D \operatorname{sgn}(\theta - \theta_0), \quad (4)$$

式中, k_s 为回位弹簧刚度系数; D 为回位弹簧扭矩系数补偿; θ_0 为平衡位置角度。

由于黏滞摩擦、库伦摩擦和静摩擦的影响, 电子节气门在工作时的响应受到较大影响, 若静摩擦在工作时不予考虑, 则摩擦力矩为:

$$T_f = k_d \omega + k_f \operatorname{sgn}(\omega), \quad (5)$$

式中, k_d 为黏性摩擦系数; k_f 为库伦摩擦系数。

当减速齿轮组工作时, 会产生一定的转动惯量, 但是由于该转动惯量和节气门阀的转动惯量较小, 故忽略不计, 则电机主轴的惯性力矩平衡方程为:

$$JN^2 \frac{d\omega}{dt} = NT - T_s - T_f, \quad (6)$$

式中 J 为电机主轴转动惯量。

电子节气门阀的转角 θ 等于角速度关于时间的积分, 则:

$$\theta = \int \omega dt. \quad (7)$$

由式 (1)、(2) 得:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} [E - (R_a + R_r)i - k_b N \omega]. \quad (8)$$

由式 (3) ~ (6) 得:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{JN^2} [k_t Ni - k_s(\theta - \theta_0) - D \operatorname{sgn}(\theta - \theta_0) - k_d \omega - k_f \operatorname{sgn}(\omega)]. \quad (9)$$

表 1 电子节气门的参数

Tab. 1 Parameters of electronic throttle

节气门参数	参数值
平衡位置角度 $\theta_0/(\circ)$	9
电源电压 E/V	12
电源内阻 R_r/Ω	0.5
电机电阻 R_a/Ω	3.5
电机电感 L/mH	1.77
反向电动势系数 $k_b/(V \cdot s \cdot \text{rad}^{-1})$	0.004 5
减速比 N	17.5
电机主轴转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.002 1
弹簧系数 $k_s/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	0.019 5
弹簧扭矩系数补偿 $D/(\text{N} \cdot \text{m})$	0.39
库伦摩擦系数 $k_f/(\text{N} \cdot \text{m})$	0.007
黏性摩擦系数 $k_d/[\times 10^{-6} (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})]$	5
电机扭矩系数 $k_t/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	0.045

2 电子节气门系统控制器设计

2.1 PID 控制基础

PID 控制算法是通过比例、积分和微分 3 个环节, 根据控制系统反馈的偏差信号 $e(t)$, 形成闭环以控制系统的稳定。偏差信号 $e(t)$ 设为目标信号 $r(t)$ 和实际输出信号 $y(t)$ 之差, 即 $e(t) = r(t) - y(t)$ 。

PID 的控制规律为^[8-9]

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt},$$

式中输出为 $u(t)$ 。

由于 PID 控制方法具有原理简单, 使用方便和适应性强等优点, 而被广泛应用于工业生产中。

2.2 模糊 PID 控制器设计

由于电子节气门系统中存在非线性弹簧、黏性摩擦和滑动摩擦、进气扰动及齿隙冲击等因素, 导致控制对象表现为较强的非线性系统, 使精度控制的难度提高。

电子节气门系统模糊 PID 控制器如图 3 所示, 节气门转角的偏差 $e(t)$ 及其偏差变化率 $de(t)/dt$ 为模糊控制器的输入, 通过模糊推理算法整定 PID 控制器的调整参数, 使系统保持稳定, 以提高系统响

