

面向控制的柴油机进排气氧气质量分数估计方法研究

董天普 张付军 刘波澜 柴智刚 刘盼

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 在构建高压回路 EGR 涡轮增压柴油机气路系统动态模型基础上, 设计了柴油机进排气氧气质量分数的龙贝格观测器, 实现对柴油机进排气氧气质量分数的估计; 利用李雅普诺夫稳定性原理对设计的观测器进行了稳定性分析, 分析结果显示, 设计的进排气氧气质量分数观测器满足稳定性要求, 可以用于进排气氧气质量分数的估计; 由于进气歧管不宜安装宽裕氧传感器 (UEGO), 进气氧气质量分数难以测到, 本文推导出一种进气氧气质量分数的计算方法, 并对推导出的计算方法进行了仿真对比验证, 结果表明, 该计算方法能够对进气氧气质量分数进行比较精确的计算估计; 最后, 对设计的进排气氧气质量分数观测器进行了仿真和试验验证, 结果表明, 设计的观测器可以对柴油机的进排气氧气质量分数进行准确估计, 为基于进排气氧气质量分数的柴油机气路控制器设计奠定了基础。

关键词: 涡轮增压柴油机; 高压回路 EGR; 进排气氧气质量分数; 龙贝格观测器; 稳定性分析

中图分类号: TK421+.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0354-07

Control Oriented Research on Method of Intake and Exhaust Oxygen Mass Fraction Estimation for Diesel Engine

Dong Tianpu Zhang Fujun Liu Bolan Chai Zhigang Liu Pan

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: An innovative oxygen mass fraction estimation method for turbocharged diesel engine was described. Based on the dynamic model of turbocharged diesel engine with high pressure exhaust gas recirculation (EGR), the Luenberger observer of the intake and exhaust oxygen mass fraction was developed. By using the data acquired from the standard sensors equipped on the engine, the intake and exhaust oxygen mass fraction can be estimated by using the Luenberger observer. The convergence stability of the observer was proved through a Lyapunov analysis, the results show that the observer can meet the stability requirements. It can be used for estimating the intake and exhaust oxygen mass fraction. For various reasons, it is not suitable to install universal exhaust gas oxygen (UEGO) sensor on the intake manifold; the intake oxygen mass fraction needs to be obtained by other means. The calculated algorithm of the intake oxygen mass fraction was proposed and the method was verified by using the GT-Power simulation data. The maximum error was less than 1.3%, the results show that the calculation method was able to accurately calculate the intake oxygen mass fraction. Finally, the test bench of the YC4E170-31 diesel engine was built. The exhaust oxygen fraction can be calculated by using the UEGO sensor which was installed at the exhaust manifold. The observer of the intake and exhaust oxygen mass fraction was verified against the experimental data and simulation data, the results show that the observer can accurately estimate the intake and exhaust oxygen mass fraction, and the estimation error was in a reasonable range, which laid a foundation for air path controller design based on intake and exhaust oxygen mass fraction.

Key words: turbocharged diesel engine; high pressure EGR; intake and exhaust oxygen mass fraction; Luenberger observer; stability analysis

收稿日期: 2015-08-31 修回日期: 2015-09-24

基金项目: 国防科工局基础产品创新计划项目 (DEDP1004) 和北京理工大学校基金项目 (3030012211428)

作者简介: 董天普 (1987—), 男, 博士生, 主要从事内燃机工作过程及优化控制研究, E-mail: dongtianpubit@163.com

通信作者: 刘波澜 (1974—), 男, 副教授, 主要从事内燃机工作过程及优化控制研究, E-mail: liubolan@bit.edu.cn

引言

随着柴油机各项性能要求的日益提高,以及柴油机控制及测试水平的不断发展,基于氧浓度的控制逐渐成为柴油机控制技术一个新的探索方向。

缸内的氧气浓度对于柴油机的燃烧和排放具有直接的影响,研究表明,在进气量一定的情况下,随着缸内氧气质量分数的降低、柴油机的燃烧恶化、效率降低,油耗率会明显增加;而缸内氧气质量分数的降低,抑制了 NO 的形成速率,可以使柴油机 NO_x 的排放量降低;但是,随着缸内氧气质量分数的降低, Soot 的氧化速率明显减缓,致使柴油机的 Soot 排放量急剧升高^[1-5]。调制燃烧开始前缸内的氧气浓度是控制柴油机燃烧和排放最根本的方法^[6-9]。但是,缸内的氧气浓度难以直接测量与控制,其状态与进排气状态密切相关。对于柴油机来说,燃烧通常是稀燃,气缸内实际氧气燃油的比例远大于化学计量氧气燃油的比例。因此,燃烧废气中必然包含没有参与燃烧的氧气,这些未燃氧气经过 EGR 进入进气歧管内,与新鲜空气中的氧气混合进入气缸,从而影响气缸内的氧气质量分数。在喷油量给定的前提下,对缸内氧气质量分数的控制从本质上讲是对进排气状态精确控制的延伸。因此,控制柴油机进排气歧管内的氧气质量分数是控制柴油机燃烧开始前缸内氧气浓度的有效措施^[10-12]。但是,在实际的柴油机中,进排气氧气的质量分数很难用常规的传感器采集到,而使用特殊的传感器采集又会增加柴油机的成本,因此,需要新的方法来估计柴油机进排气歧管内的氧气质量分数,为基于进排气氧气的质量分数的柴油机气路控制器设计奠定基础。近年来,国内外研究机构提出了一些空气质量分数和 EGR 率的估计方法^[11,13-14],但是基于控制器设计为目的的柴油机进排气氧气的质量分数估计方法还不多见。

