

发动机调速史密斯预估定量反馈控制

吕良^{1,2} 胡云峰^{1,2} 官洵^{1,3} 洪金龙¹ 陈虹^{1,2}

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022;

2. 吉林大学通信工程学院, 长春 130022; 3. 密歇根大学工程学院, 安娜堡 48109)

摘要: 对于电机后置式及地面耦合式混合动力系统,在其换挡过程中,可以通过电机补偿动力中断,因此调节发动机转速与AMT变速箱转速匹配可以实现平顺的换挡过程。针对发动机调速特性引入基于定量反馈理论与史密斯预估器结合的控制方法。首先,在AMESim中搭建自然进气发动机高保真模型,并通过速度特性验证保证模型的合理性;其次,基于机理建立发动机线性模型,并且分段辨识得到参数的不确定范围,从而将非线性系统用具有参数不确定性的线性模型表示;然后,通过频域分析优化得到一组最佳的史密斯预估器模型,用以补偿发动机进气-扭矩过程不确定延迟;最后,结合史密斯预估器与定量反馈理论设计得到发动机调速SP-QFT鲁棒控制器,从而保证系统在参数不确定情况下的鲁棒稳定性及跟踪性能要求。仿真结果表明:所设计的SP-QFT控制器满足设计要求,相比于基本QFT控制器及PID控制器,有效提高了发动机速度调节的控制精度及响应速度。

关键词: 发动机; 速度控制; 定量反馈理论; 史密斯预估器; 进气-扭矩延迟; 不确定延迟

中图分类号: TK411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)02-0348-06

Smith Predictive Quantitative Feedback Engine Speed Control

LÜ Liang^{1,2} HU Yunfeng^{1,2} GONG Xun^{1,3} HONG Jinlong¹ CHEN Hong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China

2. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

3. College of Engineering, University of Michigan, Ann Arbor 48109, USA)

Abstract: For hybrid electric vehicles with traction motors installed behind transmission, traction motors can compensate the torque interrupt during gear shifting. Thus engine speed is adjusted to achieve the speed synchronization with AMT so that shifting smoothness is guaranteed without disengaging clutch. Quantitative feedback theory (QFT) combined with Smith predictor (SP) was adopted to achieve engine speed control. Firstly, a high realistic model of naturally aspirated gasoline engine was established in AMESim and the speed characteristic was validated to guarantee the reasonable features. Secondly, the engine nonlinear model was identified under piecewise working conditions so that several linear models with regions of parametric uncertainty were achieved. Thirdly, an optimized Smith predictor model was selected based on two criteria in frequency domain so as to deal with the intake-to-torque uncertain time delay. Finally, based on quantitative feedback theory, an engine speed SP-QFT robust controller was designed to guarantee the robust stability and reference tracking. The simulation results showed that the step responses between the minimum and maximum speeds were of 0.75% overshoot, 0.7 s settling time and 6 r/min steady state error which met the demands of performance requirements of the synchronizer engagement during gear shifting of AMT and obviously improved the system dynamic characteristics compared with QFT controller and PID controller. Moreover, the simple form of SP-QFT controller is convenient to implement in engineering.

Key words: engine; speed control; quantitative feedback theory; Smith predictor; intake-to-torque time delay; uncertain time delay

收稿日期: 2016-07-06 修回日期: 2016-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(61520106008, 61374046)

作者简介: 吕良(1991—),男,博士生,主要从事发动机建模与控制研究, E-mail: lvliangen@163.com

通信作者: 胡云峰(1983—),男,讲师,主要从事发动机建模与控制研究, E-mail: huyunfeng83125@126.com

引言

换挡品质是影响汽车驾乘舒适性及传动系统耐久性的主要因素。平顺的换挡过程可以减小传动系统的冲击,提高驾乘舒适性,而且可以减小磨损,延长传动系统的寿命,提高耐久性^[1-2]。对于电机后置式及地面耦合式混合动力系统,可以通过两步实现平顺的换挡过程。第一步,电机补偿换挡过程的动力中断;第二步,发动机主动调速,达到与 AMT 变速箱转速匹配。此时,无需离合器动作,便可实现平顺的换挡过程。因此,发动机调速控制的精度及响应速度直接影响换挡品质。

