

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416083

基于 PSO 优化的插电式汽车电子节气门 NFTSM 控制*

孙建民^{1,2} 陈昊^{1,2} 杨世虎^{1,2} 栗雷敬^{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: 面对插电式汽车电子节气门系统存在非线性、参数不确定性以及进口气流扰动等问题,提出了一种基于粒子群算法(PSO)优化非奇异快速终端滑模控制(NFTSMC)的方法,以此提高节气门响应速度和跟随特性。首先考虑节气门零部件参数不确定性因素以及进气扰动,将系统扰动进行范围估计,并馈入到控制器中。然后利用 PSO 算法对 NFTSMC 进行参数整定,并根据李雅普诺夫第二定理进行稳定性证明。设计了插电式汽车阶跃信号和城市道路工况,PSO-NFTSMC 相比于 PSO-SMC 响应时间缩短了 82 ms,最大幅值跟随误差由 0.32° 降低到 0.005° ,最大误差值由 0.5° 减小到 0.004° 。证明了本文所提出的在 PSO-NFTSM 控制下插电式汽车电子节气门系统响应速度更快,跟随误差更加符合预设效果。该方法的提出与应用为提高插电式汽车发动机的燃烧和排放效率,以及提升车辆动力性能提供了一定参考。

关键词: 插电式汽车;电子节气门;非线性;非奇异快速终端滑模;粒子群算法

中图分类号: U467.3;TP273;TN47 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.2010

NFTSM control of plug-in automotive electronic throttle based on PSO optimization

Sun Jianmin^{1,2} Chen Hao^{1,2} Yang Shihu^{1,2} Li Leijing^{1,2}

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Beijing Key Laboratory of Service Performance Assurance of Urban Rail Transit Vehicles, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to improve the throttle response speed and the following characteristics, a particle swarm optimization (PSO) based method was proposed to optimize the non-singular fast terminal sliding mode control (NFTSMC) in plug-in automotive electronic throttle system. Firstly, considering the parameter uncertainty of throttle components and the intake disturbance, the system disturbance is estimated and fed into the controller. Then the parameters of NFTSMC are adjusted by PSO algorithm, and the stability is proved according to Lyapunov's second theorem. Compared with PSO-SMC, the response time of PSO-NFTSMC is reduced by 82 ms, the maximum value following error is reduced from 0.32° to 0.005° , and the maximum value of error is reduced from 0.5° to 0.004° . It is proved that the proposed plug-in automotive electronic throttle system under the control of PSO-NFTSM has faster response speed and more consistent with the preset error. The proposal and application of this method provide a reference for improving the combustion and emission efficiency of plug-in vehicle engines and improving the dynamic performance of vehicles.

Keywords: plug-in vehicle; electronic throttle valve; nonlinearity; non-singular fast terminal sliding mode; particle swarm optimization

0 引言

随着社会对于车辆排放量和能源利用率的越发重视。

国内外汽车厂在新能源汽车上增大了研发力度^[1-2]。插电式混动系统(plug-in hybrid power system, PHEV)能够进一步提高在不同工况运作下的能源利用率,减少污染排

收稿日期:2024-05-21

* 基金项目:国家自然科学基金(51605023)、北京市教委科研项目(SQKM201810016015)、北京建筑大学研究生创新项目(PG2024140)资助

放^[3]。典型的插电式混动系统,不同于传统的串/并联式混动汽车。插电式汽车避免了在低速和频繁启停工况下,发动机效率低下的问题;解决了在高速行驶下发动机供电能源转换时的损失;解决了燃油车排放污染的问题。现如今车型例如:比亚迪 DM-i 超级混动技术、本田雅阁 PHEV、上汽荣威 550,都应用了混联混动系统,市场和人们的需求促使着混合动力汽车快速发展^[4]。当下如何使插电式汽车进一步提高能源利用率、增强其动力性能是需要深入探讨的新问题。

电子节气门控制系统 (electronic throttle control, ETC) 是一类复杂的非线性控制系统^[5]。对于混合动力汽车来说,节气门开度大小不再直接取决于油门踏板的开度,而是由整车控制器,结合车辆状态运算得来。ETC 通过驱动直流电机以此带动节气门阀体转动其通过改变发动机进气气流效率,以此提供更好的燃油经济性、更少排放污染、更佳的动力性能^[6]。由此可见,电子节气门的精确控制显得尤为重要。

