

基于迭代Reference Governor的自由活塞发动机活塞运动控制

宫 洵^{1,2}, 胡云峰^{1,3†}, 杨荣彬³, 陈 虹^{1,3}

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130025;

2. 美国密歇根大学 航空航天工程学院, 密歇根 安娜堡 48105; 3. 吉林大学 控制科学与工程系, 吉林 长春 130025)

摘要: 精确的活塞运动控制是实现自由活塞发动机(free piston engine, FPE)安全可靠运行的前提, 本文的主要研究内容是带有约束的FPE活塞运动控制. 根据活塞运动控制问题描述, 建立了FPE面向控制的非线性离散模型; 设计状态反馈控制器, 通过控制循环喷油量使活塞运动位置跟踪期望值; 针对电磁负载变化引起的活塞运动瞬态波动超出安全约束的问题, 考虑闭环系统非线性隐式的特点, 在不改变原状态反馈控制的框架下, 提出基于牛顿迭代的Reference Governor来调节负载, 保证系统运动满足安全约束. 所提出的控制方法为带有约束FPE活塞运动控制提供解决方案的同时, 扩展了Reference Governor算法在隐式系统的应用. 通过MATLAB与AMESim联合仿真验证了控制方法的有效性.

关键词: 自由活塞发动机; 活塞运动控制; Reference Governor; 约束

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Piston motion control of free piston engine based on iterative Reference Governor

GONG Xun^{1,2}, HU Yun-feng^{1,3†}, YANG Rong-bin³, CHEN Hong^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun Jilin 130025, China;

2. Department of Aerospace Engineering, University of Michigan, Ann Arbor MI 48105, USA;

3. Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130025, China)

Abstract: The reliable piston motion control of Free Piston Engine (FPE) is an enable technology to ensure its stable operation. This paper focuses on the study of piston motion control with constraints in FPE. Firstly, the piston motion control problem is described as the control of clearance height at the end of each stroke. Accordingly, a nonlinear implicit discrete-time, control-oriented model is developed. Then, a state feedback controller is proposed to ensure that the actual clearance height tracks the desired set-points. Regarding the motion fluctuation during load transition, a Reference Governor is proposed to manage the electric load to enforce constraints. Considering the nonlinear implicit characteristic of the system, a novel iterative Reference Governor based on Newton's method is proposed to deal with constraints in implicit system. Finally, the effectiveness of the proposed control system is tested by the co-simulation of MATLAB and AMESim which shows that good performance in piston position tracking is achieved and the constraints during load transitions is enforced.

Key words: free piston engine; piston motion control; Reference Governor; constraints

1 引言(Introduction)

近年来, 伴随着节能环保法规的不断严格, 整个社会对节能与新能源汽车的发展提出强烈需求. 在纯电动车动力电池技术突破瓶颈之前, 混合动力汽车依然是新能源汽车中的主力军^[1-2]. 自由活塞发动机(free piston engine, FPE)作为一种新型发动机, 有着诸多优点, 有望成为下一代混合动力汽车的动力装置. FPE取消传统发动机曲轴机构, 直接利用燃烧室活塞的往复

运动驱动直线电机或液压泵, 具有燃料适应范围广、热效率高、摩擦损耗小、可实现可变压缩比等优点^[3-4]. 然而, 系统中增加的自由度却降低了系统运行的稳定性: 由于取消了曲轴机构, 能够保证活塞稳定运行的机械约束机制也随之消失. 目前, FPE还停留在概念研发阶段, 缺乏可靠的控制导致FPE无法持续稳定运行是制约其工程应用的主要因素. 因此, 活塞运动控制是保证FPE稳定可靠运行的使能技术, 是决定

收稿日期: 2016-08-02; 录用日期: 2016-12-05.

†通信作者: E-mail:huyf@jlu.edu.cn.

本文责任编辑: 胡跃明.

国家自然科学基金项目(61520106008, 61374046, 61403159)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61520106008, 61374046, 61403159).

自由活塞发动机概念能否成功应用的关键。

目前,世界范围内针对FPE的控制问题已经开展了一些研究.在活塞运动控制方面,英国纽卡斯尔大学的Mikalsen和Roskilly针对一台带有空气弹簧的自由活塞液压发动机,通过控制喷油量来精确控制活塞上止点位置,通过控制空气弹簧来控制活塞下止点位置^[5];日本Toyota的研究人员将活塞位置和速度作为状态变量,设计反馈控制器,调节电机电磁负载,使活塞到达理想的运动轨迹^[6];美国明尼苏达大学Zongxuan SUN等人针对一台对置式液压FPE,提出了跟踪预定路径的活塞运动鲁棒控制方案,通过伺服电磁阀调节液压腔内的压力实现了活塞主动运动跟踪控制的目的^[7];南京理工大学的常思勤教授等面向自由活塞发电机,以止点位置作为控制目标,提出了基于电机工作状态切换的活塞运动控制器,设计了电机工作状态切换的Bang-Bang控制律及相应的迭代学习调整策略^[8].另一方面,FPE是一类带有约束的系统,负载的变化会引起活塞运动位置发生瞬态波动,此波动可能超出安全约束,严重影响系统工作性能.目前为止,对FPE带有约束的控制研究还比较有限:文献[9]针对一台自由活塞液压发动机,通过对FPE液压负载进行控制,实现对活塞运动瞬态波动的约束;文献[10]采用模型预测控制的方法,通过同时优化FPE电力负载和喷油器循环喷油量,实现对活塞运动瞬态波动的约束。

文献[13]针对发电式FPE活塞运动控制设计了状态反馈控制器,但是并没有解决负载瞬态变化时的状态约束问题.本文的工作在文献[13]的基础上进行了比较充分的扩展,主要研究带有约束的FPE活塞运动控制.首先将活塞运动控制问题描述为活塞运动到止点位置时的间隙值跟踪控制问题,建立了FPE面向控制的非线性离散模型.然后设计状态反馈控制器,使活塞运动位置能够跟踪给定值.针对电磁负载变化引起活塞运动瞬态波动超出安全约束的问题,在不改变原状态反馈控制框架下,设计Reference Governor (RG)来调节电磁负载的瞬态变化过程,从而保证系统安全约束.考虑系统为非线性隐式的特点,提出基于牛顿迭代的RG,为带有约束FPE活塞运动控制提供解决方案的同时,拓展了RG在隐式系统的应用.最后通过仿真验证控制方法的有效性。

2 控制问题描述及面向控制的模型(Problem statement and control oriented model)

