

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.001

基于双向伺服力反馈的电子节气门控制系统*

巩明德 田博 王辉
(吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025)

摘要: 针对目前电子节气门控制系统中存在的缺乏驾驶临场感、非线性和未建模动态不确定性等缺点,结合临场感主从遥操纵理论,提出基于双向伺服力反馈控制策略的电子节气门控制系统。驾驶员目标开度与节气门实际开度位置偏差经动态鲁棒补偿器控制电驱油门踏板角位移,使驾驶员感知反馈力;同时位置偏差通过基于等效控制的模糊滑模控制器控制电子节气门实际开度,使其准确跟踪目标开度。通过仿真验证了所设计的控制策略的有效性。试验采用电控六自由度驾驶模拟器,结果表明,所设计的电子节气门控制系统能够精确修正开度位置偏差,增强驾驶临场感,具有较强的鲁棒性和自适应性。

关键词: 电子节气门 控制系统 力反馈 鲁棒控制 滑动模态控制

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0001-06

Electronic Throttle Control System Based on Bilateral Servo with Force Feedback

Gong Mingde Tian Bo Wang Hui
(Institute of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: To eliminate the lack of driving tele-presence, the errors from nonlinearity and dynamic modeling uncertainty, the control algorithm based on the bilateral servo with force feedback and the theory of master-slave tele-manipulation was presented for electronic throttle system. The position deviation between ideal angle and real angle was used as input signal. The dynamic robust compensator controlled the accelerator pedal by-wire to make driver's perception of feedback force. The fuzzy sliding mode controller based on equivalent controlled the real angle of electronic throttle to track the ideal angle. The simulation presents effectiveness of the designed control algorithm. The experimental results on the electronic 6-DOF driving simulator show that the control algorithm can eliminate the position errors rapidly and accurately, provides driving tele-presence and enhances the robustness and adaptive ability.

Key words: Electronic throttle Control system Force feedback Robust control Sliding mode control

引言

线控技术广泛应用于车辆控制的各个方面^[1]。与传统的机械连接方式相比,通过传感器、微型计算机和电动机等元件实现的连接方式,具有高可靠性、高驱动性、高经济性及安装位置灵活等优点。然而由于缺少机械阻抗,也使得线控方式不能模拟和再现传统控制方式中驾驶员对车辆控制的感知能力,

即驾驶临场感。目前仅在线控转向系统和制动系统中考虑了驾驶临场感,如文献[2]提出的基于力临场感的车辆转向控制系统,将路况和车况信息通过力信号反馈给驾驶员,使驾驶员产生驾驶临场感;文献[3]提出基于双向线控反馈调节的车辆制动控制系统,主从端的电动机提供力觉临场再现,用于干扰观测器消除系统扰动,提高控制的准确性。

电子节气门控制系统(Electronic throttle control

收稿日期: 2012-03-07 修回日期: 2012-07-17
* 国家自然科学基金资助项目(50975118)和吉林大学科学前沿与交叉学科创新项目(200903168)
作者简介: 巩明德,教授,博士,主要从事遥操纵机器人技术和特种车辆设计研究,E-mail: gmd@jlu.edu.cn

system, ETCS)是控制发动机燃油消耗的重要组成部分。目前研究方向仍集中在节气门开度优化计算^[4]和开度位置跟踪控制两方面^[5],对于如何将线控技术与临场感技术相结合,使电子节气门系统具有驾驶临场感却鲜有报道。对此,本文结合临场感主从遥操纵理论,提出基于双向伺服力反馈的电子节气门控制系统。

1 系统模型的建立

电子节气门控制系统基本结构如图1。油门踏板和电子节气门作为系统的主端和从端,通过位置信号转换成为力信号反馈给驾驶员,最大程度地模拟和再现机械连接方式中驾驶员在踩踏油门踏板时感受到的反作用力,产生驾驶临场感。系统设计目的:在确保节气门实际开度精确跟踪目标开度的同时,能够实时、快速地反馈给驾驶员,使其感知节气门体的开度位置变化,实现力觉临场感驾驶。