应能力。整定的方法是根据系统的反馈偏差及其变化率,基于模糊规则,在线调节 PID 控制器的控制参数,以动态调节系统的稳定性。

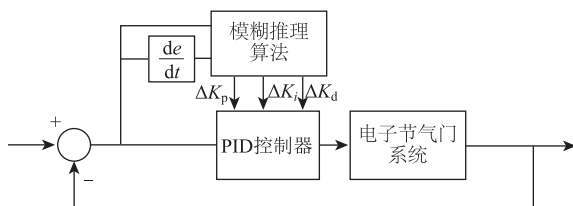


图 3 电子节气门系统模糊 PID 控制器

Fig. 3 Fuzzy PID controller for electronic throttle system

2.3 模糊免疫 PID 控制器设计

免疫系统是机体对生物性干扰的防御系统,能迅速感知抗原的入侵,并快速做出反应产生抗体。抗体和抗原结合后,会产生一系列反应,通过吞噬作用或特殊酶的作用来消除抗原的影响。免疫反馈控制是一种基于生物免疫系统的控制规律,具有自适应、自学习、鲁棒性好和抗干扰能力强等优点。

免疫系统的原理如图 4 所示,在人体的免疫系统中,淋巴细胞占重要地位,它是由胸腺中的 T 细胞和骨髓中的 B 细胞组成。当有外来抗原侵入时, T 细胞产生的淋巴因子首先获得信息,刺激 T 细胞分化为增强细胞和抑制细胞。增强细胞和抑制细胞共同作用于 B 细胞, B 细胞产生抗体和抗原,并相互结合并通过吞噬作用或者特殊酶的作用,将它们的结合物清除,以消灭抗原。当增强细胞比抑制细胞多时,增强细胞比抑制细胞刺激 B 细胞的作用强, B 细胞数量增多,抗体增加,免疫力提高。随着抗原的减少,抑制细胞比增强细胞刺激作用强, B 细胞数量减少,抗体减少,免疫力降低。

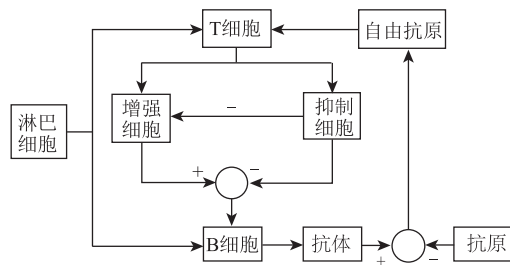


图 4 免疫系统原理

Fig. 4 Principle of immune system

免疫系统对外来抗原反应迅速,有很强的自适应能力,通过反馈以维持免疫系统平衡。根据前面所提到的免疫系统原理^[17-19],可做以下假设:

设第 k 代的抗原数量为 $\varepsilon(k)$, 抗原刺激后增强细胞 T_H 对 B 细胞的影响为 $T_H(k)$, 抑制细胞对 B 细

胞的影响为 $T_s(k)$, 则:

$$T_H(k) = k_1 \varepsilon(k), \quad (10)$$

$$T_s(k) = k_2 f(\Delta s(k)) \varepsilon(k), \quad (11)$$

式中, k_1 为激励因子, 符号为正; k_2 为抑制因子, 符号为正; $f(\cdot)$ 为抑制细胞的抑制量, 是一个非线性函数, 它的输出限制在 $[0, 1]$ 。

由式 (10)、(11) 得 B 细胞接受的总刺激为:

$$S(k) = T_H(k) - T_s(k) = (k_1 - k_2 f(\Delta s(k))) \varepsilon(k).$$

(12)

免疫系统和控制系统之间的相互对应关系, 如表 2 所示。对于 PID 控制器的比例环节, 其调节规律为:

$$u(t) = K_p e(t). \quad (13)$$

表 2 免疫系统与电子节气门控制系统的对应关系

Tab. 2 Corresponding relations of immune system and electronic throttle control system

免疫系统	控制系统
繁殖第 k 代抗原	系统的第 k 个采样时刻
第 k 代抗原的数量 $\varepsilon(k)$	第 k 个采样时刻给定的偏差 $e(k)$
第 k 代 B 细胞接受的总刺激 $S(k)$	第 k 个采样时刻的控制器的输出 $u(k)$