发动机调速过程呈现强非线性及不确定延迟的特点。针对该问题,国内外学者已通过如下几种方法实现发动机调速控制,但同时也存在各自的问题。文献[3-4]采用滑模变结构控制,文献[5]采用反步法控制,两种方法均采用文献[6]中扭矩产生的经验模型,其中需要离线辨识的参数过多,因此工作量过于繁重。文献[7-8]分别采用模糊 PID 及变参数 PID 控制,该方法避免了系统建模过程,而且工作可靠、结构简单,但控制效果有待提高。文献[9]采用模型预测控制,控制效果较好,但由于滚动优化计算量过大及实现成本过高,其工程应用价值有限。

本文引入基于定量反馈理论与史密斯预估器结合的控制方法。首先,在 AMESim 中搭建自然进气发动机高保真模型,并通过速度特性的验证保证模型的合理性;其次,基于机理建立发动机线性模型,并且分段辨识得到参数的不确定范围,从而将非线性系统用具有参数不确定性的线性模型表示;然后,通过频域分析优化得到一组最佳的史密斯预估器模型,用以补偿发动机进气-扭矩过程不确定延迟;最后,结合史密斯预估器及定量反馈理论设计得到发动机调速 SP-QFT 鲁棒控制器,以保证系统参数不确定情况下的鲁棒稳定性及跟踪性能要求。

1 控制问题描述

1.1 数学模型

图 1 所示为系统结构图,节气门动作及发动机转速决定进气歧管压力,进气歧管压力及发动机转速决定发动机指示扭矩,指示扭矩经曲轴飞轮惯性及摩擦作用输出转速。因此系统分为两部分进行建模,分别为指示扭矩模型及扭矩-转速模型。

指示扭矩模型由进气管充气模型和进气-扭矩延迟模型构成。进气管充气模型可近似描述为一阶惯性环节^[9],因此,指示扭矩模型为

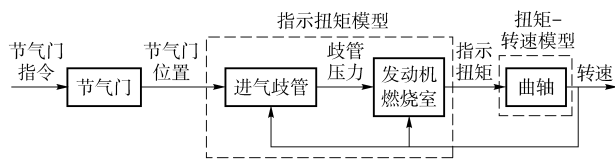


图 1 系统结构图

Fig. 1 System structure diagram

$$\frac{T_q(s)}{u_{air}(s)} = \frac{k_1}{\tau_{air}s + 1} e^{-\delta_{air}s} \quad (1)$$

式中 T_q ——指示扭矩 u_{air} ——节气门开度
 τ_{air} ——进气管充气过程时间常数
 δ_{air} ——进气到扭矩延迟
 k_1 ——节气门开度到扭矩增益

对于发动机扭矩-转速模型,由于换挡过程中发动机处于空载状态,转动惯量仅为自身转动惯量,该值较小,因此忽略扭矩-转速的动态过程,假设扭矩变化可以立即让转速处于稳态值。另外,空载状态时,发动机输出扭矩只用于克服摩擦,而发动机摩擦近似为转速的单调函数^[10],因此,扭矩-转速模型可以描述为

$$N(s) = k_2 T_q(s) \quad (2)$$

式中 N ——发动机转速

k_2 ——扭矩到转速增益

联立式(1)、(2),得到发动机转速输出模型为

$$\frac{N(s)}{u_{air}(s)} = \frac{k}{\tau_{air}s + 1} e^{-\delta_{air}s} \quad (3)$$

其中

$$k = k_1 k_2$$

式中 k ——节气门开度到转速增益

1.2 参数不确定性

由于采用了分段线性模型来描述非线性系统,所以模型(3)中的参数随工况变化而变化,因此需分段辨识获得参数的不确定范围。首先,在 1 440 ~ 2 760 r/min 转速工况内选择若干转速试验点,这些试验点覆盖了换挡所需的转速工况(1 500 ~ 2 700 r/min)及超调 5% 的转速工况。其次,在所研究的转速工况内,对发动机模型施以分段阶跃信号得到阶跃响应数据,通过最小二乘辨识得到 k 及 τ_{air} 的不确定范围。然后,由机理计算得到 δ_{air} 的不确定范围。由于进气-扭矩延迟 δ_{air} 取决于节气门动作时进气行程活塞下行的位置,因此为不确定值。当活塞位置处于进气上止点时取最大值(两个冲程时间),当活塞位置处于临近进气下止点时取最小值(一个冲程时间),因此 δ_{air} 的不确定范围为

$$[\delta_{min}, \delta_{max}] = \left[\frac{30}{N}, \frac{60}{N} \right] \quad (4)$$

