

废气再循环-可变几何截面涡轮增压柴油发动机 燃气双环系统建模及协同控制

神艳艳, 王浩平[†], 田 杨

(南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对废气再循环(EGR)与可变几何截面涡轮增压(VGT)的柴油发动机, 作者联合考虑其燃油动力转速调节回路与气体回路, 提出了内外双环稳定动态反馈的控制策略. 其中, 内环回路是利用Lyapunov函数设计的控制器, 控制燃油质量流量来跟踪柴油发动机转速; 外环回路则设计EGR-VGT控制器, 跟踪气体回路的进排气歧管压力及压气机空气质量流量, 并克服了柴油发动机建模中的不稳定零动态问题. 同时, 研究了气体流量与EGR和VGT阀门开度之间的关系, 通过设计流量开度转换模块实现了两者控制的转换. 最后, 通过专业发动机软件AMESim与仿真软件MATLAB/Simulink的联合仿真试验, 验证了该控制策略对柴油发动机燃油动力转速调节与气体回路控制的有效性.

关键词: 柴油发动机; 非线性控制; Lyapunov函数; 废气再循环; 可变几何截面涡轮增压; 联合仿真

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Modeling and collaborative control for exhaust gas recirculation and variable geometry turbocharger diesel engine fuel-air dual-loop system

SHEN Yan-yan, WANG Hao-ping[†], TIAN Yang

(College of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: For diesel engine equipped with exhaust gas recirculation (EGR) and variable geometry turbocharger (VGT), the fuel-speed regulation path and air path are considered simultaneously, and an inner-outer dual-loop based dynamical feedback stabilization control approach is proposed. Specifically, in the inner loop, we adopt a control strategy based on Lyapunov function which achieves the engine speed trajectory tracking by designing the fuel mass flow rate; in the outer loop we design a EGR-VGT controller to obtain trajectories tracking of intake manifold pressure, exhaust manifold pressure and compressor mass flow rate in the air path, which also eliminates the unstable zero dynamics in the modeling of diesel engines. The transformation between gas flow rate through EGR/VGT and their corresponding valves positions is realized in the flow-position module. Finally, through co-simulation results from the professional engine software — AMESim and the simulation software — MATLAB/Simulink, the effectiveness of the proposed control strategy is demonstrated.

Key words: diesel engine; nonlinear control; Lyapunov function; exhaust gas recirculation; variable geometry turbocharger; co-simulation

1 引言(Introduction)

近年中国多次爆发大面积“雾霾”事件, 其产生机理及影响引起了人们的广泛关注. 据资料显示, 雾霾会对人体的呼吸系统、心血管系统、生殖与神经系统造成伤害, 直接影响人体健康. 雾霾的主要组成成分为二氧化硫、氮氧化物与可吸入颗粒物, 尽管这些污染物产生的原因多种多样, 但是汽车尾气排放毫无疑问是其产生的“重犯”^[1]. 近年来, 我国汽车年产量不断增大, 汽车制造业已称为国民经济支柱性产业^[2].

同时, 柴油发动机的使用量正在逐年增多, 是未来汽车发动机的发展趋势. 在这种情况下, 各国政府不得不加大对柴油发动机各种排放, 如PM, 氮氧化物, CO, HC等的控制力度.

为满足愈加严格的排放政策, 各汽车厂商加大对各种节能减排控制技术的研发, 如: 电控高压共轨燃油喷射^[3]、废气再循环(EGR)、可变几何截面涡轮增压(VGT)^[4]、废气后处理、选择性催化还原(SCR)等. 针对汽车转速控制方面, 有增益调节控制^[5]、 H_∞ 控

收稿日期: 2014-11-03; 录用日期: 2015-05-22.

[†]通信作者. E-mail: hp.wang@njust.edu.cn; Tel.: +86 13951906738.

国家自然科学基金项目(61304077, 61203115), 江苏省自然科学基金项目(BK20130765), 教育部人文社会科学研究青年项目(13YJCZH171), 中央高校基本科研业务费专项资金项目(30920130111014)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61304077, 61203115), Jiangsu Natural Science Foundation (BK20130765), Humanity and Social Science Youth Foundation of Ministry of Education of China (13YJCZH171) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (30920130111014).

制^[6]、PID控制^[7]、滑模控制^[8]等方法;在气体回路排放控制方面,有非线性预测控制^[9]、LPV解耦控制等.目前在已有的控制方法设计中,较多的是考虑汽车转速或气体回路排放的单一控制,未能将发动机转速与与气体排放控制进行有效结合^[10],又由于柴油发动机是一个典型的多输入多输出(MIMO)强耦合非线性系统,对联合建模与控制造成困难^[10-11].

因此针对以上难点,本文将燃油动力转速调节回路与气体回路联合考虑,建立基于EGR与VGT的内外双环动态反馈控制方法:即利用Lyapunov函数控制器控制的内环燃油转速调节控制回路与利用EGR-VGT控制器控制外环气体回路.

2 EGR-VGT柴油发动机建模(EGR-VGT diesel engine modeling)

废气再循环式涡轮增压柴油发动机是由压气机、涡轮、中冷器、EGR、气缸等组成(图1).涡轮从排放的废气中吸收能量,从而带动压气机工作.空气经由压气机及中冷器进入进气歧管,从而与燃料混合进行燃烧.燃烧产生的能量使曲轴获得转矩,从而带动外界负载进行工作.经由排气歧管排出的废气主要分为两部分:一部分排出机外,另外一部分进行废气再循环,经由EGR冷却器和EGR阀重新进入进气歧管,与新鲜空气混合后进入汽缸燃烧.注意,EGR阀门能够影响进行再循环废气的气体量,因此其开度大小会对燃烧及排放均产生影响.VGT,即可变几何截面涡轮增压器,在不同的阀门开度下,可以提供与负载和发动机转速相对应的空气量.