对于电子节气门系统, 需要具备其阀片在发动机的各工况 (尤其是过渡工况) 下响应速度快、跟随能力强且响应稳定等特点。本研究通过提高电子节气门的动态响应特性, 探讨电子节气门在发动机过渡工况下的精确控制, 以进一步改善发动机在各工况下的排放性能。通过免疫反馈算法, 在线调节影响控制系统响应速度的比例增益环节, 以提高被控系统响应特性。应用于电子节气门的免疫反馈机理的控制规律为:

$$u(k) = K[1 - \eta f(u(k), \Delta u(k))] e(k) = K_{PI} e(k), \quad (14)$$

式中, K 为快速反应系数; K_{PI} 为免疫反馈比例增益; $K_{PI} = K[1 - \eta f(u(k), \Delta u(k))]$; η 为增益。

根据免疫反馈算法机理, 可将免疫反馈算法引入 PID 控制器中, 用来控制系统中的比例增益, 以提高电子节气门控制系统的响应特性。由模糊控制算法求得式中的非线性函数 $f(\cdot)$ 。模糊免疫 PID 控制器的原理, 如图 5 所示, 其中比例增益环节用免疫反馈算法调整, 积分与微分增益环节通过模糊推

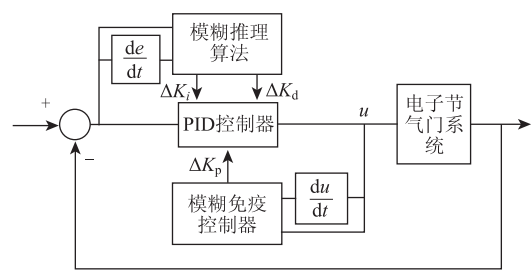


图 5 电子节气门系统模糊免疫 PID 控制器

Fig. 5 Fuzzy immune PID controller for electronic throttle system

理算法整定。免疫反馈环节的输入是 PID 控制器的输出量 u 及其变化率 Δu , 经免疫反馈算法确定 PID 控制器的比例增益环节的增量。模糊免疫 PID 控制器在非线性系统的应用过程中, 反应速度快, 鲁棒性好, 抗干扰能力强, 但在电子节气门系统控制中的应用, 还需进一步探索。

3 电子节气门控制系统仿真及结果分析

基于模糊免疫 PID 控制策略的电子节气门系统, 如图 6 所示。

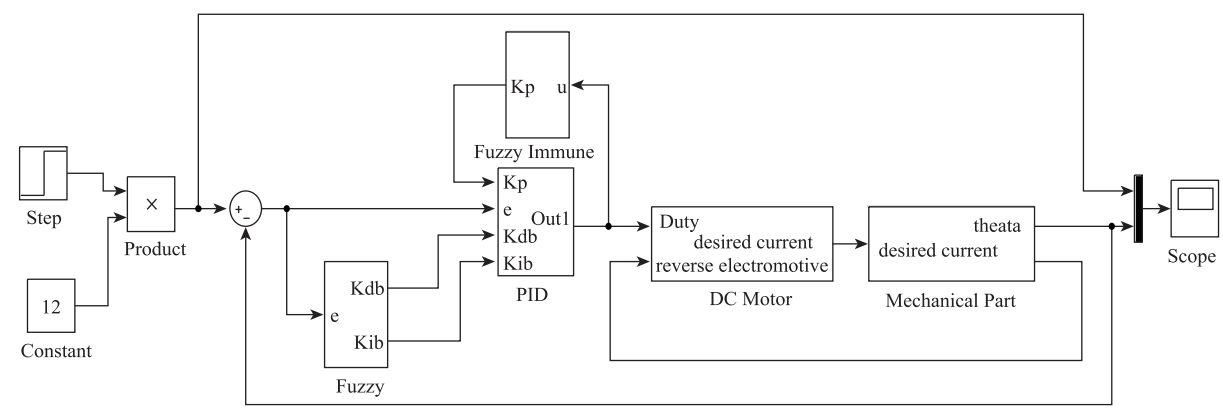


图 6 基于模糊免疫 PID 控制策略的电子节气门系统

Fig. 6 Electronic throttle system based on fuzzy immune PID control strategy

在不同控制方法下, 电子节气门系统响应特性如图 7 所示。3 种不同控制方法的电子节气门系统响应特性参数, 列于表 3。与 PID 控制电子节气门对比, 模糊 PID 控制方法的响应曲线上升时间延长 12.5%, 峰值时间缩短 10%, 调整时间缩短 35.7%; 对于模糊免疫 PID 控制电子节气门系统, 其响应特性曲线的上升时间缩短 18.75%, 峰值时间缩短 35%, 调整时间缩短 53.57%。由于系统的阻尼比较