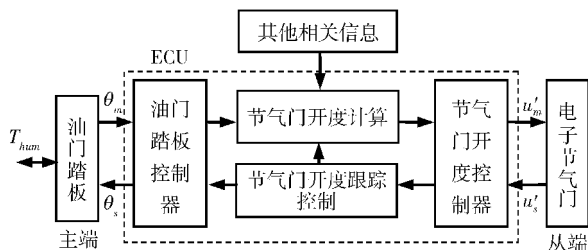


图1 电子节气门控制系统结构框图

Fig. 1 Structure of electronic throttle control system

控制系统主端为电驱油门踏板。通过电动机将位置信号转换为力信号,反馈给驾驶员;同时,角位移传感器把踏板角度信号和其它相关信息综合传递给车载计算机(ECU),计算目标开度位置,基本结构如图2。

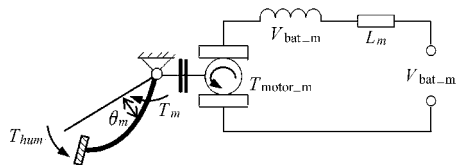


图2 电驱油门踏板系统

Fig. 2 Accelerator pedal by-wire system

为提高可靠性,油门踏板由扭矩弹簧提供复位扭矩,其弹性系数为 k_m 。直流电动机扭矩为 T_m 。根据扭矩平衡,油门踏板的运动学方程为

$$J_m \ddot{\theta}_m = T_{hum} - (T_m + k_m \theta_m) \quad (1)$$

式中 J_m ——油门踏板转动惯量

θ_m ——转动角度 T_{hum} ——踩踏转矩

电动机有效扭矩为

$$T_m = T_{motor_m} \eta = k_{t_m} i_m(t) \eta \quad (2)$$

式中 k_{t_m} ——电动机扭矩常数

i_m ——电动机电流

T_{motor_m} ——电动机名义扭矩

η ——联轴器传递效率,令 $\eta = 1$

根据基尔霍夫定律,直流电动机绕组回路的电压平衡方程为

$$R_m i_m(t) + L_m \frac{di_m(t)}{dt} + k_{b_m} \dot{\theta}_m = V_{bat_m} u_m(t) \quad (3)$$

式中 k_{b_m} ——电动机反电动势常数

L_m ——电动机电感 R_m ——电动机电阻

u_m ——占空比 V_{bat_m} ——电源电压

系统从端电子节气门由直流电动机、减速齿轮组、带有复位弹簧的节气门体及位置传感器等部件组成,如图3。复位弹簧使阀体在怠速或故障时留有一定开度 θ_0 ,确保少量空气进入发动机,使车辆能够缓慢行驶,当阀体开度在 θ_0 附近变化时,系统非线性明显^[6],节气门阀体力矩平衡方程为

$$J_s n^2 \ddot{\theta}_s = n k_{t_s} i_s(t) - T_f - T_s \quad (4)$$

其中

$$n = \theta'_s / \theta_s$$

式中 J_s ——节气门转动惯量

n ——齿轮传动比 T_s ——复位弹簧扭矩

θ'_s ——电动机旋转角度

θ_s ——油门阀体旋转角度

k_{t_s} ——扭矩常数 T_f ——摩擦扭矩

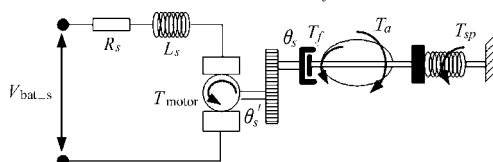


图3 电子节气门原理图

Fig. 3 Schematic of electronic throttle

气体流经阀体时,产生扭矩 $T_a = R_{af} F_a \cos \theta_s$, R_{af} 为名义半径, F_a 为作用力,则 T_f 和 T_s 分别为

$$T_f = k_{f_s} \text{sgn}(\dot{\theta}_s) + k_{f_s} \dot{\theta}_s + T_a \quad (5)$$

$$T_s = k_{sp_s} (\theta_s - \theta_0) + k_{pre} \text{sgn}(\theta_s - \theta_0) \quad (6)$$