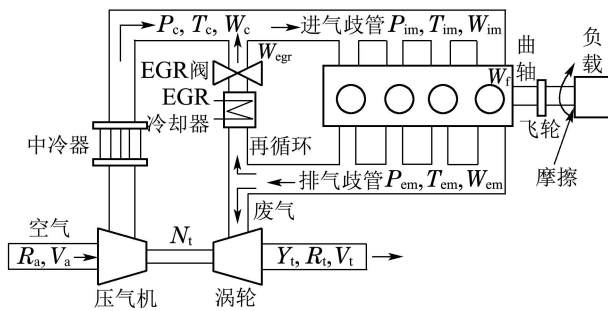


图1 涡轮增压式柴油发动机原理图

Fig. 1 Turbocharged diesel engine architecture

因此,基于上述柴油发动机的工作原理,本文主要针对两个回路:以曲轴为主的燃油-转速回路和以进排气歧管、压气机、EGR和VGT为主的气体回路,采用基于质量与能量守恒定律的平均值模型对柴油发动机的各部分进行建模.

2.1 燃油转速回路建模(Fuel-speed path modeling)

转速是发动机重要性能参数之一,研究性能优良的转速调节系统具有十分重要的理论和实际意义.同时,转速闭环回路也影响着柴油发动机废弃物排放.

这是由于此闭环回路所设计的燃油质量流量将作为气体回路的外部扰动量,而气体回路的控制与PM, NOx的排放息息相关.评价系统的转速控制性能有3个标准:一是系统受到外部干扰后,在此恢复平衡状态的时间,即调整时间;二是系统受到外部干扰后,瞬时离开平衡状态的最大程度,即超调量;三是转速调节系统的稳定性^[11].满足这3个衡量标准正是本文所设计的燃油-转速调节回路的目标.其大小跟汽车行驶外部负载大小及摩擦密切相关^[12]:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J\omega}(P_i - P_f), \quad (1)$$

$$P_i(t) = H_f \eta_i(t) W_f(t), \quad (2)$$

其中: $P_f(W)$ 为外部的负载摩擦功率; $W_f(\text{kg/s})$ 为燃油质量流量; $J(\text{kgm}^2)$ 是指发动机曲轴惯量; $H_f(\text{J/kg})$ 是燃料热值; $P_i(W)$ 是指发动机指示功率; η_i 是发动机指示效率,且为关于空燃比 λ 的多项式^[13]:

$$\eta_i(t) = \begin{cases} a_\lambda + b_\lambda \lambda(t) + c_\lambda^2, & \lambda(t) > \lambda_{st}(t), \\ (a_\lambda + b_\lambda \lambda(t) + c_\lambda^2) \frac{\lambda(t)}{\lambda_{st}(t)}, & \lambda(t) < \lambda_{st}(t), \end{cases} \quad (3)$$

其中 λ_{st} 是指柴油发动机化学计量空燃比系数.

2.2 气体回路建模(Air path modeling)

首先针对进气歧管压力、排气歧管压力与VGT的传输功率,建立气体回路的三阶非线性气体回路模型,具体如下:

$$\dot{P}_{im} = \frac{RT_{im}}{V_{im}}(W_c + W_{egr} - W_{ie}), \quad (4)$$

$$\dot{P}_{em} = \frac{RT_{em}}{V_{em}}(W_{ie} + W_f - W_{egr} - W_t), \quad (5)$$

$$\dot{P}_c = \frac{1}{\tau}(\eta_m P_t - P_c), \quad (6)$$

其中: $P_{im}(\text{Pa})$ 与 $P_{em}(\text{Pa})$ 是指进排气歧管压力; $P_c(W)$ 是涡轮传输功率; $T_{im}(\text{K})$ 与 $T_{em}(\text{K})$ 是指进排气歧管温度; $V_{im}(\text{m}^3)$ 与 $V_{em}(\text{m}^3)$ 是进排气歧管容积; $W_{egr}(\text{kg/s})$ 与 $W_t(\text{kg/s})$ 是指流经EGR与VGT的气体质量流量; $W_c(\text{kg/s})$ 是压气机空气质量流量. $W_{ie}(\text{kg/s})$ 表示从进气歧管进入气缸的气体质量流量,建模如下:

$$W_{ie} = k_{ie} P_{im}, \quad (7)$$

其中: $k_{ie} = \frac{(\alpha_0 + \alpha_1 \omega + \alpha_2 \omega^2) \omega V_d}{4\pi RT_{im}}$, $\omega(\text{r/min})$ 是柴油发动机转速, $V_d(\text{m}^3)$ 是指排量. $P_t(W)$ 表示柴油发动机的涡轮功率,具体如下:

$$P_t = c_p T_{em} \eta_t \left(1 - \left(\frac{P_{em}}{p_a}\right)^{-\mu}\right) W_t, \quad (8)$$

其中: $p_a(\text{Pa})$ 是大气压; c_p 是定压比热, η_t 为涡轮效率.

其次针对压气机空气质量流量进行建模:

$$W_c = \frac{\eta_c P_c}{T_a c_p \left(\left(\frac{P_{im}}{p_a} \right)^\mu - 1 \right)}, \quad (9)$$

其中 c_p 是定容比热.

EGR的阀门能够控制进行再燃烧废气的气体量,因此其开度大小会对燃烧及排放均产生影响^[14].VGT,即可变几何截面涡轮增压器,在不同的阀门开度下气体流量不同.因此,控制气体流量的关键是控制EGR和VGT阀门开度大小.为此首先建立流经EGR和VGT的气体流量与其阀门开度之间的模型,具体如下^[15-16]:

$$W_{egr} = \frac{A_{egrmax} f_{kegr} \psi_{egr}}{\sqrt{T_{em} R}} P_{em}, \quad (10)$$

$$W_{vgt} = \frac{A_{vgtmax} f_{kvgt} P_{em}}{\sqrt{T_{em} R}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_a}{P_{em}} \right)^\mu}, \quad (11)$$

