

车用汽油发动机电子控制系统研究现状与展望

王耀南¹, 申永鹏^{1†}, 孟步敏¹, 李会仙², 袁小芳¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 宇通客车技术研究院, 河南 郑州 450061)

摘要: 发动机电子控制系统是高性能、高可靠性发动机开发的核心研究内容, 是保证发动机动力性、经济性和排放性的重要因素之一. 针对车用汽油发动机, 本文首先分析了典型的车用汽油发动机电子控制系统结构, 然后围绕电子节气门控制系统、燃油喷射控制系统、点火控制系统、空燃比控制系统、怠速控制系统、涡轮增压控制系统、爆震检测与控制系统以及汽油机先进燃烧模式控制这8项关键问题展开论述, 并着重介绍了近年来国内外的研究内容和研究成果. 最后对车用汽油发动机电子控制系统的发展前景和发展方向进行了展望.

关键词: 电子节气门控制; 燃油喷射控制; 点火控制; 空燃比控制; 怠速控制; 涡轮增压; 爆震; 燃烧控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Electronic control system for gasoline automotive engine: state of the art and perspective

WANG Yao-nan¹, SHEN Yong-peng^{1†}, MENG Bu-min¹, LI Hui-xian², YUAN Xiao-fang¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;

2. Yutong Technology Research Institute, Zhengzhou Henan 450061, China)

Abstract: As the core research field in the development of high performance and high reliability vehicle engine, the electronic control system is one of the key factors for satisfying the engine performance of power, fuel economy and emissions. The typical structure of the electronic control system of gasoline engine is analyzed firstly. Then, the control technology and theory of gasoline engine electronic control system are reviewed from eight aspects: electronic throttle control, fuel injection control, ignition control, air-fuel ratio control, idle speed control, turbocharging control, knock detection and control and combustion control, where the state of the art of the engine electronic control technology are introduced as a key point. Finally, the prospects for the development of spark ignition engine electronic control system are presented.

Key words: electronic throttle control; fuel injection control; ignition control; air-fuel ratio control; idle speed control; turbocharging control; engine knock; combustion control

1 引言(Introduction)

随着我国国民经济的快速发展, 汽车保有量不断增加, 随之而来的能源和环境问题也日益突出, 人们对汽车安全性、经济性、动力性、舒适性、操作性以及排放性的要求也不断提高. 汽车发动机作为汽车的心脏, 是汽车最重要的组成单元, 其性能直接决定整车性能. 同时汽车发动机集机械、电气、电子、流体力学、材料学等众多学科于一体, 是一个复杂的被控对象, 具有非线性、时变性、不确定性和不完全性以及不易建立精确数学模型的特点.

自上世纪50年代美国Bendix公司推出世界上第一款电控燃油喷射系统Electrojector以来^[1], 伴随着新型

传感器以及电气执行机构的不断发展, 汽车发动机电子控制系统已不仅仅局限于早期的电控燃油喷射, 新的电子控制项目在汽车发动机中不断涌现, 例如点火正时控制、空燃比控制、怠速控制、爆震控制和先进燃烧模式控制等. 与此同时, 围绕汽车发动机的动力性、经济性和排放性, 汽车发动机的精确、优化控制成为各发动机厂商和研究机构的关注热点. 汽车发动机电子控制技术已从过去的逻辑门限值控制、稳态Map图查表法和PID控制等经典控制方法, 向现代智能控制理论和方法发展. 目前, 自适应控制、模糊控制、专家控制、预测控制和神经网络等先进智能控制理论和方法在汽车发动机电子控制系统中的应用已成为一

收稿日期: 2014-06-07; 录用日期: 2014-12-24.

[†]通信作者. E-mail: shenyongpeng@hnu.edu.cn; Tel.: +86 15073173394.

国家“863”计划项目(2012AA111004), 国家自然科学基金项目(61104088)资助.

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (“863” Program) (2012AA111004) and National Natural Science Foundation of China (61104088).

个研究重点^[2]。

尽管我国汽车年产量已经连续5年位居世界第一^[3], 汽车制造业已成为国民经济的支柱性产业, 但是应该清醒地认识到我国的汽车发动机研发、制造水平与世界先进水平仍有较大差距. 汽车发动机电子控制系统的核心技术、产品、开发设备仍依赖于国外进口, 严重地损害了民族汽车企业和消费者的利益, 也制约着我国汽车工业的长远发展^[4]. 因此, 提炼汽车发动机电子控制系统中的共性科学问题, 追踪该领域的新理论、新方法, 对掌握汽车发动机控制系统的核心技术, 增强自主创新能力, 进而提高自主品牌汽车在国际市场的竞争力具有重要的意义.

需要指出的是, 尽管燃料电池发动机、柴油发动机、斯特林发动机也部分搭载于汽车, 但是因其属于独立的技术领域, 并且很少装备于乘用车. 因此, 本文

所研究的汽车发动机电子控制系统特指广泛装备于各类汽车的四冲程汽油发动机电子控制系统. 全文结构安排如下: 第2节对汽车发动机电子控制系统的总体结构、控制项目以及涉及的传感器、执行器件进行分析; 第3节分别从电子节气门控制、燃油喷射控制、点火控制、空燃比控制、怠速控制、涡轮增压控制、爆震检测与控制以及先进燃烧模式控制8个方面对汽车发动机电子控制系统的研究现状进行了综述分析; 第4节对全文进行了总结并对汽车发动机电子控制系统的发展方向进行了展望.

2 车用汽油发动机电子控制系统概述 (Overview of the gasoline automotive engine electronic control system)

典型的四冲程车用汽油发动机电子控制系统结构及关键传感器、执行器以及发动机部件如图1所示.

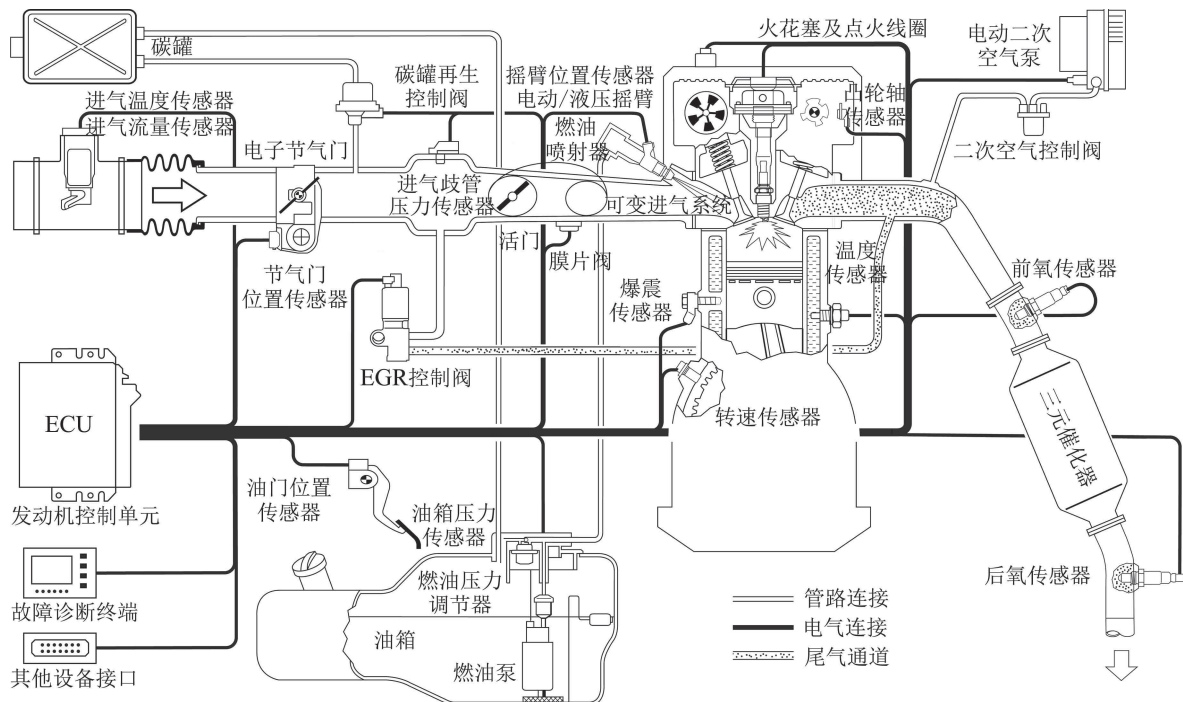


图1 典型的车用四冲程汽油发动机电子控制系统

Fig. 1 Diagram of the classic electronic control system of four-stroke gasoline engine

汽车发动机电子控制系统由多个子控制系统构成, 表1列出了常见的汽车发动机电子控制系统所包含的控制项目以及相应的传感器和执行机构. 文献[5]对表1中各传感器和执行机构的原理、结构和功能进行了详细的介绍. 同时, 根据所采用的控制方法的不同, 有些控制项目可能涉及不同的传感器和执行机构, 并且各控制项目之间所涉及的传感器和执行机构存在交叉, 因此不便于将各控制项目所涉及的传感器和执行机构单独列出. 此外, 某些控制项目由于功能单一、控制模型简单, 简单的逻辑

门限值控制就能达到其控制目标, 例如二次空气控制、燃油蒸发控制、废气再循环系统(exhaust gas recirculation, EGR)控制等. 对于这些控制项目, 本文不再对其进行详细分析, 而主要对车用汽油发动机电子控制系统中模型较复杂、问题比较集中的8项共性问题展开讨论, 即电子节气门控制(electronic throttle control, ETC)、燃油喷射控制(fuel injection control, FIC)、点火控制、空燃比控制、怠速控制、涡轮增压控制、爆震检测与控制以及先进燃烧模式控制.

表1 传感器、控制项目和执行器

Table 1 Sensors, control items and actuators

传感器(输入)	控制项目	执行器(输出)
油门位置传感器	电子节气门控制	电子节气门
节气门位置传感器	怠速控制	燃油泵
转速传感器	燃油喷射控制	燃油喷射器
凸轮轴传感器	点火控制	燃油压力调节器
氧传感器(前后)	空燃比控制	点火线圈
爆震传感器	爆震控制	二次空气阀门
增压压力传感器	涡轮增压控制	涡轮喷嘴环开度
进气歧管压力传感器	EGR控制	EGR阀
进气温度传感器	二次空气控制	电动二次空气泵
进气流量传感器	可变气门控制	碳罐再生控制阀
发动机温度传感器	可变进气控制	电动/液压摇臂
摇臂位置传感器	燃油蒸发控制	膜片阀
油箱压力传感器	燃油压力控制	

3 车用汽油发动机控制系统研究现状(State of the art of the gasoline automotive engine electronic control system)

3.1 电子节气门控制(Electronic throttle control)

电子节气门是伴随着汽车电子驱动(drive by wire)理念而诞生的. 它摒弃了传统油门踏板与节气门之间的机械连接, 而是采用电子节气门控制器或发动机控制单元(engine control unit, ECU)采集油门踏板的位置信号, 并根据此信号对节气门开度进行控制. 它既实现了节气门开度的精准控制, 又可以动态调整油门踏板位置信号与节气门开度之间的

比例关系, 有助于提高整车的动力性、舒适性^[6].