式中 k_{f_s} ——库仑摩擦系数

k_{f_s} ——滑动摩擦系数

k_{sp_s} ——弹性系数

k_{pre} ——复位弹簧预紧力矩系数

将式(2)和式(3)代入式(1),忽略电枢电流的动态特性,整理得电驱油门踏板系统结构模型

$$\ddot{\theta}_m = \frac{1}{J_m} \left(-k_m \theta_m(t) + \frac{k_{t_m} k_{b_m}}{R_m} \dot{\theta}_m(t) - \frac{k_{t_m} V_{bat_m}}{R_m} u_m(t) + T_{hum} \right) \quad (7)$$

结合式(4)~(6),可得电子节气门系统结构模型

$$\ddot{\theta}_s = \frac{1}{J_s n^2} \left[- \left(\frac{n^2 k_{b-s} k_{t-s}}{R_s} + k_{f-s} \right) \dot{\theta}_s - k_{sp-s} (\theta_s - \theta_0) - k_{pre} \operatorname{sgn}(\theta_s - \theta_0) - k_{tf-s} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_s) + \frac{n k_{t-s} V_{bat-s}}{R_s} u_s(t) - T_a \right] \quad (8)$$

上述模型仅考虑了影响系统的主要非线性因素,但忽略了工作温度、气压、车辆行驶过程中振动等因素。因此,从端控制器的设计目的为:在未准确建模和动态扰动情况下,使从端开度能够准确跟踪目标开度,并实时、快速反馈给驾驶员,保证驾驶员对路况、车况的准确感知能力。

2 系统控制器设计

2.1 油门踏板控制器设计

油门踏板作为控制发动机牵引功率的重要组成部分,在车辆行驶过程中易受路况等外部因素影响,产生输入性干扰;电器元件的老化、元件对温度的敏感性等因素易产生参数干扰和结构干扰,导致对车辆控制的不准确。本文采用动态鲁棒补偿法^[7-8]设计油门踏板控制器,可以有效消除以上干扰,准确传递目标开度信号。

将驾驶员踩踏转矩视为负载转矩,电驱油门踏板传递函数为

$$G(s) = \frac{-\frac{k_{t-m} V_{bat-m} J_m}{R_m}}{s^2 + \frac{k_{t-m} k_{b-m}}{R_m} s - k_m} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (9)$$

其中

$$N(s) = -\frac{k_{t-m} V_{bat-m} J_m}{R_m}$$
$$D(s) = s^2 + \frac{k_{t-m} k_{b-m}}{R_m} s - k_m$$

采用等效干扰归零法消除系统干扰的影响,则控制器所调节的对象相当于参数恒定的系统。系统为理想线性时有

$$D(s)y^*(s) - N(s)u^*(s) = 0 \quad (10)$$

系统受不确定因素干扰时,其控制量 $u^*(s)$ 和输出量 $y^*(s)$ 产生变化, $\Delta u_1(s)$ 为 $u^*(s)$ 的变化量,这时

$$D(s)y(s) - N(s)u(s) \neq 0 \quad (11)$$

设等效干扰为

$$q(s) = \begin{bmatrix} D(s) & -N(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D(s) & -N(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta u_1(s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

归零因子传递函数为 $W_{qu}(s) = \frac{\Delta u_1(s)}{q(s)} = -1$,

归零因子环节 $K(s) = \begin{bmatrix} -\frac{D(s)}{N(s)} & 1 \end{bmatrix}$ 。

图 4 为带有低通滤波器 $F(s)$ 的动态鲁棒补偿油门踏板控制系统 Simulink 结构图。当系统参数变化时,将产生 $\Delta u_1(s)$,低通滤波器对不确定因素实施有效补偿,使 $\Delta u_1(s)$ 快速归零。本系统选用二阶低通滤波器,通频带截止频率 f 取 300。