其中 A_{egrmax} 和 A_{vgtmax} 分别指流经EGR和VGT气体的最大有效面积.其他参数表达式为

$$\psi_{egr} = \begin{cases} 1, & \frac{P_{im}}{P_{em}} < \Pi_{egropt}, \\ 1 - \left(\frac{1 - \frac{P_{im}}{P_{em}}}{1 - \Pi_{egropt}} - 1 \right)^2, & \Pi_{egropt} \leq \frac{P_{im}}{P_{em}} \leq 1, \\ 0, & 1 < \frac{P_{im}}{P_{em}}, \end{cases} \quad (12)$$

$$f_{kegr} = \begin{cases} \lambda_{egr1} k_{egr}^2 + \lambda_{egr2} k_{egr} + \lambda_{egr3}, & k_{egr} \leq \rho_{egr}, \\ \lambda_{egr3} - \frac{\lambda_{egr2}^2}{4\lambda_{egr1}}, & k_{egr} > \rho_{egr}, \end{cases} \quad (13)$$

$$f_{kvgt} = \lambda_{f2} + \lambda_{f1} \sqrt{1 - \left(\frac{k_{vgt} - \lambda_{vgt2}}{\lambda_{vgt1}} \right)^2}, \quad (14)$$

其中 $\rho_{egr} = -\lambda_{egr2}/(2\lambda_{egr1})$.注意,本文首先以EGR和VGT的气体流量为控制变量,设计控制器进行控制,然后将流量控制转化为相应的阀门开度控制.

结合上述燃油转速回路的气体回路模型,本文有3个输入 $u_1 = W_f$, $u_2 = W_{egr}$, $u_3 = W_t$,可以建立柴油发动机的动态方程,具体如下:

$$\dot{\omega} = f_1(\omega, P_{im})u_1 + f_2(\omega, P_{im}) + \frac{f_3(\omega, P_{im})}{u_1}, \quad (15)$$

$$\dot{x} = g(x, u_1) + h(x) \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$y = [\omega \ P_{im} \ W_c]^T, \quad (17)$$

其中 $x = [P_{im} \ P_{em} \ P_c]^T$,其他参数表达式为

$$f_1 = H_f a_\lambda / J \omega,$$

$$f_2 = \frac{1}{J \omega} \frac{H_f b_\lambda V_d \omega (\alpha_0 + \alpha_1 \omega + \alpha_2 \omega^2) P_{im}}{4\pi R T_{im}} - P_{fi},$$

$$f_3 = \frac{H_f c_\lambda V_d^2 \omega (\alpha_0 + \alpha_1 \omega + \alpha_2 \omega^2)^2 P_{im}^2}{16\pi^2 J R^2 T_{im}^2},$$

$$g(x, u_1) = \begin{bmatrix} \frac{k_c R T_{im} P_c}{V_{im} \left(\left(\frac{P_{im}}{p_a} \right)^\mu - 1 \right)} - \frac{R T_{im} k_{ie} P_{im}}{V_{im}} \\ \frac{R T_{em}}{V_{em}} (k_{ie} P_{im} + W_f) \\ -\frac{1}{\tau} P_c \end{bmatrix},$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} \frac{R T_{im}}{V_{im}} & 0 \\ \frac{R T_{em}}{V_{em}} & -\frac{R T_{em}}{V_{em}} \\ 0 & \frac{\eta_m k_t}{\tau} \left(1 - \left(\frac{p_a}{P_{em}} \right)^\mu \right) \end{bmatrix}.$$

2.3 双环系统控制目标(Dual-loop system control objectives)

1) 内环燃油转速控制:设计燃油质量流量,跟踪转速变化轨迹;

2) 外环气体回路控制:由于EGR率的设置能够降低汽缸氮氧化物的产生量,AFR值能够影响发动机动态性能和烟灰的排放,所以这两个值是发动机设计的两个重要因素.这两个值的设计可以转化成对进气歧管压力和压气机空气质量流量的控制^[17],所以本文在气体回路的控制目标为设计流经EGR和VGT阀门的气体质量流量,在以燃油质量流量为外部扰动的前提下,控制进排气歧管压力和压气机空气质量流量.

3 双环动态反馈控制器设计(Dual-loop dynamical feedback controller design)

3.1 双环控制策略(Dual-loop control strategy)

为实现以上控制目标,本文建立了内外双环动态反馈协同控制方法(具体控制策略如图2所示).

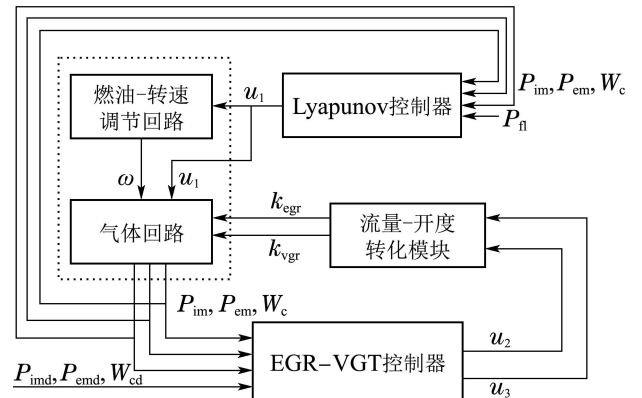


图2 双环控制策略图

Fig. 2 Dual-loop control strategy architecture

1) 内环控制: 是由基于Lyapunov的转速调节回路组成, 目标是利用Lyapunov函数控制器设计的燃料质量流量 u_1 实现对转速的良好跟踪;

2) 外环控制: 是由EGR-VGT控制器与气体回路组成, 目标是利用EGR-VGT控制器设计的经过EGR与VGT的气体质量流量 u_2 与 u_3 , 实现对进排气歧管与压气机空气质量流量的轨迹跟踪. 同时通过流量-开度转换模块, 将经过EGR与VGT的质量流量控制转化成阀门开度的控制.

3.2 基于Lyapunov函数的内环燃油-转速控制器(Lyapunov function based inner fuel-speed controller)

内环控制器设计的目标是使得 $\omega \rightarrow \omega_d$, 因此本文采用基于Lyapunov函数的方法设计控制规律 $u_1(t)$ 以实现控制目标. 为了有效地分析内环系统模型的稳定性, 根据Lyapunov稳定性理论, 闭环系统稳定时, Lyapunov函数 $V(x)$ 需要满足的条件是:

- 1) $V(0) = 0$;
- 2) 任意 $x \neq 0$ 时, $V(x) > 0$;
- 3) 任意 $x \neq 0$ 时, $\dot{V}(x) < 0$.