大, 在后两种控制结果中, 超调量和振荡现象不明显。

表 3 电子节气门控制系统响应特性对比

Tab. 3 Comparison of response characteristics of electronic throttle control system

	PID	模糊 PID	模糊免疫 PID
上升时间/s	0.08	0.09	0.065
峰值时间/s	0.1	0.09	0.065
最大超调量/%	1.64	0	0
调整时间/s	0.14	0.09	0.065

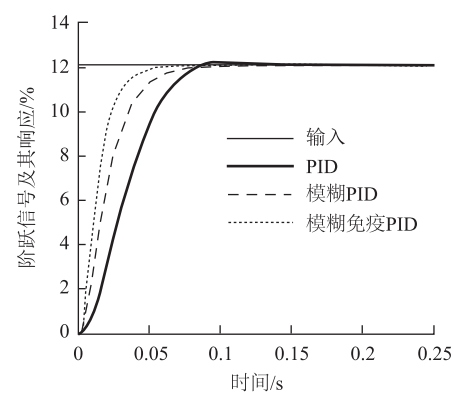


图 7 在不同控制方法下电子节气门响应特性

Fig. 7 Response characteristics of electronic throttle under different control methods

发动机在工作过程中, 大多数情况下是处于部分负荷工况的, 即由怠速工况过渡到部分负荷工况, 对于本研究涉及的 3 种电子节气门系统控制方法, 由怠速到部分负荷工况响应特性如图 9 所示, 即图 8 中方波信号的局部响应曲线。同时, 对于部分负荷工况时电子节气门系统响应特性参数, 列于表 4。

与 PID 控制方法对比, 模糊 PID 控制电子节气门系统的响应曲线上升时间延长 262.5%, 峰值时间延长 121.4%, 调整时间缩短 3.1%; 模糊免疫 PID 控制电子节气门系统响应曲线上升时间延长 37.5%, 峰值时间缩短 21.4%, 调整时间缩短 65.6%。

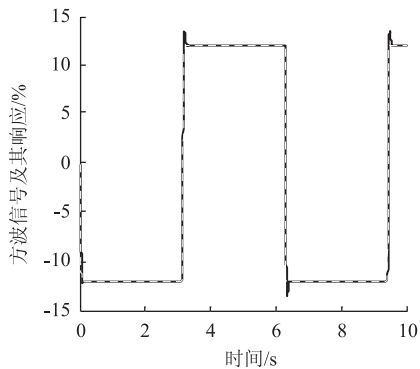


图 8 在不同控制方法下方波信号响应特性

Fig. 8 Square signal response characteristics under different control methods

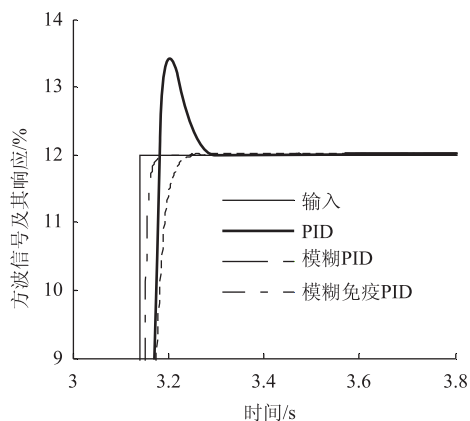


图 9 部分负荷工况下电子节气门响应特性

Fig. 9 Response characteristics of electronic throttle under partial load condition

表 4 部分负荷工况下电子节气门响应特性对比

Tab. 4 Comparison of response characteristics of electronic throttle under partial load condition