本文所研究的FPE为双活塞式二冲程缸内直喷汽油发动机,其结构如图1所示.该装置集成了内燃机与直线电机,可以作为串联式混合动力电动汽车(hybrid electric vehicle, HEV)的动力装置.其内燃机部分主要部件包括:1为活塞及连杆;2为火花塞;3为喷油器;4为进气/排气阀(可变正时电磁阀);该装置将作为混合动力电动汽车的发电装置,电机部分选用永磁直

线电机,作为动子的永磁铁镶嵌在活塞连杆上,而线圈固定在定子上.当系统启动时,直线电机工作在电动机状态,将自由的活塞组件拖动到一个能够维持振动的工作频率下.燃油通过喷油器直接喷入气缸,通过火花塞引燃,在每一个气缸进行交替燃烧来推动活塞进行往复的运动,将内能转化成电能对外输出。

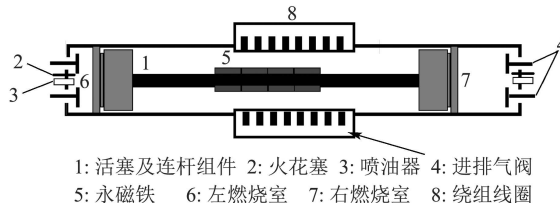
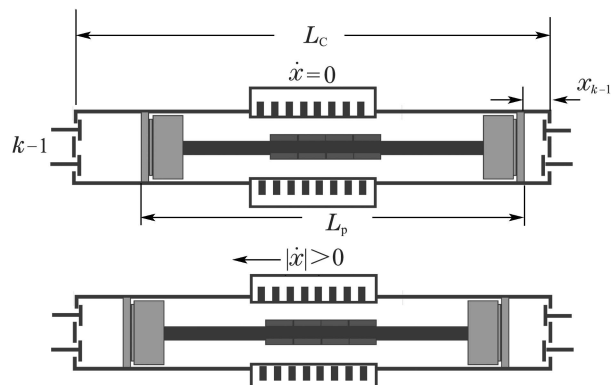


图1 FPE结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of the proposed FPE

由于FPE取消传统发动机曲轴机构,活塞运动不受机械装置的约束,当喷油量过大时,活塞容易撞击气缸顶部而损坏气缸,当喷油量过小时,系统容易发生因失稳而导致的失火现象.此外,在混合动力框架下,当电磁负载发生变化时,活塞运动会发生瞬态波动,如果波动超出安全范围同样会引起活塞撞击气缸或者失火等现象的发生.因此对活塞运动位置的精确控制并约束负载瞬态变化下的活塞位置波动对FPE发动机能否稳定运行至关重要。

在FPE活塞运动过程中,笔者关心的是每一冲程活塞位于上、下止点(top dead center/bottom dead center, TDC/BDC)的位置情况.在止点位置时,活塞与气缸顶部缸盖的间隙 x_k (如图2所示,以下称为“间隙值”)能够反映每冲程活塞的止点位置和运动情况^[9-10].因此,活塞运动控制问题即可描述为止点位置间隙值的跟踪控制问题.如果选取间隙值 x_k 为状态变量,选取能够直接影响活塞运动状态的循环喷油量和电磁负载为控制变量,控制目标就变成了通过协调控制循环喷油量和电磁负载,实现FPE活塞运动间隙值的精确控制.对于FPE的工作过程,每一冲程都可以视为一个离散事件:冲程运动、进排气、喷油、点火等.这种情况下,对间隙值的控制实际上是在离散时间框架下进行的,因此在设计控制器之前,需要建立FPE面向控制的离散模型。



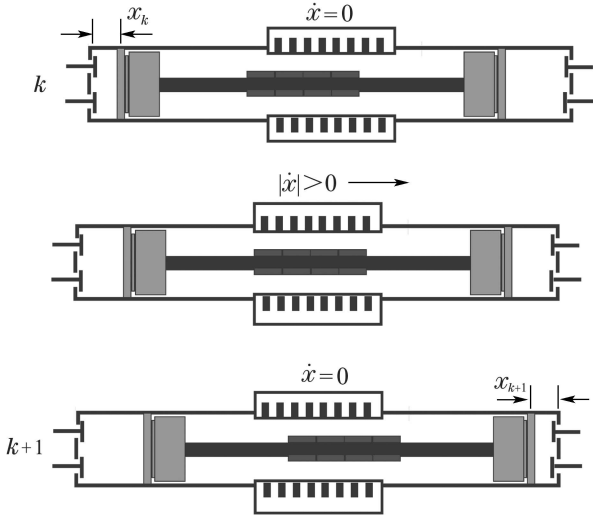
图2 系统状态 x_k 在 $k-1, k, k+1$ 时刻采样示意图Fig. 2 Sampling of state at time steps $k-1, k, k+1$ including depictions of piston velocity and FPE measurements

图2描述在一个完整循环下, 间隙值 x_k 的采样示意图, 以左侧气缸为例, 活塞组件在一个完整循环内, 经BDC-TDC-BDC所在位置的间隙值分别为 x_{k-1}, x_k, x_{k+1} ^[11-12]. 于是根据图2的描述, 对于任何一个FPE系统, 存在一个函数 f , 描述 $(k-1, k+1)$ 两个回转点之间动能变化(作用在活塞组件的功), 满足能量守恒定律

$$f(x_{k+1}, x_k, x_{k-1}, u_k, \alpha_k) = W_{\text{comp}} + W_{\text{exp}} + W_{\text{exh}} + W_{\text{int}} + W_{\text{mag}} = 0, \quad (1)$$

其中: W_{comp} 为压缩冲程做功, W_{exp} 为膨胀冲程做功, W_{int} 为进气冲程做功, W_{exh} 为排气冲程做功, W_{mag} 为直线发电机所作电磁功, u_k 和 α_k 为选取的控制量, 分别表示FPE循环喷油量和系统可调电磁负载系数. 负载 α_k 的变化对应着FPE外界的能量/负载需求的变化(驾驶员的需求), 在混合动力汽车框架下, 可以通过电力电子设备实现 $0 \sim 1$ 之间的调节^[6, 10].