本文采用的Lyapunov^[18]函数为

$$V(\omega) = \frac{1}{2}e_{\omega}^2, e_{\omega} = \omega_d - \omega, \quad (18)$$

对 ω 求导可得

$$\dot{V}(\omega) = e_{\omega}\dot{e}_{\omega}. \quad (19)$$

选取

$$e = K_{\omega}S(e_{\omega}), \quad (20)$$

$$S(e_{\omega}) = K_1\text{sgn}(e_{\omega}) + K_2e_{\omega}, \quad (21)$$

结合式(19)-(21)可以得到

$$\dot{V}(\omega) = -K_{\omega}^2(K_1^2e_{\omega}^2 + 2K_1K_2|e_{\omega}| + K_2^2(\text{sgn} e_{\omega})^2). \quad (22)$$

为保证 $\dot{V}(x) < 0$, 应该满足的充分条件为

$$K_{\omega} > 0, K_1 > 0, K_2 > 0.$$

在上述条件下, 结合系统稳定需要满足的条件可知, 此内环系统是稳定的. 结合方程(1) (15), 可以得到内

$$\beta_{ya}(x) = \begin{bmatrix} k_{im}(\frac{k_c P_c}{(\frac{P_{im}}{p_a})^{\mu} - 1} - k_{ie} P_{im}) & & \\ & \frac{1}{\tau} k_c P_c & \mu k_c^2 P_c^2 \frac{P_{im}^{\mu-1}}{p_a^{\mu}} + \frac{\mu k_c k_{im} k_{ie} P_c (\frac{P_{im}}{p_a})^{\mu}}{((\frac{P_{im}}{p_a})^{\mu} - 1)^2} \\ -\frac{1}{(\frac{P_{im}}{p_a})^{\mu} - 1} & -\frac{1}{((\frac{P_{im}}{p_a})^{\mu} - 1)^3} & \frac{1}{((\frac{P_{im}}{p_a})^{\mu} - 1)^2} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

现在对零动态系统进行检验. 零动态系统稳定性检验是系统进行输入输出线性化的重要一环^[19]. 零动

态系统燃油质量流量 $u_1(t)$ 为

$$u_1(t) = \frac{-[f_2 - (\dot{\omega}_d + K_{\omega}S(e_{\omega}))] + \sqrt{\delta}}{2f_1}, \quad (23)$$

其中 $\delta = [f_2 - (\dot{\omega}_d + K_{\omega}S(e_{\omega}))]^2 - 4f_1f_3$. 结合状态方程(15), 可知 $f_1 > 0$, 并且 $f_3 < 0$, 所以式(23)中的 $\delta > 0$. 因此, 此控制规律成立.

3.3 外环气体回路控制器(Outer air-path controller)

外环气体回路控制器设计的主要步骤如图3所示.

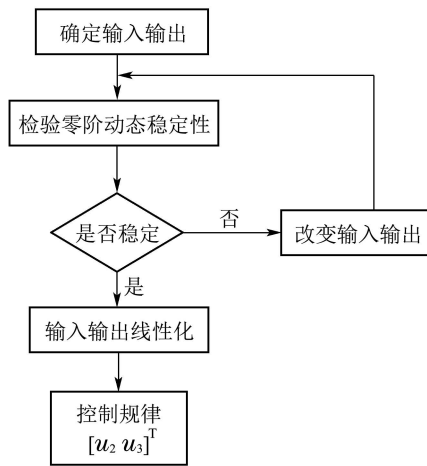


图 3 外环控制器设计步骤

Fig. 3 Outer loop controller design steps

首先, 考虑到外环EGR-VGT气体回路的控制目标输出 $y_a = [P_{im} \ W_c]^T$ 趋于 $y_{ad} = [P_{im}^d \ W_c^d]^T$. 结合方程(16)与输出方程, 可以写成以下形式:

$$\dot{y}_a = \beta_{ya}(x) + \alpha_{ya}(x) \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

其中 $\alpha_{ya}(x)$ 为可逆矩阵, 且与 $\beta_{ya}(x)$ 的表达式为

$$\alpha_{ya}(x) = \begin{bmatrix} k_{im} & 0 \\ -\frac{\mu k_c k_{im} P_c \frac{P_{im}^{\mu-1}}{p_a^{\mu}}}{(\frac{P_{im}}{p_a})^{\mu} - 1} & -\frac{k_c K_0 (1 - (\frac{p_a}{P_{im}})^{\mu})}{(\frac{P_{im}}{p_a})^{\mu} - 1} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

态指的是在任何初始状态下, 都存在唯一的输入使得输出为0. 判断零动态系统存在的一个依据是相对阶

与系统的阶数是否相等. 由于此时系统的相对阶2小于气体回路子系统的阶数3, 所以存在零动态响应. 假设气体回路动态反馈控制规律 $[u_2 \ u_3]^T$ 为

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \alpha^{-1}(x)(-\beta(x) + v(x) - \dot{y}_{ad}). \quad (27)$$

为满足此控制规律, 需要满足的条件为 $\alpha(x)$ 为可逆矩阵, 并且 $v(x) = [v_2 \ v_3]^T = [K_3(P_{im} - P_{im}^d) \ K_4(W_c - W_c^d)]^T$. 结合控制规律(25), 此时系统的零动态响应为

$$\dot{P}_{em} = k_{em}W_c^d \left(1 - \frac{(\frac{P_{im}^d}{p_a})^\mu - 1}{\eta_{im}k_t k_c (1 - \frac{p_a}{P_{em}})^\mu}\right), \quad (28)$$

平衡点为 $P_{em0} = p_a \left(1 - \frac{(P_{im}^d/p_a)^\mu - 1}{\eta_{im}k_t k_c}\right)^{-\frac{1}{\mu}}$. 根据稳定性判据可知此系统输出对应的零动态系统不稳定.