针对上述问题,本文提出一种估计高压回路 EGR 涡轮增压柴油机进排气歧管内氧气的质量分数的方法,并利用 GT-Power 和 Matlab/Simulink 联合仿真的方法对提出的进排气氧气的质量分数的估计方法进行仿真研究。搭建试验台架,利用试验数据对设计的估计方法进行试验验证。

1 动态模型的构建

以一台装有高压回路 EGR 系统的 YC4E170-31 型涡轮增压柴油机作为研究对象,图 1 是柴油机的结构示意图。从图中可以看出,整个柴油机系统包括:进气歧管、排气歧管、气缸、涡轮增压器、高压回路 EGR、中冷器和 EGR 冷却器。

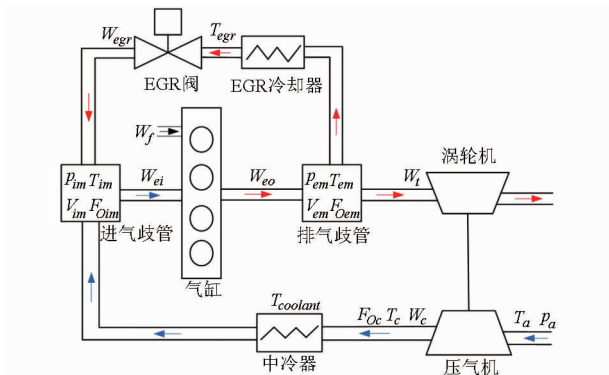


图 1 EGR 涡轮增压柴油机结构示意图
Fig. 1 Structural diagram of diesel engine

根据质量守恒,进排气歧管内的氧气的质量分数的动态模型为^[15]

$$\dot{F}_{Oim} = \frac{R_a T_{im}}{p_{im} V_{im}} [W_{egr} (F_{Oem} - F_{Oim}) + W_c (F_{Oc} - F_{Oim})] \quad (1)$$

$$\dot{F}_{Oem} = \frac{R_a T_{em}}{p_{em} V_{em}} W_{eo} (F_{Oe} - F_{Oem}) \quad (2)$$

式中 R_a ——歧管内气体的气体常数
 p_{im} 、 T_{im} 、 V_{im} ——进气歧管压力、温度和容积
 p_{em} 、 T_{em} 、 V_{em} ——排气歧管压力、温度和容积
 W_{egr} 、 W_c 、 W_{eo} ——EGR 气体的质量流量、压气机的质量流量和气缸排出气体的质量流量
 F_{Oim} ——进气歧管内的氧气的质量分数
 F_{Oem} ——排气歧管内的氧气的质量分数
 F_{Oc} ——空气中的氧气的质量分数
 F_{Oe} ——气缸排出气体中的氧气的质量分数
 W_{egr} 可以根据喷管节流方程近似求解,并可以进一步简化为

$$W_{egr} = \frac{A_{egr} p_{em}}{\sqrt{R_a T_{egr}}} \psi_{egr}(p_{im}, p_{em}) \quad (3)$$

其中 $A_{egr} = C_d(u_{egr}) A_{egr,ref}$

$$\psi_{egr}(p_{im}, p_{em}) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & (0 \leq \frac{p_{im}}{p_{em}} < 0.5) \\ \sqrt{\frac{2p_{im}}{p_{em}} \left(1 - \frac{p_{im}}{p_{em}}\right)} & (0.5 \leq \frac{p_{im}}{p_{em}} < 1) \end{cases} \quad (4)$$

式中 A_{egr} ——EGR 阀的有效流通面积
 $A_{egr,ref}$ ——EGR 阀的参考流通面积
 C_d ——流量系数, EGR 阀开度 u_{egr} 的函数
 通过压气机的质量流量 W_c 可以根据气体的等熵过程由热力学第一定律求解。

$$W_c = \frac{P_c \eta_c}{c_p T_a \left(\frac{P_c}{P_a}^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1\right)} \quad (5)$$