假设FPE工作在理想奥拓循环(otto cycle)下, 即压缩和膨胀为等熵过程并且燃烧过程为等体过程. 同时认为进排气时做功幅值近似相等, 在这样边界条件下, 一个循环中各个过程所做功分别表示为^[11-13]

$$W_{\text{comp}} = \frac{P_0 A_p (L - x_{\text{sca}} - x_k)}{1 - \gamma} \left[\left(\frac{L - x_{\text{sca}} - x_k}{x_{k+1}} \right)^{\gamma-1} - 1 \right], \quad (2)$$

$$W_{\text{exp}} = \left[u_k H_u + \frac{P_0 A_p (L - x_{\text{sca}} - x_{k-1})^\gamma}{\gamma - 1 x_k^{\gamma-1}} \right] \eta_k, \quad (3)$$

$$\eta_k = \left[1 - \left(\frac{x_k}{L - x_{\text{sca}} - x_{k+1}} \right)^{\gamma-1} \right], \quad (4)$$

$$W_{\text{exh}} = -W_{\text{int}}, \quad (5)$$

$$W_{\text{mag}} = - \int_k^{k+1} \alpha_k K_g \dot{x} dx = - \int_k^{k+1} \alpha_k K_g \dot{x}^2 dt, \quad (6)$$

其中: P_0 为外界大气压强, A_p 为活塞表面积, γ 为等熵指数, L 为活塞最大有效冲程长度, x_{sca} 为二冲程发动机扫气行程长度, H_u 为燃油低热值, K_g 为等效电磁系数, x 为活塞组件瞬时位移, η_k 为等效奥拓循环效率.

3 带有约束的活塞运动控制系统设计 (Design of piston motion control system with constraints)

本文所提出的FPE活塞运动控制系统控制框图如图3所示. 首先在假设负载 α 为恒定的情况下, 设计状态反馈控制器, 通过调节循环喷油量 u_k , 使FPE每一冲程下的实际间隙值 x_k 跟踪上期期望值 x_r . 进一步, 根据驾驶员侧解析出的电磁负载需求 α_r , 针对负载变化引起 x_k 波动的问题, 提出迭代Reference Governor算法, 通过调节实际电磁负载系数 α_k ($\alpha_k \rightarrow \alpha_r, t \rightarrow \infty$), 保证间隙值 x_k 的波动满足安全约束 $|x_k - x_r| < \mathcal{M}$, 其中 \mathcal{M} 为约束限值. 下面详细介绍控制系统的设计过程.

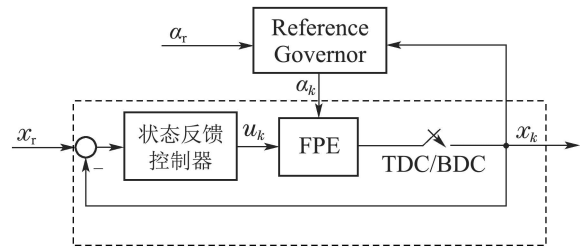


图3 活塞运动控制系统框图

Fig. 3 Control diagram of FPE piston motion control

3.1 基于状态反馈的FPE活塞位置跟踪控制 (Piston motion tracking control based on state feedback control)

在FPE活塞位置跟踪控制中, 可以选用线性二次调节器 (liner quadratic regulator, LQR)、极点配置、PID等控制器, 希望控制器简单易实现的同时能更好的满足跟踪性能. 因此, 本文以LQR为例设计FPE的活塞运动位置控制器^[13].

基于能量平衡的FPE动力学方程(1)为一个离散非线性隐式方程, 给控制器的设计带来了困难, 现有的控制技术与方法很难直接应用. 因此, 首先通过在工作点处进行泰勒展开, 将隐式系统(1)转化为如下的显式方程:

$$\frac{\partial f}{\partial x_{k+1}} \Big|_* \delta x_{k+1} + \frac{\partial f}{\partial x_k} \Big|_* \delta x_k + \frac{\partial f}{\partial x_{k-1}} \Big|_* \delta x_{k-1} + \frac{\partial f}{\partial u_k} \Big|_* \delta u_k + \frac{\partial f}{\partial \alpha_k} \Big|_* \delta \alpha_k = 0, \quad (7)$$

其中符号*表示参考工作点 $*$:= (x_r, u_r, α_r) . 在LQR设计过程中, 假设FPE电磁负载系数 α 不变, 即 $\delta \alpha_k = 0$, 在这种情况下电磁负载的变化视为系统的外界位

置有界干扰. 其中: $\delta x_{k-1} = x_{k-1} - x_r$, $\delta x_k = x_k - x_r$, $\delta x_{k+1} = x_{k+1} - x_r$, $\delta u_k = u_k - u_r$. 需要指出的是, 本文认为系统状态 x_k 可测, 其估计问题见文献[9-10].

另外, 为减少稳态误差, 本文引入积分环节 q_k , 令 $q_{k+1} = q_k + \delta x_k$, 将 q_k 视作为系统的另一个状态量, 得到系统的状态空间方程如下:

$$\begin{cases} X_{k+1} = A_c X_k + B_c \delta u_k, \\ Y_k = C_c X_k, \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$X_{k+1} = \begin{bmatrix} \delta x_{k+1} \\ \delta x_k \\ q_{k+1} \end{bmatrix}, X_k = \begin{bmatrix} \delta x_k \\ \delta x_{k-1} \\ q_k \end{bmatrix},$$

$$A_c = \begin{bmatrix} -\left(\frac{\partial f}{\partial x_{k+1}}\right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial x_k} \Big|_*, & -\left(\frac{\partial f}{\partial x_{k+1}}\right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial x_{k-1}} \Big|_*, & 0 \\ 1, & 0, & 0 \\ 1, & 0, & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_c = \begin{bmatrix} -\left(\frac{\partial f}{\partial x_{k+1}}\right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial u_k} \Big|_* \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

根据控制问题描述, 定义系统性能指标函数为

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} [X_k^T Q X_k + (\delta u_k)^T R (\delta u_k)], \quad (9)$$

式中: Q 和 R 为权重矩阵, 其中: Q 为半正定对称矩阵, R 为正定对称矩阵. 为了使性能指标(9)最小, 通过求解里卡提方程, 可以得到状态反馈控制律

$$\delta u_k = K X_k, \quad (10a)$$

$$K = -(B_c^T P B_c + R)^{-1} B_c^T P A_c, \quad (10b)$$

其中 P 为里卡提方程

$$A_c^T [P - P B_c (B_c^T P B_c + R)^{-1} B_c^T P] A_c + Q = P \quad (11)$$

的解. 进而可以得到系统实际循环喷油量 $u_k = u_r + \delta u_k$, 其中 FPE 循环喷油量的参考工作点 u_r 与期望间隙值 x_r 有关, 可以通过离线标定得到, 如图4所示.