式中 δ_{min} —— δ_{air} 的最小值

δ_{max} —— δ_{air} 的最大值

模型(3)中各参数不确定范围如表1所示。

表1 参数不确定范围

Tab. 1 Parameters uncertainty range

参数	k	τ_{air}/s	δ_{air}/s
不确定范围	120.47 ~ 163.97	0.423 ~ 0.597	0.010 ~ 0.042
名义值	120.47	0.423	0.010

1.3 控制问题描述

图2所示为系统控制框图,车速、挡位等信息计算得到期望转速,经发动机调速控制器计算得到期望节气门开度,实际节气门开度控制发动机转速。节气门开度控制在此不做赘述。系统控制目标为跟踪期望的阶跃转速信号;设计要求为,在1500~2700 r/min转速工况内,超调量小于5%,调节时间小于1 s,稳态误差小于10 r/min。

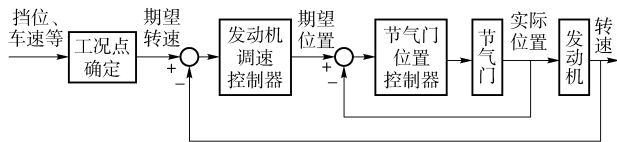


图2 系统控制框图

Fig. 2 System control diagram

2 控制系统设计

2.1 史密斯预估器模型优化

文献[11-13]研究表明,史密斯预估器对模型失配非常敏感,即使在较大稳定裕度的情况下,很小的模型失配也会导致系统不稳定。而由表1辨识结果可知,发动机调速过程有较大的模型不确定性。为此,将通过2个准则在频域范围内对史密斯预估器模型进行优化,找到一个最佳的史密斯预估器模型应用于后续的SP-QFT控制器设计。

图3、图4所示分别为二自由度史密斯预估控制系统框图及其等效的SP-QFT控制系统框图。其中, $C(s)$ 为补偿器, $F(s)$ 为前置滤波器,各模块的转换关系为

$$\begin{cases} H(s) = (1 - e^{-\delta s}) \frac{\hat{G}(s)}{G(s)} + e^{-\delta s} \\ Q(s) = \frac{e^{-\delta s}}{H(s)} \\ G_{eq}(s) = (1 - e^{-\delta s}) \hat{G}(s) + G(s) e^{-\delta s} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $G(s) e^{-\delta s}$ ——实际被控对象模型

$\hat{G}(s) e^{-\delta s}$ ——史密斯预估器模型

$G_{eq}(s)$ ——等效被控对象模型

$Q(s)$ ——后置滤波器模型

2.1.1 史密斯预估器模型优化准则1

文献[14]认为:如果系统共振频率低于系统带宽, $y^*(s)$ 通过 $Q(s)$ 时将被扭曲,导致系统性能变

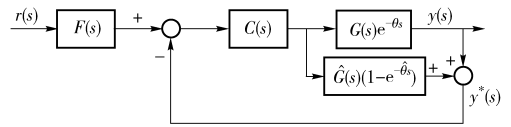


图3 二自由度史密斯预估控制系统框图

Fig. 3 Two degrees of freedom SP system diagram

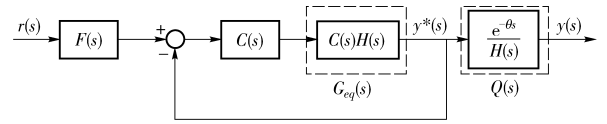


图4 等效SP-QFT控制系统框图

Fig. 4 Equivalent SP-QFT system diagram

坏,同时提出了针对史密斯预估器模型中延迟时间失配情况的解决方法。文献[15]将其扩展到史密斯预估器模型中任意参数失配的情况,并且提出了史密斯预估器模型优化的第1个准则:在系统带宽范围内,对于所有被控对象的模型,史密斯预估器模型必须保证 $Q(s)$ 对 $y^*(s)$ 的扭曲程度不超过3 dB,即

$$|20 \lg |Q(s)|| \leq 3 \text{ dB} \quad (6)$$

其中 $0 \leq \omega \leq B \quad \forall P_j \in P$

式中 B ——系统带宽

P_j ——第 j 个史密斯预估器模型

P ——史密斯预估器模型的集合

2.1.2 史密斯预估器模型优化准则2

由于等效被控对象模板的面积越小,QFT控制器设计越容易。因此,史密斯预估器模型优化的第2个准则为:在准则1优化出的史密斯预估器模型基础上,选择使代价函数 $I(P_j)$ 最小的模型。代价函数为

$$I(P_j) = \frac{1}{n_\omega} \sum_{\omega \in \Omega} \frac{w(\omega) A(T_j(\omega))}{A(T(\omega))} \quad (7)$$