其中

$$\pi_c = \frac{p_c}{p_a}$$

式中 π_c ——压气机的增压比

p_c ——增压后的压力

p_a ——环境压力 T_a ——环境温度

η_c ——压气机的等熵热效率

c_p ——气体的定压比热容

γ ——气体的比热容比

P_c ——压气机所消耗的功率

P_c 的动态模型可以描述为^[16]

$$\dot{P}_c = \frac{1}{\tau_{tc}} (\eta_m P_t - P_c) \tag{6}$$

式中 η_m ——增压器的机械效率

τ_{tc} ——与涡轮增压器结构相关的时间常数

P_t ——涡轮机输出的功率

P_t 可以采用与涡轮相同的建模方法描述为

$$P_t = \eta_t W_t c_p T_{em} (1 - \pi_t^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}) \tag{7}$$

其中

$$\pi_t = \frac{p_{em}}{p_a}$$

式中 η_t ——涡轮机的效率

π_t ——涡轮的膨胀比

W_t ——涡轮机的质量流量

根据气体稳定流动的连续性方程可得^[17]

$$W_t = \frac{A_{t,eff} P_{em}}{\sqrt{RT_{em}}} \psi_t(p_a, p_{em}) \tag{8}$$

其中

$$\psi_t(p_a, p_{em}) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & (0 \leq \frac{p_a}{p_{em}} < 0.5) \\ \sqrt{\frac{2p_a}{p_{em}} \left(1 - \frac{p_a}{p_{em}}\right)} & (0.5 \leq \frac{p_a}{p_{em}} < 1) \end{cases} \tag{9}$$

式中 $A_{t,eff}$ ——涡轮喷嘴有效流通面积

根据质量守恒,从气缸内排出的气体流量 $W_{eo} = W_{ei} + W_f$, W_f 为燃油的质量流量; W_{ei} 为进入气缸的气体流量,可以根据速度密度公式求解^[18]。

$$W_{ei} = \frac{N_e V_d P_{im} \eta_{vol}}{120 R_g T_{im}} \tag{10}$$

式中 N_e ——发动机的转速

V_d ——气缸排量

η_{vol} ——气缸容积效率

流过压气机的新鲜空气中的氧气质量分数 F_{Oc} , 其值为 23.2%; F_{Oe} 是气缸排出气体的氧气质量分数, 假设燃油在燃烧过程中完全燃烧, 则

$$F_{Oe} = \frac{W_{ei} F_{Oim} - W_f l_s}{W_{eo}} \tag{11}$$

式中 l_s ——氧气和燃油质量的化学计量比

经过中冷器和 EGR 冷却器后, 气体的温度可以根据线性热交换器效率公式求解。

$$T_{egr} = T_{em} (1 - \eta_{c,e}) + \eta_{c,e} T_{coolant} \tag{12}$$

$$T_{im} = T_c (1 - \eta_{c,c}) + \eta_{c,c} T_{coolant} \tag{13}$$

式中 $T_{coolant}$ ——冷却液的温度

$\eta_{c,e}$ 、 $\eta_{c,c}$ ——EGR 冷却器和中冷器冷却效率

2 进排气氧气质量分数龙贝格观测器设计

利用进排气氧气质量分数作为反馈变量进行状态反馈控制时, 需要准确测量出其值的变化, 但在实际的车用发动机上, 该状态变量很难测量出来, 需要利用其它方法对进排气氧气质量分数进行准确估计。本文利用龙贝格观测器的方法对进气氧气质量分数进行有效估计, 并利用李雅普诺夫稳定性原理对设计的观测器进行稳定性分析, 从而为基于进排气氧气质量分数的控制器设计奠定基础。

2.1 龙贝格观测器的设计

进气歧管和排气歧管氧气质量分数的动态模型如式(1)、(2), 将两式表示成状态空间形式

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_{Oim} \\ \dot{F}_{Oem} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 (W_{egr} + W_c) & k_1 W_{egr} \\ 0 & -k_2 W_{eo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Oim} \\ F_{Oem} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 W_c F_{Oc} \\ k_2 W_{eo} F_{Oe} \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$y = F_{Oem} = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} F_{Oim} \\ F_{Oem} \end{bmatrix} \tag{15}$$

其中 $k_1 = R_a T_{im} V_{im} / p_{im} > 0$ $k_2 = R_c T_{em} V_{em} / p_{em} > 0$

该系统是一线性时变 (LPV) 系统, 且 $\boldsymbol{\rho} = (k_1, k_2, W_{egr}, W_c, W_{eo}, F_{Oc}, F_{Oe})$ 。对于 LPV 系统来说, 当柴油机处于某一特定工况时, 矢量 $\boldsymbol{\rho}$ 内的参数都为某常数。