随着混动汽车的发展,对于插电式电子节气门控制策略国内外大量研究并且取得了许多杰出成果。其中,最为普遍的就是传统比例积分微分控制 (proportion integration differentiation, PID) 和滑模控制 (sliding mode control, SMC), 相较于传统 PID 控制滑模控制更能应对插电式汽车电子节气门参数不确定和未知干扰等非线性因素, 拥有较强的鲁棒性。文献[7-8]提出了自适应滑模控制方法 (adaptive sliding mode, ASM) 有效的降低了滑模控制的超调量问题, 提高了节气门系统的稳定性, 但其响应速度较慢, 影响插电式汽车的能源利用率。文献[9-10]分别提出了终端滑模和连续滑模的控制方法 (terminal sliding mode, TSM) 使节气门系统在有限时间收敛, 缩短了响应时间, 但响应速度仍然未达到预定效果, 抖振现象较为严重。文献[11]设计了基于观测器的连续终端滑模控制 (continuous terminal sliding mode, CTSM), 利用高阶滑模控制主要减少了滑模控制的抖振现象使节气门运动更加平稳, 但建模时存在着奇异点问题。文献[12]为了解决滑模控制存在的奇异点问题, 提出了非奇异终端滑模 (non-singular terminal sliding mode, NTFSM) 控制方法, 提升了节气门系统的暂稳态性能。但由于制造和磨损的问题, 节气门参数难以确定, 并且每辆插电式汽车电子节气门的参数都有着些许的不同。文献[13]利用自适应的方法改善节气门参数不确定性, 提出了递归终端滑模 (recursive terminal sliding mode, RTSM) 自适应跟踪策略, 减少了参数不确定性带来的干扰, 减少抖振现象, 但响应速度和跟随特性仍有待提高。随着社会智能化的发展, 模糊控制、神经网络控制相互结合的方法优化节气门控制, 例如文献[14], 其原理是: 鲁棒自适应神经模糊推理控制系统, 利用自适应的方法优化神经网络中的参数以此达到在变速状态下良好的控制性能, 但是这种严重依赖于人为设定的智能化规则

判断影响了控制性能, 并不能达到最优控制。滑模控制具有抗干扰能力强的特点, 将其与 PSO 算法优化相结合, 以拥有强抗干扰能力和快速响应速度。进而实现最佳动态性能, 同时获得优秀的跟随特性, 使插电式汽车内部达到最佳空燃比, 从而在增加插电式汽车动力性能的同时减少能源损耗。

基于上述综合分析, 本文提出了一种基于粒子群 (particle swarm optimization, PSO) 算法优化非奇异快速终端滑模 (nonlinear fast terminal sliding mode control, NFTSMC) 策略。通过分析建立插电式汽车电子节气门的数学模型, 考虑了电子节气门的各种非线性和不确定性因素, 利用 PSO 算法优化 NFTSMC 控制器参数, 能够有效的提高系统的响应速度, 并减小扰动带来的误差和抖振。

1 插电式汽车电子节气门数学模型

典型的插电式混合动力车辆如: 比亚迪唐 DM 电子节气门如图 1 所示。



图 1 比亚迪电子节气门

Fig. 1 Byd electronic throttle

其主要由: 节气门、驱动电机、齿轮组、节气门阀片、复位弹簧、位置传感器等组成。结构简图如图 2 所示。在混合动力汽车动力系统中, 主要通过改变气流流量大小来保证发动机的工作效率。

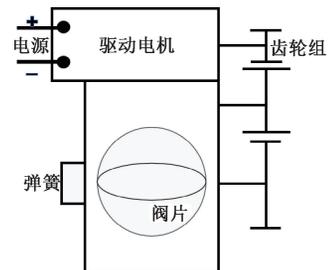


图 2 电子节气门结构

Fig. 2 Electronic throttle structure

节气门在电机驱动力矩、齿轮粘性摩擦力矩、库伦力矩、弹簧扭转力矩和进气气流扰动产生的不平衡力矩的作用下转动。由于存在一系列非线性不确定因素的影响, 对于电子节气门的精确建模变得十分困难。在实际工程中通

常分别构建直流电机的微分方程和描述执行机构的机械特性的微分方程,不仅如此还要考虑部件老化和磨损的情况。

1.1 插电式汽车电子节气门电路模型

插电式汽车 ECU 工作原理如下:驾驶员踩下加速踏板,踏板传感器得出期望角度,并传送到微控单元(microcontroller unit, MCU),驱动电机驱动齿轮组转动,改变节气门阀片角度,节气门开度由角度传感器测量得出,反馈到 ECU,接着与期望角度对比,计算出误差,进行后续控制以减小误差。