式中 $T(\omega)$ ——实际被控对象的模板

$T_j(\omega)$ ——等效被控对象的模板

$A(\cdot)$ ——对象模板在Nichols图上的面积

$w(\omega)$ ——各研究频率的权重

Ω ——各研究频率的集合

n_ω ——研究频率的个数

将参数 k 、 τ_{air} 和 δ_{air} 在其不确定范围内20等分,则总共9261(21^3)个备选史密斯预估器模型,同时为兼顾系统响应性及设计难度,选择25 dB为系统带宽。通过第一步优化,得到满足准则1的史密斯预估器模型如图5所示;通过准则2优化,得到最佳史密斯预估器模型参数为 $k = 155.27$, $\tau_{air} = 0.4665$, $\delta_{air} = 0.0212$ 。

2.2 SP-QFT控制器设计

2.2.1 设计要求定量描述

在进行环路整形之前,需要定量描述控制系统

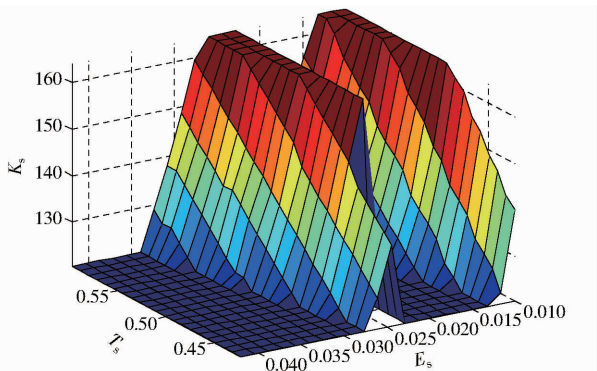


图 5 25 dB 系统带宽下容许史密斯预估器模型

Fig. 5 Admissible SP models for $B = 25$ dB

的设计要求。

系统的鲁棒稳定性由闭环系统阶跃响应峰值 M_p 表示^[16]。根据最大超调量 5% 的设计要求,得到的鲁棒稳定性约束为

$$\left| \frac{C(s) [G(s)H(s)]}{1 + C(s) [G(s)H(s)]} \right| = M_p \leq 1.05 \quad (8)$$

系统幅值裕度 h 及相角裕度 γ 为

$$\begin{cases} h = 20 \lg \left(1 + \frac{1}{M_p} \right) \\ \gamma = 2 \arcsin \frac{1}{2M_p} \end{cases} \quad (9)$$

经计算得 $h = 5.81$ dB, $\gamma = 56.84$ rad。

系统的跟踪特性由闭环系统设计要求的上、下界表示。为了满足闭环系统 5% 超调量、1 s 调节时间及 10 r/min 稳态误差的设计要求,初始边界模型由二阶传递函数表示。另外,为了保证 $\delta(j\omega_i)$ 在 ω_i 大于 T_{R_U} 的 0 dB 穿越频率时随 ω_i 增大而增大,从而简化补偿器 $C(s)$ 的设计,在初始边界模型中额外添加若干零点和极点,其中 $\delta = T_{R_U} - T_{R_L}$ 。最终得到的跟踪特性约束为

$$\begin{cases} T_{R_U} = \frac{4.097(s+20)}{(s+6.3+6.5j)(s+6.3-6.5j)} e^{-0.010s} \\ T_{R_L} = \frac{1445}{(s+8.5)(s+8.5)(s+20)} e^{-0.042s} \end{cases} \quad (10)$$

式中 T_{R_U} ——跟踪上界 T_{R_L} ——跟踪下界

2.2.2 设计频率选择

设计频率贯穿于补偿器及前置滤波器设计的整个过程,其选择与参考跟踪上界的特性相关,应在参考跟踪上界 0 dB 穿越频率左右各选择至少 3 个频率,最高频率在上界 -12 dB 左右,频率间隔不小于低频的 1 倍。 T_{R_U} 的 0 dB 穿越频率为 4.57 rad/s, -12 dB 对应频率为 21.9 rad/s,因此设计频率选择为

$$\omega = (0.01, 0.1, 1, 5, 10, 20, 50) \quad (11)$$

2.2.3 环路整形

在定量描述系统设计的要求后,开始补偿器 $C(s)$ 的设计,即环路整形。为了方便补偿器的在线调节,采用 PID 结构的补偿器,等效被控对象模板 $G_{eq}(s)$ 将在补偿器整形后满足鲁棒稳定边界及跟踪边界要求。图 6 所示为混合边界及环路整形前后名义值 $L_0 = C(s)G_{eq,0}(s)$ 在各个设计频率点的分布,补偿器 $C(s)$ 的设计结果为

