

<http://www.phei.com.cn>

自动控制技术应用丛书

智能 控制 与MATLAB

在电控发动机中的应用

李国勇 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

自动控制技术应用丛书

智能控制与 MATLAB 在电控发动机中的应用

李国勇 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书首先对电控汽油机控制系统的结构、原理及其故障的种类、原因等进行了系统的分析;然后以电控汽油机为研究对象,详细地介绍了模糊逻辑、神经网络和预测控制等理论的基本概念及工作原理,并在此基础上,对电控汽油机的怠速控制、喷油控制和点火控制进行了系统的理论研究和大量的 MATLAB 仿真实验;最后针对电控汽油机故障的复杂性、多样性及诊断信息存在模糊性的特点,将专家思想和模糊神经网络技术应用到电控汽油机的故障诊断中,并运用 MATLAB 的图形用户界面(GUI)功能,设计了一种全新的基于模糊神经网络的电控汽油机故障诊断专家系统及其人机交互界面。

本书可作为高等院校电气信息类、计算机类、机械类及机电工程等专业研究生和高年级本科生的教材,也可作为从事发动机电控系统智能控制策略和电控发动机故障诊断的研究、设计及应用的科学技术人员的参考用书。全书 MATLAB 源程序除部分通过附录 A 给出外,其余可免费从电子工业出版社的华信教育网(<http://hxedn.com.cn>)上下载。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

智能控制与 MATLAB 在电控发动机中的应用/李国勇著. —北京:电子工业出版社,2007.6

(自动控制技术应用丛书)

ISBN 978-7-121-04369-7

I. 智… II. 李… III. ①汽车—电子控制—发动机—智能控制 ②汽车—电子控制—发动机—计算机辅助计算—软件包, MATLAB IV. U464-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 066683 号

责任编辑:张 榕 特约编辑:李云霞

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×980 1/16 印张:20 字数:448 千字

印 次:2007 年 6 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:34.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

随着社会对环境与能源问题的日益关注和汽车产量的迅速增长,以及人们对汽车的安全性、动力性、经济性、操作性、舒适性、排放法规等方面的要求不断提高,汽车的功能越来越多,控制越来越复杂,要控制的参数也越来越多。这样传统的控制理论及方法就可能不能满足新的要求,势必要提出一种新的控制理论及方法来满足新的要求,特别是越来越严格的排放法规的要求。近年来人们一直围绕着汽油机的动力性、经济性、排放性等性能寻求着最佳方案,因此汽油机的精确控制越来越受到重视。随着控制理论的不断发展和新型传感器的不断出现,汽油机电子控制技术从过去的查表法和 PID 等基于经典理论的控制方法,向现代智能控制理论发展。目前,自适应控制、专家控制、模糊控制、预测控制和神经网络等现代智能控制理论在汽油机控制中的应用已成为一个研究热点和重点。另外,随着汽车用途的日益广泛、使用量的急剧增加,以及其结构和功能的不断复杂,电控汽油机故障的发生率和提高故障诊断的效率也成为汽车工业一个十分重要的问题。对它们的分析与研究不仅有利于设计出高性能的电控系统,也对汽车工业的发展具有现实的意义。

我国汽油机的研究、开发设计和制造水平与世界先进水平相比还有较大差距,汽油机的经济性、动力性、排放性、可靠性等问题一直是业内科技工作者研究的重要课题,把智能控制技术引入汽油机研究领域,将为此开拓新的思路。汽油机电控单元的软件开发技术作为电控系统开发的关键技术,被严格保密,公开的资料很少。因此,本文针对当前我国汽油机控制技术的现状及实现电控化和降低排放污染物、减少故障的首要任务,通过对国内外汽油机电控系统研究发展的相关资料进行查找和分析,结合我们的实际状况,以 4 缸微型车汽油机电控系统和 465Q 电控汽油机作为研究对象,分别对其软、硬件进行了详细的剖析,从而获得电控软件的基本设计思想和方法。选择汽油机电子控制系统的智能控制策略和电控汽油机的故障诊断作为主攻方向,并基于控制系统的实验,实现对汽油机怠速、燃油喷射和点火系统的控制及对电控汽油机故障的诊断。主要研究了以下几方面内容:

本文首先对电子控制汽油机的构造、原理及其故障的种类、原因等进行了介绍;详细分析了 465Q 汽油机电控系统的结构、组成、功能、工作原理和控制策略,它为下一步研究电控汽油机系统的控制策略奠定了良好的基础。由于 465Q 汽油机电控系统采用静态预定最优控制方式即依据预先对发动机控制参数进行离线优化而得的脉谱图(MAP 图),实现对空燃比和点火提前角的控制。因此设计了 465Q 电控汽油机脉谱测量试验系统,在发动机实验台

架上,利用德尔福汽车发动机电控系统 PCHud 测控软件,实际测取了 465Q 汽油机喷油和点火控制的最佳脉谱图。

汽车发动机怠速工况是一个很重要的工况,汽车在交通密集的城市道路上行驶时,消耗在怠速阶段的燃油相当多。为了满足日益严格的燃油消耗和排放法规要求,汽油机怠速工况的控制越来越引起人们的重视。本文针对汽油机怠速控制系统的非线性、时变性、不确定性及不易建立精确数学模型的特点,研究了利用模糊控制理论控制发动机怠速的实验,设计了一种汽油机怠速转速模糊控制系统,在怠速控制系统中,采用模糊控制和 PID 控制相结合的思想,其中利用模糊控制实现宏观调节达到快速控制,利用 PID 实现微观调节达到精确控制,充分发挥了两者的优点。

利用神经网络具有自适应、自学功能,通过在线和离线训练,实现系统外部的非线性映射关系,并将这种关系记忆在网络结构中的这一优势,将神经网络应用于汽油机的点火和喷油控制中。根据 465Q 发动机点火和喷油的最佳脉谱图,利用神经网络建立了 465Q 发动机在稳定工况下的点火和喷油系统的数学模型;然后提出了多种对于发动机这种高度非线性系统进行点火和喷油控制的新方法和新策略。特别提出了一种神经网络自校正喷油控制系统,它既适用于以汽油作为燃料的发动机控制,来满足系统在不同工况下对空燃比的要求,也适用于以混合燃料(如汽油+甲醇)作为动力的发动机控制,来满足系统在汽油与甲醇不同的混合比下,灵活地设定其目标空燃比,实现对目标空燃比在某一范围内(5~55)任意连续设定的要求,同时也可满足稀薄燃烧(空燃比 >17)技术的要求。结果表明,该神经网络自校正喷油控制系统具有很好的自适应性、鲁棒性和快速性,且结构简单,占用内存少,在线训练时间短,运算速度快,学习能力强,可无差跟踪系统的目标设定值。它可以克服由于制造、磨损及参数变化所造成的各种误差,且满足实时控制的快速要求。

针对汽油机具有非线性、时变性、不确定性及不易建立精确数学模型的特点,研究了预测控制理论在汽油机喷油及点火控制系统中的应用,通过提出多种有效的自适应控制方式,使汽油机实现了空燃比及爆震控制的精确要求。结果表明,在汽油机控制中,隐式广义预测自校正控制算法是一种可行的、效果很好的控制方法。它具有较强的鲁棒性,当系统的参数、阶次和纯滞后变化时,系统仍能较好地工作;使用方便,一般的控制理论对于复杂的汽油机控制往往具有较多的整定参数,不便于工业实际应用,广义预测控制在实用时一般来说整定参数只有两个(预测长度和控制长度),需要对象较少的验前知识;实用范围广,它适用于任何稳定的最小相位/非最小相位,已知/未知时延系统;具有实用性,由于隐式广义预测自校正控制不辨识对象模型参数,而是根据输入/输出数据直接辨识求取最优控制律中的参数,因而避免了在线求解丢番图(Diophantie)方程所带来的大量中间运算,运行速度快,可用于实际控制系统。