根据龙贝格观测器的定义^[19], 构造观测器的动态方程

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}} &= \mathbf{A}(\boldsymbol{\rho}) \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{W}(\boldsymbol{\rho}) - \mathbf{L}(\boldsymbol{\rho}) (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}) = \\ & (\mathbf{A}(\boldsymbol{\rho}) - \mathbf{L}(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{C}) \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{L}(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{C} \mathbf{x} + \mathbf{W}(\boldsymbol{\rho}) \end{aligned} \tag{16}$$

其中 $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{F}_{Oim}, \hat{F}_{Oem})^T$

式中 $\mathbf{L}(\boldsymbol{\rho})$ ——状态观测器的增益矩阵

系统的状态估计误差为

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}} \tag{17}$$

其动态方程为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{x}}} &= \dot{\mathbf{x}} - \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}(\boldsymbol{\rho}) (\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{L}(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{C} (\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}) = \\ & \mathbf{A}(\boldsymbol{\rho}) \tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{L}(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{C} \tilde{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}(\boldsymbol{\rho}) - \mathbf{L}(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{C}) \tilde{\mathbf{x}} \end{aligned} \tag{18}$$

其解为

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}} = e^{(A(\boldsymbol{\rho}) - L(\boldsymbol{\rho})C)(t-t_0)} (\mathbf{x}(t_0) - \hat{\mathbf{x}}(t_0)) = e^{(A(\boldsymbol{\rho}) - L(\boldsymbol{\rho})C)(t-t_0)} \tilde{\mathbf{x}}(t_0) \quad (19)$$

从式(19)可知,可以通过合理选择状态观测器的增益矩阵 $L(\boldsymbol{\rho})$,调整状态观测器系统矩阵 $A(\boldsymbol{\rho}) - L(\boldsymbol{\rho})C$ 的特征值,实现观测器对系统状态的估计, $L(\boldsymbol{\rho})$ 矩阵可以使用极点配置法根据系统的参数进行选取。

2.2 观测器的稳定性分析

系统状态估计误差的动态方程(式(18))的稳定性对状态观测器的性能有较大影响,决定着状态观测器能否对状态变量进行准确估计,需要对其稳定性进行分析。根据李雅普诺夫稳定性理论^[19],构造李雅普诺夫函数

$$V = \tilde{x}_1^2 + \tilde{x}_2^2 \quad (20)$$

则其导数形式为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2\tilde{x}_1 \dot{\tilde{x}}_1 + 2\tilde{x}_2 \dot{\tilde{x}}_2 = \\ &2\tilde{x}_1 [-k_1(W_{egr} + W_c)\tilde{x}_1 + (k_1W_{egr} - l_1)\tilde{x}_2] + \\ &2\tilde{x}_2 [(-k_2W_{eo} - l_2)\tilde{x}_2] = \\ &-2k_1(W_{egr} + W_c)\tilde{x}_1^2 + 2(k_1W_{egr} - l_1)\tilde{x}_1\tilde{x}_2 - \\ &2(k_2W_{eo} + l_2)\tilde{x}_2^2 \end{aligned} \quad (21)$$

根据极点配置的方法,选取

$$L(\boldsymbol{\rho}) = [k_1W_{egr} \quad k_1(W_{egr} + W_c) - k_2W_{eo}]^T$$

将系统极点配置于 $-k_1(W_{egr} + W_c)$, $-k_1(W_{egr} + W_c)$ 。在实际柴油机中,当柴油机正常运行时,进入进气歧管的气体流量 $W_{egr} + W_c > 0$,由上文知 $k_1 > 0$,从而 $-k_1(W_{egr} + W_c) < 0$,增益矩阵 $L(\boldsymbol{\rho})$ 的选取可以使系统估计误差渐进趋向于零。

将 $L(\boldsymbol{\rho})$ 代入式(21)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -2k_1(W_{egr} + W_c)\tilde{x}_1^2 - 2k_1(W_{egr} + W_c)\tilde{x}_2^2 = \\ &-2k_1(W_{egr} + W_c)(\tilde{x}_1^2 + \tilde{x}_2^2) = -2k_1(W_{egr} + W_c)V \end{aligned} \quad (22)$$

由以上分析可知 $-k_1(W_{egr} + W_c) < 0$,且 $V > 0$,所以可得

$$\dot{V} < 0 \quad (23)$$

由以上分析可知,李雅普诺夫函数 $V > 0$,其导数 $\dot{V} < 0$,根据李雅普诺夫稳定性原理可知,系统的估计误差是渐进稳定的,因此,状态观测器对进排气氧气质量分数的估计值渐进地收敛于真实值。