基于基尔霍夫定律,电机电流回路方程为:

$$K_v \omega_m + R_a i + L \frac{di}{dt} = U \quad (1)$$

电机输出转矩为:

$$T_1 = K_1 i \quad (2)$$

式中: U 为直流电机输入电压; L 和 R_a 分别为电机电感和电阻; T_1 为电机输出总转矩; K_v 和 K_1 分别代表电机反电动势常数、电机扭矩系数; i 为电路电流; ω_m 为电机转动角速度。

1.2 插电式汽车电子节气门运动学模型

插电式汽车电子节气门系统主要包括了齿轮间隙摩擦扭矩、复位弹簧扭矩、进气扰动 3 个非线性因素。在长时间使用导致节气门零部件磨损老化等不确定因素的条件下,建立微分方程。

根据牛顿第二定律建立节气门运动学方程:

$$J_e N^2 \omega_m + T_{sp} + T_f + T_L = T_m \quad (3)$$

式中: T_m 、 T_f 、 T_{sp} 、 T_L 分别为电机总转矩、齿轮总摩擦转矩、复位弹簧转矩、进气气流扰动转矩; J_e 为节气门阀片转动惯量; N 为齿轮比。

其中齿轮间隙摩擦扭矩和复位弹簧扭矩方程分别表示为:

$$T_{sp} = K_{sp}(\theta - \theta_0) \quad (4)$$

$$T_f = K_f \omega + K_c \operatorname{sgn}(\omega) \quad (5)$$

式中: ω 为节气门阀片转动角速度; K_{sp} 、 K_f 、 K_c 分别为复位弹簧扭矩系数、齿轮间隙粘性摩擦系数、齿轮库伦摩擦系数。

考虑到式(1)中的电机电感 L 很小,会导致其时间常数小于系统采样时间,因此通常将其忽略不计取 $L = 0$ 。结合式(1)~(5),则电子节气门系统可表示为:

$$J_e N^2 \ddot{\theta} + \frac{N^2 K_1 K_v}{R_a} \dot{\theta} + K_{sp}(\theta - \theta_0) + K_f \dot{\theta} + K_c \operatorname{sgn} \dot{\theta} - T_L = \frac{NK_v U}{R_a} \quad (6)$$

1.3 考虑参数不确定性的插电式汽车电子节气门模型

考虑插电式汽车部件生产时的偏差,使用时磨损,以及零部件老化等原因带来的参数不确定性。将式(6)变为:

$$\alpha_1 \ddot{\theta} + \alpha_2 \dot{\theta} + \alpha_3(\theta - \theta_0) + \alpha_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) - T_D = U \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \beta_1 + \beta_{10} \\ \alpha_2 = \beta_2 + \beta_{20} \\ \alpha_3 = \beta_3 + \beta_{30} \\ \alpha_4 = \beta_4 + \beta_{40} \end{cases} \quad (8)$$

其中, β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 分别可以由系统标定的参数值求得。

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{J_e N R_a}{K_v} \\ \beta_2 = \frac{NK_1}{R_a} + \frac{K_f R_a}{NK_v} \\ \beta_3 = \frac{K_{sp} R_a}{NK_v} \\ \beta_4 = \frac{K_c R_a}{NK_v} \end{cases} \quad (9)$$

其中,由气流扰动导致的 $F_D = \frac{T_L R_a}{NK_v}$, β_{10} 、 β_{20} 、 β_{30} 、 β_{40}

分别为节气门由磨损和老化带来的参数扰动量。定义新的扰动变量 df :

$$df = F_D - \beta_{10} - \beta_{20} - \beta_{30} - \beta_{40} \quad (10)$$

根据式(7)~(10)可得: $\beta_1 \ddot{\theta} + \beta_2 \dot{\theta} + \beta_3(\theta - \theta_0) + \beta_4 \operatorname{sgn} \dot{\theta}$

$$\dot{\theta} = U + df$$

定义系统状态变 x_1 、 x_2 分别为节气门阀片转动角度和角度的导数,表达式为:

$$\begin{cases} x_1 = \theta \\ x_2 = \dot{\theta} \end{cases} \quad (11)$$

联立式(10)、(11)可得电子节气门状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1 x_2 + bu + a_2(x_1 - \theta_0) + a_3 \operatorname{sgn}(x_2) + df \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{式中: } a_1 = -\frac{K_v K_1}{R_a J_e} - \frac{K_f}{J_e N^2}, a_2 = -\frac{K_{sp}}{J_e N^2}, a_3 = -\frac{K_c}{J_e N^2}, b = \frac{K_v}{J_e N R_a}。$$