$$C(s) = 0.0615 + \frac{0.12}{s} + 0.00073s \quad (12)$$

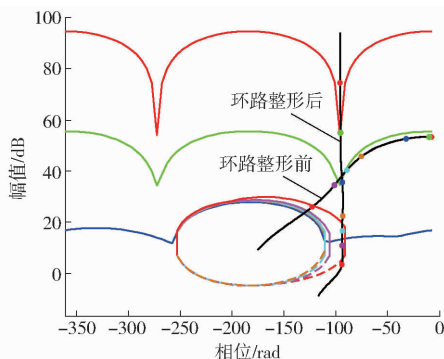


图 6 环路整形结果

Fig. 6 Loop shaping results

2.2.4 前置滤波器设计及跟踪性能验证

跟踪边界约束可以保证 $\Delta T(j\omega)$ (系统输出边界的上、下界之差) 小于 $\delta(j\omega)$, 却不能保证闭环系统频率响应幅值在跟踪边界之内,而前置滤波器的作用即是解决该问题,前置滤波器设计结果为

$$F(s) = \frac{64}{s^2 + 16s + 64} \quad (13)$$

图 7 所示为前置滤波器校正前后闭环系统幅频特性,由图可知,所设计的控制系统满足跟踪性能要求。

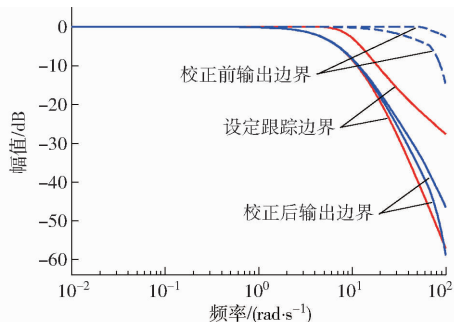


图 7 前置滤波器设计

Fig. 7 Prefilter design

2.2.5 鲁棒稳定性验证

由于控制器设计时基于少量离散频率点完成,因此控制系统设计完成后需要在更大的频率范围及采用更密集的频率点进行系统鲁棒稳定性验证。图 8 所示为系统鲁棒稳定性验证结果。由图可知,

所设计的控制系统满足鲁棒稳定性要求。

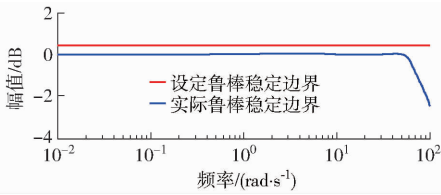


图8 鲁棒稳定性验证

Fig. 8 Verification of robust stability

3 仿真验证

3.1 仿真模型

为了验证控制系统的效果,在 AMESim^[17-18] 中搭建了高仿真度的四缸四冲程 1.8 L 汽油发动机模型,如图 9 所示。

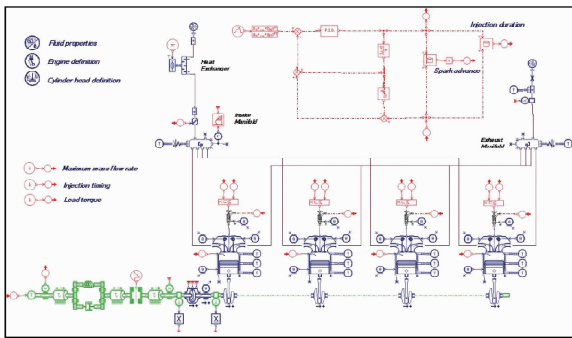


图9 发动机 AMESim 模型

Fig. 9 Engine model in AMESim

为了保证发动机模型的高仿真度,对其速度特性进行了功能性验证,包括指示热效率、机械效率、热油消耗率、功率、扭矩及摩擦扭矩等主要特性,结果如图 10 所示。经验证,发动机模型符合真实发动机的速度特性^[19-20],可以代替真实发动机进行控制