为了抑制不稳定的零动态系统, 本文采取改变输入输出的方法. 其消除方法具体可见图4. 首先, 改变气体回路系统的输出

$$\tilde{y}_a = \begin{bmatrix} h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{im} \\ P_c + \frac{K_0}{k_{em}} \left(P_{em} - \frac{p_a}{1 - \mu}\right) \left(\frac{P_{em}}{p_a}\right)^{1-\mu} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

然而, 结合方程(16) (24) (27)可知, 在此新的输出下, $\alpha(x)$ 为

$$\alpha(x) = \begin{bmatrix} k_{im} & 0 \\ -K_0 \left(1 - \left(\frac{p_a}{P_{em}}\right)^\mu\right) & 0 \end{bmatrix}.$$

此矩阵为不可逆矩阵, 无法满足控制规律(25).

因此, 本文进一步改变输入, 将 $[\sigma_2 \ \sigma_3]^T$ 作为气体回路的新的输入变量, 将原有3阶气体回路系统进行

$$\alpha_{\tilde{y}_a} = \begin{bmatrix} k_{im} & \frac{k_{im}k_c K_0 \left(1 - \left(\frac{p_a}{P_{em}}\right)^\mu\right)}{\left(\frac{P_{im}}{p_a}\right)^\mu - 1} \\ K_0 \left(\left(\frac{p_a}{P_{em}}\right)^\mu - 1\right) & \frac{\mu K_0 k_{im}}{p_a} (z - u_1 - k_{ie}P_{im}) \left(\frac{p_a}{P_{em}}\right)^{\mu+1} + \frac{K_0}{\tau} \left(\left(\frac{p_a}{P_{em}}\right)^\mu - 1\right) \end{bmatrix},$$

$$\beta_{\tilde{y}_a} = \begin{bmatrix} k_{im}^2 \left(k_{ie} + \frac{\mu k_c P_c \left(\frac{P_{im}}{p_a}\right)^{\mu-1}}{p_a \left(\left(\frac{P_{im}}{p_a}\right)^\mu - 1\right)}\right) \left(\frac{k_c P_c}{\left(\frac{P_{im}}{p_a}\right)^\mu - 1} + z - k_{ie}P_{im}\right) - k_{im} k_{ie} P_{im} - \frac{k_{im} k_c P_c}{\tau \left(\left(\frac{P_{im}}{p_a}\right)^\mu - 1\right)} \\ K_0 \left(1 - \left(\frac{p_a}{P_{em}}\right)^\mu\right) \left(k_{ie} k_{im} \frac{k_c P_c}{\left(\frac{P_{im}}{p_a}\right)^\mu - 1} + z - k_{ie}P_{im}\right) + k_{ie} P_{im} + \dot{u}_1 + \frac{\mu k_{em} K_0}{p_a} (k_{ie} P_{im} + u_1 - z)^2 \left(\frac{p_a}{P_{em}}\right)^{\mu+1} + \frac{1}{\tau^2} P_c \end{bmatrix},$$

由于系统的相对阶与维数相同, 故不存在零动态. 此时气体回路的稳定动态反馈控制规律为

$$\begin{bmatrix} \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \alpha_{\tilde{y}_a}^{-1}(x)(\beta_{\tilde{y}_a}(x) + \varphi), \quad (35)$$

扩展^[20]:

$$\dot{P}_{im} = k_{im} \left(\frac{k_c P_c}{\left(\frac{P_{im}}{p_a}\right)^\mu - 1} - k_{ie} P_{im} + z\right), \quad (30)$$

$$\dot{P}_{em} = k_{em} (k_{ie} P_{im} + u_1 - z - \sigma_3), \quad (31)$$

$$\dot{P}_c = -\frac{1}{\tau} P_c + K_0 \left(1 - \left(\frac{p_a}{P_{em}}\right)^\mu\right), \quad (32)$$

$$\dot{z} = \sigma_2, \quad (33)$$

其中: $z = u_2 = W_{egr}, \sigma_3 = u_3 = W_t$.

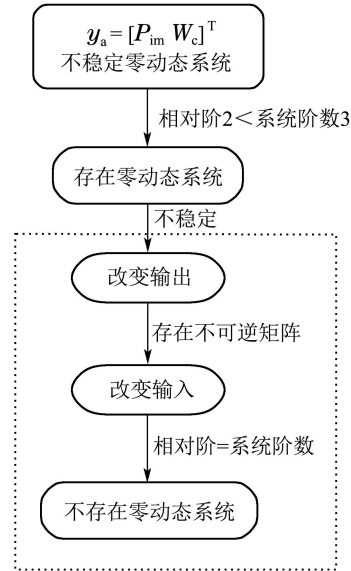


图4 零动态系统的消除过程

Fig. 4 Zero dynamics elimination process

结合方程(27)–(31), 可以得到如下方程:

$$\ddot{\tilde{y}}_a = \beta_{\tilde{y}_a}(x) + \alpha_{\tilde{y}_a}(x)[\sigma_2 \ \sigma_3]^T, \quad (34)$$

其中 $\alpha_{\tilde{y}_a}(x), \beta_{\tilde{y}_a}(x)$ 的表达式如下:

$$\text{其中 } \varphi = \begin{bmatrix} -K_2^1 \dot{P}_{im} - K_2^2 (P_{im} - P_{im}^d) \\ -K_3^1 h_3 - K_3^2 (h_3 - h_3^d) \end{bmatrix}, K_i \in \mathbb{R}, \text{ 并且}$$

$$h_3^d = \frac{W_c^d \left(\left(\frac{P_{im}^d}{p_a}\right)^\mu - 1\right)}{k_c} +$$

$$\frac{K_0}{k_{em}} \left(P_{em} - \frac{p_a}{1-\mu} \left(\frac{P_{em0}}{p_a} \right)^{1-\mu} \right).$$

为了保证此气体回路子系统的稳定性, 选取

$$\ddot{y}_a = \varphi + \ddot{y}_{ad} + \begin{bmatrix} K_2^1 \\ K_3^1 \end{bmatrix} \dot{y}_{ad}, \quad (36)$$

从而得到关于新的输出下的稳态误差方程:

$$\ddot{e}_1 + K_2^1 \dot{e}_1 + K_2^2 e_1 = 0, \quad (37a)$$

$$\ddot{e}_2 + K_3^1 \dot{e}_2 + K_3^2 e_2 = 0, \quad (37b)$$

进一步可得到使气体回路系统稳定的参数条件为:

$$K_2^1 > 0, K_2^2 > 0, K_3^1 > 0, K_3^2 > 0, \quad (38)$$

因此, 在此参数条件下, 气体回路系统是稳定的.