$$F(s) = \frac{f^2}{(s+f)^2} \quad (13)$$

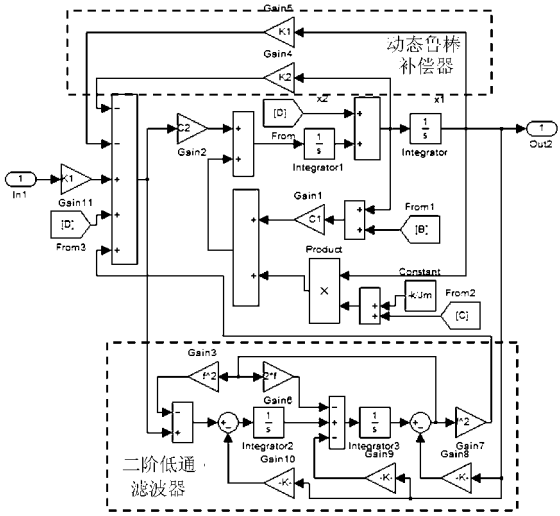


图 4 有动态鲁棒补偿器的控制系统 Simulink 结构图
Fig.4 Simulink structure of system with dynamic robust compensator

图 5 是正弦输入信号下,对 3 种主要干扰的补偿结果及误差。由仿真结果可知,补偿后的输出信号对控制信号有较好的跟踪性,误差明显减小,证明动态鲁棒补偿器对未知干扰具有良好的调节能力。

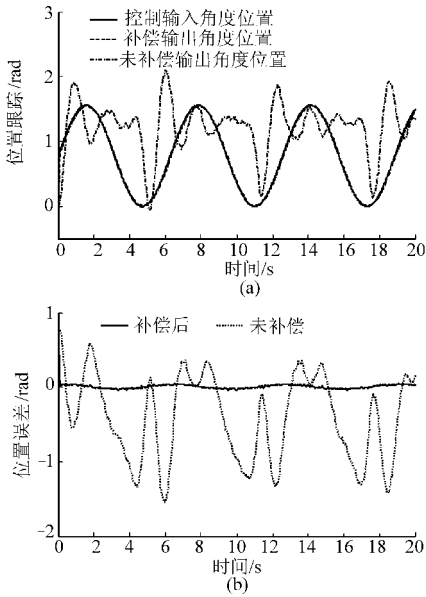


图 5 踏板控制器信号位置跟踪及误差结果
Fig.5 Position and error tracking of input signal for pedal controller

2.2 电子节气门控制器设计

电子节气门具有明显的非线性,不易采用动态鲁棒补偿器控制开度位置。当气体流经阀片产生瞬时剧烈变化或驾驶员操纵失误等极端情况时,节气门应能够在一定程度上补偿影响,保证阀体开度的稳定,避免引起事故。考虑到以上情况,电子节气门控制器应具有削弱非线性因素、较高的鲁棒性、跟踪性能良好等特点。

采用基于等效控制的模糊滑动模态控制策略^[9]。滑模控制具有响应快速、鲁棒性强等特点,然而容易使系统在滑模面上产生抖动。将模糊规则与滑模控制相结合,可以消除抖动。齿轮间隙对系统的非线性影响、式(8)中 $k_{f-s} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_s)$ 项和 T_a 项以及未建模动态不确定性合并表述为叠加干扰 $d^{[5]}$, 状态变量 $x_1 = \theta_s, x_2 = \dot{\theta}_s$, 阀体开度输出 $y = x_1 = \theta_s$, 系统状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_{sp-s}}{n^2 J_s} & \frac{R_s k_{f-s} + n^2 k_{b-s} k_{t-s}}{n^2 J_s R_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_{t-s} V_{bat-s}}{n J_s R_s} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{k_{pre} \operatorname{sgn}(x_1 - \theta_0) + k_{sp-s} \theta_0}{n^2 J_s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} d \quad (14)$$

$$f(x, t) = -\frac{k_{sp-s}}{n^2 J_s} x_1 - \frac{R_s k_{f-s} + n^2 k_{b-s} k_{t-s}}{n^2 J_s R_s} x_2 - \frac{k_{pre} \operatorname{sgn}(x_1 - \theta_0) + k_{sp-s} \theta_0}{n^2 J_s} \quad (15)$$

$$g(x, t) = \frac{k_{t-s} V_{bat-s}}{n J_s R_s} \quad (16)$$

系统跟踪误差为 $e = x_d - x = [e \quad \dot{e}]^T$, 则切换函数为 $s(x, t) = Ce = c_1 e + c_2 \dot{e}$ 。通过取 $\dot{s} = 0$, 可得 $\dot{s} = c_1 \dot{e} + \ddot{r} - f(x, t) - g(x, t)u(t) = 0$ 。其中, r 为控制信号。