在电子节气门系统中由于扰动和非线性因素导致 df 难以精确控制。基于上述分析有可能引起扰动的量分别是:1)由于测量和制造偏差以及使用老化导致节气门转动阀片转动惯量 J_e 产生大小变化。2)由于使用老化导致电机电阻 R_a 会发生变化。3)由于气流扰动难以估计,与进气量、节气门开度有关。

文献[15]提到了用不同方法解决不同模型条件下参数不确定的问题。本文对于总扰动 df , 做了如下假设:

假设 1:系统总扰动 df 有界,且存在一个实数 σ 使得 $df \leq \sigma$ 。

在本文中,ETC 的设计应确保在未知模型不确定参数的条件下和非线性扰动的情况下,实际节气门阀片转动角度 θ 能够紧密的跟踪期望转动角度 θ_d 。并且要有良好的暂稳态系数,即无超调量,较快的响应速度,稳态误差小等

特点。此外对于不确定性因素,系统应有较强的鲁棒性。

2 插电式汽车电子节气门控制器设计

本文控制器设计的目的是使插电式汽车电子节气门快速、准确且稳定的到达目标开度。基于上述 θ 为节气门实际旋转角度, θ_d 为节气门期望角度, e 为跟踪误差,得出 $e = \theta_d - \theta$ 。

2.1 插电式汽车节气门传统滑模控制

构造传统滑模面 s :

$$s = c(\theta_d - \theta) + (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (13)$$

式中: c 为滑模面参数,且 $c > 0$ 。

将滑模面求导并带入式(12):

$$s = c(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + (\ddot{\theta}_d - \ddot{x}_2) = c(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + [\ddot{\theta}_d - a_1x_2 - bu - a_2(x_1 - \theta_0) - a_3\text{sgn}(x_2) + df] \quad (14)$$

选取指数滑模趋近率,选取指数趋近率不但可以使运动状态以等速和指数两种速率到达滑模面,而且还可以提高系统的动态性能。趋近率为:

$$\dot{s} = -\epsilon e \text{sgn}(s) - ks \quad (15)$$

式中: ks 为指数项,能保证以较快的速度收敛到滑模面; $\epsilon e \text{sgn}(s)$ 为等速项,当 s 接近于 0 时,趋近速度是 ϵ 而不是 0,可以保证在有限时间内到达滑模面。

将式(15)带入到式(14)中得:

$$u = \frac{1}{b}[\ddot{\theta} + c(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) - a_1\dot{\theta} - a_2(\theta - \theta_0) - a_3\text{sgn}(\dot{\theta}) + \epsilon e \text{sgn}(s) + ks - df] \quad (16)$$

在电子节气门系统中,由于本身惯性以及滞后性会使滑模态存在抖振现象并且主要因为符号函数 $\text{sgn}(x)$,为减小抖振现象,实际控制中通常用饱和函数 $\text{sat}(x)$ 来代替。

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} \text{sgn}(s) & |s| > \Delta \\ \frac{s}{\Delta} & |s| < \Delta \end{cases} \quad (17)$$

其中, Δ 称为“边界层”。 sgn 函数和 sat 函数如图 3、4 所示。

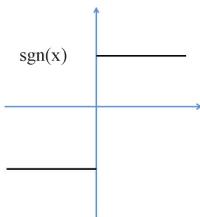


图 3 sgn 函数
Fig. 3 Sgn function

所以式(16)改写为:

$$u = \frac{1}{b}[\ddot{\theta} + c(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) - a_1\dot{\theta} - a_2(\theta - \theta_0) - a_3\text{sgn}(\dot{\theta}) + \epsilon e \text{sat}(s) + ks - df] \quad (18)$$

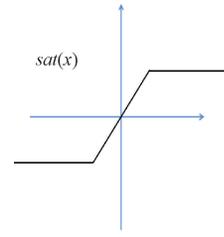


图 4 sat 函数
Fig. 4 Sat function

2.2 插电式汽车节气门非奇异快速终端滑模控制

为了提高插电式汽车电子节气门系统的控制精度和缩小响应时间。本节设计了一种非奇异快速终端滑模控制器(NFTSMC),其表达式为:

$$s = (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + \alpha(\theta_d - \theta) + \beta(\theta_d - \theta)^{\frac{p}{q}} \quad (19)$$

其中, α, β 为正数, p, q 为奇数 $1 < \frac{p}{q} < 2$, 只有当滑模面中没有负指数项时才可以避免控制器的奇异性问题。相比于传统滑模面, NFTSMC 滑模面增加了 $\beta(\theta_d - \theta)^{\frac{p}{q}}$ 一项,减少了响应时间,提高了控制精度。