汽油机作为汽车的心脏组成,汽车的一些基本技术指标都直接或间接地与汽油机的相关性能相联系。针对电控汽油机的典型故障,如何运用更有效的方法,以提高故障诊断的正确

率、可靠性及适应能力是其故障诊断中的重要问题。本文在介绍了故障诊断技术的原理、方法、发展及专家系统基本概念的基础上,针对电控汽油机故障多、复杂性高的特点,根据电控汽油机故障,应用改进的 BP 神经网络对电控汽油机进行故障诊断。实验结果表明,对于电控汽油机的故障诊断而言,BP 神经网络确为一种较为实用的网络,它具有很强的模式识别和分类能力。但由于电控汽油机故障具有复杂性、多样性、模糊性的特点,采用传统的以布尔代数为基础的二值逻辑显得过于粗糙、不精确,因此在利用神经网络对电控汽油机进行故障诊断的基础上,引入模糊逻辑的概念,采用模糊隶属函数来描述这些故障的程度,将模糊逻辑与神经网络相结合,发挥其各自的优点,构造了一个模糊神经网络。诊断结果表明采用模糊神经网络进行故障诊断,结果更精确、应用更加合理、可信度更高。另外,针对电控汽油机故障诊断的特点,结合专家系统的发展方向,研究了电控汽油机故障诊断专家系统的建造思路和算法。将专家思想很好地融合到模糊神经网络中,构造了基于模糊神经网络电控汽油机故障诊断专家系统。该设计结合了人工神经网络、模糊逻辑理论及专家系统各自的优点,具有很好的故障诊断能力。并运用 MATLAB 的图形用户界面 (GUI) 功能,设计了一种全新的模糊神经网络智能故障诊断专家系统及其人机交互界面,增加系统的易操作性,方便用户使用,更新了系统而且简单直观。

本书取材先进实用,理论联系实际,讲解深入浅出。该书不仅具有完整的设计过程和详细的仿真结果,而且每个设计环节都给出了相应的 MATLAB 源程序,便于读者掌握和巩固所学知识。

博士生导师太原理工大学杨庆佛教授审阅了全书,并提出了许多宝贵的意见,在此深表谢意。此外,感谢电子工业出版社责任编辑张榕女士为本书的编辑和出版所做的辛勤工作。最后还要特别感谢原闻喜县审计局李孝卿局长(即我的父亲)对我编写工作的大力支持,以及我的妻子杨丽娟和儿子李翥,在我编写过程中为家庭所付出的一切辛劳。

由于作者水平有限,书中难免有遗漏与不妥之处,恳请各位专家和广大读者批评指正。

作 者

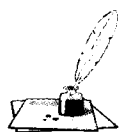
目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 汽车发动机电控系统的现状及发展趋势	(3)
1.3 电控汽车发动机故障诊断技术的现状及发展趋势	(8)
1.4 本课题研究的目的和意义	(11)
第 2 章 电控汽油机控制系统及故障分析	(15)
2.1 电控汽油机的基本工作原理	(15)
2.1.1 汽油机的工作循环	(15)
2.1.2 汽油机的燃烧过程	(16)
2.1.3 汽油机的性能要求	(17)
2.1.4 汽油机的运行模式	(18)
2.1.5 电控汽油机控制的基本内容	(19)
2.1.6 确定汽油机工况所需的参数	(21)
2.2 汽油机电控系统的基本组成及特点	(22)
2.2.1 系统组成	(22)
2.2.2 系统特点	(25)
2.3 电子控制汽油喷射系统	(26)
2.3.1 国内外汽油喷射的研究及发展状况	(26)
2.3.2 系统组成	(28)
2.3.3 空燃比对性能的影响	(31)
2.3.4 各种工况的空燃比要求	(31)
2.3.5 燃油喷射方式	(34)
2.3.6 空燃比控制方式	(35)
2.4 汽油机对点火及爆震的要求及其控制	(37)
2.4.1 汽油机点火系统的发展现状及趋势	(37)
2.4.2 点火参数对汽油机性能的影响	(39)
2.4.3 汽油机对点火系统的要求	(40)
2.4.4 最佳点火提前角及影响点火提前角的因素	(41)
2.4.5 点火控制系统的组成	(42)
2.4.6 点火控制系统的分类	(44)
2.4.7 点火提前角的控制方式	(46)
2.5 汽油机对怠速的要求及其控制	(47)