等效控制器为

$$u_{eq} = \frac{1}{g(x, t)} (c_1 \dot{e} + \ddot{r} - f(x, t)) \quad (17)$$

为满足滑模到达条件 $s(x, t) \cdot \dot{s}(x, t) \leq -\eta |s|$, 切换控制器为

$$u_{sw} = \frac{1}{g(x, t)} \eta \operatorname{sgn}(s) \quad (18)$$

则滑模控制器为

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (19)$$

模糊规则: 当 $s(t) = 0$ 时, 模糊控制器为等效控制 u_{eq} ; 当 $s(t) \neq 0$, 模糊控制器为滑模控制 $u_{eq} + u_{sw}$, 即

If $s(t)$ is ZO then u is u_{eq}

If $s(t)$ is NZ then u is $u_{eq} + u_{sw}$

采用反模糊化方法, 模糊滑模控制器设计为

$$u = u_{eq} + \mu_{NZ}(s) u_{sw} \quad (20)$$

当 $\mu_{NZ}(s) = 1$ 时, 控制律为等效滑模控制; 当 $\mu_{NZ}(s) \neq 1$ 时, 通过隶属函数 $\mu_{NZ}(s)$ 的变化实现抖动的消除。针对系统的复杂性, 采用 S-函数编写功能模块, 其 Simulink 结构如图 6。

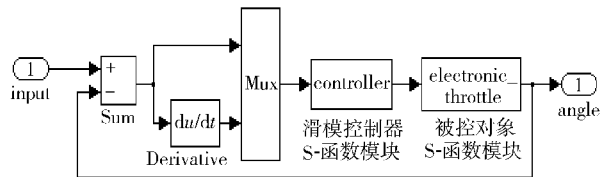


图6 电子节气门及控制器 Simulink 结构图

Fig.6 Simulink structure of electronic throttle and controller

仿真结果如图 7。可见, 经过等效控制的模糊滑模控制器消抖后, 削弱了非线性因素的影响, 提高了稳定性; 位置跟踪误差也得到极大削减(图 7b)。

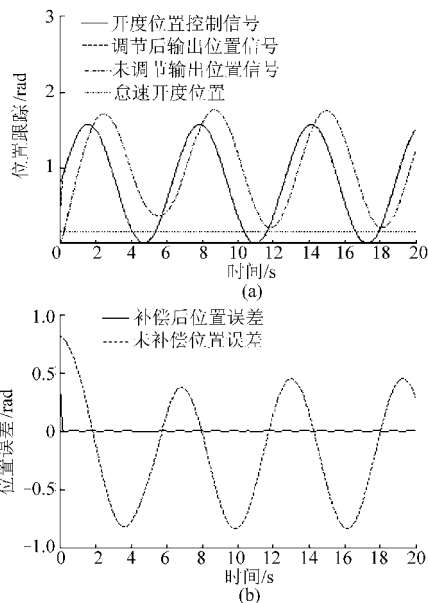


图7 节气门控制器信号位置跟踪及误差结果

Fig.7 Position and error tracking of input signal for throttle controller

3 控制策略仿真与试验

系统采用双向伺服力反馈控制策略^[10~11]: 目标开度与节气门实际开度的位置偏差, 经放大器通过主端的电动机和油门踏板转换成力信号, 实时反馈给驾驶员; 同时该偏差经从端控制器调节电子节气门开度, 使其精确跟踪主端目标开度, 实现驾驶员对车辆的力觉临场感驾驶。