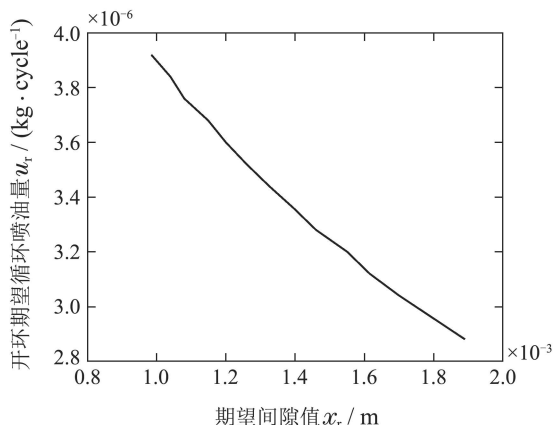


图4 喷油量参考工作点 u_r 与期望间隙值 x_r 关系

Fig. 4 Relationship between u_r and x_r

3.2 迭代Reference Governor设计(Design of iterative Reference Governor)

Reference Governor是在不改变已有闭环控制系统的情况下(已设计的闭环控制器可能无法处理约束), 保持原有良好控制性能的基础上, 调节某些瞬态大幅变化的参考信号, 保证闭环系统的状态或输入满足约束. 目前RG已经成功的应用于很多控制领域^[14]. Gilbert应用离散RG处理直升飞机四阶线性模型的控制饱和问题^[15]. 在汽车控制领域, Kalabisc通过Reference Governor方法控制节气门和废气旁通阀开度, 处理涡轮增压发动机压缩机喘振和执行器饱和问题^[16]. Sun和Kolmanovsky应用Reference Governor方法约束燃料电池的氧气过量比和氧气质量, 以达到调节电流的目的^[17]等.

纵观RG的研究现状, 所有的研究与应用都是针对显式系统进行的, 目前RG在非线性的隐式系统的研究与应用还鲜有提及. 如前所述, 通过状态反馈控制器调节循环喷油量 u_k , 在负载 α_k 为恒定的情况能够保证良好的位置跟踪性能, 联立方程(1)(10), FPE活塞运动闭环控制系统可以表示为如下的隐式形式:

$$f_{cl}(x_{k+1}, x_k, x_{k-1}, \alpha_k) = 0, \quad (12)$$

其中 α_k 是闭环系统的参考输入. 在混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)框架下, 电磁负载 α_k 根据驾驶员的需求实时变化, 其瞬态发生较大变化时, 间隙值将发生较大的波动, 甚至可能超出安全约束, 严重影响系统的稳定运行. 在HEV中, FPE的电磁负载通过电力电子设备有实时调节权限, 因此本文针对隐式系统(12), 提出迭代Reference Governor, 使其作为状态反馈控制器的外拓控制器, 在不改变原控制框架的情况下, 通过对电磁负载 α_k 的调节, 使间隙值 x_k 的波动满足安全约束. 下面介绍迭代RG的设计过程.

FPE控制系统状态需要满足约束

$$x_k \in \bar{X} = \{x : |x_k - x_r| \leq M\}. \quad (13)$$

RG在调节负载时, 希望实际负载 α_k 与负载需求 α_r 尽可能的接近, 为了达到这个目的, RG在每一 k 时刻, 通过如下形式更新 α_k :

$$\alpha_k = \alpha_{k-1} + \beta_k (\alpha_r - \alpha_{k-1}), \quad (14)$$

其中 $\beta_k \in [0, 1]$ 为调节系数, 需要通过在线寻优的方式得到, 即满足

$$\beta_k = \max \{ \beta_k \in [0, 1] : x_{k+n|k}(\alpha_k) \in \bar{X}; n = 1, 2, \dots, p \}, \quad (15)$$

其中: $x_{k+n|k}$ 为当前 k 时刻对未来第 n 步状态的预测值, p 为预测步长. 在搜索 β_k 极值问题上, 比较简单且经典的方法是二分搜索法^[17]. 从优化问题(15)可以看出, 为了得到精确的可行解 β_k , 精确预测未来系统状

态 $x_{k+n|k}$ 至关重要. 然而, 由于闭环控制系统(12)的非线性隐式的特点, $x_{k+n|k}$ 不能显式表达, 传统RG在隐式系统无法直接应用^[14].

本文针对系统隐式非线性特点, 将预测系统未来动态的问题转化为非线性方程的求根问题, 利用牛顿迭代法在预测时域区间 $[k, k+p]$ 内近似求解系统预测状态响应序列. 由于活塞运动控制系统设计过程中引入积分控制, 因此系统(12)在每一个 $[k, k+p]$ 的区间内, 未来动态与系统的历史状态相关. 在每一当前 k 时刻, 参考输入为 α_k 时, 系统 $[k, k+p]$ 的动态序列满足下面的方程组:

$$\begin{cases} f_{cl,1}(x_{k+1|k}, x_k, x_{k-1}, \alpha_k) = 0, \\ f_{cl,2}(x_{k+2|k}, x_{k+1|k}, x_k, x_{k-1}, \alpha_k) = 0, \\ \vdots \\ f_{cl,p}(x_{k+p|k}, x_{k+p-1|k}, \dots, x_k, x_{k-1}, \alpha_k) = 0, \end{cases} \quad (16)$$

其中方程组(16)含有 p 个方程、 p 个自变量, 方程组中的自变量向量为未来 p 步系统的状态响应序列.

定义方程组自变量(状态响应)序列向量

$$\begin{aligned} \mathcal{X}_k = & [x_{k+1|k}, x_{k+2|k}, \dots, x_{k+p-1|k}, x_{k+p|k}]^T \in \mathbb{R}^p. \end{aligned} \quad (17)$$

定义方程向量

$$F_{cl}(\mathcal{X}_k) = [f_{cl,1}(\cdot), f_{cl,2}(\cdot), \dots, f_{cl,p}(\cdot)]^T \in \mathbb{R}^p, \quad (18)$$

这样, k 时刻FPE间隙值预测问题转化为方程组(18)的求根问题. 通过选择一个合理的初始值 $\mathcal{X}_{k,0}$, 利用牛顿迭代法, 使其经过有限次迭代, 收敛到一个近似解 $\hat{\mathcal{X}}_k \approx \mathcal{X}_k^*$, 其迭代形式如下:

$$\hat{\mathcal{X}}_{k,i+1} = \hat{\mathcal{X}}_{k,i} - \nabla_J F_{cl}(\hat{\mathcal{X}}_{k,i})^{-1} \cdot F_{cl}(\hat{\mathcal{X}}_{k,i}), \quad (19)$$