2.3 进气氧气质量分数的计算方法

以上设计状态观测器时,选取状态变量 F_{Oim} 作为系统的输出,排气歧管内的氧气质量分数可以通过安装在排气管上的宽裕氧传感器(UEGO)测量计算得到。由于压力温度环境变化较大,以及水蒸气

的凝结问题,进气歧管处不适合 UEGO 传感器的安装^[7]。进气氧气质量分数无法通过传感器测量得到,需要通过其他方法计算得到。

根据质量守恒定律,进气氧气质量分数可以表示为关于新鲜空气氧气质量分数和 EGR 氧气质量分数的公式,即

$$F_{Oim} = \frac{F_{Oc}W_c + F_{Oegr}W_{egr}}{W_c + W_{egr}} \quad (24)$$

式中 F_{Oegr} ——EGR 废气中的氧气质量分数
根据 EGR 率的定义可得 EGR 率

$$\phi_{egr} = \frac{W_{egr}}{W_{egr} + W_c} \quad (25)$$

联立式(24)、(25)可得

$$F_{Oim} = (1 - \phi_{egr})F_{Oc} + \phi_{egr}F_{Oegr} \quad (26)$$

假设燃料完全燃烧,且忽略残余废气的影响,气缸排出气体的氧气质量分数可以表示为

$$F_{Oe} = \frac{(W_c - W_f l_0)F_{Oc} + W_{egr}F_{Oegr}}{W_c + W_{egr} + W_f} \quad (27)$$

根据过量空气系数的定义有

$$\phi_a = \frac{W_c}{W_f l_0} \quad (28)$$

式中 ϕ_a ——过量空气系数

l_0 ——单位质量燃油完全燃烧所需要的理论空气质量,即化学计量空燃比,对于柴油 $l_0 \approx 14.3$

如果忽略排气的传输延迟,则有

$$F_{Oe} = F_{Oegr} \quad (29)$$

联立式(27)~(29)可得

$$F_{Oegr} = \frac{(\phi_a - 1)F_{Oc}}{\phi_a + \frac{1}{l_0}} \quad (30)$$

将式(30)代入式(26)中,可得

$$F_{Oim} = F_{Oc} \left(1 - \phi_{egr} \frac{1 + \frac{1}{l_0}}{\phi_a + \frac{1}{l_0}} \right) \quad (31)$$

柴油机过量空气系数一般都大于 1,在数值上远大于 $1/l_0$,式(31)可以简化为

$$F_{Oim} = F_{Oc} \left(1 - \frac{\phi_{egr}}{\phi_a} \right) \quad (32)$$

由式(32)可知,进气氧气质量分数与流过压气机的新鲜空气的氧气质量分数、EGR 率以及过量空气有关,并且与 ϕ_{egr}/ϕ_a 成近似的线性关系。

表 1 是 1 500 r/min、25% 负荷下,GT-Power 仿真结果和通过公式(32)计算结果的对比。通过对比可以看出,在柴油机正常工作范围内,公式(32)对进气氧气质量分数有比较精确的估计,估计误差

表 1 1 500 r/min、25% 负荷进气氧气质量分数
计算结果与仿真结果对比

Tab. 1 Intake oxygen mass fraction calculated results at
1 500 r/min and 25% load

EGR 率/%	过量 空气 系数	过量 氧气 系数	氧气质量 分数 GT 仿真值/%	氧气质量 分数估计 值/%	误差/ %
0	2.39	2.39	23.30	23.30	0
6.2	2.15	2.22	22.59	22.63	0.17
12.7	1.91	2.03	21.68	21.75	0.35
16.5	1.78	1.92	21.05	21.14	0.43
21.6	1.61	1.77	20.08	20.18	0.50
25.2	1.51	1.67	19.32	19.41	0.46
28.8	1.41	1.57	18.47	18.53	0.34
31.1	1.35	1.50	17.88	18.10	1.23

在 1.3% 以内。

由 UEGO 传感器测量得到的排气氧气质量分数和由式(32)计算得到的进气氧气质量分数对于观测器性能的验证非常重要,在后续研究中,将设计基于进排气氧气质量分数的控制器,并利用 UEGO 传感器测量到的排气氧气质量分数以及由式(32)计算得到的进气氧气质量分数实现对控制器控制效果的验证。

3 仿真分析与试验验证

利用 GT - Power 仿真数据和试验数据对设计的状态观测器进行验证。台架试验系统实物图如图 2 所示。



图 2 台架试验系统实物图

Fig. 2 Test bench

本文以 YC4E170 - 31 型涡轮增压中冷柴油机为研究对象,其主要技术参数如表 2 所示,并设计高压回路 EGR 系统,选择博格华纳生产的冷端 EGR 阀,该阀为 24 V 直流电动机驱动,设计 EGR 阀 H 桥驱动电路,对 EGR 阀直流电动机进行驱动控制,实现 EGR 阀开度的有效控制。利用德国 dSPACE 公司开发的 MicroAutoBox 实现对传感器信号的采集和设计算法的实时运算。搭建试验台架,采集试验数据,并利用采集的试验数据对 GT - Power 柴油机模型进行校核^[20]。进气歧管内的氧气质量分数根