采用 Matlab/Simulink 对双向伺服系统进行仿真, 验证控制策略在高频率低幅值和低频率高幅值

的目标开度信号控制下的鲁棒性、稳定性,以及电子节气门位置跟踪的准确性和响应的快速性。

电子节气门在 θ_0 附近存在非线性因素,本文采用在 θ_0 附近小幅值变化的高频正弦信号($f=1\text{ Hz}$, 5 Hz)测试系统对非线性的补偿及鲁棒性等, θ_m 为目标开度位置, θ_s 为节气门实际开度位置(下同)。图8表明,双向控制系统位置跟踪性能较好;能够有效消除外界与系统扰动,鲁棒性较好。随着频率的增加,系统稳定性、位置跟踪性能不变。

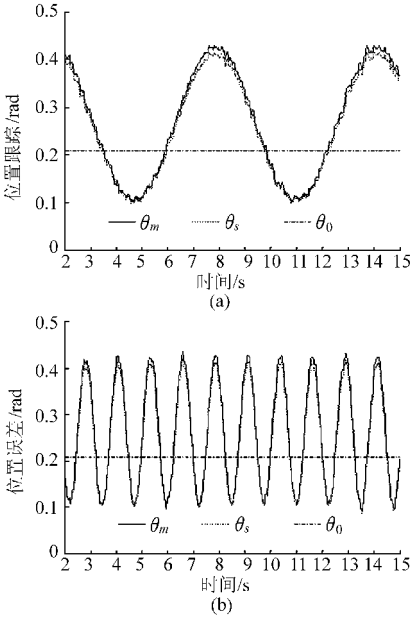


图8 不同频率低振幅系统正弦信号位置跟踪性能仿真结果

Fig. 8 Position tracking simulation for small scale signal at different frequencies

在低频高幅仿真试验中,采用频率为 0.1 Hz 和 0.2 Hz 的梯形波,结果如图9。结果表明,从端开度位置能够准确跟踪目标开度位置信号,鲁棒性和稳定性较好。

试验采用电控六自由度驾驶模拟器,角位移传感器分辨率为 0.09° ,线性度 $\pm 0.5\%$,采用IIR数字滤波器^[12]消除传感器受到的各种噪声干扰,改善ECU接收到的信号。图10为模拟器内的油门踏板。

主端控制器为动态鲁棒控制器,从端采用基于等效控制的模糊滑动模态控制器,目标开度经标定倍数^[13]放大后与实际开度相比较;记录反馈力幅值变化,与节气门开度位置变化相比较。试验人员驾驶电控六自由度驾驶模拟器,模拟实际驾驶特征,试验3种情况下(恒值开度、变值开度及从端受冲击开度)节气门开度位置的跟踪准确性和快速性。

恒值开度跟踪试验中,驾驶员控制油门踏板分别在不同时间段内保持角度恒定,从图11中可见,电子节气门开度位置基本保持在目标开度位置附

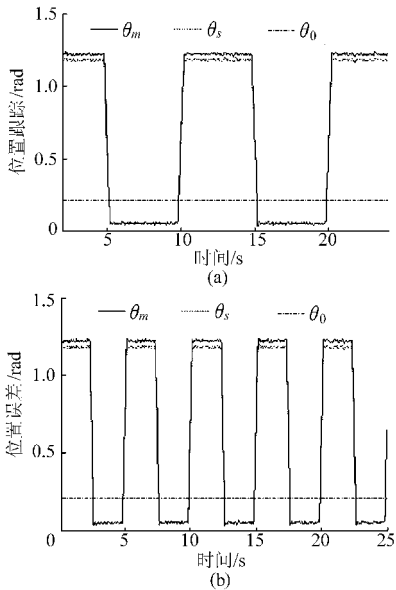


图9 不同频率高振幅系统梯形信号位置跟踪性能仿真结果

Fig. 9 Position tracking simulation for large scale signal at different frequencies

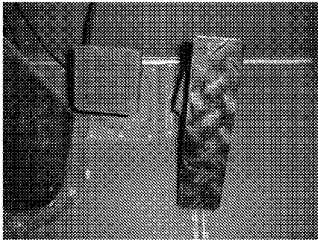


图10 驾驶模拟器油门踏板

Fig. 10 Accelerator pedal of driving simulator

近,仅有小幅波动。反馈力变化趋势与从端实际开度位置变化一致。变开度跟踪试验中,驾驶员连续踩踏油门踏板,不断改变其角度位置。图12表明,节气门开度能够快速跟踪驾驶员的目标开度信号,