典型的电子节气门控制系统如图2所示, ETC系统由两部分组成: 最佳节气门开度计算和节气门开度的跟踪控制. ETC系统首先根据油门踏板位置信号、发动机转速、车速以及其他相关信息, 计算出最佳节气门开度信号, 从而使发动机和整车工作在最佳状态, 以提高整车的操控性和舒适性; 然后根据最佳节气门开度信号输出开度给定信号 θ^* , 开度跟踪控制算法根据 θ^* 和开度反馈信号 θ 进行闭环跟踪控制. 在最佳节气门开度信号计算方面, 文献[7]对典型工况下的驾驶员操作特征进行了分析, 定义了平直道路匀速行驶的平衡节气门开度和相对节气门开度, 并根据实车实验数据和经验收集制定了100条模糊推理规则库, 实现了节气门开度的动态调整. 该方法的不足之处在于其控制效果严重依赖于模糊推理规则库; 文献[8]提出了一种多目标优化驾驶的策略(multi-objective optimization driving strategy, MODS), 该方法以行驶时间、油耗和舒适性为优化目标, 根据车速和加速度对节气门开度和制动踏板进行调整, 在不延长行驶时间、不严重增加油耗的前提下实现了对车辆舒适性的优化, 但是该方法需要关于车辆行驶距离的先验知识, 不适合于实际车辆应用. 最佳节气门开度计算方面的难点在于既要根据油门踏板位置信号以及车辆其他相关信息, 对经济性、动力性或者排放性进行优化, 又要满足不同驾驶员的驾驶习惯, 这就要求算法具有自学习功能, 能根据驾驶习惯调整最佳节气门开度优化策略.

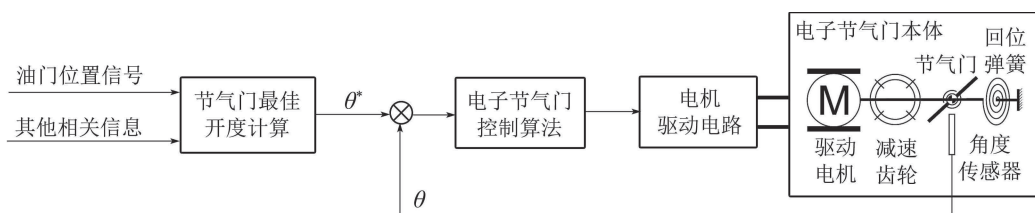


图2 电子节气门控制系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the ETC system

在电子节气门开度跟踪控制算法方面, 使用较早的是PID控制^[9]. 但是节气门系统存在多种非线性因素, 比如非线性粘滞摩擦力、非线性回位弹簧扭矩, 同时电子节气门的参数会随着发动机工作过程而不断变化, 并且存在着进气流量、发动机震动等强扰动. 采用PID控制通常难以保证系统的鲁棒性、稳定性以及控制精度^[10-11]. 通过将PID算法和其他智能控制算法进行结合, 在一定程度上改善了PID控制器的控制效果, 这类方法包括增益调度

PID^[12]、自适应组合PID的前馈控制^[13]、模糊PID等^[14-15]. 这类控制器在一定程度上改善了系统的控制效果, 但是没有从根本上解决扰动问题. 伴随着现代控制理论的发展, 模糊控制^[16]、滑模控制^[17]、积分滑模控制^[18]、线性二次型控制^[19]、自适应滑模控制^[20]、神经网络自学习控制^[21]及自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)^[22]等先进控制方法都被尝试着应用于电子节气门控制系统.

目前,电子节气门控制系统的发展方向是由单一功能向多功能集成化控制系统发展.最初的ETC设计仅仅是为了发动机扭矩控制,通过将ETC控制系统与怠速控制、换挡控制、巡航控制以及车辆稳定性控制结合起来,使ETC系统成为整车动力一体化的组成部分,进一步提高整车的操控性、经济性和动力性将是ETC系统的发展方向.

3.2 燃油喷射控制(Fuel injection control)

汽油机燃油喷射控制的关键问题是燃油定量电子控制^[5].对于目前广泛应用于各种车辆的电磁阀控制间歇喷射系统而言,燃油定量控制实质上就是

根据每循环空气吸入量 m_a 、喷油器燃油质量流量 \dot{m}_f 和过量空气系数 λ 确定喷油器的基本喷射时间 T_i ,然后根据发动机工况对基本喷射时间进行修正.其中,基本喷射时间:

$$T_i = \frac{m_a}{14.7\lambda \cdot \dot{m}_f(\Delta p_m)}, \quad (1)$$

式中 Δp_m 为喷油器喷油间隙两端的压力差.由式(1)可知,对于特定的 λ ,基本喷射时间由 m_a 和 Δp_m 决定,因此在计算基本喷射时间之前,必须先确定 m_a 和 Δp_m .典型的燃油定量控制系统如图3所示,下面分别对空气吸入量估计、燃油压力控制和燃油喷射修正控制3个方面的研究现状进行介绍.

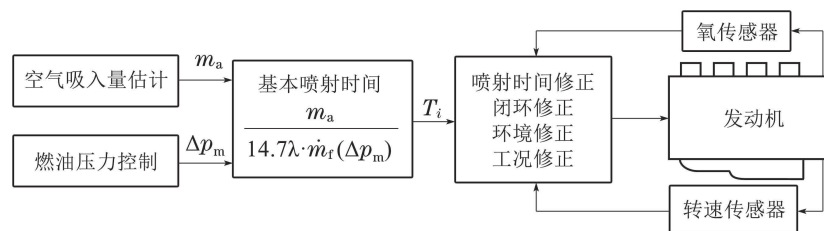


图3 燃油定量控制系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the fuel quantity control system

3.2.1 空气吸入量估计(Air charge estimation)

由式(1)可知,汽油机每循环空气吸入量 m_a 是计算基本喷射时间 T_i 必不可少的参数.汽油机每循环空气吸入量的传感方法通常有直接法和间接法两种方法.其中直接法通过阻流板式、卡门涡式、热线或者热膜式空气流量传感器直接测量进气流量,然后再根据发动机转速和气缸数目确定每循环空气吸入量.直接法空气吸入量传感方法具有精度高、不受发动机结构、尺寸影响等优点,但是其传感器响应速度较慢、且价格较高,一定程度上限制了其应用^[5].

间接法并不直接测量空气流量,而是根据节气门开度 θ 或者进气歧管压力 p_m ,结合发动机转速、进气温度、冷却液温度等信息计算发动机每循环空气吸入量.间接法又分为节气门开度-转速法和速度-密度法.根据节气门开度-转速法有

$$m_a = \eta_v(\theta, n) \cdot \frac{p_0}{RT_0} \cdot V_h, \quad (2)$$

其中: p_0 为标准大气压, T_0 为进气温度, V_h 为气缸排量, $\eta_v(\theta, n)$ 为描述节气门开度、发动机转速与充气效率 η_v 之间函数关系的表达式,该式由实际数据确定.速度-密度法与节气门开度-转速法有类似的表达式^[5].间接法具有价格低廉、响应速度快的优点,但是受发动机运行工况、环境参数的影响较大.

针对如何提高间接法发动机空气吸入量估计精

度的问题,文献[23-24]提出了一种基于输入观测器的估计方法,该方法采用速度-密度法,并且考虑了由发动机容积效率引入的不确定性,并通过实验验证了该方法具有良好的瞬态特性.由于该方法的估计精度严格依赖于发动机进气系统的数学模型,因此建立精确的进气系统模型是使用该方法的前提;文献[24]基于发动机进气歧管温度不确定性模型,提出了一种发动机空气吸入量自适应估计方法;Andersson在他的博士论文中详细地分析了增压汽油发动机(turbocharged spark-ignited, TCSI)进气系统的动态模型,并提出了一种基于恒定增益扩展卡尔曼滤波器(constant gain extended Kalman filter, CGEKF)的空气吸入量估计方法^[25];同样,采用扩展卡尔曼滤波器进行发动机空气吸入量估计的方法还有文献[26],该方法的精度同样依赖于发动机进气系统的数学模型,并且受测量噪声协方差矩阵与模型噪声协方差矩阵的影响.

3.2.2 燃油压力控制(Fuel pressure control)

对于电磁阀控制间歇喷射系统,喷油器开启时,喷油间隙燃油质量流量计算公式为

$$\dot{m}_f(\Delta p_m) = S_m \cdot \alpha_m \sqrt{2\rho_f \cdot \Delta p_m}, \quad (3)$$

其中: S_m 为喷油器喷油间隙的截面积, α_m 为喷油间隙处的燃油流量系数, ρ_f 为燃油密度.对于特定的喷油器和燃油, S_m 、 α_m 和 ρ_f 均为常数,那么只有保持

喷油间隙两端的压力差 Δp_m 恒定才能保证喷油时喷油间隙的燃油质量流量恒定,进而通过调整喷油脉宽实现对燃油喷射量的精确控制。

对于进气道喷射发动机(port fuel injection, PFI)发动机,通常使用燃油压力阻尼器和燃油压力调节器使喷油器与进气歧管之间的压力差保持恒定, Δp_m 一般为270~450 kPa^[27]。然而对于缸内直喷汽油(gasoline direct injection, GDI)发动机而言,喷油压力直接影响燃油的雾化程度与油束贯穿度,燃油压力控制系统既要保证燃油良好的雾化程度,又要根据发动机工况对油束贯穿度进行限制。同时由于高压油泵和喷油器动作的不连续特性,增加了直喷发动机燃油压力控制的难度^[27-28]。

针对直喷发动机油轨压力控制问题,文献[29]建立了共轨燃油直接喷射系统的动力学模型,并采用自抗扰控制方法设计了油轨压力跟踪控制器,该控制器采用线性扩张状态观测器(extended state observer, ESO)对系统存在的总扰动和不确定性进行估计,采用非线性误差反馈控制(nonlinear state error feedback, NLSEF)实现对扰动的抑制。该方法的优点在于不依赖与模型的精确形式,而是将模型的不确定性当作扰动的一部分,采用ESO对系统的总扰动来进行估计,因此,不需要模型的精确参数;文献[30]建立了GDI发动机燃油共轨系统的平均值模型,基于该平均值模型文献[31]提出了一种基于模型的静态前馈加积分反馈的油轨压力跟踪控制系统,平均值模型是建立在大量的实验数据的基础上的经验模型,并未考虑共轨系统的工作机理,因此不能完全反映油轨压力的瞬态特性;文献[32]从液压力学的角度建立了GDI发动机燃油共轨系统的非线性数学模型,设计了基于backstepping的油轨压力控制系统,并在AMESim仿真系统中对算法进行了验证,该方法的控制效果严格依赖于精确的数学模型。

3.2.3 燃油喷射修正控制(Fuel injection revision control)

基本喷射时间 T_i 仅仅是根据目标过量空气系数 λ 确定的基本喷油量,为了进一步提高发动机性能,还需要根据车辆运行环境、发动机工况信息、空燃比闭环信息和转速闭环信息等条件对基本喷油量进行修正,才能最终得到作用于燃油喷射器的有效喷射脉宽。通常,这些燃油喷射修正条件包括启动修正、暖机修正、高温修正、过渡工况修正、蓄电池电压修正、高负荷修正、倒拖切断、怠速修正、空燃比修正等^[1]。