据常规温度压力传感器采集的信息,利用公式(32)进行求解计算,排气歧管中的氧气质量分数利用安装在排气歧管上的宽裕氧传感器进行测量计算,利用计算值和测量值实现对 GT - Power 仿真数据和观测器估计数据的验证。

表 2 柴油机主要技术参数

Tab. 2 Specifications of engine

参数	数值
型式	直列 4 缸、增压中冷
缸径/mm	110
行程/mm	112
排量/L	4.26
压缩比	17.5
喷油系统	电控组泵
标定功率/kW	125
标定转速/(r·min ⁻¹)	2 600

分别选取 1 500 r/min、25% 负荷,1 700 r/min、25% 负荷和 1 900 r/min、25% 负荷 3 个柴油机运行工况点来验证状态观测器的性能,在运行 8 s 时刻,使 EGR 阀的开度从 20% 阶跃至 40%,对比 GT - Power 的仿真数据、试验采集数据和观测器的计算数据,实现对设计的观测器性能的验证。

图 3 是柴油机在 1 500 r/min、25% 负荷时,EGR 阀在 8 s 发生瞬态阶跃变化时,GT - Power 仿真值、设计的观测器的计算值以及采集的试验值的对比。从图中可以看出,当 EGR 阀发生阶跃变化时,进排气氧气质量分数的估计值跟随迅速,EGR 阀发生阶跃前后,与 GT - Power 仿真值相比,进气氧气质量分数的观测器估计误差分别为 0.44% 和 0.21%,排气氧气质量分数的观测器估计误差为 0.48% 和 0.17%。

图 4 是柴油机在 1 700 r/min、25% 负荷时,EGR 阀在 8 s 发生瞬态阶跃变化时,GT - Power 和设计的观测器对柴油机进排气氧气质量分数的仿真以及估计值的对比。当 EGR 阀发生阶跃前后,进气氧气质量分数的观测器估计误差分别为 0.39% 和 0.18%,排气氧气质量分数的观测器估计误差为 1.28% 和 0.27%。

图 5 是柴油机在 1 900 r/min、25% 负荷时,EGR 阀在 8 s 发生阶跃变化时,GT - Power 和设计的观测器对柴油机进排气氧气质量分数的仿真以及估计值的对比。EGR 阀发生阶跃前后,进气氧气质量分数的观测器估计值误差分别为 0.43% 和 0.18%,排气氧气质量分数的观测器估计误差分别为 0.66% 和 0.13%。

从图 3a、4a、5a 可以看出,当 EGR 阀开度发生

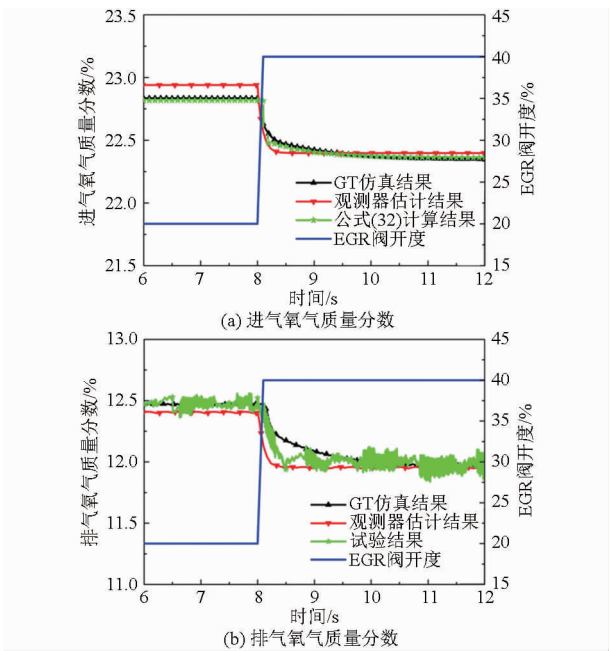


图3 1500 r/min、25% 负荷,EGR 阀发生阶跃变化时进排气氧质量分数变化曲线
Fig.3 Oxygen mass fraction estimation during EGR step at 1500 r/min and 25% load