其中: i 表示牛顿迭代次数, $\nabla_J F_{cl}(\mathcal{X}_k) \in \mathbb{R}^{p \times p}$ 表示方程组 $F_{cl}(\mathcal{X}_k) = 0$ 对应的雅克比矩阵. 迭代终止条件满足

$$\|\hat{\mathcal{X}}_{k,i+1} - \hat{\mathcal{X}}_{k,i}\| \leq \epsilon, \quad (20)$$

其中 ϵ 为设定限值. 对于(18)这样特定形式的方程组, 其对应的雅克比矩阵 $\nabla_J F_{cl}(\hat{\mathcal{X}}_{k,i})$ 为下三角矩阵, $\det(\nabla_J F_{cl}(\hat{\mathcal{X}}_{k,i})) \neq 0$, 则 $\nabla_J F_{cl}(\hat{\mathcal{X}}_{k,i})$ 为可逆矩阵^[18]. 则当前 k 时刻对未来 p 步FPE间隙值的预测序列为

$$\hat{\mathcal{X}}_k \approx \mathcal{X}_k^* = [x_{k+1|k}, x_{k+2|k}, \dots, x_{k+p-1|k}, x_{k+p|k}]^T. \quad (21)$$

利用基于牛顿迭代近似得到的未来状态序列 $\hat{\mathcal{X}}_k$, 结合输出约束(13), 在每一个 k 时刻通过二分法搜索得到满足约束条件的 β_k . 于是基于牛顿迭代法的Reference Governor优化问题描述为

问题 1

$$\begin{cases} \max \beta_k \in [0, 1], \\ \alpha_k = \alpha_{k-1} + \beta_k(\alpha_r - \alpha_{k-1}), \\ \hat{\mathcal{X}}_k \in \bar{X}. \end{cases} \quad (22)$$

由于优化变量 β_k 为标量, 在线计算量是比较小的. 为了求解优化问题1, 迭代Reference Governor算法流程如图5所示.

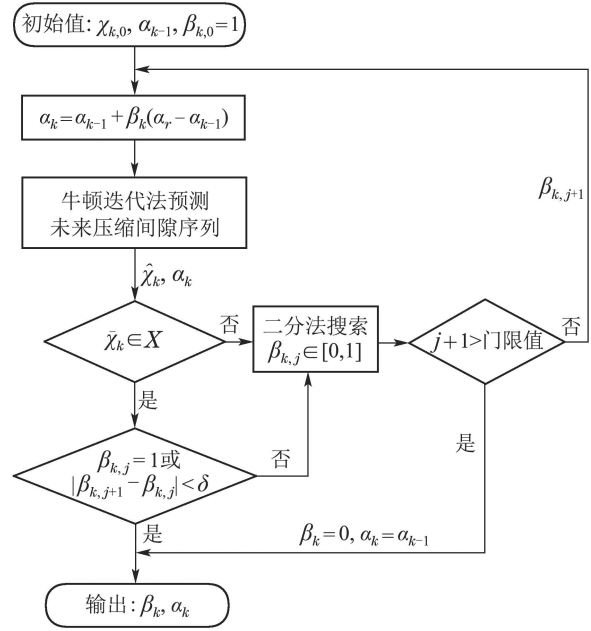


图5 迭代Reference Governor算法流程图

Fig. 5 Diagram of iterative Reference Governor

结合图5, 将迭代Reference Governor优化问题求解过程归纳如下: 在当前 k 时刻, 利用给定初始值 $\mathcal{X}_{k,0}$, $\beta_{k,0} = 1$ 和前一时刻电磁负载 α_{k-1} , 通过方程(14)更新得到当前电磁负载 α_k , 然后根据系统(12), 在预测时域 $[k, k+p]$ 区间内应用牛顿迭代法, 对FPE间隙值进行预测, 得到系统预测序列 $\hat{\mathcal{X}}_k$, 然后判断系统是否满足:

- ① $\hat{\mathcal{X}}_k \in \bar{X}$;
- ② β_k 在 $[0, 1]$ 内取得最大值.

如果条件①和②同时成立, 则Reference Governor控制系统输出当前 α_k , 否则应用二分法, 在 $[0, 1]$ 范围内重新对 β_k 进行搜索, 更新 α_k , 然后重新在 $[k, k+p]$ 区间内对FPE间隙值进行预测, 直至 $\hat{\mathcal{X}}_k, \beta_k$ 同时满足条件①②. 在极端情况下, 如果条件①始终不成立, 为保证系统满足约束, 令 $\beta_k = 0$, 即 $\alpha_k = \alpha_{k-1}$. 此外, 在二分法搜索中, 设定一个足够小的量 δ , 当 $|\beta_{k,j+1} - \beta_{k,j}| < \delta$ 时, 可以认为在 $[0, 1]$ 范围内 β_k 取到最大值; 同时为防止二分法陷入死循环, 需要为 β_k 的搜索次数 j 设定门限值.

所提出的基于牛顿迭代Reference Governor算法, 为解决带有约束的FPE活塞运动控制提供可行方案的

同时, 扩展了Reference Governor的应用范围, 能够解决一类非线性隐式系统的约束控制问题。

搭建的仿真模型如图6所示。

4 仿真验证与分析(Simulation results and analysis)

4.1 基于AMESim的FPE仿真模型搭建(FPE model based on AMESim)

在FPE控制系统开发的过程中, 需要仿真模型对控制系统的控制效果进行验证, 本文在AMESim环境下搭建FPE仿真模型, 模型的主要参数如表1所示, 所

表 1 FPE仿真模型主要参数

Table 1 Model parameters

参数	数值	单位
进气压力 P_0	1.3	bar
活塞表面积 A_p	1.809×10^{-3}	m^2
最大冲程 L	0.038	m
满载负荷 K_g	385	$N(m \cdot s^{-1})$
低热值 H_u	4.35×10^{-7}	J/Kg