燃油喷射控制的难点在于不能对实际喷油量进行测量,只能按照预定的修正Map图根据发动机的运行参数对基本喷射时间进行开环修正。发动机燃油喷射修正控制系统通常采用静态预定最优修正控制方式,即根据台架实验对发动机控制参数进行离线优化得到的Map图,由传感器检测发动机工况信息和环境参数信息,查取Map中预定的控制量,对基本喷射时间进行各种修正得到最终有效喷射时间。但是由于不同的修正量之间存在着耦合,修正参数和修正量之间存在着非线性,静态预定最优修正控制难以满足高性能发动机对燃油喷射量的精确控制需求。由于人工神经网络系统具有高度并行的信息处理能力、分布记忆、自联想、容错性和高度非线性特征,它在发动机燃油喷射修正控制中得到了一定的应用。在文献[33-34]中,作者提出了一种基于小脑神经网络(cerebellar model articulation controller, CMAC)控制的发动机燃油喷射控制系统,它采用发动机转速和进气歧管压力作为CMAC的输入,并通过实验验证了该方法的非线性学习能力和解决发动机氧传感器的固有时延特性的效果。由于神经网络需要大量的离线数据进行训练,因此其控制效果也受训练数据的准确性和数据量的影响;文献[35-36]提出了基于径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络观测器的发动机燃油喷射系统模型预测控制器,与基于小脑神经网络的燃油喷射控制系统相比,该方法采用的径向基神经网络需要更少的节点数目。此外,文献[37]建立了进气道燃油喷射系统的基于事件的离散时间采样线性系统,并将该系统描述为一个线性变参数(linear parameter varying, LPV)系统,最后作者采用线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)方法设计了进气道燃油喷射系统增益调度控制器,该方法的优点在于考虑到燃油的湿壁效应和氧传感器的时延特性;文献[38]在AMESim和Simulink中搭建了四缸直喷增压发动机仿真模型,并设计了喷油量智能控制器,该方法最大的贡献在于对汽油机燃油控制系统的热工机理进行了深入的分析,并基于该机理建立了汽油机燃油控制系统的物理模型。

3.3 点火控制(Ignition control)

汽油发动机点火系统控制的核心问题是点火提前角控制,即点火正时。点火正时对发动机的动力性、经济性和排放性能具有重要的影响,是继燃油定量控制之后第2个基本的控制项目。点火正时的基本功能是根据曲轴位置传感信息以及发动机转速、冷却液温度、蓄电池电压等信息计算出火花塞

点火时刻。点火正时优化的原则是在不发生爆震和满足排放法规要求的情况下尽量提高动力性和经济性^[5,39]。

最大扭矩下的最小点火提前角优化(minimum advance for best torque, MBT)是当前发动机点火控制系统的研究热点,即保证发动机输出最大扭矩且稳定运行时所允许的最小点火提前角的优化。文献[40]和文献[41–43]分别根据气缸内压力传感器和电离塞传感器反馈信号,设计了MBT闭环控制器,其中文献[43]还对发动机的点火延迟时间作了控制。采用气缸压力传感器的缺点是需要对气缸盖进行特殊加工,增加了系统的开发难度和成本,采用电离塞传感器虽然不需要增加传感器,但是如何从电离信号中正确提取燃烧信息是一个难点;模糊数学方法和神经网络也被尝试着应用于发动机点火控制系统,文献[44]采用模糊专家系统,将发动机转速、节气门位置、进气歧管压力、喷油脉冲宽度、发动机功率和空燃比信号作为输入值,构造了136条模糊规则,实现了对发动机点火正时优化控制。这种方法的优点在于对过渡工况具有良好的适应性,但是其控制效果依赖于专家知识库以及在此基础上设计的模糊规则;文献[45–46]分别采用压力传感器和光纤传感器作为反馈信号,提出了一种基于模糊神经网络的天然气发动机点火正时控制系统,该方法集中了模糊系统良好的推理能力与神经网络系统良好的自学习能力,在一台福特1.6L汽油发动机上的实验结果表明该方法获得了良好的转矩提升效果。但是由于采用了压力传感器和光纤传感器,这种方法不适合装车使用。

一些文献将发动机燃油喷射量控制和点火正时控制集成到一个控制系统中,通过构造一个两输出控制系统,同时实现了对燃油喷射量和点火正时的控制。文献[2,47]通过在线训练,将发动机转速和进气歧管压力作为神经网络输入,最佳点火提前角和喷油脉宽作为神经网络的期望输出,建立了一个2输入2输出的点火和喷油控制系统。类似地,文献[48–49]采用BP神经网络构建了发动机点火正时和喷油脉宽控制系统,同时控制燃油喷射量和点火正时提高了系统的控制灵活性,但是也增加了系统的控制难度,具体到神经网络控制系统而言,用于网络训练的数据必须完整的覆盖输入量和输出量的工作区间,需要大量实验数据的支撑。

3.4 空燃比控制(Air-fuel ratio control)

发动机可燃混合气中空气质量与燃油质量之比称为空燃比(air-fuel ratio, AFR)。空燃比对发动机的

排放性、动力性和经济性都有很大的影响,实现空燃比的精确控制是提高汽油机性能的关键环节^[50–51]。同时对于三元催化器而言,只有当 λ 保持在理论空燃比附近的狭窄区域内时,才能保证HC、CO和NO_x这三种有害物质同时得到最大限度的净化^[52–53]。因此,空燃比的精确控制对保持三元催化装置的高效至关重要。

空燃比控制的难点在于由燃油湿壁效应、进气系统的动态充气现象、发动机空燃比响应的延时性以及氧传感器的迟滞性造成的非线性、参数不确定性及时滞性^[54]。此外,各气缸喷油器的一致性以及由于发动机结构特性造成的各气缸进气不均衡也给空燃比控制增加了难度。

在空燃比控制系统建模以及参数辨识方面,文献[55]对基于平均值模型的汽油机瞬态空燃比控制策略及人工智能和神经网络技术在模型参数辨识中的应用进行了汇总分析。平均值模型是比较常用的一种发动机动态模型,但是它将一个循环内发动机各缸的工作状态差异进行平均化处理,忽略了各缸的差异,而且需要大量的实验数据才能确定其精确参数,因此限制了它在空燃比控制系统中的应用;文献[56–57]首先采用子空间N4SID算法对发动机空燃比多参数模型进行辨识,N4SID虽然效率较高,但是辨识精度较差。为了提高辨识精度,作者采用预报误差法(prediction error method, PEM)对模型的参数进行循环迭代优化,提高了模型精度。

在空燃比控制方法方面,传统的控制方法是根据发动机运行工况信息以及氧传感器输出信号,查表基本喷油Map图,然后加上各种修正量,实现发动机的空燃比控制。但是该方法需要大量的标定实验,且受产品制造公差和燃油品质的影响,空燃比控制精度较差。研究控制精度高、鲁棒性强且适用范围广的空燃比控制方法是当前的一个研究热点。

文献[58]采用宽域氧传感器+PID实现了对发动机空燃比的精确控制,该方法最大的优点在于不需要系统精确模型,实现简单,但是在瞬态工况下的空燃比控制精度较差,而且宽域氧传感器的使用增加了系统成本。文献[59–60]针对稀薄燃烧汽油发动机,提出了一种空燃比滑模-神经网络控制方案,该方案采用神经网络处理发动机模型中的非线性环节,对过渡工况进行滑模-神经网络前馈补偿控制,并在实验台架上验证了方法的可行性,但是由于没有考虑瞬态工况下油膜传输特性的补偿,因此在节气门快速变化时,空燃比会出现较大的超调量。文献[61]采用由高斯神经网络构成的前向自适应控制

器对瞬态油膜传输特性和进气量测量偏差进行了补偿,然后采用滑模控制器调整喷油量,一定程度上改善了空燃比控制系统的动态性能.这两种方法的不足在于都没有对滑模控制器的抖振问题进行讨论.

围绕改善瞬态工况下空燃比的控制精度和鲁棒性,采用预测算法的空燃比控制策略得到了广泛的关注.采用这种方法的观测对象一般可以分为:1)氧传感器输出:文献[62]为弥补发动机氧传感器的传输延迟对空燃比控制精度的影响,设计了一种基于广义预测控制(generalized predictive control, GPC)的空燃比控制策略,并通过dSPACE快速控制原型系统验证了该方法在改善过渡工况空燃比方面的控制效果;2)发动机转速和负荷:文献[63]提出了一种空燃比自适应模型预测控制方法,该方法根据实时的发动机转速和负荷对模型参数进行自适应调整,并采用卡尔曼滤波器对扰动进行估计,最后在Ford 2L直列四缸发动机上对方法进行了实验验证;3)发动机进气状态:文献[64]构建了发动机稳态和瞬态时的进气状态观测器和燃油动态补偿器,并提出了基于改进Sage自适应算法的稳态进气量观测器和基于卡尔曼滤波器的瞬态进气压力预测算法,在此基础上设计了发动机空燃比控制器.上述方法在实际空燃比控制系统中的最大问题在于算法的实时性难以保障.尤其是对于采用了卡尔曼滤波器的文献[63],卡尔曼增益矩阵的计算需要较大的计算量,很难在ECU中实时运行.

由于各缸之间的喷油误差、进气误差、曲轴箱通风气分配误差,各缸之间的实际空燃比可能存在10%左右的误差^[65].对发动机各缸空燃比进行独立控制是进一步提高空燃比控制精度的可行方法.在发动机分缸空燃比控制方面,文献[65]提出了基于简化进气动力学模型的发动机分缸进气量估计算法,并以分缸进气量估计作为空燃比控制的前馈通道设计了空燃比前馈控制系统,最后在六缸汽油机测试台架上验证了算法的有效性;文献[66]分析了进气道喷射发动机燃油传输动态和废气动态,建立了发动机的油路模型,并设计了分缸空燃比的状态输入观测器,最后在enDYNA软件平台上对方法进行了仿真并在实验台架上进行了验证;文献[67]建立了各缸空燃比不均匀的产生及传递模型,并利用遗传算法对模型进行参数辨识,然后采用卡尔曼滤波算法建立各缸空燃比观测器,构建了平衡各缸空燃比的反馈控制系统,最后通过GT-Power和Simulink联合仿真验证了该方法可以将各缸空燃比差异从 $\pm 10\%$ 减至 $\pm 1\%$ 以内;文献[68]利用多速采样技术,通过将发动机燃油喷射动力学和排气动力学结

合起来,建立了分缸空燃比控制系统模型,然后基于该模型提出了发动机分缸空燃比输入观测器控制方法.目前分缸空燃比控制仍然是发动机空燃比精确控制的难点之一,而且美国加州政府还出台了CARB法规,要求2011年起所有车辆必须具备缸间空燃比差异的检测能力^[67].分缸空燃比控制的难点在于如何从排气歧管汇合处的单个宽域氧传感器信号中提取各缸空燃比信号并进行单独调节.