	PID	模糊 PID	模糊免疫 PID
上升时间/s	0.04	0.155	0.055
峰值时间/s	0.07	0.155	0.055
最大超调量/%	12.5	0	0
调整时间/s	0.16	0.155	0.055
振荡次数	1	0	0

由仿真结果可见,模糊免疫 PID 控制方法能够较好地适应电子节气门系统的非线性特点,控制系统响应特性较优,有利于节气门动态特性的提高,将改善发动机过渡工况下的排放性能。

4 结论

本研究为提高电子节气门系统的响应特性,利于发动机过渡工况的精确控制,基于免疫算法、模糊算法以及 PID 算法,对电子节气门的响应控制,

进行相应的理论研究与应用。

考虑电子节气门机电系统的非线性环节,面向节气门动态特性的提高,提出电子节气门模糊免疫 PID 控制算法。基于免疫反馈算法机理,控制 PID 系统中的比例增益,以提高电子节气门控制系统的响应特性。

与 PID 控制电子节气门系统动态响应特性对比,模糊 PID 控制响应的峰值时间延长 121.4%,调整时间缩短 3.1%;模糊免疫 PID 控制响应峰值时间缩短 21.4%,调整时间缩短 65.6%。可见,本研究提出的基于模糊免疫 PID 控制的电子节气门系统响应特性满足节气门在过渡工况下工作的需要,对发动机过渡工况下排放性能的改善是有利的。

参考文献:

References:

- [1] 王胜贤,白锐,王贺彬. 汽车电子节气门测控系统的设计及开发 [J]. 辽宁工业大学学报:自然科学版, 2016, 36 (4): 216-221.
WANG Sheng-xian, BAI Rui, WANG He-bin. Design and Development of Automotive Electronic Throttle Control System [J]. Journal of Liaoning University of Technology: Natural Science Edition, 2016, 36 (4): 216-221.
- [2] 谢有浩. 电动汽车增程器的电子节气门控制系统研究 [J]. 汽车技术, 2012 (7): 26-29.
XIE You-hao. Research on Research on Electronic Throttle Control System of Electric Vehicle Range Extender [J]. Automobile Technology, 2012 (7): 26-29.
- [3] 宛传平,张海涛,陈杰平,等. 基于 PID 控制的电子节气门设计与仿真 [J]. 滁州学院学报, 2012, 14 (5): 25-27.
WAN Chuan-ping, ZHANG Hai-tao, CHEN Jie-ping, et al. Control Design and Simulation of Electronic Throttle Based on the PID [J]. Journal of Chuzhou University, 2012, 14 (5): 25-27.
- [4] AGHABABA M P, KHANMOHAMMADI S, ALIZADEH G. Finite-time Synchronization of Two Different Chaotic Systems with Unknown Parameters via Sliding Mode Technique [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35 (6): 3080-3091.
- [5] WANG C H, HUANG D Y. A New Intelligent Fuzzy Controller for Nonlinear Hysteretic Electronic Throttle in Modern Intelligent Automobiles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (6): 2332-2345.
- [6] 刘尚,童亮,谢明伟,等. 汽车电子节气门 Back-