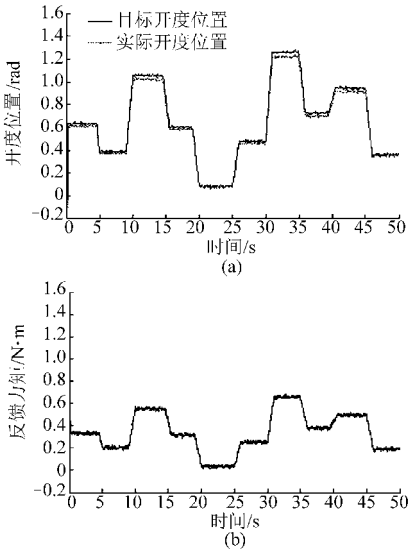


图11 恒值开度位置跟踪及反馈力矩试验结果

Fig. 11 Position tracking of constant angle and feedback force

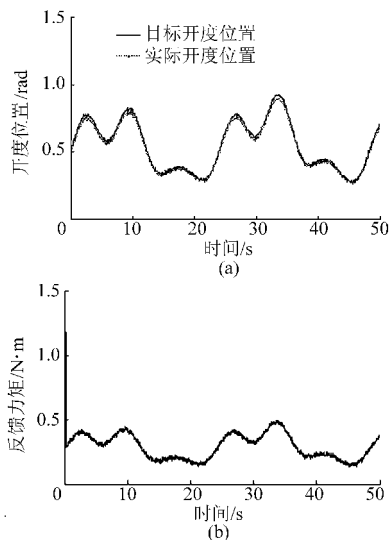


图12 变开度位置跟踪及反馈力矩试验结果

Fig. 12 Position tracking of changed angle and feedback force

扰动较小,主端反馈力跟随从端节气门开度变化。

从端受冲击开度跟踪试验中,系统节气门阀片在约12 s时突然受到剧烈气流的冲击,产生急剧变化的扰动扭矩,如图13。试验结果表明,双向伺服控制策略能够有效地消除阀片受到的外界扰动冲击,确保节气门实际开度准确跟踪目标开度位置;主端反馈力不会将从端的冲击反馈给驾驶员,确保操作的真实平顺。

试验结果表明,反馈力能够真实反应节气门实际开度位置变化,从端准确跟踪目标开度,主从端位置误差较小。在从端受到外界扰动冲击时,系统能够迅速有效地消除这种冲击,确保其不会传递给驾驶员。基于双向伺服力反馈的电子节气门控制系统能够提供驾驶临场感,具有较高的鲁棒性和实时性,确保驾驶员的驾驶感知能力。

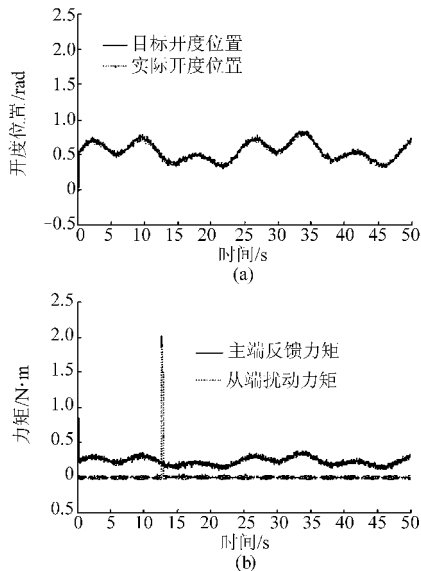


图13 从端受冲击开度位置跟踪及反馈力矩试验结果

Fig. 13 Position tracking of impact on slave side and feedback force

4 结束语

针对系统在高频率低幅值和低频率高幅值的控制信号情况下的性能进行了仿真,并对电子节气门系统双向伺服力反馈控制策略在3种典型工况下(恒值开度、变开度及从端受冲击开度)节气门开度位置的跟踪准确性和响应快速性进行了试验。