3.5 怠速控制(Idle speed control)

怠速工况是发动机的重要工况之一.怠速控制(idle speed control, ISC)的基本功能是:1)维持发动机以较低的怠速转速稳定运转;2)当受到空调压缩机、发电机和助力转向等设备负荷波动时,迅速通过调节进气量、喷油量、点火正时等控制量来维持怠速稳定;3)进入/退出怠速工况时,保证发动机转速变化平稳,防止发动机熄火^[69].汽车在交通密集的城市道路行驶时,有近30%的燃油消耗在怠速工况中^[70],因此怠速控制系统的性能对发动机的经济性和排放性能有着重要的意义.同时,怠速控制系统还直接影响整车的舒适性.

针对发动机怠速控制问题,经典的PID控制及其各种改进型控制器得到了广泛的应用,如经典PID控制^[71-72]、增量式数字PID控制^[69]、复合模糊-PID控制^[73].此外,文献[74]提出了一种基于自适应卡尔曼滤波器的发动机怠速控制系统转矩补偿器,它采用自适应卡尔曼滤波器对PID怠速控制系统进行转矩补偿,表现出了较好的抗干扰能力和较快的响应速度,并通过和PI, PID控制器的实验结果进行比较,验证了方法的有效性.尽管在稳态工况下,上述方法已经能够取得良好的怠速控制效果,但是当发动机面临较强的转矩扰动时, PID控制器通常在响应速度上难以满足要求,容易造成发动机停机.模糊控制具有不依赖系统的精确数学模型、对系统参数和干扰不敏感等优点,因此模糊控制在发动机怠速控制系统中得到了一定的应用^[71, 75-78],根据经验知识,设计完备的、一致性良好的模糊控制规则库是保证模糊怠速控制系统性能的关键.

由于滑模控制的滑动模态与对象参数及扰动无关,适合于发动机怠速控制这类模型不精确、扰动较大的系统,因此滑模控制及其各种改进型控制方法也在发动机怠速控制系统中得到了一定应用,如基本滑模控制^[79]、离散积分滑模控制^[80]、多面滑模控制(multiple sliding surface control)^[81].滑模控制的缺点在于系统会产生抖振,实际怠速控制系统中的执行机构(一般为节气门)的响应速度难以满足

理论要求,限制了滑模控制在实际节气门控制系统中的应用。

神经网络也在发动机怠速控制系统建模、观测器设计和控制器设计中得到了广泛的应用。如基于神经网络的发动机怠速模型参考自适应控制^[82]、动态神经网络^[83]、径向基神经网络^[84]。基于神经网络的怠速控制系统存在的最大问题在于网络的学习速度通常难以满足怠速控制系统对实时性的要求。

模型预测控制通过在线反复优化并循环实施其控制作用和模型误差的反馈校正,可以有效地克服系统的不确定性和非线性,具有良好的鲁棒性。目前3种典型的预测控制算法模型算法控制、动态矩阵控制和广义预测控制均在发动机怠速控制系统中得到了初步的应用^[70,85-88],但是它们存在的共同问题在于巨大的计算开销,以嵌入式微控制器为载体的运算单元难以保证算法的实时性要求。

目前,均质压燃等先进汽油机燃烧模式的提出,增加了燃烧的不稳定性,也给发动机怠速控制系统提出了新的挑战。因此,均质压燃汽油机怠速控制系统开发将是今后的研究重点。

3.6 涡轮增压控制(Turbocharging control)

通过发动机进气增压技术可以有效地提高发动机的进气密度,以较小的发动机排量获得较大的扭矩和功率,同时还可以有效改善发动机排放性能。常见的增压系统有机械增压、压力波增压、废气涡轮增压、复合增压和电辅助增压^[89]。相比于机械增压、压力波增压和复合增压系统,废气涡轮增压具有不消耗发动机机械输出功率、体积较小、结构相对简单等优点,在目前的车用增压器中占据了主导地位^[90]。

尽管从原理上讲,汽油机的涡轮增压与柴油机相比并没有本质的区别,但是对于汽油机而言,由于增压后气缸内的压力和温度的上升,容易引起爆震。同时由于汽油机过量空气系数较小,燃烧温度较高,膨胀比小,废气温度也比柴油机高 $200^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$,这导致了汽油发动机热负荷的增加^[89]。此外,汽油机转速运行范围较柴油机宽,进气流量变化范围大,可能出现低速时增压压力不足、高速时增压压力过高的情况^[91]。因此,增压压力控制对于汽油发动机性能有着非常重要的影响。

增压压力电子控制一般是通过调节旁通阀开度或可变喷嘴涡轮(variable nozzle turbocharger, VNT)的喷嘴环开度实现的^[92]。由于通过调节旁通阀开度是以放走一部分废气为代价来调节压缩机转速的,浪费了一部分废气能量,因而效率较低,限制了涡

轮增压系统性能的进一步提升。可变喷嘴涡轮增压系统是通过电液控制结构调节涡轮喷嘴环叶片的开度来调节涡轮转速进而实现增压压力的精确控制的。在发动机低速时,通过减小涡轮喷嘴环叶片开度使增压压力提高以改善发动机的低速特性;发动机高速时,增大叶片开度,使增压压力不至于过高。可变喷嘴涡轮增压系统还可以扩大发动机低油耗运行区域,改善发动机的瞬态响应特性^[93]。因此,可变喷嘴涡轮增压器是一种较为理想的增压方案。目前关于如何根据发动机实时运行工况对增压压力进行快速、精准控制是可变喷嘴涡轮增压器电子控制系统的研究热点。王恩华等采用数字PID控制方法,通过控制步进电机的步数实现对喷嘴开度的调节,通过发动稳态实验验证了可变喷嘴涡轮增压器对发动机性能的改善效果^[94]。日本的Nissan公司与美国的Allied Signal, Garret公司共同开发了一种可变喷嘴涡轮增压系统,该系统采用以电动真空泵为动力源的膜片式负压执行器,控制器通过调整真空泵压力控制阀的开启和关闭时间来调整负压的大小,实现对涡轮喷嘴环叶片开度的连续调节。控制器采用PI控制对增压压力进行闭环控制,同时为了提高非稳态工况下系统的稳定性和平滑性,又增加了前馈控制作为PI控制器的补充。与传统的步距控制方式相比,该系统达到稳态最佳增压压力的时间减少了30%,发动机的燃油经济性提高 $0.7\%\sim 1.1\%$ ^[95]。

尽管传统的PI/PID控制能够基本实现增压压力的闭环控制,相比步距控制取得了一定的进步。但是由于增压压力控制系统的非线性,以及由废气压力波动、节气门开度变化引起的扰动,当发动机工况波动时,PI/PID控制器通常难以快速、准确地将增压压力调整至设定值。为了解决增压压力控制系统的非线性,文献^[96]提出了一种基于增益调度模型预测控制的增压压力和EGR率控制方法。台架实验结果表明该方法可以有效地应对发动机负载波动引起的增压压力波动,但是该方法严格依赖于发动机和涡轮增压系统参数,需要通过大量的台架实验确定控制系统参数。文献^[97]利用定量反馈理论设计了发动机增压压力和EGR率控制多输入多输出控制系统,这种方法有效地增强了系统的鲁棒性,降低了扰动对增压压力控制效果的影响,但是并未消除增压压力控制系统与进气系统之间的耦合。

采用可变喷嘴涡轮增压器的缺点在于当发动机转速较低时,废气产生的能量通常难以满足较高的空气压缩比,导致了发动机低速性能的恶化。在这种情况下,电辅助涡轮增压系统应运而生,并成为发动机增压电子控制系统的新的研究方向。电辅助

涡轮增压系统通过将电机连接到涡轮增压器的轴上,当发动机工作在启动或加速工况时,电控单元驱动电机,驱动压缩机加速进而提高进气压力.此外,当发动机工作在高转速或大负荷工况时,电机还可以作为发电机,将部分涡轮能量转换为电能.因而电辅助涡轮增压系统能够有效改善发动机的低速性能和瞬态响应特性以及经济性.目前制约电辅助增压系统技术的关键问题包含两个方面:一是电机方面,由于涡轮增压器的转速很高(一般每分钟10万转以上)^[98],所以辅助电机也应该具有很高的输出转速,这要求电机转子结构必须紧凑,且能承受涡轮增压器的热辐射和高频振动^[99-100];二是电辅助涡轮增压控制策略方面,相比于可变喷嘴涡轮增压系统,电辅助涡轮增压系统控制更灵活,可以在任何发动机工况下将增压压力调整至期望值,因此根据发动机工况及时调整电辅助涡轮增压控制策略是电辅助增压系统研究的一个重要方向^[101-102].

3.7 爆震检测与控制(Knock detection and control)

爆震是发动机的一种非正常燃烧现象,是由气缸中远离火花塞的末端混合气在火焰前锋到达之前自燃造成的.爆震发生时,气缸内火焰传播速度剧增,压力陡升并作高频大幅波动,发动机发出金属敲击声,机体振动加剧,冷却液、润滑油和气缸盖温度增高.轻微爆震时,发动机功率略有增加,强烈爆震时发动机功率下降、转速降低,运转不稳定.爆震对发动机危害极大,它会加重缸盖和活塞的热负荷,造成缸盖和活塞磨损加剧甚至局部熔化、开裂,同时过高的机械负荷会加速轴承、缸垫的损坏,爆震还会使发动机的排放恶化、油耗增加,同时强烈振动和噪声严重的影响了驾驶的舒适性.因此,探究发动机爆震的产生机理和影响因素、开发爆震检测传感器和相应的信号处理方法、设计合理的爆震强度指标进而控制爆震的发生对提高发动机性能具有重要意义.

关于发动机爆震检测的方法,根据所采用的测量信号,一般可分为5类,即:机体振动法、气缸压力法、燃烧噪声法、火花塞离子电流法、瞬态热信号法.

1) 机体振动法.通过在机体或者气缸盖合适的位置安装振动(加速度)传感器,爆震发生时便可从机体振动信号中提取相应的爆震信号.尽管需要加装额外的振动传感器,但是该方法具有较高的检测准确率,因此它是目前发动机中应用最广泛的爆震检测方法.机体振动法的难点在于振动信号与机体的安装位置有较大的关系,需要大量的实验进行匹

配.此外在发动机高速运转时,信噪比较低,如何从振动信号中提取有效爆震特征是机体振动法检测爆震的研究热点.通过对振动传感器信号进行时域和频域的分析,确定爆震临界值电平是目前广为使用的振动信号处理方法^[103].此外,一些复杂的信号处理方法也被应用于爆震检测中,例如文献^[104]通过对发动机机体振动信号进行连续小波变换得到了发动机的噪声强度,并根据噪声强度来判断发动机是否发生了爆震;文献^[105]通过对机体振动信号进行自回归滑动平均(auto regressive moving average, ARMA)模型分析,提出了一种用于测量发动机轻微爆震的新方法.这些方法尽管在不同程度上改善了检测的准确率,但是由于算法实时性较差,限制了它们在实际发动机中的应用.