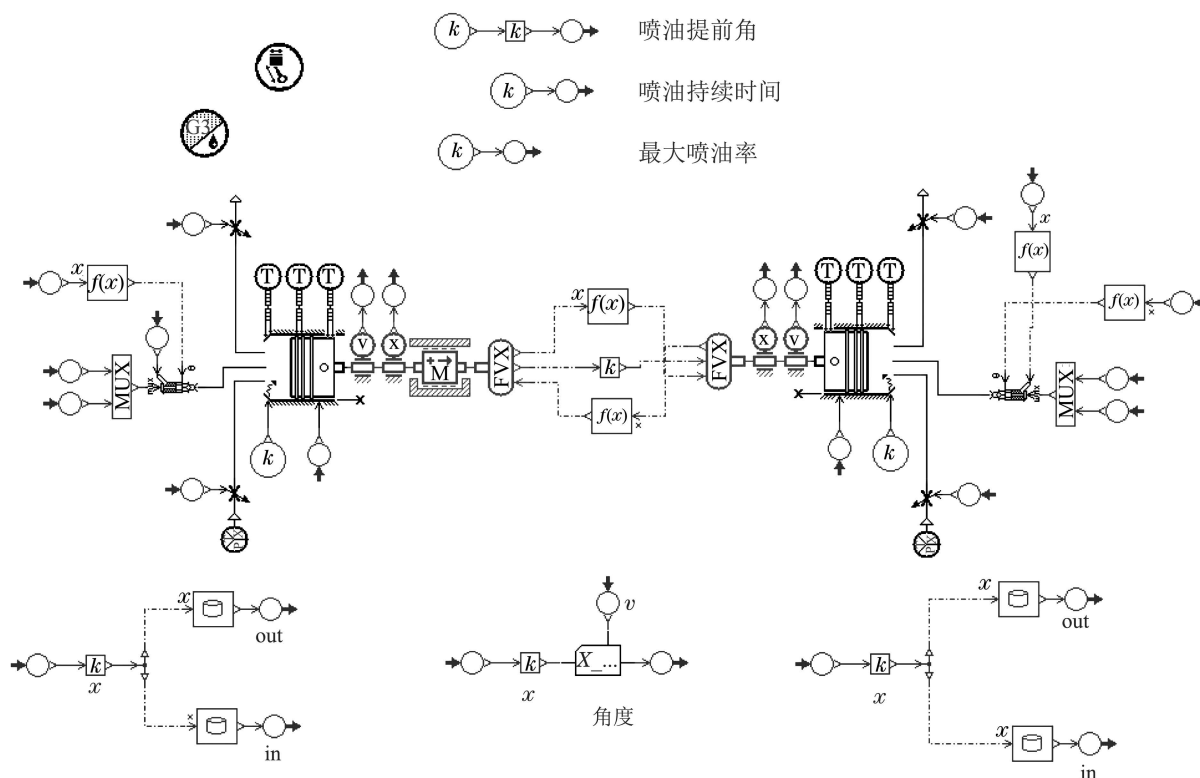
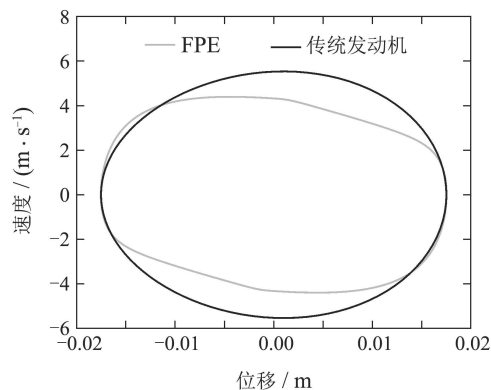


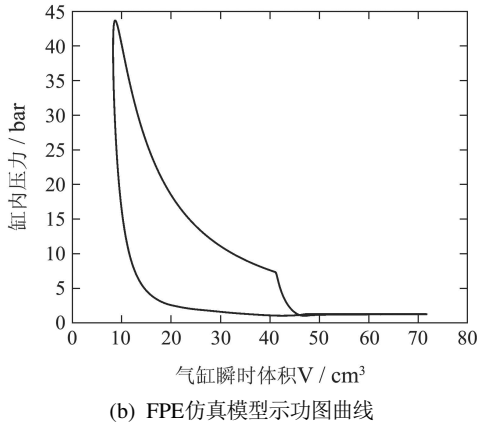
图 6 基于AMESim的FPE仿真模型
Fig. 6 FPE model based on AMSESim

由于FPE目前正处于概念研发阶段, 世界范围内的原型机有限, 在无法获取实验数据的情况下, 本文通过对FPE基本运动规律的分析, 功能上验证仿真模型的合理性. 图7(a)为FPE速度位移曲线, FPE的速度位移曲线整体呈中心对称, 当活塞运动远离止点位置时, 活塞速度变化较小; 而在止点附近时, 活塞速度突变. 与之对比, 传统发动机由于存在曲轴机构的约束, 使得活塞运动过程中速度变化比较平滑, 在止点附近速度没有太大突变. 图7(b)为FPE体积压力示功图, FPE二冲程发动机每一工作循环包括压缩、点火燃烧、膨胀、扫气等过程. 在压缩冲程中, 近似等熵过程, 火花塞点燃可燃工质后, 迅速放热, 气缸内压力急剧升高, 高压气体膨胀推动活塞下行, 系统膨胀做功; 在换气过程中, 缸内压力与

外界大气压相等. 综上, 通过对FPE基本运动规律的分析, 从功能上验证了仿真模型的合理性, 该模型可以用于FPE活塞运动控制器开发初期阶段的控制器验证.



(a) FPE仿真模型速度位移曲线



(b) FPE仿真模型示功图曲线

图7 FPE仿真模型系统特性曲线

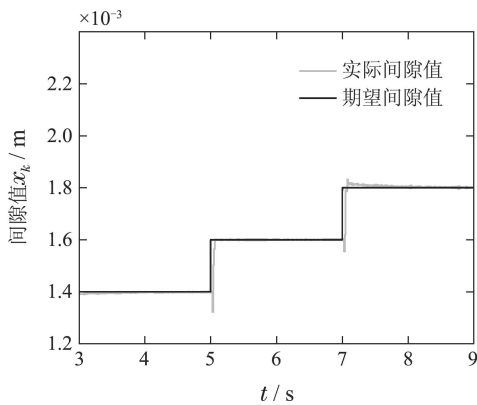
Fig. 7 Characteristics of FPE model based on AMESim

4.2 仿真验证与分析(Simulation results and analysis)

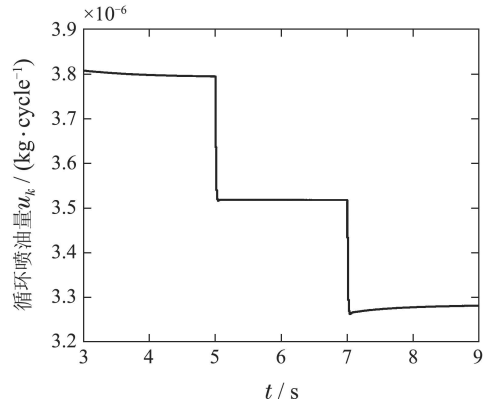
4.2.1 基于状态反馈的活塞运动控制(State feedback based piston motion control)

当FPE电磁负载恒定且系统工作在满载工况($\alpha_k = 1$)时,对于状态反馈控制系统,其间隙值跟踪曲线如图8(a)所示.从图中可以看出,稳态时FPE实际间隙值可以实现无静差跟踪,当期望间隙值发生变化时,实际间隙值可以较快的跟踪上期望间隙值.系统循环喷油量曲线如图8(b)所示,当期望间隙值变大时,喷油量减小,使活塞的有效行程减小,保证实际间隙跟踪上期望值.