- stepping 滑模控制器设计 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17 (3): 114-120, 144.
- LIU Shang, TONG Liang, XIE Ming-wei, et al. Design of Back-stepping Sliding Mode Controller for Electronic Throttle [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17 (3): 114-120, 144.
- [7] 张邦基, 陈志强, 田阳, 等. 汽车电子节气门位置最优预见控制 [J]. 农业机械学报, 2017, 48 (4): 349-354.
- ZHANG Bang-ji, CHEN Zhi-qiang, TIAN Yang, et al. Optimal Preview Position Control for Automotive Electronic Throttle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48 (4): 349-354.
- [8] 秦洋洋, 吴光强, 郭晓晓. 基于拉盖尔函数的电子节气门模型预测控制研究 [J]. 汽车技术, 2017 (1): 33-37, 51.
- QIN Yang-yang, WU Guan-qiang, GUO Xiao-xiao. Model Predictive Control Study of Electronic Throttle Based on Laguerre Functions [J]. Automobile Technology, 2017 (1): 33-37, 51.
- [9] 臧怀泉, 曹学铭, 张乃斯, 等. 基于粒子群优化算法的模糊神经分数阶 PID 电子节气门控制器设计 [J]. 燕山大学学报, 2014, 38 (4): 354-360, 376.
- ZANG Huai-quan, CAO Xue-ming, ZHANG Nai-si, et al. Fuzzy Neural Network Fractional-order PID Control of Electronic Throttle Based on PSO Optimization Algorithm [J]. Journal of Yanshan University, 2014, 38 (4): 354-360, 376.
- [10] 李臣, 李兴虎, 晋杰. 半挂汽车列车转弯制动稳定性模糊控制 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (11): 147-152.
- LI Chen, LI Xing-hu, JIN Jie. Fuzzy Control of Tractor-semitrailer Cornering Braking Stability [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (11): 147-152.
- [11] 杨文臣, 张轮, 何兆成, 等. Matlab 与 VC++ 混合编程及其在交通信号两级模糊控制中的应用 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (9): 123-128.
- YANG Wen-chen, ZHANG Lun, HE Zhao-cheng, et al. Matlab & VC++ Hybrid Programming and Its Application in Two-stage Fuzzy Control for Urban Traffic Signals [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (9): 123-128.
- [12] 吴晓刚, 王旭东, 孙金磊, 等. ISG 型混合动力汽车粒子群优化模糊控制研究 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (6): 146-152.
- WU Xiao-gang, WANG Xu-dong, SUN Jin-lei, et al. Research on Particle Swarm Optimization Fuzzy Control for ISG Hybrid Electric Vehicle [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (6): 146-152.
- [13] 陈翔, 宋庆阳, 刘新成. 改进的模糊 PID 控制器对 4 自由度主动悬架振动控制的研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (2): 129-133.
- CHEN Xiang, SONG Qing-yang, LIU Xin-cheng. Research on Vibrating Control of 4-DOF Active Suspension with Improved Fuzzy PID Controller [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (2): 129-133.
- [14] 库硕, 丁达理, 黄长强, 等. 基于自适应模糊 PID 的 UCAV 姿态控制 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54 (20): 223-229.
- KU Shuo, DING Da-li, HUANG Chang-qiang, et al. Attitude Control of UCAV Based on Adaptive Fuzzy PID [J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54 (20): 223-229.
- [15] 侯丽春. 某型电子节气门 PID 模糊控制系统仿真分析 [J]. 汽车技术, 2015 (11): 44-46, 51.
- HOU Li-chun. Simulative Analysis of an Electronic Throttle PID Fuzzy Control System [J]. Automobile Technology, 2015 (11): 44-46, 51.
- [16] 胡云峰, 李超, 李骏, 等. 基于观测器的输出反馈电子节气门控制器设计 [J]. 自动化学报, 2011, 37 (6): 746-754.
- HU Yun-feng, LI Chao, LI Jun, et al. Observer-based Output Feedback Control of Electronic Throttles [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37 (6): 746-754.
- [17] 李洪斌, 张承瑞. 重型汽车电控气动离合器的模糊免疫 PSD 控制 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (3): 151-154.
- LI Hong-bin, ZHANG Cheng-rui. A Fuzzy Immune PSD Control Approach to Pneumatic Clutch of the Heavy Trucks [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (3): 151-154.
- [18] 孙涛. 基于模糊免疫自适应 PID 的智能控制算法的研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- SUN Tao. Study of Intelligent Control Algorithm Based on Fuzzy Immune Adaptive PID [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009.
- [19] 李俊林. 人工免疫算法在水下机器人运动控制策略中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39 (4): 192-194.
- LI Jun-lin. Artificial Immune Algorithm in the Application of the Underwater Robot Motion Control Strategy [J]. Ship Science and Technology, 2017, 39 (4): 192-194.