此EGR-VGT控制器的设计尽管需要较多且复杂的数学分析与计算, 但其设计原理较为简单, 并且能够克服3阶气体回路系统存在的零动态不稳定的问题. 控制效果可由AMESim与MATLAB/Simulink的联合仿真结果看出.

4 AMESim与MATLAB/Simulink的联合仿真(AMESim and MATLAB/Simulink co-simulation)

LMS Imagine.Lab AMESim (Advanced modeling environment for performing simulation of engineering systems)是由法国Imagine公司创建, 被比利时LMS公司推广的多学科领域复杂系统的建模仿真平台. 用户可在此平台上建立多领域复杂系统的模型, 并进行仿真计算与深入分析, 进而研究系统的稳态与动态性能. AMESim软件能够使用户摆脱繁琐的数学建模, 从而专注于物理系统本身的设计. 其中, 此软件中的IFP是专门针对发动机设计的元件库, 能够用来模拟柴油发动机进排气系统和供油系统的性能. 因此, 为验证本文设计双环系统的有效性, 本文不仅利用Simulink进行仿真, 同时与基于AMESim软件与MATLAB/Simulink软件的联合仿真进行对比. 表1为双环柴油发动机的部分参数数值.

表 1 双环系统参数数值参考

Table 1 Dual-loop system reference parameters

参数	数值	参数	数值	参数	数值
J	0.15(kg·m ²)	η_m	0.98	η_v	0.87
R	287	η_t	0.76	μ	0.286
τ	0.11(s)	η_c	0.61	V_d	0.002(m ³)
H_f	4e7(J/kg)	a_λ	0.072	c_λ	-0.00017

4.1 内环燃油转速回路(Inner fuel-speed path)

转速的大小与柴油发动机所处的外部实时路况, 如负载、摩擦等紧密相关. 本文将柴油发动机所受到的外部摩擦、负载等视为外部干扰. 干扰情况如图5. 在此扰动的存在下, 基于李雅普诺夫函数的控制器的

输出-燃油质量流量和转速的结果见图6.

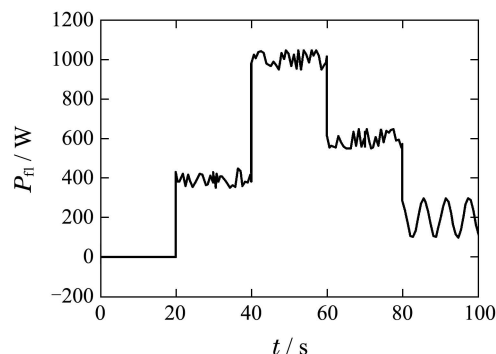


图 5 外界摩擦负载功率

Fig. 5 External friction and load power

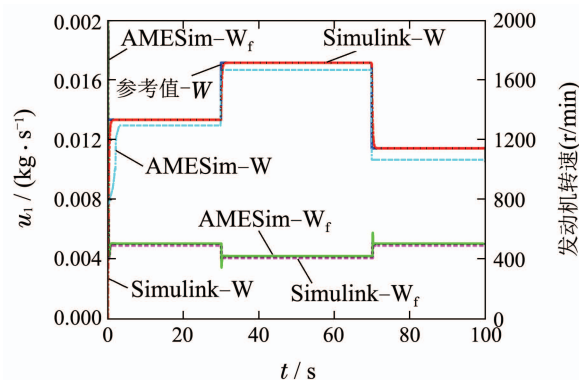


图 6 内环控制结果

Fig. 6 Inner loop control results

由图6可以看出燃油质量流量值的范围在0.003~0.005 kg/s之内, 保持较低的燃油消耗量. 在此燃油质量流量和上述的外部干扰存在的情况下, 转速在两种仿真结果下均能保持良好的跟踪效果. 其中在Simulink得到的转速追踪效果相对在基于AMESim联合仿真中更平滑, 稳态误差更小, 调整时间更短, 更加快速地趋于稳定. 满足转速调节的3个标准.

4.2 外环气体回路(Outer air path)

首先, 图7-9反映了进排气歧管的压力与压气机空气质量流量的跟踪结果. 由此可以看出, 在EGR-VGT控制器的作用下, 对于进气歧管压力、排气歧管压力和压气机质量流量这3个气体回路控制变量来说, 基于Simulink的仿真结果相较于基于AMESim与Simulink的联合仿真结果更加的平滑, 稳态误差更小一些, 但是, 两种仿真结果均具有调整时间较短, 快速趋于稳定, 跟踪效果良好的特点.

然而, 由仿真图7-9可以看出, Simulink仿真结果和基于AMESim与Simulink联合仿真结果之间存在差异性. 这是由于联合仿真结果的模型是基于AMESim柴油发动机的机械物理模型, 而Simulink的结果则是基于所建立的3阶气体回路数学模型. 然而由于柴油发动机的数学模型是7阶模型, 本文则采用了应用较

为广泛的3阶降阶模型^[17]. 因此, Simulink数学模型和联合仿真物理模型不同, 也就造成了两者仿真结果的不同.