对滑模面式(19)求导得:

$$\dot{s} = \ddot{e} + \alpha\dot{e} + \beta\frac{p}{q}e^{\frac{p}{q}-1}\dot{e} \quad (20)$$

联立式(12)、(15)则非奇异快速终端滑模控制器为

$$u = \frac{1}{b}[\ddot{\theta} + \alpha\dot{e} + \beta\frac{p}{q}e^{\frac{p}{q}-1} + \epsilon e \text{sat}(s) + ks - a_1x_2 - a_2(x_1 - \theta_0) - a_3\text{sgn}(x_2) - df] \quad (21)$$

2.3 粒子群优化

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是一种基于群体智能的优化算法,其主要思想就是通过模仿鸟、鱼群等生物群体的活动,来寻找最优解。其拥有较强的全局搜索能力,适用于插电式汽车电子节气门这种非线性模型中。

即设在 D 维空间中,存在 N 个粒子,每个粒子都代表一个可能的最优解^[16]。

第 i ($i = 1, 2, \dots, N$) 个粒子的位置为 x_i , 速度为 v_i , 粒子速度和位置更新公式为:

$$\begin{cases} v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (P_{best}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (g_{best}^t - x_{id}^t) \\ x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \end{cases} \quad (22)$$

式中: ω 为惯性权重; t 为实时迭代步数; c_1 和 c_2 为学习因子; r_1 和 r_2 为 0~1 之间的随机因子; $d = 1, 2, \dots, D, i = 1, 2, \dots, N$ 。

粒子群优化流程图如图 5 所示。

其中, P_{best} 和 g_{best} 表示粒子的个体极值和群体极值,粒子根据 P_{best} 和 g_{best} 不断更新自身的位置和速度,从而寻找全局最优解^[17]。

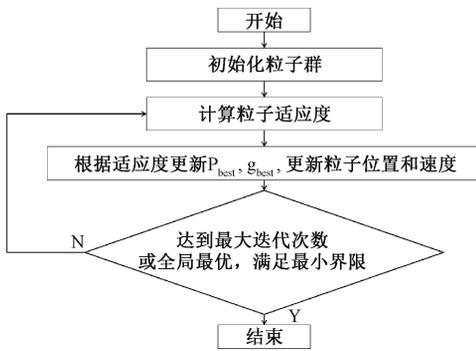


图 5 PSO 流程优化图

Fig. 5 PSO process optimization diagram

本文提出应用粒子群算法时用来实时改变 NFTSM 控制器参数,以此来改善插电式汽车电子节气门的暂稳态性能。本文所提出的改进的粒子群算法是通过实时改变惯性权重平衡算法的全局搜索能力,研究表明,惯性权重的值越大,粒子群算法的全局搜索能力越强,反之,其局部搜索能力越强。首先定义两个变量系数。

进化系数 x :

$$x = \frac{g_{best}(t)}{g_{best}(t-1)} \quad (23)$$

式中: $g_{best}(t)$ 为当前迭代寻优步数下群体极值; $g_{best}(t-1)$ 为上一迭代寻优步数下群体极值。

聚合系数 y :

$$y = \frac{g_{best}(t)}{\sum_{i=1}^M P_{ibest}(t)} \quad (24)$$

式中: $P_{ibest}(t)$ 为第 i 个粒子当前迭代寻优步数的个体极值。

粒子群在迭代更新过程中,进化系数可以用来表示粒子群的迭代更新速度,当其数值较小时,说明粒子群的迭代更新速度较快,反之,说明种群迭代更新已经停止或已找到最优解。聚合系数可以反映粒子群的分散程度,其值越小,说明粒子群越分散,反之,说明粒子群聚集在一点,迭代结束。本文中进化系数和聚合系数取值范围为 $0 \sim 1$ 。

建立惯性权重 ω 与两个变量的函数关系:

$$\omega = f(x, y) \quad (25)$$

当 x 较小时,粒子群的迭代更新速度快,即算法可以在大范围内全局收缩,可以取较大的惯性权重,反之当粒子群迭代更新速度较慢时,可以减小惯性权重的取值,从而增强粒子群的局部搜索能力;当 y 较小时,说明粒子群较为分散,可以减小惯性权重的值,从而增加粒子群局部寻优能力,而当 y 较大时,可以通过增大惯性权重来调整粒子群的全局搜索范围。