当电磁负载 α_k 如图9(a)所示变化时系统的控制响应曲线如图9(b)所示.电磁负载 α_k 由1(满载工况)变化至0.9时,实际间隙值发生较大波动,且波动幅度超出安全约束.图9(c)为此情况下喷油器循环喷油曲线,当电磁负载变小后,控制系统需要减小循环喷油量,进而减小推动活塞运动的能量,保证实际间隙跟踪上期望值.由此可以看出,单纯利用状态反馈控制器调节喷油量 u_k 虽然能够得到较好的活塞止点跟踪性能,但是无法保证间隙值波动在安全约束范围.



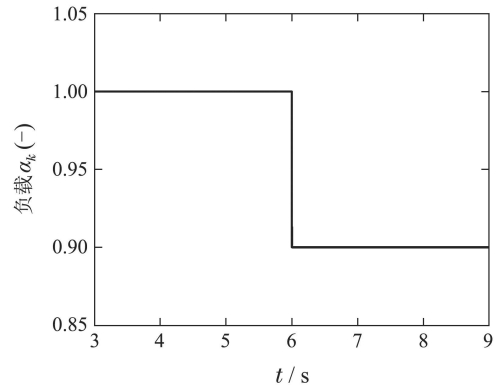
(a) 间隙值跟踪曲线



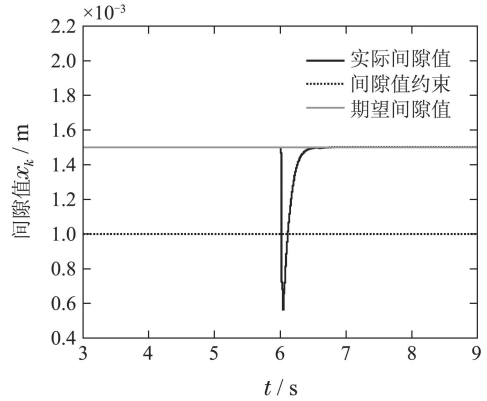
(b) 循环喷油量变化曲线

图8 电磁负载不变时FPE控制系统响应曲线: LQR

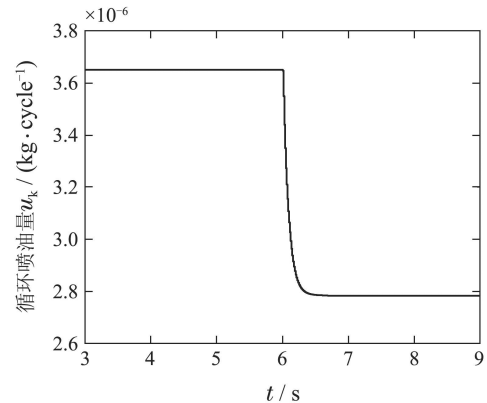
Fig. 8 Control response with constant load: LQR



(a) 电磁负载变化曲线



(b) 间隙值变化曲线



(c) 循环喷油量变化曲线

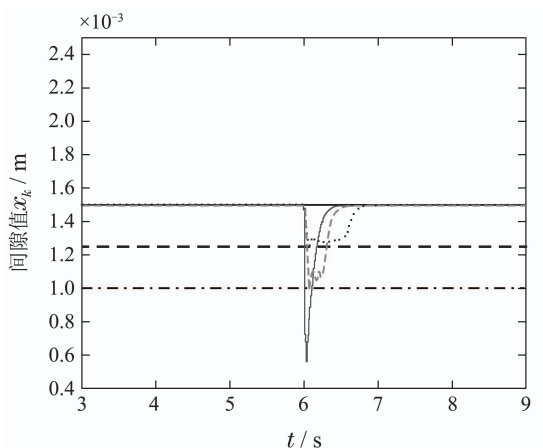
图9 电磁负载变化时FPE控制系统响应曲线: LQR

Fig. 9 Control response with varying load: LQR

4.2.2 状态反馈控制器+迭代RG(State feedback controller + iterative RG)

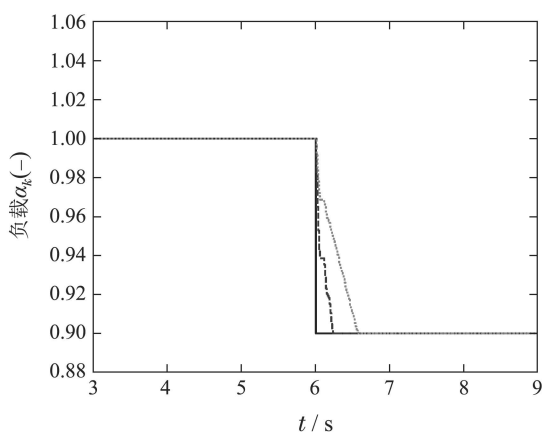
在不改变状态反馈控制器的框架上, 引入迭代Reference Governor处理约束, 控制系统响应曲线如图10所示. 从图10(a)可以看出, 当期望电磁负载发生变化时, 控制系统能够保证间隙值满足约束. 此时电磁负载 α_k 的变化曲线如图10(b)所示, 黑色实线为期望的电磁负载 α_r 变化曲线, 当安全约束越苛刻, 电磁负载 α_k 的变化率越缓, 从而保证系统状态满足约束. 图10(c)为此时循环喷油量变化曲线.

综上所述可以发现, 仅用状态反馈控制器对活塞运动进行控制时, 电磁负载变化引起的间隙值波动超出安全约束, 影响系统运行性能; 当引入Reference Governor后, 活塞运动控制系统能够保证间隙值波动满足安全约束, 并同时保证系统良好的活塞止点跟踪性能.