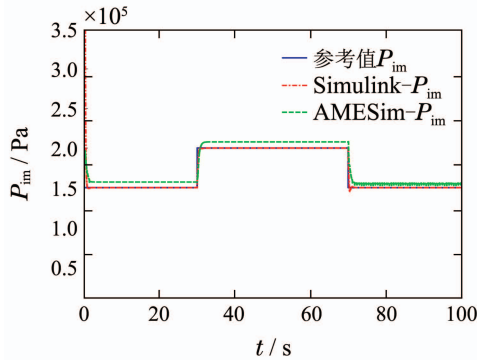


图7 进气歧管压力调节

Fig. 7 Intake manifold pressure regulation

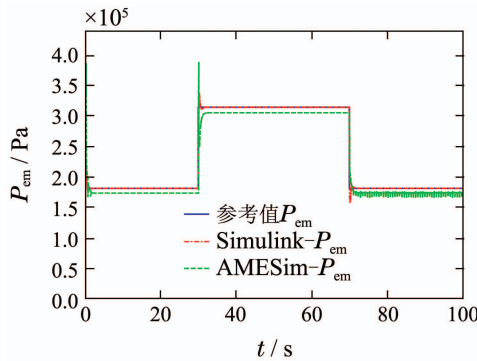


图8 排气歧管压力调节

Fig. 8 Exhaust manifold pressure regulation

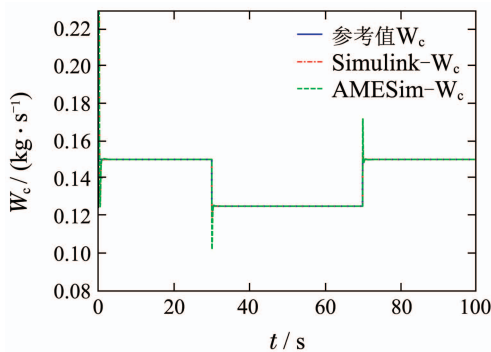


图9 压气机空气质量流量调节

Fig. 9 Compress mass flow rate regulation

其次, 本文通过流量-开度转换模块, 将经过EGR与VGT的质量流量控制转化成对阀门开度的控制. 结合式(10)与(11)可知

$$f_{kegr} = \frac{\sqrt{RT_{em}}}{P_{em} A_{egrmax} [1 - (\frac{1 - \Pi_{egr}}{1 - \Pi_{egropt}})^2]}, \quad (39)$$

$$f_{kvgt} = \frac{R\sqrt{T_{em}}}{P_{em} A_{vgtmax} [1 - (\frac{p_a}{P_{em}})^\mu]} u_3. \quad (40)$$

结合方程(13)可知VGT阀门开度 k_{vgt} 为

$$\begin{cases} k_{egr} = \frac{-\lambda_{egr2}}{2\lambda_{egr1}} - \sqrt{\frac{\lambda_{egr2}^2 - 4\lambda_{egr1}(\lambda_{egr3} - f_{kegr})}{4\lambda_{egr1}}}, \\ k_{egr} \leq \frac{\lambda_{egr2}}{2\lambda_{egr1}}. \end{cases} \quad (41)$$

结合方程(14)可知EGR阀门开度 k_{vgt} 为

$$k_{vgt} = \lambda_{vgt2} + \lambda_{vgt1} \sqrt{1 - (\frac{f_{kvgt} - \lambda_{f2}}{\lambda_{f1}})^2}. \quad (42)$$

图10表示经过流量-开度转换模块将EGR与VGT的质量流量转换成的对其相应阀门开度控制的情况. 通过控制阀门开度, 并将其变化情况作为AMESim中柴油发动机模型的输入, 对其他参数进行验证, 实现联合仿真.

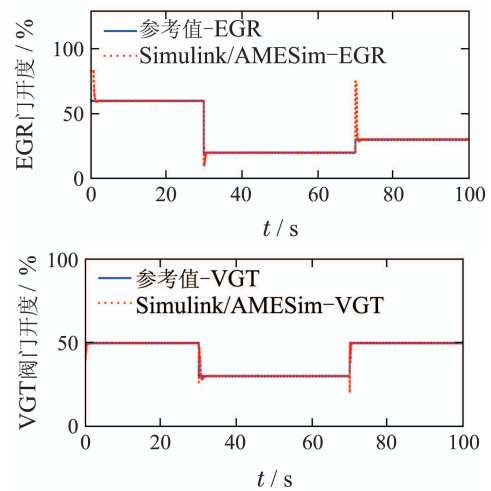


图10 EGR和VGT的阀门开度

Fig. 10 EGR and VGT valve positions

4.3 废气排放控制(Exhaust emission control)

为进一步验证燃油转速-气体回路双环控制系统的有效性, 本文将对双环控制下的烟灰颗粒物排放量进行分析. 通过上述气体回路压力与质量流量的控制, 对污染物的排放进行建模^[21]如下:

$$O_p = (k_0 + k_1\omega) P_{im}^{k_2 + k_3\omega} W_f^{k_4 + k_5\omega}, \quad (43)$$

其大小主要与转速、燃油质量流量与进气歧管压力相关. 基于Simulink和基于AMESim与MATLAB/Simulink联合仿真的烟灰颗粒物排放情况如图11.

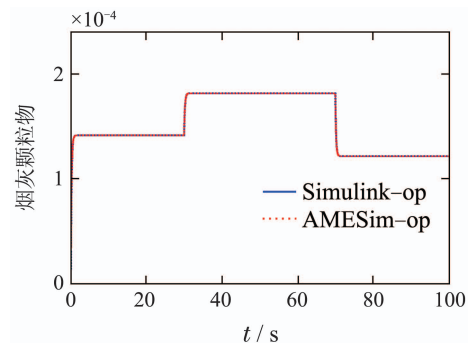


图11 烟灰颗粒物 O_p 排放

Fig. 11 Particles O_p emission

由图11得出经过双环控制可以将烟灰颗粒物控制在很小的排放范围内. 这也正是柴油发动机设计的重要目的之一: 对排放物进行有效的限值, 进而验证了双环系统设计的有效性.

5 总结(Conclusions)

本文对带有EGR与VGT柴油发动机的燃油-转速与气体回路进行了综合建模, 并在此基础上提出了内外双环动态反馈的稳定控制策略, 其控制性能在AMESim与MATLAB/Simulink的联合仿真平台中得到了具体的验证. 从仿真结果中可知基于Lyapunov函数的内环控制器在有外部摩擦及负载扰动的情况下, 依然能保证发动机转速够快速地跟踪设定值, 调整时间较短, 并快速趋于稳定, 并且保持较低的燃油消耗量; 而外环EGR-VGT控制器, 在以燃油质量流量为外部扰动的情况下, 进排气歧管压力与压气机气体质量流量能够迅速跟踪理想设定值, 稳态误差较小; 同时, 烟灰颗粒物的较小排放量也验证了此控制策略能够有效地降低有害废弃物的排放. 最后, 尽管由于模型的差异性存在, 使得Simulink仿真结果与联合仿真结果出现些许不同, 但是差异性较小, 能够验证本文所设计的双环控制策略能够满足实际柴油发动机应用的需求, 具有理论与应用价值.