2) 气缸压力法.压力示功图反映的是气缸内压力波动的直接信号,故通过在气缸盖安装压电晶体传感器、压电陶瓷传感器或光纤压力传感器,根据气缸压力信号的波动便可提取发动机爆震信息.文献^[106]采用高速摄影法和同步记录气缸压力示功图,对火花点火发动机爆震特性进行了试验研究,试验结果验证了爆震起因于末端混合气的自燃;文献^[107]采用缸内压力传感器和光纤传感器对发动机全负荷工况时爆震发生的位置进行了识别,并根据计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)对爆震进行了热力学定量分析.该方法尽管可以得到关于燃烧的全面信息,但是实验设备较昂贵,而且需要对气缸盖进行特殊加工,所以仅仅在实验室中用于对发动机燃烧和爆震机理的研究.

3) 燃烧噪声法.由于爆震发生时,发动机会产生金属敲击声,因此通过测量发动机的噪声频率,配以相应的信号滤波处理系统和信号分析系统,便可在爆震发生时从发动机噪声信号中提取出相应的爆震特征.文献^[108]由KIVA燃烧计算的流场模型推出三维声学波动方程,并通过与KIVA源程序的联合求解得出了发动机爆震燃烧过程中的声学振荡过程及声学激励项的特征,以及各燃烧激励源对气缸压力波动的贡献和声场分布情况、燃烧室声学振荡规律;文献^[109]提出了一种爆震燃烧声学测量方法和相应的信号处理方法,并通过实验验证了该方法可以有效应用于爆震检测.尽管燃烧噪声法已被证明可以作为一种有效的爆震检测方法,但是它对轻微爆震的检测准确率并不如机体振动法,且成本远高于机体振动法,所以并未受到持续的研究和关注.

4) 火花塞离子电流法.碳氢化合物在燃烧时,会产生游离离子,使火焰和燃烧产物具有导电性.利

用该特性,在火花塞两极之间加上适当的直流偏置电压,就会形成所谓的火花塞离子电流.离子电流的大小与瞬时离子浓度有关,而瞬时离子浓度是由燃烧过程决定的.因此通过对离子电流信号的频域和时域研究,就可以对气缸内燃烧过程进行分析^[110].根据火花塞离子电流信号对爆震特征进行提取已成为发动机爆震检测方法的研究热点^[110-113].火花塞离子电流法爆震检测的优点是不需要安装额外的传感器,不需要对原有发动机结构作任何改变,只需要添加简单的激励及信号处理电路便可进行离子电流信号的检测.该方法的难点在于如何根据离子电流信号准确地提取爆震特征以及爆震强度评价指标的确定^[112,114].

5) 瞬态热信号法.爆震发生时,放热率的剧增会造成缸盖、冷却液以及润滑油的温度变化,通过检测发动机冷却液或者缸盖、缸体的温度波动便可以从中提取爆震特征^[115-116].但是受限于发动机材料和冷却液的热传导率及热扩散率,这种方法的响应速度较低,限制了其进一步应用.

根据检测到的爆震信号,及时调整点火提前角,最大限度地缩小爆震安全距离是爆震控制系统的核心.传统的爆震控制系统在爆震发生时,将气缸的下次点火正时比特性场数据推迟一个固定的量,如果下次仍发生爆震,则继续推迟点火提前角直至不发生爆震,然后再逐步增大点火提前角直至恢复特性场数据.该方法的缺点是调整速度慢,且发动机工作在爆震极限两侧.围绕如何提高爆震控制的调整速度和准确性,有学者提出了基于统计学的控制方法^[117-118],相对于传统方法,这些方法在一定程度上提高了爆震控制的调整速度,但是该方法是建立在大量统计信息的基础上的,需要大量实验数据的支持,并且在准确性上还有待提高^[119].

3.8 先进燃烧模式控制(Advanced combustion mode control)

燃烧是将燃料的化学能转换为热能的过程,是发动机运行的核心过程,也是决定发动机效率与污染物排放的最重要的环节.20世纪90年代后期以来,面临着越来越严格的有害气体排放法规以及越来越高的燃油经济性要求,内燃机先进燃烧理论和技术研究进入了一个新的活跃期^[120].一方面先进传感技术以及电气执行机构在发动机上的应用,为控制发动机燃烧过程的速率和方向提供了可能,进而为开发更为高效、清洁的发动机燃烧模式提供了可能,如稀薄燃烧(lean burn, LB)、均质压燃(homogeneous charge compression ignition, HCCI)、低温燃烧(low

temperature combustion, LTC)等;另一方面新的燃烧模式也对发动机电子控制系统及控制方法提出了新的挑战.天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室苏万华院士曾指出:“新一代内燃机燃烧理论的核心学术思想是燃烧过程边界条件与燃料化学的协同控制”.通过燃烧边界条件的控制,控制燃料均匀程度、燃料浓度、氧浓度以及再循环废气浓度等与燃料化学动力学过程相关的物理和化学参数,从而使燃烧过程按着预定的高效、低污染的方向和速率进行.这种物理和化学参数的控制是通过燃料和空气的供给与混合、稀释气体的利用、进气温度等参数的控制实现的.因此必须对内燃机的燃料和空气供给系统、废气再循环系统及散热系统等进行高度灵活的、智能化的控制,以达到协同控制的目的.燃烧控制是燃烧学、信息和控制学科的交叉,是对传统燃烧学的发展^[121-122].

在汽油机先进燃烧模式方面,“均质压燃”燃烧理论被认为新一代内燃机燃烧理论的代表,根据这一理论可以组织最高效、最清洁的燃烧过程.苏万华院士在其专著《均质压燃低温燃烧发动机理论与技术》和《内燃机燃烧与控制》中对均质压燃的理论内涵、国内外发展现状、核心学术思想以及他的研究团队在近年来取得的研究成果进行了深入详实的分析和介绍^[121-122].

在燃烧模式控制方法方面,由韩京清教授最先提出来的自抗扰控制得到了很好的应用.自抗扰控制既继承了经典PID控制器不依赖于控制对象精确数学模型的优点,又利用非线性结构弥补了PID控制的固有缺陷.自抗扰控制把被控对象中的未知部分归结为系统的总扰动,通过扩张状态观测器对系统的总扰动进行估计并给予补偿.具有良好的适应性、鲁棒性和可操作性.2012年10月份,天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室还专门举办研讨会就自抗扰控制的核心思想及其在发动机控制、汽车控制领域的应用展开专题讨论.围绕HCCI发动机,自抗扰控制得到了一系列的应用.文献[123]提出了一种基于模型前馈-解耦-自抗扰控制的HCCI发动机燃烧控制方法,该方法以燃烧相位CA50、平均指示有效压力和空燃比为输出,Simulink/GT-power仿真结果表明该方法对发动机转速波动、进气温度波动和冷却液温度波动均表现出了良好的鲁棒性;文献[124]提出了一种混合自抗扰控制策略(HDRC)用于HCCI汽油机的可变气门正时机构控制,实验结果表明该方法比PI控制器有更快的响应速度和更好的鲁棒性.

燃烧相位检测是HCCI发动机燃烧控制的基础,在HCCI汽油发动机的燃烧相位检测和辨识方面,文献[125]对基于内部残余废气的汽油HCCI燃烧过程的离子电流特性进行了实验分析,结果表明离子电流拐点相位、峰值相位与HCCI燃烧相位的线性相关系数在0.95以上;文献[126]利用Elman神经网络对HCCI汽油发动机的燃烧相位进行预测,实验结果表明该方法对HCCI动态过程的燃烧相位CA10预测误差小于 0.8°CA ,而对CA50的预测误差小于 0.9°CA ;文献[127]利用Elman动态递归神经网络从气缸压力信号中对HCCI汽油发动机的燃烧相位CA50进行了在线辨识,结果表明该方法对CA50的预测误差小于 0.25°CA ;文献[128]利用傅立叶变换将时域的机体振动信号转换至频域,然后对机体振动信号与燃烧相位之间的关系进行了分析,结果表明机体振动信号与燃烧相位之间具有很高的相关系数,可以作为一种有效的燃烧相位检测方法;文献[129]利用时域方法从爆震传感器信号和瞬时转速信号中提取HCCI汽油机燃烧模式信息,总体辨识成功率在75%左右.上述方法均是通过间接反映燃烧相位的可测量物理量信号进行辨识而提取发动机燃烧相位的,在相位检测的准确率方面还亟待提高.开发可直接反映HCCI汽油发动机燃烧相位的新型传感器件或者深入研究可测量物理量与燃烧相位之间的关系,提高相位检测准确率是今后一个时期燃烧相位检测研究的重点.

4 结论与展望(Conclusion and perspective)

综上,伴随着先进传感器及电气执行机构的不断发展,汽车发动机电子控制系统的各个领域都取得了许多令人瞩目的进展.但是,伴随着全球石油资源的日益枯竭以及大气污染的日益严重,人们对发动机经济性能和排放性能的要求也越来越高.与此同时,大量的新型传感元件和电气执行机构的使用,增加了发动机电子控制系统的控制自由度,也增加了变量之间的耦合程度,使发动机控制系统的模型更加复杂,这对发动机电子控制系统的控制理论、设计思想、标定和实验方法都提出了新的挑战.总之,发动机电子控制领域还存在着很多重要的尚未解决的问题需要相关的科研技术人员去探索和研究.针对这些问题,对未来车用汽油发动机电子控制系统的发展趋势作如下展望.

1) 均质压燃汽油机燃烧控制.燃烧是内燃机核心,通过对燃烧模式的优化,内燃机预计还有25%~50%的节油潜力^[121].以均质压燃为代表的汽油机先进燃烧模式是着火极限和稳定燃烧极限下的“极

限”燃烧过程,要实现这种极限燃烧过程,就要充分利用燃料的燃烧特性和与之相适应的边界燃烧条件控制.因此,HCCI汽油发动机的燃烧速率控制、爆震控制、多燃烧模式切换控制及与其相关的传感和检测方法,将是今后一个时期汽油发动机电子控制系统的研究重点^[121];

2) 发动机混合建模方法.发动机是一种复杂的能量转换装置,很难通过基本的物理、化学定律建立其精确模型.目前广泛使用的发动机平均值模型,是在大量的实验数据的基础上而得出的一种经验模型,模型精度较差,没有完全反映发动机的工作机理,且参数非常多,对不同的发动机需要进行大量的重复实验才能建立其模型.针对发动机这样的复杂系统,通过对大量离线或者在线数据进行分析,探索变量之间的内在关系,研究机理模型和经验模型相结合的混合建模方法,对深入理解发动机控制系统机理,开发新型发动机控制方法具有重要的理论指导意义;

3) 多工况下发动机多目标优化控制.随着各国汽车排放法规对NO_x, CO和HC等污染物排放标准的进一步提高,持续地改善发动机排放性能是发动机电子控制系统的重要任务.但是,由于发动机的经济性、动力性和排放性之间往往存在冲突,进一步地提高排放性可能会导致经济性或动力性的恶化.同时,发动机往往频繁交替工作在加速、减速、匀速、驻车等各种工况下,不同工况下对发动机各控制目标的要求也不完全相同.因此,研究多工况下发动机多目标优化控制,对协调各控制目标,综合改善发动机性能具有重要意义;