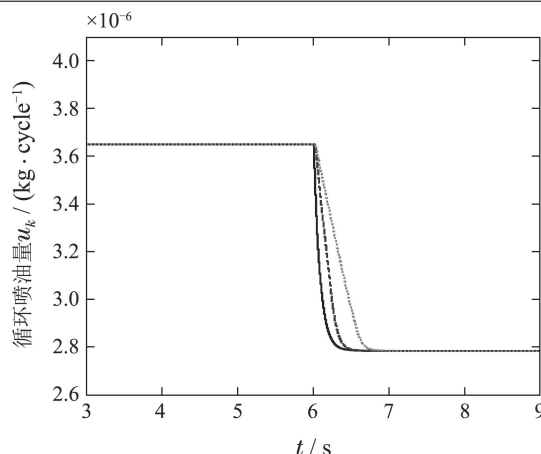
.....加入Reference Governor的实际间隙值(约束0.25 mm)
 ----间隙值约束0.25 mm
 ----加入Reference Governor的实际间隙值(约束0.5 mm)
 ——不加入Reference Governor的实际间隙值
 -.-.-间隙值约束0.5 mm
 ——期望间隙值

(a) 间隙值变化曲线



——没加入RG的实际负载 α_k
 ----加入RG的实际负载 α_k (约束0.5 mm)
加入RG的实际负载 α_k (约束0.25 mm)

(b) 电磁负载变化曲线



——不加入Reference Governor
 ----加入Reference Governor(约束0.5 mm)
加入Reference Governor(约束0.25 mm)

(c) 循环喷油量变化曲线

图 10 电磁负载变化时FPE控制系统响应曲线:
 LQR+Reference Governor

Fig. 10 Control response: LQR+Reference Governor

5 结论(Conclusions)

本文主要研究了带有约束的FPE控制问题, 提出了基于迭代Reference Governor活塞运动控制策略: 通过设计状态反馈控制器调节喷油量使活塞运动位置跟踪给定值; 针对系统离散非线性隐式并带有约束的特点, 设计了基于牛顿迭代的Reference Governor调节负载, 使FPE满足安全约束. 所提出的控制策略为FPE运动控制提供解决方案的同时扩展了Reference Governor在隐式系统中的应用. 最后通过仿真验证了所设计控制系统的有效性.

致谢(Acknowledgement)

本文作者感谢密歇根大学的 Ilya Kolmanovsky 教授和丰田北美技术研发中心的Kevin Zaseck博士在FPE建模与控制问题上给予的建议和指导.

参考文献(References):

- [1] CHEN Hong, GONG Xun, HU Yunfeng, et al. Automotive control: the state of the art and perspective [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 332 – 346.
(陈虹, 宫洵, 胡云峰, 等. 汽车控制的研究现状与展望 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(4): 332 – 346.)
- [2] SCIARRETTA A, GUZZELLA L. Control of hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Control System Magazine*, 2007, 27(2): 60 – 70.
- [3] LI Qingfeng. *Performance analysis of a free piston liner alternator* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
(李庆峰. 自由活塞式内燃发电机的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.)
- [4] MIKALSEN R, ROSKILLY P. A review of free piston engine history and applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(14): 2339 – 2352.

- [5] MIKALSEN R, ROSKILLY P. The control of a free piston engine generator, part II: engine dynamics and piston motion control [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(4): 1281 – 1287.
- [6] GOTO S, MORIYA K, KOSAKA H, et al. Development of free piston engine linear generator system, part II: investigation of control system for generator [C] // *Proceedings of 2014 SAE World Congress*. Detroit: SAE, 2014-01-1193.
- [7] LI K, SADIGHI A, SUN Z X. Active motion control of a hydraulic free piston engine [J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(4): 1148 – 1159.
- [8] XU Zhaoping. *Research on internal combustion linear generator integrated power system and its implementation* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (徐照平. 内燃-直线发电集成动力系统的键技术研究及其系统实现 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010.)
- [9] ZASECK K. *Modeling and control of hydraulic linear and free-piston engines* [D]. Michigan: University of Michigan, 2013.
- [10] GONG X, ZASECK K, KOLMANOVSKY I, et al. Modeling and predictive control of free piston engine generator [C] // *Proceedings of IEEE American Control Conference*. Chicago: IEEE, 2015: 4735 – 4740.
- [11] ZASECK K, BRUSSTAT M, KOLMANOVSKY I. Constraint enforcement of piston motion in a free piston engine [C] // *Proceedings of IEEE American Control Conference*. Portland, IEEE, 2014: 1487 – 1492.
- [12] GONG X, ZASECK K, KOLMANOVSKY I, et al. Dual-loop control of free piston engine generator [C] // *Proceedings of the 4th IFAC Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling*. Columbus: Elsevier, 2015: 174 – 180.
- [13] YANG R B, GONG X, HU Y F, et al. Motion control of free piston engine generator based on LQR [C] // *Proceedings of Chinese Control Conference*. Hangzhou, IEEE, 2015: 8091 – 8096.
- [14] KOLMANOVSKY I, GARONE E, DI CARANO S. Reference and command governors: a tutorial on their theory and automotive applications [C] // *Proceedings of IEEE American Control Conference*. Portland: IEEE, 2014: 226 – 241.
- [15] GILBERT E G, KOLMANOVSKY I, TAN K T. Discrete-time reference governors and the nonlinear control of systems with state and control constraints [J]. *International Journal of Robust Nonlinear Control*, 1995, 5(5): 487 – 504.
- [16] KALABIC U. *Reference governors: theoretical extensions and practical applications* [D]. Michigan: University of Michigan, 2015.
- [17] SUN J, KOLMANOVSKY I. Load governor for fuel cell oxygen starvation protection: a robust nonlinear reference governor approach [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2005, 13(6): 911 – 920.
- [18] HUBBARD J H, HUBBARD B H. *Vector Analysis, Linear Algebra, and Differential Forms: A Unified Approach* [M]. 4th edition. New Jersey, American: Prentice Hall, 2001.

作者简介:

宫 洵 (1987–), 男, 博士, 目前研究方向是汽车先进动力系统建模与控制, E-mail: gongxun10@hotmail.com;

胡云峰 (1983–), 男, 讲师, 博士, 目前研究方向是发动机控制、非线性控制, E-mail: huyunfeng83125@126.com;

杨荣彬 (1990–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向是发动机建模与控制, E-mail: yanronbin@126.com;

陈 虹 (1963–), 女, 教授, 博士生导师, 目前研究方向是预测控制、鲁棒控制、汽车电子控制, E-mail: chenh@jlu.edu.cn.