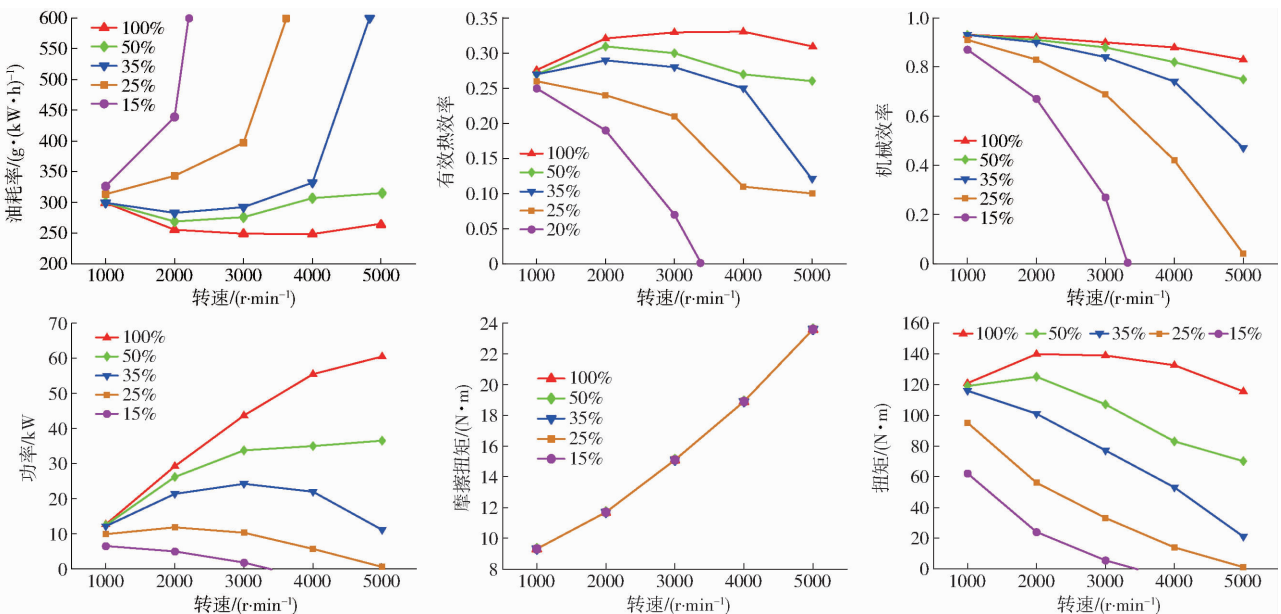


图10 发动机 AMESim 模型验证

Fig. 10 Verification of engine model in AMESim

系统验证。

3.2 仿真结果

因为换挡过程中控制器接收的转速信号为阶跃信号,所以对系统的阶跃响应特性进行对比,结果如图 11~13 所示。从图 11 可以看出,由于被控对象存在强非线性特点,系统正向阶跃(1 500 ~ 2 700 r/min)和反向阶跃(2 700 ~ 1 500 r/min)响应的特性差异明显。为了方便控制效果的对比,调节 3 个控制器使系统正向阶跃响应特性相近,并且刚好满足 1 s 调节时间及 10 r/min 稳态误差的设计要求(由于该原因使 SP-QFT 控制系统前段上升较慢,这属于人为调节控制参数的问题),如图 12 所示。在此基础上,通过对比系统反向阶跃的响应特性,如图 13 所示,可以明显看出:SP-QFT 控制器相比基本 QFT 控制器和 PID 控制器,具有超调量小、调节时间短及稳态误差小等特点,性能参数对比如表 2 所示。