4) 发动机自动标定/匹配平台开发.发动机的标定/匹配过程需要实验人员反复地调整控制参数,并根据实验结果反复地调整各种Map图,工作过程非常繁琐,并且随着发动机控制系统复杂度的提高,需要优化、控制的参数越来越多,发动机标定/匹配的过程也呈现出越来越复杂的趋势.因此,开发以计算机为核心的发动机电子控制系统自动化标定/匹配平台,将会大大提高发动机标定/匹配效率.在国外,已经有商品化的发动机自动标定/匹配平台,例如AVL Puma Open等.在国内,文献[130]早在2001年就自主开发了发动机自动优化匹配管理平台,湘仪动测、洛阳凯迈等公司也推出了发动机自动化测试平台,但是这些平台在功能、集成化、自动化程度上均与国际先进水平有较大差距.因此,研究开发具有自主知识产权的发动机自动标定/匹配平台,对于打破国外垄断,开发高性能的发动机

电子控制系统具有重要意义;

5) 高效的发动机电子控制系统开发模式研究。大量的传感器和电气执行机构、复杂的工作机理和变量耦合关系, 决定了开发高性能的发动机电子控制系统是一项复杂、繁琐、耗时的系统工程, 并且开发过程离不开各种各样的实验、调试、方案调整。传统的Step-by-Step开发模式在开发效率、开发成本以及开发风险上已很难适应于发动机电子控制系统这样的复杂系统。近年来, 基于“V模型”的开发模式, 6Sigma设计(design for six sigma, DFSS)以及嵌入式软件开发瀑布模型等先进开发模式在发动机控制系统开发中得到了越来越多的应用, 在一定程度上提高了开发效率。但是, 具体到特定的发动机电子控制系统开发, 上述开发模式都还存在某些局限性, 例如基于“V模型”的开发模式在代码移植环节仍然需要大量的人工介入, 瀑布模型对需求变化的不敏感等。因此, 针对现有开发模式的缺点, 结合实际发动机电子控制系统的开发特点, 设计更为高效的开发模式, 是发动机电子控制系统开发的一个重要研究内容。

近年来, 伴随着我国汽车产销量以及国内市场需求的逐年提高, 以及各汽车厂商对企业核心竞争力自我要求的不断提高, 各汽车厂商和科研机构对自主创新能力的认识也逐步深刻, 越来越多的企业致力于开发具有自主知识产权的发动机电子控制系统和相关零部件。相信随着国产发动机电子控制系统的不断成熟, 必将为国产高性能发动机设计和制造带来巨大动力, 为提高自主品牌汽车的核心竞争力奠定基础。

参考文献(References):

- [1] 日本自动车技术会. 汽车工程手册: 基础理论篇 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
(Society of Automotive Engineering of Japan. *Automotive Technology Handbook: Basic Theories* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010.)
- [2] 李国勇. 智能控制与MATLAB在电控发动机中的应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
(LI Guoyong. *Application of Intelligent Control Theory and MATLAB in Electronic-Controlled Engine* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.)
- [3] 中华人民共和国工业和信息化部. 2013年中国工业通信业运行报告 [EB/OL], 2013. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11294132/n12858387/15801467.html>.
(Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. *Reports on the industry and telecommunication industry of China (2013)* [EB/OL]. 2013. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11294132/n12858387/15801467.html>.)
- [4] 陈虹, 宫函, 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): 322 – 346.
(CHEN Hong, GONG Xun, HU Yunfeng, et al. Automotive control: the state of the art and perspective [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 322 – 346.)
- [5] 钱人一. 现代汽车发动机电子控制 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.
(QIAN Renyi. *Modern Automobile Engine Electronic Control* [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1999.)
- [6] STREIB H-M, BISCHOF H. *Electronic throttle control (ETC): A cost effective system for improved emissions, fuel economy, and driveability* [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 1996.
- [7] 王玉海, 宋健, 李兴坤. 基于模糊推理的驾驶员意图识别研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 22(12): 113 – 118.
(WANG Yuhai, SONG Jian, LI Xingkun. Study on inference of driver's intentions based on fuzzy reasoning [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, 22(12): 113 – 118.)
- [8] DOVGAN E, TUŠAR T, JAVORSKI M, et al. Discovering comfortable driving strategies using simulation-based multiobjective optimization [J]. *Informatica*, 2012, 36(3): 319 – 326.
- [9] YANG C. *Model-based analysis and tuning of electronic throttle controllers* [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 2004.
- [10] 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.)
- [11] GREPL R, LEE B. Modeling, parameter estimation and nonlinear control of automotive electronic throttle using a Rapid-Control Prototyping technique [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2010, 11(4): 601 – 610.
- [12] CORNO M, TANELLI M, SAVARESI S M, et al. Design and validation of a gain-scheduled controller for the electronic throttle body in ride-by-wire racing motorcycles [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(1): 18 – 30.
- [13] GREPL R. Adaptive composite control of electronic throttle using local learning method [C] // *International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Brno, Czech Republic: IEEE, 2010: 58 – 61.
- [14] WANG H, YUAN X, WANG Y, et al. Harmony search algorithm-based fuzzy-PID controller for electronic throttle valve [J]. *Neural Computing and Applications*, 2013, 22(2): 329 – 336.
- [15] SHENG W, BAO Y. Fruit fly optimization algorithm based fractional order fuzzy-PID controller for electronic throttle [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2013, 73(1/2): 611 – 619.
- [16] WANG C H, HUANG D Y. A new intelligent fuzzy controller for nonlinear hysteretic electronic throttle in modern intelligent automobiles [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(6): 2332 – 2345.
- [17] REN Z, GERLAND P, KROLL A. A novel friction-identification method using sliding-mode observer and its application to electro-mechanical throttles [C] // *The 18th International Federation of Automatic Control World Congress*. Milano, Italy: IFAC, 2011: 4803 – 4808.
- [18] YUAN X, YANG Y, WANG H, et al. Genetic algorithm-based adaptive fuzzy sliding mode controller for electronic throttle valve [J]. *Neural Computing and Applications*, 2013, 23(1): 209 – 217.
- [19] DI BERNARDO M, DI GAETA A, MONTANARO U, et al. Synthesis and experimental validation of the novel LQ-NEMCSI adaptive strategy on an electronic throttle valve [J]. *Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(6): 1325 – 1337.
- [20] CHEN R, LIN M, WEI T. Adaptive fuzzy logic based sliding mode control of electronic throttle [J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2012, 8(8): 3253 – 3260.

- [21] YUAN X, WANG Y, WU L, et al. Neural network based self-learning control strategy for electronic throttle valve [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(8): 3757 – 3765.
- [22] HU Y F, LIU Q F, SUN P Y, et al. Design of an ADRC-based electronic throttle controller [C] // *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*. Yantai, China: IEEE, 2011: 344 – 349.
- [23] STOTSKY A, KOLMANOVSKY I. Application of input estimation techniques to charge estimation and control in automotive engines [J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(12): 1371 – 1383.
- [24] STOTSKY A. *Automotive Engines: Control, Estimation, Statistical Detection* [M]. Berlin, Germany: Springer, 2009.
- [25] ANDERSSON P. *Air charge estimation in turbocharged spark ignition engines* [D]. Linköping, Sweden: Linköping University, 2005.
- [26] 谭德荣, 刘正林, 严新平. 电控汽油机进气量的最优估计算法 [J]. *交通运输工程学报*, 2006, 6(2): 39 – 42.
(TAN Derong, LIU Zhenglin, YAN Xinping. Optimum estimate method of intake flowrate for electronic control gasoline engine [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2006, 6(2): 39 – 42.)
- [27] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
(JIANG Deming. *Combustion and Emission of the Internal Combustion Engine* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.)
- [28] (德)巴斯怀森, 宋进桂, 李栋, 等. 汽油机直喷技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
(RICHARD V B, SONG Jingui, LI Dong, et al. *Gasoline Engine with Direct Injection* [M]. Beijing: China Machine Press, 2012.)
- [29] 刘奇芳, 宫洵, 胡云峰, 等. 缸内直喷汽油机的自抗扰轨压跟踪控制器设计 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(12): 1595 – 1601.
(LIU Qifang, GONG Xun, HU Yunfeng, et al. Active disturbance rejection control of fuel rail pressure for gasoline direct injection engines [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1595 – 1601.)
- [30] DI GAETA A, FIENGO G, PALLADINO A, et al. A control oriented model of a common-rail system for gasoline direct injection engine [C] // *Joint the 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*. Shanghai, China: IEEE, 2009: 6614 – 6619.
- [31] DI GAETA A, FIENGO G, PALLADINO A, et al. Design and experimental validation of a model-based injection pressure controller in a common rail system for GDI engine [C] // *American Control Conference (ACC)*. San Francisco, USA: IEEE, 2011: 5273 – 5278.
- [32] 欣白宇. GDI发动机的轨压控制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
(XIN Baiyu. *Research on rail pressure control of GDI engine* [D]. Changchun: Jilin University, 2012.)
- [33] MAJORS M, STORI J, CHO D-I. Neural network control of automotive fuel-injection systems [J]. *IEEE Control Systems*, 1994, 14(3): 31 – 36.
- [34] SHIRAISHI H, IPRI S L, CHO D-I. CMAC neural network controller for fuel-injection systems [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1995, 3(1): 32 – 38.
- [35] MANZIE C, RALPH D, WATSON H, et al. Model predictive control of a fuel injection system with a radial basis function network observer [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2002, 124(4): 648 – 658.
- [36] MANZIE C, PALANISWAMI M, WATSON H. Gaussian networks for fuel injection control [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2001, 215(10): 1053 – 1068.
- [37] WHITE A, CHOI J, NAGAMUNE R, et al. Gain-scheduling control of port-fuel-injection processes [J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(4): 380 – 394.
- [38] 邓元望, 贾国海, 左青松, 等. 汽油机燃油控制系统联合仿真 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(2): 384 – 390.
(DENG Yuanwang, JIA Guohai, ZUO Qingsong, et al. Co-simulation of injection control system of gasoline engine [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(2): 384 – 390.)
- [39] BOBER T, SHIH F Y. Image processing-based methodology for optimizing automotive ignition timing [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(1): 85 – 92.
- [40] ZHU G G, DANIELS C F, WINKELMAN J. *MBT timing detection and its closed-loop control using in-cylinder pressure signal* [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 2003.
- [41] ZHU G G, DANIELS C F, WINKELMAN J. *MBT timing detection and its closed-loop control using in-cylinder ionization signal* [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 2004.
- [42] ZHU G G, HASKARA I. *IC engine retard ignition timing limit detection and control using in-cylinder ionization signal* [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 2004.
- [43] ZHU G, HASKARA I, WINKELMAN J. Closed-loop ignition timing control for SI engines using ionization current feedback [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(3): 416 – 427.
- [44] HO T, KARRI V. Fuzzy expert system to estimate ignition timing for hydrogen car [R] // SUN F, ZHANG J, TAN Y, et al. *Lecture Notes in Computer Science: Advances in Neural Networks*. Berlin, Germany: Springer, 2008, 5264: 570 – 579.
- [45] WANG W, CHIRWA E, ZHOU E, et al. Fuzzy ignition timing control for a spark ignition engine [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2000, 214(3): 297 – 306.
- [46] WANG W, CHIRWA E, ZHOU E, et al. Fuzzy neural ignition timing control for a natural gas fuelled spark ignition engine [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2001, 215(12): 1311 – 1323.
- [47] 李国勇. 电控汽油机智能控制策略及故障诊断的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
(LI Guoyong. *Research on intelligent control strategy and fault diagnosis of electronic controlled gasoline engine* [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.)
- [48] ZHANG C, YANG Q. Study on injection and ignition control of gasoline engine based on BP neural network [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 16(4): 441 – 444.
- [49] 张翠平. 电控汽油机燃油喷射及点火控制系统的设计与实验研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
(ZHANG Cuiping. *Design and experimental research of fuel injection and ignition control system for electronically controlled gasoline engine* [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.)
- [50] POSTMA M, NAGAMUNE R. Air-fuel ratio control of spark ignition engines using a switching LPV controller [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(5): 1175 – 1187.
- [51] ALIPPI C, DE RUSSIS C, PIURI V. A neural-network based control solution to air-fuel ratio control for automotive fuel-injection systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2003, 33(22): 259 – 268.
- [52] 姚春德. 内燃机先进技术与原理 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2010.
(YAO Chunde. *Advanced Technology for Internal Combustion Engines* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2010.)
- [53] 王务林, 赵航, 王继先. 汽车催化转化器系统概论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
(WANG Wulin, ZHAO Hang, WANG Jixian. *Introduction to the Vehicle Catalyst Converter System* [M]. Beijing: China Communications Press, 1999.)