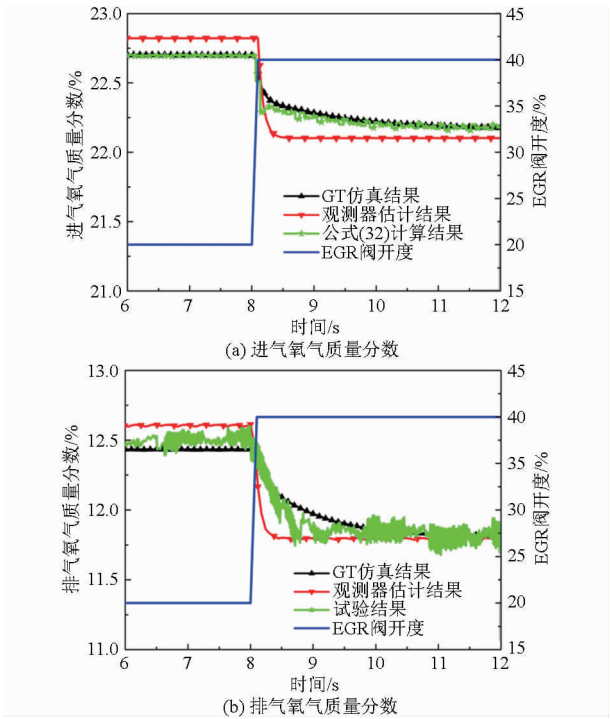


图4 1700 r/min、25% 负荷,EGR 阀发生阶跃变化时进排气氧质量分数变化曲线
Fig.4 Oxygen mass fraction estimation during EGR step at 1700 r/min and 25% load

阶跃变化时,公式(32)对进气氧质量分数的计算值跟随迅速,计算结果与GT数据基本吻合,计算误差在合理的范围内。从图3b、4b、5b可以看出,观测器对排气歧管内氧质量分数的估计值以及变化趋

势与试验测量值吻合,满足控制器设计的要求。因此,提出的该计算方法和排气歧管UEGO传感器可以实现对进排气歧管氧质量分数的准确计算与测量,为后续的观测器观测效果以及控制器控制效果验证奠定了基础。

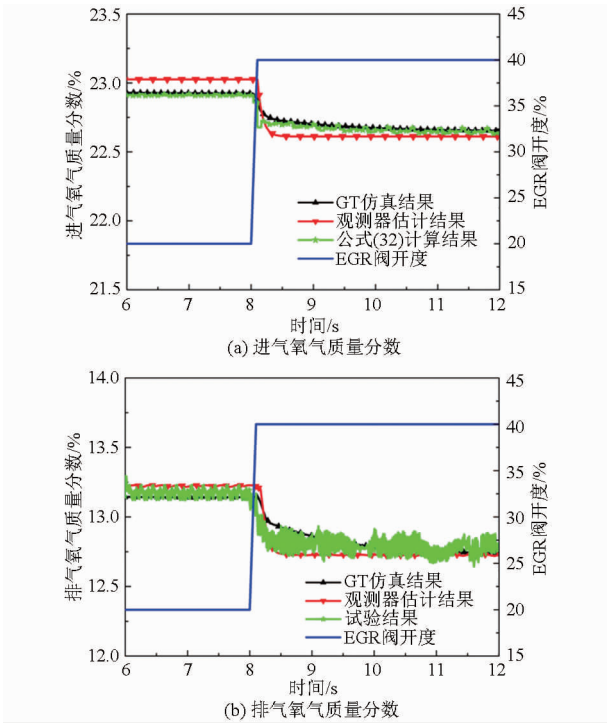


图5 1900 r/min、25% 负荷,EGR 阀发生阶跃变化时进排气氧质量分数变化曲线
Fig.5 Oxygen mass fraction estimation during EGR step at 1900 r/min and 25% load

4 结论

(1)基于EGR涡轮增压柴油机气路系统的动态模型而设计的进排气氧质量分数龙贝格观测器满足稳定性要求,可以用于柴油机进排气氧质量分数的估计。

(2)推导出一种进气氧质量分数的计算方法,并利用GT-Power仿真数据对提出的计算方法进行了对比验证,结果表明,该方法可以对进气氧质量分数进行比较准确的计算,计算误差在1.3%以内。