4 结论

(1) 针对发动机调速过程的强非线性,采用分段辨识得到具有定量参数不确定范围的线性模型。

(2) 针对参数不确定性及进气-扭矩不确定延迟等问题,引入基于定量反馈理论与史密斯预估器结合的 SP-QFT 控制方法。

(3) 针对史密斯预估器对模型失配较为敏感的特点,在频域内优化得到最优史密斯预估器模型。

(4) 仿真结果表明:本文所设计的 SP-QFT 鲁

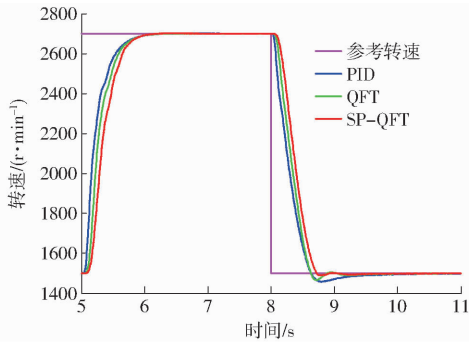


图 11 系统阶跃响应仿真结果

Fig. 11 Simulation results of system step responses

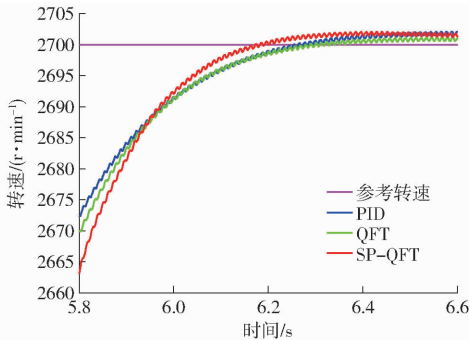


图 12 正向阶跃响应对比

Fig. 12 Comparison of forward step responses

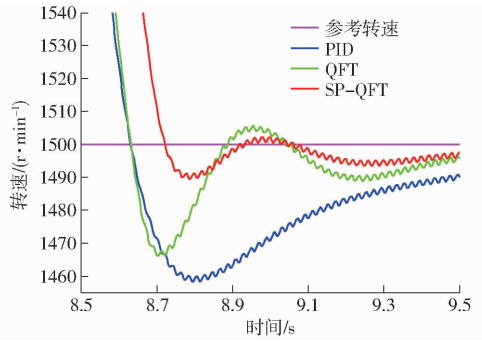


图 13 反向阶跃响应对比

Fig. 13 Comparison of backward step responses

表 2 控制器性能参数对比

Tab. 2 Controller performance

控制器	超调量/%	调节时间/s	稳态误差/($r \cdot \text{min}^{-1}$)
PID	3.33	1.50	29
QFT	2.75	0.84	10
SP-QFT	0.75	0.70	6

棒控制器满足设计要求,并且相比基本 QFT 控制器和 PID 控制器,具有超调量小、调节时间短及稳态误差小等特点,且针对系统参数不确定性和不确定延迟具有较好的鲁棒性。

参 考 文 献

- 1 严亿泉,宋健,李亮. 干式双离合自动变速器分段优化换挡策略研究[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(5):30-36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20140505&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.005.
- 2 YAN Yiquan, SONG Jian, LI Liang. Multi-section optimization shift control method of dry dual clutch transmission [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 30-36. (in Chinese)
- 3 葛文庆,李波,赵彦峻,等. 基于直接驱动和自增力技术的 AMT 换挡系统[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(9):1-7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20140901&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.001.
- 4 GE Wenqing, LI Bo, ZHAO Yanjun, et al. AMT shift system based on direct-drive and self-energizing technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 1-7. (in Chinese)
- 5 MOSKWA J J, HEDRICK J K. Sliding mode control of automotive engines[C]//1989 American Control Conference, 1989:1040-1045.
- 6 GREEN J H, HEDRICK J K. Nonlinear speed control for automotive engines[C]//1990 American Control Conference, 1990:2891-2897.
- 7 WAGNER J R, DAWSON D M, LIU Zeyu. Nonlinear air-to fuel ratio and engine speed control for hybrid vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2003, 52(1): 184-195.
- 8 MOSKWA J J, HENDRICK J K. Modeling and validation of automotive engines for control algorithm development [J]. Journal of Dynamic System Measurement & Control, 1992, 114(2): 278-285.
- 9 DI Xiang, HUANG Ying, GE Yanwu, et al. Fuzzy-PID speed control of diesel engine based on load estimation [J]. SAE International Journal of Engines, 2015, 8(4): 1669-1677.
- 10 来晓靓,管成,肖扬,等. 并联油液型混合动力挖掘机发动机转速控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(1):14-20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20140103&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.003.
- 11 LAI Xiaoliang, GUAN Cheng, XIAO Yang, et al. Engine speed control method of parallel hydraulic excavator [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 14-20. (in Chinese)
- 12 CAIRANO S D, DOERING J, KOLMANOVSKY I V, et al. Model predictive control of engine speed during vehicle deceleration [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(6): 2205-2217.
- 13 ERIKSSON L, NIELSEN L. Modeling and control of engines and drivelines [M]. UK: John Wiley & Sons Ltd, 2014.
- 14 IOANNIDES A C, ROGERS G J, LATHAM V. Stability limits of a Smith controller in simple systems containing a dead-time [J]. International Journal of Control, 1979, 29(4): 557-563.