- [54] 侯志祥, 吴义虎, 申群太. 车用汽油机过渡工况空燃比的先进控制策略 [J]. 内燃机学报, 2003, 21(5): 369 – 373.
(HOU Zhixiang, WU Yihu, SHEN Quntai. Advanced control strategies for engine transient air/fuel ratio [J]. *Transactions of CSICE*, 2003, 21(5): 369 – 373.)
- [55] 杨斌, 王绍光. 瞬态空燃比控制策略研究及智能控制的应用 [J]. 内燃机工程, 2002, 23(5): 10 – 14.
(YANG Bin, WANG Shaoguang. The research of transient air-fuel ratio control strategy and application of artificial intelligence control [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2002, 23(5): 10 – 14.)
- [56] 李顶根, 刘刚. 基于PEM与子空间方法的汽油机空燃比动态模型辨识 [J]. 内燃机学报, 2012, 30(3): 248 – 253.
(LI Dinggen, LIU Gang. Air/Fuel ratio control model of gasoline engine based on subspace identification and PEM methods [J]. *Transactions of CSICE*, 2012, 30(3): 248 – 253.)
- [57] 刘刚. 汽油机空燃比多参数模型辨识及MPC控制器设计 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
(LIU Gang. *Multi-parameter model identification of air-fuel ratio and MPC controller design of gasoline engine* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.)
- [58] 孟嗣宗, 郭少平, 张文海. 发动机精确空燃比控制方法的研究 [J]. 内燃机工程, 1999, 20(2): 70 – 75.
(MENG Sizong, GUO Shaoping, ZHANG Wenhai. Research on accurate air-fuel ratio control strategy of SI engines [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 1999, 20(2): 70 – 75.)
- [59] 王莉, 刘德新. 稀燃汽油机空燃比滑模-神经网络控制及实验 [J]. 天津大学学报, 2006, 39(B06): 51 – 56.
(WANG Li, LIU Dexin. Sliding mode-neural network control for air-fuel ratio of lean burn gasoline engine and experiment research [J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, 39(B06): 51 – 56.)
- [60] 王莉, 刘德新. 神经网络在汽油机瞬态空燃比控制中的应用 [J]. 天津大学学报, 2008, 40(11): 1367 – 1371.
(WANG Li, LIU Dexin. Application of neural network in control for transient air-fuel ratio of gasoline engine [J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 40(11): 1367 – 1371.)
- [61] WON M, CHOI S B, HEDRICK J K. Air-to-fuel ratio control of spark ignition engines using gaussian network sliding control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1998, 6(5): 678 – 687.
- [62] 刘一鸣, 花志远, 陈永全. 广义预测控制算法在发动机空燃比控制中的应用 [J]. 汽车工程, 2013, 35(5): 403 – 407.
(LIU Yiming, HUA Zhiyuan, CHEN Yongquan. The application of GPC algorithm to the air-fuel ratio control of engine [J]. *Automotive Engineering*, 2013, 35(5): 403 – 407.)
- [63] MUSKE K R, JONES J C P, FRANCESCHI E. Adaptive analytical model-based control for SI engine air-fuel ratio [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(4): 763 – 768.
- [64] 邹博文. 基于模型的汽油机空燃比控制技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
(ZOU Bowen. *Research on the model based air-fuel ratio control technology of gasoline engine* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.)
- [65] ZHAO Y N, SHEN T L, JIAO X H. Air-fuel ratio transient control design for gasoline engines based on individual cylinder air charge estimation [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 2013.
- [66] 王萍, 江和耀, 范亚南, 等. 基于输入观测器的分缸空燃比估计 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(6): 1574 – 1580.
(WANG Ping, JIANG Heyao, FAN Yanan, et al. Individual cylinder air-fuel ratio estimation based on input observer [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2013, 43(6): 1574 – 1580.)
- [67] 胡春明, 张基伟, 刘娜. 基于遗传算法参数辨识的汽油机各缸空燃比均匀性控制 [J]. 内燃机工程, 2013, 34(6): 13 – 18.
(HU Chunming, ZHANG Jiwei, LIU Na. Individual cylinder air-fuel ratio balance control based on genetic algorithm identification [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2013, 34(6): 13 – 18.)
- [68] HE B, SHEN T, KAKO J, et al. Input observer-based individual cylinder air-fuel ratio control: modelling, design and validation [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(5): 1057 – 1065.
- [69] 姚栋伟, 吴锋, 杨志家, 等. 基于增量式数字PID的汽油机怠速控制研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(6): 1122 – 1126.
(YAO Dongwei, WU Feng, YANG Zhijia, et al. Design of idle speed controller for an SI engine based on incremental digital PID [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(6): 1122 – 1126.)
- [70] 李姝. 基于预测控制的汽油发动机怠速控制方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.
(LI Shu. *Gasoline engine idle speed control strategy based on model predictive control* [D]. Changchun: Jilin University, 2010.)
- [71] 樊林, 裴普成, 杨武, 等. 电控汽油机怠速控制方式 [J]. 汽车工程, 2002, 24(6): 490 – 493.
(FAN Lin, PEI Pucheng, YANG Wu, et al. Idling control schemes for electronically controlled gasoline engine [J]. *Automotive Engineering*, 2002, 24(6): 490 – 493.)
- [72] KAMARUDDIN T N T, DARUS I Z M. PID controller for idle speed control [C] // *UKSim the 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim)*. Cambridge, UK: IEEE, 2013: 247 – 253.
- [73] 李岳林, 王立标, 曾志伟, 等. 汽油机怠速稳定性的复合模糊-PID控制方法研究 [J]. 内燃机工程, 2010, 31(3): 57 – 60.
(LI Yuelin, WANG Libiao, ZENG Zhiwei, et al. Study of compound fuzzy-PID control method for gasoline engine idling speed control [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2010, 31(3): 57 – 60.)
- [74] PAVKOVIĆ D, DEUR J, KOLMANOVSKY I. Adaptive Kalman filter-based load torque compensator for improved SI engine idle speed control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17(1): 98 – 110.
- [75] 张付军, 黄英, 甘海云, 等. 汽油机怠速转速的模糊控制方法 [J]. 北京理工大学学报, 2000, 9(4): 408 – 414.
(ZHANG Fujun, HUANG Ying, GAN Haiyun, et al. Fuzzy control method for gasoline engine idle speed control [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2000, 9(4): 408 – 414.)
- [76] 张翠平, 杨庆佛, 韩以仑. 汽油机怠速稳定性的模糊控制仿真研究 [J]. 内燃机工程, 2003, 24(4): 38 – 41.
(ZHANG Cuiping, YANG Qingfo, HAN Yilun. A simulation of fuzzy control idling speed stability controlling for gasoline engines [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2003, 24(4): 38 – 41.)
- [77] 赵光宙, 杨志家. 应用神经网络模糊控制器的发动机怠速控制 [J]. 内燃机工程, 2000, 21(1): 59 – 62.
(ZHAO Guangzhou, YANG Zhijia. The application of neural network fuzzy controller in engine idle speed control [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2000, 21(1): 59 – 62.)
- [78] KLAOWONN F, GEBHARDT J, KRUSE R. Fuzzy control on the basis of equality relations with an example from idle speed control [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1995, 3(3): 336 – 350.
- [79] LI X, YURKOVICH S. Sliding mode control of delayed systems with application to engine idle speed control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, 9(6): 802 – 810.