参考文献(References):

- [1] 刘志华, 葛蕴珊, 丁焰, 等. 柴油机和LNG发动机排放颗粒物粒径分布特性研究 [J]. 内燃机学报, 2009, 27(6): 518 – 542.
(LIU Zhihua, GE Yunshan, DING Yan, et al. Diesel engine and LNG engine exhaust nucleation mode particles distribution characteristics research [J]. *Transactions of Csice*, 2009, 27(6): 518 – 542.)
- [2] 王耀南, 申永鹏, 孟步敏, 等. 车用汽油发动机电子控制系统研究现状与展望 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(4): 432 – 447.
(WANG Yaonan, SHEN Yongpeng, MENG Bumin, et al. Electronic control system for gasoline automotive engine: state of the art and perspective [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(4): 432 – 447.)
- [3] 何超, 汪勇, 李加强, 等. 高压共轨柴油机燃烧与二氧化氮排放特性研究 [J]. 内燃机工程, 2013, 34(1): 13 – 17.
(HE Chao, WANG Yong, LI Jiaqiang, et al. Combustion and NO₂ emission characteristics of high pressure common rail diesel engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2013, 34(1): 13 – 17.)
- [4] 田径, 刘忠长, 葛思非, 等. 可变几何截面增压器/废气再循环对重型柴油机性能和排放的影响 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(4): 864 – 868.
(TIAN Jing, LIU Zhongchang, GE Sifei, et al. Effect of VGT/EGR system on performances and emissions of heavy-duty diesel engine [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2009, 39(4): 864 – 868.)
- [5] JIANG J. Optimal gain scheduling controller for a diesel engine [J]. *IEEE Control System*, 1994, 14(4): 42 – 48.
- [6] 黄曼磊, 宋克明, 魏志达. 柴油发电机组非线性H₂/H_∞调速器的研究 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(6): 885 – 893.
(HUANG Manlei, SONG Keming, WEI Zhida. Nonlinear H-two/H_∞ speedregulator for a diesel-generator set [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(6): 885 – 893.)
- [7] LEE S H, YIM J S, LEE J H, et al. Design of speed control loop of a variable speed diesel engine generator by electric governor [C] // *Industry Applications Society Annual Meeting*. Edmonton, Alta: IEEE, 2008: 1 – 7.
- [8] MAO X B, LU X B. Research on the nonlinear governor of diesel engine with variable structure control theory [C] // *Robotics, Automation and Mechatronics*. Chengdu: IEEE, 2008: 537 – 542.
- [9] HERCEG M, RAFF T, FINDEISEN R, et al. Nonlinear model predictive control of a turbocharged diesel engine [C] // *Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications*. Munich, Germany: IEEE, 2006: 2766 – 2771.
- [10] WANG H P, BOSCHE J, TIAN Y, et al. Two loop based dynamical feedback stabilization control of a diesel engine with EGR and VGT [C] // *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. Orlando, FL, USA: IEEE, 2011: 1596 – 1601.
- [11] 刘兴华, 仇滔. 柴油机转速调节系统分析探讨 [J]. 内燃机, 2001, (4): 6 – 8. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6494.2001.04.002.
(LIU Xinghua, QIU Tao. Analysis of governing system of rotary speed in diesel engine [J]. *Internal Combustion Engine*, 2001, (4): 6 – 8. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6494.2001.04.002.)
- [12] GRATON G, OUTBIB R. Stabilizing controllers for diesel engine speed [C] // *2009 European Control Conference (ECC)*. Budapest: IEEE, 2009: 3809 – 3814.
- [13] IBRAHIM H, YOUNÈS R, BASBOUS T, et al. Optimization of diesel engine performances for a hybrid wind - diesel system with compressed air energy storage [J]. *Energy*, 2011, 36(5): 3079 – 3091.
- [14] WAHLSTROM J, ERIKSSON K, NIELSEN L. EGR-VGT control and tuning for pumping work minimization and emission control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(4): 993 – 1003.
- [15] WAHLSTRÖM J, ERIKSSON L. Nonlinear input transformation for EGR and VGT control in diesel engines [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2010, 3(2): 288 – 305.
- [16] KUZMYCH O, AITOUCHE A. CLF-based nonlinear control design for turbocharged diesel engine [C] // *21st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*. Chania: IEEE, 2013: 1484 – 1489.
- [17] UTKIN V I, CHANG H, KOLMANOVSKY I, et al. Sliding mode control for variable geometry turbocharged diesel engines [C] // *American Control Conference*. Chicago, IL: IEEE, 2000: 584 – 588.
- [18] WU L G, WANG C H, GAO H J, et al. Sliding mode control of uncertain systems with the distributed time-delay: parameter-dependent Lyapunov functional approach [J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2006, 4(2): 159 – 167.
- [19] 张静, 王广雄, 何朕. 不稳定零动态系统的鲁棒控制 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(1): 67 – 70.
(ZHANG Jing, WANG Guangxiang, HE Zhen. Robust control of systems with unstable zero dynamics [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(1): 67 – 70.)
- [20] DABO M, LANGLOIS N, CHAFOUK H. Dynamic feedback linearization applied to asymptotic tracking: generalization about the turbocharged diesel engine outputs choice [C] // *American Control Conference*. St. Louis, MO: IEEE, 2009: 3458 – 3463.
- [21] GOMAA M, ALIMIN A J, KAMARUDIN K A. Trade-off between NO_x, soot and EGR rates for and IDI diesel engine fuelled with JB5 [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2011, 11(11): 1987 – 1993.

作者简介:

神艳艳 (1989-), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为柴油发动机节能减排控制, E-mail: yy.shen1989@gmail.com;

王浩平 (1980-), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为柴油发动机节能减排控制、多源科再生能源系统建模与优化控制, E-mail: hp.wang@njust.edu.cn;

田杨 (1983-), 女, 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为线性切换系统的状态观测与估计、时变系统的状态估计与参数估算, E-mail: angetian@hotmail.com.