- LIN Lanfen, GAO Peng, CAI Ming, et al. Case retrieval for manufacturing process planning based on geometry similarity [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(9): 2094 - 2099. (in Chinese)
- 10 程晓东, 李建勇. 基于粗糙集的柔性制造系统概念设计实例检索技术 [J]. *计算机集成制造系统*, 2005, 11(6): 769 - 771. CHENG Xiaodong, LI Jianyong. Rough set-based case retrieval technology in conceptual design of FMS [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2005, 11(6): 769 - 771. (in Chinese)
- 11 刘金山, 廖文和, 张素敏, 等. 基于零件特征关注度的夹具实例相似性检索 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(10): 1304 - 1307. LIU Jinshan, LIAO Wenhe, ZHANG Sumin, et al. Research on feature attention-driven fixture case retrieval [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2007, 19(10): 1304 - 1307. (in Chinese)
- 12 朱凌云, 赵韩, 钱德猛. 基于模糊客户需求信息的农机设计方案及检索示例 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 100 - 103. ZHU Lingyun, ZHAO Han, QIAN Demeng. Method of agricultural machinery design retrieval based on fuzzy customer requirement information [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(7): 100 - 103. (in Chinese)
- 13 李成华, 杨宇, 张晓东, 等. 铲式播种机数字化设计实例检索策略研究 [J]. *农业机械学报*, 2010, 41(8): 31 - 34. LI Chenghua, YANG Yu, ZHANG Xiaodong, et al. Retrieval strategy of spade punch planter for digital design case [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(8): 31 - 34. (in Chinese)
- 14 包志炎, 肖刚, 高飞, 等. 基于实例推理的个性化产品评价方法 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(9): 197 - 201. BAO Zhiyan, XIAO Gang, GAO Fei, et al. Evaluation method of individualized products based on case reasoning [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(9): 197 - 201. (in Chinese)
- 15 杨宇, 李成华, 张国梁. 基于实例推理的铲式玉米精密播种机设计 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(12): 51 - 55. YANG Yu, LI Chenghua, ZHANG Guoliang. Design method of precision spade punch planter of maize based on CBR [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(12): 51 - 55. (in Chinese)
- 16 龚俊华. 集成的 ELECTRE 方法研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006. GONG Junhua. Research of integrative ELECTRE method [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. (in Chinese)
- 17 徐敏杉. 基于 ELECTRE 算法的多属性决策支持系统的设计与实现 [D]. 贵阳: 贵州财经大学, 2012. XU Minshan. Design and implementation for multiple attribute decision support system based on ELECTRE algorithm [D]. Guiyang: Guizhou University of Finance and Economics, 2012. (in Chinese)
- 18 于跃, 赵秋红, 周泓. 改进的 Electre 方法在反应型供应链供应商选择中的应用 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, 19(2): 13 - 16. YU Yue, ZHAO QiuHong, ZHOU Hong. Application of the improved Electre method in supplier selection of responsive supply chain [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 19(2): 13 - 16. (in Chinese)
- 19 梁郑丽, 贾晓丰. 决策支持系统理论与实践 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- 20 李长林. 基于知识的农机专业底盘快速设计专家系统构建方法研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2014. LI Changlin. Research on building method of knowledge based rapid design expert of agricultural machinery professional chassis [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

(上接第 353 页)

- 12 SANTACESARIA C, SCATTOLINI R. Easy tuning of Smith predictor in presence of delay uncertainty [J]. *Automatica*, 1993, 29(6): 1595 - 1597.
- 13 PALMOR Z. Stability properties of Smith dead-time compensator controllers [J]. *International Journal of Control*, 1980, 32(6): 937 - 949.
- 14 YAMANAKA K, SHIMEMURA E. Effects of mismatched Smith controller on stability in systems with time-delay [J]. *Automatica*, 1987, 23(6): 787 - 791.
- 15 SANZ M G, GUILLEN J C, IBARROLA J J. Robust controller design for uncertain systems with variable time delay [J]. *Control Engineering Practice*, 2001, 9(9): 961 - 972.
- 16 HOUPIS C H, RASMUSSEN S J, SANZ M G. Quantitative feedback theory fundamentals and applications [M]. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006.
- 17 LIU Qifang, CHEN Hong, HU Yunfeng, et al. Modeling and control of the fuel injection system for rail pressure regulation in GDI Engine [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(5): 1501 - 1513.
- 18 班智博, 谢辉, 何宇. 汽油机电液式可变气门正时系统响应性能仿真与试验 [J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(9): 12 - 18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20130903&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.003.
- BAN Zhibo, XIE Hui, HE Yu. Experiment and simulation on response performance of electro-hydraulic VVT system for gasoline engine [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(9): 12 - 18. (in Chinese)
- 19 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 256 - 260.
- 20 HEYWOOD J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. Columbus, OH: McGraw-Hill Education, 1988.