- [80] ZHANG Y, KURIHARA N. A study of discrete-time sliding mode control for SI engine idle speed control [C] // *International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. Hachinohe, Japan: IEEE, 2011: 27 – 32.
- [81] ALT B, BLATH J P, SVARICEK F, et al. Multiple sliding surface control of idle engine speed and torque reserve with dead start assist control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(9): 3580 – 3592.
- [82] CZARNIGOWSKI J. A neural network model-based observer for idle speed control of ignition in SI engine [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2010, 23(1): 1 – 7.
- [83] PUSKORIUS G V, FELDKAMP L A, DAVIS JR L I. Dynamic neural network methods applied to on-vehicle idle speed control [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 84(10): 1407 – 1420.
- [84] GORINEVSKY D, FELDKAMP L A. RBF network feedforward compensation of load disturbance in idle speed control [J]. *IEEE Control Systems*, 1996, 16(6): 18 – 27.
- [85] SHARMA R, NESIC D, MANZIE C. Idle speed control using linear time varying model predictive control and discrete time approximations [C] // *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*. Yokohama, Japan: IEEE, 2010: 1140 – 1145.
- [86] SHARMA R, NESIC D, MANZIE C. Sampled data model predictive idle speed control of ultra-lean burn hydrogen engines [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(2): 538 – 545.
- [87] DI CAIRANO S, YANAKIEV D, BEMPORAD A, et al. Model predictive powertrain control: an application to idle speed regulation // RE L D, ALLGÖWER F, GLIELMO L, et al. *Lecture Notes in Control and Information Sciences: Automotive Model Predictive Control*. Berlin, Germany: Springer, 2010, 402: 183 – 194.
- [88] DI CAIRANO S, YANAKIEV D, BEMPORAD A, et al. Model predictive idle speed control: design, analysis, and experimental evaluation [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(1): 84 – 97.
- [89] 吴建华. 汽车发动机原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. (WU Jianhua. *Automobile Engine Theory* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.)
- [90] 陈红. 汽油机废气涡轮增压技术的研究及发展前景 [J]. 内燃机, 2008(1): 1 – 4. (CHEN Hong. Trend and research of turbocharged technology in gasoline engines [J]. *Internal Combustion Engine*, 2008(1): 1 – 4.)
- [91] 蒋德明. 内燃机的涡轮增压 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986. (JIANG Deming. *Turbocharging of the Internal Combustion Engine* [M]. Beijing: China Machine Press, 1986.)
- [92] 靳素华, 李自强, 冯仰利, 等. 变喷嘴涡轮增压技术开发应用 [J]. 汽车工程, 2009, 31(10): 924 – 926. (JIN Suhua, LI Ziqiang, FENG Yangli, et al. Development and application of variable nozzle turbocharging technology [J]. *Automobile Engineering*, 2009, 31(10): 924 – 926.)
- [93] 孟长江, 褚全红, 张春, 等. 可变喷嘴涡轮增压器控制策略研究 [J]. 车用发动机, 2008, 175(3): 72 – 75. (MENG Changjiang, CHU Quanhong, ZHANG Chun, et al. Research on the control strategy of variable nozzle turbocharger [J]. *Vehicle Engine*, 2008, 175(3): 72 – 75.)
- [94] 王恩华, 周明, 李建秋, 等. 可变喷嘴涡轮增压器电控系统的设计与匹配 [J]. 内燃机学报, 2002, 20(6): 559 – 563. (WANG Enhua, ZHOU Ming, LI Jianqiu, et al. Design and matching of the electrical control system of the variable nozzle turbocharger [J]. *Transactions of CSICE*, 2002, 20(6): 559 – 563.)
- [95] OGAWA H, HAYASHI M, YASHIRO M. 重型货车可调喷嘴涡轮增压器连续反馈控制的发展 [J]. 车用发动机, 1998(1): 9 – 15. (OGAWA H, HAYASHI M, YASHIRO M. Development of the continuous and feedback controlled variable nozzle turbine turbocharger system for heavy-duty trucks [J]. *Vehicle Engine*, 1998(1): 9 – 15.)
- [96] RÜCKERT J, RICHERT F, SCHLOFIER A, et al. A model based predictive attempt to control boost pressure and EGR-rate in a heavy duty diesel engine [C] // *Modeling and Control of Economic Systems 2001*. Klagenfurt, Austria: Elsevier, 2001: 111 – 117.
- [97] WANG Y Y, HASKARA I, YANIV O. Quantitative feedback design of air and boost pressure control system for turbocharged diesel engines [J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(6): 626 – 637.
- [98] 王增全, 王正. 车用涡轮增压器结构可靠性 [M]. 北京: 科学出版社, 2013. (WANG Zengquan, WANG Zheng. *Struct Reliability of the Vehicle Turbocharger* [M]. Beijing: Science Press, 2013.)
- [99] BUMBY J R, SPOONER E S, CARTER J. Electrical machines for use in electrically assisted turbochargers [C] // *The 2nd IEE International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*. London, UK: IEE, 2004: 344 – 349.
- [100] SEIICHI I, YUKIO Y, KUNIO S, et al. Development of the hybrid turbo-an electrically assisted turbocharger [J]. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 2006, 43(3): 53 – 58.
- [101] KATRAŠNIK T, RODMAN S, TRENC F. Improvement of the dynamic characteristic of an automotive engine by a turbocharger assisted by an electric motor [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, 125(2): 590 – 595.
- [102] PETITJEAN D, BERNARDINI L, MIDDLEMASS C, et al. *Advanced gasoline engine turbocharging technology for fuel economy improvements* [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 2004.
- [103] 于秀敏, 高莹, 鞠革, 等. 汽油机爆震信号测量与应用分析 [J]. 内燃机学报, 2000, 18(4): 399 – 403. (YU Xiumin, GAO Ying, JU Ge, et al. Knocking detection and application analysis in SI engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2000, 18(4): 399 – 403.)
- [104] CHANG J, KIM M, MIN K. Detection of misfire and knock in spark ignition engines by wavelet transform of engine block vibration signals [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(7): 1108 – 1114.
- [105] ETTEFAGH M, SADEGHI M, PIROUZPANAH V, et al. Knock detection in spark ignition engines by vibration analysis of cylinder block: a parametric modeling approach [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(6): 1495 – 1514.
- [106] 王良煜, 尚秀镜, 刘文胜, 等. 火花点火发动机爆震燃烧特性的研究 [J]. 内燃机学报, 1998, 16(2): 176 – 183. (WANG Liangyu, SHANG Xiujing, LIU Wensheng, et al. A study on the characterization of knock in a spark-ignition engine [J]. *Transactions of CSICE*, 1998, 16(2): 176 – 183.)
- [107] ROTHE M, HEIDENREICH T, SPICHER U, et al. *Knock behavior of SI-engines: Thermodynamic analysis of knock onset locations and knock intensities* [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 2006.
- [108] 韦静思, 舒歌群, 卫海桥. 内燃机爆震燃烧过程中燃烧室内声学分析 [J]. 内燃机学报, 2010, 28(5): 427 – 434. (WEI Jingsi, SHU Gequn, WEI Haiqiao. Analysis of acoustics in combustion chamber during knock combustion of an IC engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2010, 28(5): 427 – 434.)
- [109] BOUBAL O, OKSMAN J. Knock acoustic signal estimation using parametric inversion [J]. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 2000, 49(4): 890 – 895.
- [110] 邢建国, 许沧粟, 孙优贤. 火花塞离子电流信号及其在发动机检测和控制在中的应用 [J]. 内燃机工程, 2001, 22(3): 70 – 73. (XING Jianguo, XU Cangsu, SUN Youxian. Spark plug gap ion current and its application in engine diagnosis and control [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2001, 22(3): 70 – 73.)

- [111] 汪映, 周龙保, 吴筱敏. 离子电流法检测发动机失火和爆震的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(9): 895 – 898.
(WANG Ying, ZHOU Longbao, WU Xiaomin. Investigation on detection of misfire and knock of spark ignition engine using ionic current method [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2002, 36(9): 895 – 898.)
- [112] 许沧粟, 邢建国. 基于火花塞离子电流信号的发动机爆震检测研究 [J]. 内燃机工程, 2002, 23(2): 12 – 14.
(XU Cangsu, XING Jianguo. Engine knock detection using spark ion current [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2002, 23(2): 12 – 14.)
- [113] DANIELS C F, ZHU G G, WINKELMAN J. *Inaudible knock and partial-burn detection using in-cylinder ionization signal* [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 2003.
- [114] 吴筱敏, 李福明, 蒋德明, 等. 离子电流法爆震强度信号的评价分析 [J]. 内燃机学报, 2001, 19(3): 222 – 224.
(WU Xiaomin, LI Fuming, JIANG Deming, et al. The analyses of knock intensity ionization [J]. *Transactions of CSICE*, 2001, 19(3): 222 – 224.)
- [115] OLLIVIER E, BELLETTRE J, TAZEROUT M, et al. Detection of knock occurrence in a gas SI engine from a heat transfer analysis [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(7): 879 – 893.
- [116] ZAVALA J C, FOLKERTS C. *Knock detection and estimation based on heat release strategies* [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 2011.
- [117] STOTSKY A. Statistical engine knock modelling and adaptive control [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2008, 222(3): 429 – 439.
- [118] PEYTON JONES J, SPELINA J, FREY J. An optimal CumSum-based knock controller [C] // *Advances in Automotive Control*. Tokyo, Japan: IFAC, 2013: 372 – 377.
- [119] PEYTON JONES J, FREY J, MUSKE K R. A fast-acting stochastic approach to knock control [C] // *Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling*. IFP, France: IFAC, 2009: 16 – 23.
- [120] 尧命发, 刘海峰. 均质压燃与低温燃烧的燃烧技术研究进展与展望 [J]. 汽车工程学报, 2012, 2(2): 79 – 90.
(YAO Mingfa, LIU Haifeng. Review and prospect of the combustion technology of homogeneous charge compression ignition and low temperature combustion [J]. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2012, 2(2): 79 – 90.)
- [121] 苏万华, 赵华, 王建昕. 均质压燃低温燃烧发动机理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
(SU Wanhua, ZHAO Hua, WANG Jianxin. *Theory and Technology of Homogeneous Charge Compression Ignition and Low Temperature Combustion Engine* [M]. Beijing: Science Press, 2010.)
- [122] 苏万华. 内燃机燃烧与控制 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2010.
(SU Wanhua. *Combustion and Control of the Internal Combustion Engine* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2010.)
- [123] SONG K, XIE H, LI L, et al. *Disturbance observation and rejection method for gasoline HCCI combustion control* [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 2013.
- [124] XIE H, SONG K, HE Y. A hybrid disturbance rejection control solution for variable valve timing system of gasoline engines [J]. *ISA Transactions*, 2014, 53(4): 889 – 898.
- [125] 谢辉, 吴召明, 孙艳辉. 基于内部残余废气的汽油HCCI燃烧过程离子电流特性 [J]. 天津大学学报, 2008, 41(5): 547 – 552.
(XIE Hui, WU Zhaoming, SUN Yanhui. Ion current characteristics of gasoline HCCI combustion process based on internal EGR [J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41(5): 547 – 552.)
- [126] 谢辉, 孙艳辉, 吴召明. 基于离子电流的汽油HCCI发动机燃烧相位传感方法 [J]. 天津大学学报, 2007, 40(9): 1089 – 1093.
(XIE Hui, SUN Yanhui, WU Zhaoming. Ion current-based method for gasoline HCCI combustion phase detecting [J]. *Journal of Tianjin University*, 2007, 40(9): 1089 – 1093.)
- [127] 谢辉, 孙艳辉, 夏超英. 基于动态递归神经网络的HCCI发动机燃烧相位辨识模型 [J]. 内燃机学报, 2007, 25(7): 352 – 357.
(XIE Hui, SUN Yanhui, XIA Chaoying. A gasoline HCCI combustion phasing observer based on a dynamically recurrent neural network [J]. *Transactions of CSICE*, 2007, 25(7): 352 – 357.)
- [128] ZHANG H C, XIE H. *Research on relativity of knock sensor signal and gasoline HCCI combustion obtained with trapping residual gas* [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 2010.
- [129] 张宏超, 谢辉, 陈韬, 等. 基于振动信号及瞬时转速信号的HCCI燃烧模式辨识 [J]. 燃烧科学与技术, 2012, 18(2): 144 – 148.
(ZHANG Hongchao, XIE Hui, CHEN Tao, et al. HCCI combustion mode detection based on knock sensor signal and instant speed [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2012, 18(2): 144 – 148.)
- [130] 王国祥, 谢辉, 苏万华. 电控发动机自动优化匹配管理平台的开发研究 [J]. 内燃机学报, 2001, 19(6): 535 – 540.
(WANG Guoxiang, XIE Hui, SU Wanhua. Research on the development of automatic optimization and matching management platform for electric-controlled engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2001, 19(6): 535 – 540.)

作者简介:

王耀南 (1957–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为混合动力汽车控制、智能机器人系统、智能控制理论与应用, E-mail: yaonan@hnu.cn;

申永鹏 (1985–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为发动机控制和混合动力汽车优化控制, E-mail: shenyongpeng@hnu.edu.cn;

孟步敏 (1986–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为混合动力汽车优化控制和发动机控制, E-mail: mengbm@163.com;

李会仙 (1986–), 男, 工程师, 目前研究方向为发动机电控系统开发与标定, E-mail: huixian8686@126.com;

袁小芳 (1979–), 男, 教授, 目前研究方向为智能控制理论与应用、混合动力汽车优化与控制技术, E-mail: yuanxiaofang@hnu.edu.cn.