结果表明,所采用的动态鲁棒控制器和基于等效控制的模糊滑模控制器可以有效消除系统主要干扰,改善非线性,提高控制的准确度。电子节气门控制系统使驾驶员通过反馈力能够精确感受节气门开度位置的变化,有效地模拟和再现了机械连接方式中感受到的反作用力,具有驾驶临场感,确保驾驶员对车况的感知能力。

参考文献

- 1 Iles-Klumpner D, Serban I, Ristic M. Automotive electrical actuation technologies [C] // 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006.
- 2 Ogura Hiraku, Murakami Toshiyuki. Improvement of vehicle stability by reaction force control on accelerator pedal and steering wheel [C] // 2010 International Power Electronics Conference, 2010: 2 956 ~ 2 963.
- 3 Harsha A M, Abeykoon S, Ohnishi Kouhei. Implementation of pedal feeling for brake by wire system using bilateral control [C] // 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2008: 1 347 ~ 1 352.
- 4 Daniel McKay, Gary Nichols, Bart Schreurs. Delphi electronic throttle control systems for model year 2000; driver features, system security and OEM benefits. ETC for the mass market [C]. SAE Paper 2000-01-0556, 2000.
- 5 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 Yunfeng, Li Chao, Li Jun, et al. Observer-based output feedback control of electronic throttles [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(6): 746 ~ 754. (in Chinese)
- 6 Pan Yaodong, Ozguner Umit, Dageci Oguzhasan. Variable-structure control of electronic throttle valve [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(11): 3 899 ~ 3 907.
- 7 巩明德, 赵丁选, 冯汝扬. 电液伺服操纵机器人主-从位置控制器 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 189 ~ 193.
Gong Mingde, Zhao Dingxuan, Feng Ruyang. Master-slave position controller of electron-hydraulic servo telerobot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 189 ~ 193. (in Chinese)

- 7 Whitelaw J H, Xu H M. Cyclic variations in a lean burn spark ignition engine without and with swirl[C]. SAE Paper 950683, 1995.
 - 8 候圣智, 吕永, 詹樟松, 等. 基于特征矢量的汽油机缸内气流运动特性的研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 5~9.
Hou Shengzhi, Lü Yong, Zhan Zhangsong, et al. Eigenvector-based research on in-cylinder flow field of gasoline engines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 5~9. (in Chinese)
 - 9 郑振鑫. 内燃机缸内气流运动的评价与分析[D]. 天津: 天津大学, 2009.
Zheng Zhenxin. Evaluation and analysis for in-cylinder air motion of internal combustion engine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
 - 10 Ricardo plc. Steady state flow bench port performance measurement and analysis techniques[R]. Report DP93/0704, 1993.
 - 11 刘书亮, 宋飞舟. 汽油机滚动涡流模拟试验台和滚流进气道的试验研究[J]. 内燃机工程, 1995, 16(4): 1~9.
Liu Shuliang, Song Feizhou. An investigation of the steady flow test rig and inlet port for in-cylinder tumbling air movement in gasoline engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1995, 16(4): 1~9. (in Chinese)
-

(上接第 6 页)

- 8 王占林. 近代电气液压伺服控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- 9 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 10 巩明德, 赵丁选, 段秀兵. 力觉反馈的电液位置伺服控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 104~107.
Gong Mingde, Zhao Dingxuan, Duan Xiubing. Research of electro-hydraulic position servo with force-feedback[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1): 104~107. (in Chinese)
- 11 文广, 赵丁选, 唐新星, 等. 遥操作工程机器人力觉双向伺服控制系统[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(6): 919~923.
Wen Guang, Zhao Dingxuan, Tang Xinxing, et al. Bilateral hydraulic servo control system based on force sense for tele-operated engineering robot[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(6): 919~923. (in Chinese)
- 12 郭连. 汽车发动机电子节气门控制系统设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
Guo Lian. Design and research for electronic throttle control system of automobile engine[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- 13 于洪洋. 基于位置反馈控制的节气门控制系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
Yu Hongyang. Design of the electronic throttle control system based on position feedback[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)