综上可建立惯性权重与两个变量的关系, ω 与 x 呈反比,与 y 呈正比,并由此得到表达式:

$$\omega = \omega_0 - 0.4x + 0.2y \quad (26)$$

式中: ω_0 为初始惯性权重。

惯性权重的取值为 $\omega_0 - 0.4 < \omega < \omega_0 + 0.2$, 性权重的大小根据 x 和 y 的变化调整,以此提高算法性能。

2.4 滑模稳定性分析

为了证明插电式汽车电子节气门的滑模运动的可达性,存在性,稳定性做出如下分析:

基于 Lyapunov 第二定理判断系统的稳定性;当李雅普诺夫候选函数 $V(x) > 0$, 且 $\dot{V}(x) < 0$ 时,系统是渐近稳定的。定义 $V(x) = \frac{1}{2}s^2$ 。

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(-\epsilon \text{sat}(s) - ks) = -(\epsilon \text{sat}(s) + ks^2) \quad (27)$$

根据 sat 函数的性质可以得: $s \leq 0$ 时 $s \times \text{sat}(s) \leq s \times (-s)$; $s > 0$ 时 $s \times \text{sat}(s) > s \times s$ 。

所以式(25)可以近似为 $\dot{V} = -(\epsilon |s| + ks^2)$ 由于 ϵ, k 都为大于零的常数且 $s \neq 0$ 所以 $\dot{V} < 0$ 。所以传统滑模应用指数趋近率时系统是稳定的。

再对 PSO 优化 NFTSMC 的插电式汽车电子节气门进行稳定性分析;定义 $V(x) = \frac{1}{2}s^2$ 。

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(\dot{e} + \alpha e + \beta \frac{p}{q} e^{\frac{p}{q}-1}) = \beta \frac{p}{q} e^{\frac{p}{q}-1} (-\epsilon |s| - ks^2) \leq -\tau \quad (28)$$

其中, $\tau = \beta \frac{p}{q} e^{\frac{p}{q}-1} (\epsilon |s| + ks^2)$ 由于式中各参数都大于 0, 所以 $\dot{V} < 0$, 可以证明插电式汽车电子节气门旋转角度与期望角度之差收敛到零。根据上述定理判断基于 PSO 优化的 NFTSM 控制器是稳定的。

3 插电式汽车模拟仿真对比

为了验证 POS 优化的 NFTSMC 对于插电式汽车电子节气门的优化性能。在 MATLAB/Simulink 软件中搭建仿真模型。其中模型中需要设定的参数如下,通过实际测量以及查阅资料,得到参数取值如表 1 所示。

因为是插电式汽车电子节气门模型,所以避免了节气门过度频繁开闭的情况。电子节气门控制信号需要迅速、稳定且有良好的跟随特性,因此给予插电式汽车电子节气门阶跃信号以及常见工况,以验证 PSO 优化的 NFTSMC 控制器的性能优越。PSO 参数设置:种群数目 $M=200$ 、迭代次数 $N=50$ 、学习因 $c_1 = c_2 = 1.5$ 、初始惯性权重 $\omega_0 = 0.8$ 。经过 PSO 优化的 NFTSMC 参数分别为 $p = 15, q = 11, \alpha = 400, \beta = 6, \epsilon = 4000, k = 100$ 。对于上述提到的插电式汽车电子节气门制造时所形成的偏差、长使用时间导致零部件老化等原因引起的参数改变,和汽车行驶过程中,由于道路环境、空气流速、节气门开度的改变产生不同程度的气流扰动,在开始仿真时施加外部高频噪声信号。外部高频噪声设置为 $d(t) = 30\sin(0.2t) + 30\sin(0.1t)$ 。

表 1 电子节气门物理参数

表 2 不同控制器阶跃响应对比

Table 1 Physical parameters of electronic throttle

Table 2 Comparison of step response of different controllers

参数	数值
电机扭矩系数 $k_t/(N \cdot m \cdot A^{-1})$	0.022 1
粘滞摩擦系数 $k_d/(N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1})$	5×10^{-6}
库仑摩擦系数 $k_f/(N \cdot m)$	0.007
弹簧补偿系数 $D/(N \cdot m)$	0.385
弹簧刚度系数 $k_p/(N \cdot m \cdot rad^{-1})$	0.019 5
电机转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.002 2
传动比 N	21
反电动势系数 $k_a/(V \cdot s \cdot rad^{-1})$	0.055
电机内阻 R_a/Ω	3
电源内阻 R_r/Ω	0.6
电源电压 E/V	12
平衡位置角度 $\theta_0/(\circ)$	0.002 21