(3)利用试验数据以及GT-Power的仿真数据对观测器的性能进行了对比验证,结果表明,与GT-Power的仿真数据相比,观测器的估计误差在0.7%以内,观测器可以对进排气氧质量分数进行比较准确的估计,满足控制器设计的需求,为后续基于进排气氧质量分数的柴油机气路控制器设计奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 安晓辉,刘波澜,张付军,等. 基于氧浓度的 EGR 对柴油机性能影响的仿真[J]. 内燃机学报, 2013, 31(2): 115 – 119.
AN Xiaohui, LIU Bolan, ZHANG Fujun, et al. Simulation of the effect of intake charge oxygen concentration based EGR on diesel engine performance[J]. Transaction of CSICE, 2013, 31(2): 115 – 119. (in Chinese)
- 2 VAN ALSTINE D G, KOCHER L E, KOEBERLEIN E, et al. Control- oriented PCCI combustion timing model for a diesel engine utilizing flexible intake valve modulation and high EGR levels[C]//Proceedings of the 2012 American Control Conference (ACC), IEEE, 2012: 2060 – 2065.
- 3 ADI G, HALL C, SNYDER D, et al. Soy-biodiesel impact on NO_x emissions and fuel economy for diffusion-dominated combustion in a turbo-diesel engine incorporating exhaust gas recirculation and common rail fuel injection [J]. Energy & Fuels, 2009, 23(12): 5821 – 5829.
- 4 OGAWA H, MIYAMOTO N, SHIMIZU H, et al. Characteristics of diesel combustion in low oxygen mixtures with ultra-high EGR [C]. SAE Paper 2006 – 01 – 1147, 2006.
- 5 马小康,张付军,韩恺,等. 进气氧浓度对柴油机燃烧过程影响的仿真研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(7): 945 – 952.
MA Xiaokang, ZHANG Fujun, HAN Kai, et al. Simulation study into effect of intake air oxygen concentration on combustion process in diesel engine[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(7): 945 – 952. (in Chinese)
- 6 金英爱. 不同进气组分发动机燃烧机理及排放特性研究[D]. 长春:吉林大学, 2009.
JIN Yingai. Combustion and emission characteristics of engines by variable intake-air composition [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 7 YAN F, WANG J. Design and robustness analysis of discrete observers for diesel engine in-cylinder oxygen mass fraction cycle-by-cycle estimation [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(1): 72 – 83.
- 8 张韦,舒歌群,沈颖刚,等. 柴油机燃用不同乳化率柴油与富氧进气试验与模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 1 – 7.
ZHANG Wei, SHU Gequn, SHEN Yinggang, et al. Simulation of diesel engine fueled with different water-emulsion rates and different oxygen concentrations in intake air[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 1 – 7. (in Chinese)
- 9 左承基,钱叶剑,徐天玉,等. EGR 与富氢进气对柴油机性能和排放的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 12 – 15.
ZUO Chengji, QIAN Yejian, XU Tianyu, et al. Effect of EGR and intake hydrogen enrichment on performance and emissions of automotive diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 12 – 15. (in Chinese)
- 10 ALBERER D, DEL RE L. Fast oxygen based transient diesel engine operation[C]. SAE Paper 2009 – 01 – 0622, 2009.
- 11 WANG J. Air fraction estimation for multiple combustion mode diesel engines with dual-loop EGR systems [J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(12): 1479 – 1486.
- 12 MARIANI F, GRIMALDI C N, BATTISTONI M. Diesel engine NO_x emissions control: an advanced method for the O₂ evaluation in the intake flow [J]. Applied Energy, 2014, 113(0): 576 – 588.
- 13 CHAUVIN J, CORDE G, PETIT N, et al. Motion planning for experimental airpath control of a diesel homogeneous charge-compression ignition engine[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(9): 1081 – 1091.
- 14 KOLMANOVSKY I, SUN J, DRUZHININA M, et al. Charge control for direct injection spark ignition engines with EGR[C]//Proceedings of the 2000. American Control Conference, IEEE, 2000, 1(6): 34 – 38.
- 15 WAHLSTRÖM J, ERIKSSON L. Modelling diesel engines with a variable-geometry turbocharger and exhaust gas recirculation by optimization of model parameters for capturing non-linear system dynamics[J]. Proc. IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2011, 225(7): 960 – 986.
- 16 OUEYOU-GAMO S, RACHID A, OULADSINE M. A nonlinear controller of a turbocharged diesel engine using sliding mode[C]//Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications, 1997: 803 – 805.
- 17 EJIRI A, SASAKI J, KINOSHITA Y, et al. Transient control of air intake system in diesel engines[C]//Proceedings of the 2010 SICE Annual Conference, IEEE, 2010: 503 – 508.
- 18 STORSET O F, STEFANOPOULOU A G, SMITH R. Adaptive air charge estimation for turbocharged diesel engines without exhaust gas recirculation [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2004, 126(3): 633 – 643.
- 19 DORF R C, BISHOP R H. 现代控制系统[M]. 谢红卫,孙志强,宫二玲,等译. 北京:科学出版社, 2010: 632 – 639.
- 20 安晓辉,刘波澜,张付军,等. 带 EGR 的涡轮增压柴油机瞬态特性研究[J]. 车用发动机, 2013(5): 17 – 21.
AN Xiaohui, LIU Bolan, ZHANG Fujun, et al. Research on transient characteristics of turbocharged diesel engine with EGR[J]. Vehicle Engine, 2013(5): 17 – 21. (in Chinese)