物理量	PSO-SMC	PSO-NFTSMC
上升时间/s	0.098	0.016
延迟时间/s	0.013	0.003

通常节气门开度不会完全打开,常开到 70° 左右,所以在 0.1 s 时节气门开度从 $0^\circ \sim 70^\circ$,以此来对比两种控制器控制下的插电式电子节气门动态性能。仿真结果如图 6 所示。

应时间在 98 ms ,而 PSO-NTSMC 的响应时间为 16 ms ,响应时间缩短了 82 ms 。由此可得,插电式汽车电子节气门在 PSO-SMC 的控制下到达稳态的速度,远不及 PSO-NFTSMC 的控制下迅速。

为了验证经过 PSO 优化后的 NFTSMC,在实际运行中优化了插电式汽车电子节气门的跟随特性,将 NFTSMC 控制器和 SMC 控制器在加减速工况下进行对比。当给予插电式电子汽车电子节气门由于参数不定和气流干扰等因素模拟出来的干扰后,其效果如图 8 所示,其数据如表 3 所示。

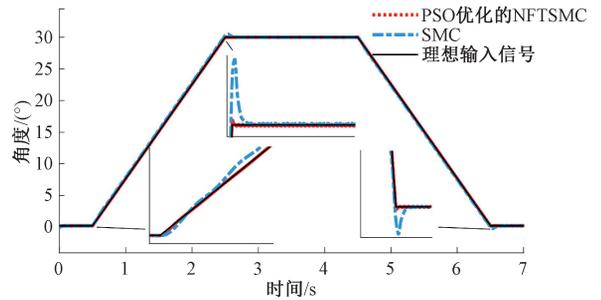
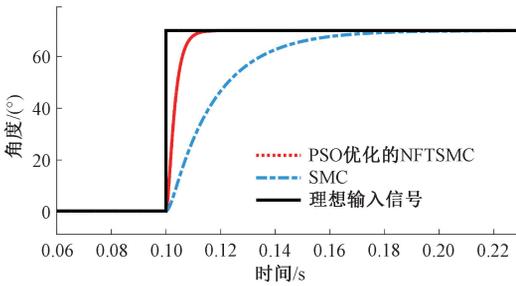


图 6 不同控制下的阶跃信号响应曲线

图 8 不同控制器施加干扰相应对比图

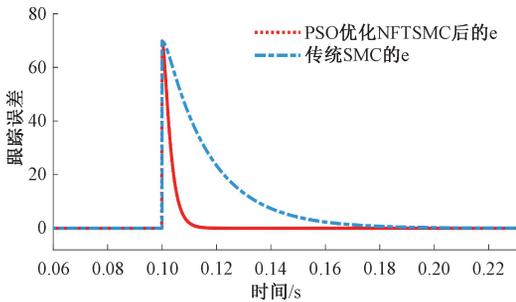
Fig. 6 Step signal response curves under different controls

Fig. 8 Corresponding comparison diagram of interference applied by different controllers

电子节气门系统在不同控制器下,阶跃到 70° 跟踪误差如图 7 所示。

表 3 不同控制器城市道路工况对比

Table 3 Comparison of urban road conditions with different controllers



物理量	PSO-SMC	PSO-NFTSMC
最大幅值/ $(^\circ)$	30.5	30.004
跟随误差/ $(^\circ)$	0.32	0.005

图 7 不同控制下追踪误差曲线

不同控制方法下的跟随误差分别为 0.32° 、 0.005° ;抑制超调方面,依然是本文设计的 PSO-NFTSMC 控制方法超调量小;响应速度方面,PSO-SMC 的响应时间比 PSO-NTSMC 的响应时间更短。进而验证了插电式汽车电子节气门在 PSO 优化的 NFTSMC 的控制下,响应更迅速、跟随误差更符合预设效果。

4 结 论

不同控制器阶跃信号响应特性对比如表 2 所示。仿真结果可以看出,由于滑模控制器抗干扰能力强,所以两个控制器基本并未出现较大超调量。PSO-SMC 的响

由于插电式汽车电子节气门在考虑零部件制造时的偏差和长时间使用后的部件老化及磨损等种种原因引起的非线性因素,本文选用 SMC 抗干扰能力强的特性减少不确定性因素,并在此基础上采取 PSO 算法优化 NFTSM 控制

器,最终得到最优的控制参数,提高了插电式汽车电子节气门的动态响应速度和动态性能,二者稳定性皆经过数学证明。

仿真结果表明 PSO-NFTSMC 响应速度更快,拥有更符合预期的跟随性能和控制效果,对插电式汽车发动机燃烧和排放,以及车辆动力性能提升具有一定参考意义。

参考文献

- [1] ZHANG Q, TIAN SH P. Energy consumption prediction and control algorithm for hybrid electric vehicles based on an equivalent minimum fuel consumption model[J]. Sustainability, 2023, 15(12), DOI:10.3390/SU15129394.
- [2] LI L, WANG X Y, SONG J. Fuel consumption optimization for smart hybrid electric vehicle during a car-following process [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 87: 17-29.
- [3] DU J Y, ZHANG X B, WANG T Z, et al. Batter degradation minimization oriented energy management strategy for plug-in hybrid electric bus with multi-energy storage system [J]. Energy, 2018, 165: 153-163.
- [4] XU X H, ZHU J P, YU H J, et al. Demand response and economic dispatch of power systems considering large-scale plug-in hybrid electric vehicles/electric vehicles (PHEVs/EVs): A review [J]. Energies, 2013, 6(9): 4394-4417.
- [5] 曹也. 基于串/并联构型的混联式混动系统整车控制策略研究[D]. 长春:吉林大学, 2019.
CAO Y. Research on vehicle control strategy of hybrid hybrid system based on series/parallel configuration[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [6] ASHOK B, ASHOK S D, KUMAR C R. Trends and future perspectives of electronic throttle control system in a spark ignition engine [J]. Annual Reviews in Control, 2017, 44: 97-115.
- [7] 姚崇,刘健美,龙云,等. 船用天然气发动机电子节气门自适应高阶滑模控制[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 239-247.
YAO CH, LIU J M, LONG Y, et al. Adaptive high order sliding mode control for marine natural gas engine electronic throttle [J]. Chinese Journal of Instrument, 2021, 42(11): 239-247.
- [8] WANG D P, LIU SH G, HE Y G, et al. Barrier Lyapunov function-based adaptive back-stepping control for electronic throttle control system [J]. Mathematics, 2021, 9(4): 326-350.
- [9] KAMAL S, MOENO J A, CHALANHA A, et al. Continuous terminal sliding mode controller [J]. Automatica, 2016, 69: 308-314.
- [10] 白吉. 电子节气门系统连续滑模控制研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
BAI J. Research on continuous sliding mode control of electronic throttle system [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [11] WANG H, SHI L H, MAN ZH H, et al. Continuous fast nonsingular terminal sliding mode control of automotive electronic throttle systems using finite-time exact observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 7160-7172.
- [12] 王艳敏,张伟琦,段广鑫,等. 电子节气门的连续非奇异终端滑模控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(7): 2127-2135.
WANG Y M, ZHANG W Q, DUAN G X, et al. Continuous non-singular terminal sliding mode control of electronic throttle [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(7): 2127-2135.
- [13] HU Y H, WANG H, HE SH P, et al. Adaptive tracking control of an electronic throttle valve based on recursive terminal sliding mode [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(1): 251-262.
- [14] ESKI I, YILDIRIM S. Neural network-based fuzzy inference system for speed control of heavy duty vehicles with electronic throttle control system [J]. Neural Computing & Applications, 2017, 28 (1): 907-916.
- [15] 孙传斌,王树波. 基于双滑模观测器的参数不确定系统抗扰与跟踪控制[J/OL]. 控制与决策, 1-8 [2024-07-01]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1770>.
SUN CH B, WANG SH B. Disturbance rejection and tracking control of parametric uncertain systems based on double sliding mode observer. [J/OL] Control and Decision, 1-8 [2024-07-01]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1770>.
- [16] 艾福强,包建东. 基于粒子群优化模糊 PID 控制的多足式真空吸附机器人控制方案设计[J]. 电子测量技术, 2023, 46(2): 67-72.
AI F Q, BAO J D. Control scheme design of multi-legged vacuum adsorption robot based on particle swarm optimization fuzzy PID control [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(2): 67-72.
- [17] 杨爱平,唐倩,阳小林,等. 基于神经网络与 PSO 算法的发动机装配工艺参数优化[J]. 现代制造工程, 2022(2): 105-113.
YANG AI P, TANG Q, YANG X L, et al. Optimization of engine assembly process parameters based on neural network and PSO algorithm [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(2): 105-113.

作者简介

孙建民(通信作者),教授,硕士生导师,主要研究方向为车辆性能优化与控制。

E-mail: Halchenhao@163.com

陈昊,硕士研究生,主要研究方向为车辆性能优化与控制。

E-mail:2628631227@qq.com