2.5.1	怠速控制的目的是汽油机怠速控制发展状况	(47)
2.5.2	怠速的定义及怠速控制的任務	(47)
2.5.3	怠速控制的基本要求	(48)
2.5.4	怠速控制系统的组成	(49)
2.6	汽油机排放及其控制	(50)
2.6.1	空燃比与点火控制对排放的影响	(51)
2.6.2	三元催化转换器对排放的影响	(53)
2.6.3	其他因素对排放的影响	(55)
2.7	电控汽油机的故障分析	(55)
2.7.1	电控汽油机常见的典型故障	(56)
2.7.2	电控系统主要组件故障对汽油机工作性能的影响	(59)
2.7.3	汽油机电控系统常见故障的诊断	(60)
	本章小结	(62)
第3章	465Q汽油机电控系统	(64)
3.1	系统简介	(64)
3.2	电控系统的硬件分析	(65)
3.2.1	465Q型电控汽油发动机	(65)
3.2.2	电控单元	(66)
3.2.3	传感器	(67)
3.2.4	执行器	(73)
3.3	电控系统的软件分析	(76)
3.4	传感器及执行器特性的标定	(78)
3.5	465Q汽油机电控系统的控制策略	(81)
3.5.1	空燃比控制策略	(81)
3.5.2	点火控制策略	(92)
3.5.3	怠速控制策略	(99)
3.6	电控系统脉谱图的实验制取	(101)
3.6.1	试验装置及其测量系统	(102)
3.6.2	喷油脉谱图和点火脉谱图	(104)
	本章小结	(106)
第4章	基于模糊逻辑理论的汽油机怠速控制	(108)
4.1	模糊控制理论	(108)
4.1.1	模糊逻辑理论的基本概念	(109)
4.1.2	模糊控制系统的基本原理	(116)
4.2	怠速模糊控制系统	(125)
4.2.1	系统框图	(125)
4.2.2	465Q汽油机怠速控制系统数学模型	(127)

4.2.3 怠速模糊控制器的设计	(129)
4.3 怠速模糊控制系统的仿真实验	(137)
4.3.1 怠速模糊控制系统的仿真	(138)
4.3.2 PID 型怠速模糊控制系统的仿真	(145)
本章小结	(146)
第 5 章 基于神经网络的汽油机点火和喷油控制	(148)
5.1 人工神经网络理论	(148)
5.1.1 神经网络的基本概念	(149)
5.1.2 BP 神经网络	(155)
5.2 基于神经网络的点火控制系统	(162)
5.2.1 数据样本集	(162)
5.2.2 神经网络的设计	(165)
5.2.3 神经网络的离线训练	(167)
5.2.4 利用神经网络实现点火控制	(170)
5.2.5 神经网络的在线训练	(171)
5.2.6 神经网络点火控制系统的控制步骤	(173)
5.2.7 考虑冷却水温度的神经网络点火系统	(173)
5.3 基于神经网络的点火和喷油控制系统	(175)
5.3.1 数据样本集	(175)
5.3.2 网络的设计与训练	(176)
5.3.3 利用神经网络实现点火和喷油控制	(178)
5.3.4 神经网络的在线训练	(179)
5.4 神经网络自校正喷油控制系统	(179)
5.4.1 神经网络控制的基本原理	(179)
5.4.2 神经网络自校正喷油控制	(181)
5.4.3 仿真研究	(184)
本章小结	(188)
第 6 章 基于预测控制的汽油机空燃比与爆震控制	(190)
6.1 预测控制理论	(190)
6.1.1 动态矩阵控制理论	(191)
6.1.2 广义预测控制理论	(194)
6.1.3 广义预测控制的性能分析	(198)
6.1.4 广义预测控制与动态矩阵控制规律的等价性证明	(203)
6.2 单输入/单输出系统的空燃比控制	(205)
6.2.1 单输入/单输出系统框图	(206)
6.2.2 单输入/单输出系统的隐式广义预测自校正控制算法	(207)
6.2.3 仿真研究	(210)

6.3 双输入/单输出系统的空燃比控制	(215)
6.3.1 双输入/单输出系统框图	(215)
6.3.2 双输入/单输出系统的隐式广义预测自校正控制算法	(215)
6.3.3 仿真研究	(218)
6.4 双输入/双输出系统的空燃比与爆震控制	(219)
6.4.1 双输入/双输出系统框图	(220)
6.4.2 双输入/双输出系统的隐式广义预测自校正控制算法	(221)
6.4.3 仿真研究	(225)
6.5 单输入/单输出非系统的空燃比控制	(226)
6.5.1 非线性系统的模型结构	(227)
6.5.2 非线性系统模型参数的辨识	(228)
6.5.3 非线性系统控制器的设计	(230)
6.5.4 非线性系统的仿真研究	(231)
本章小结	(232)
第7章 电控汽油机智能故障诊断系统	(234)
7.1 故障诊断原理	(234)
7.1.1 故障诊断的方法	(234)
7.1.2 智能故障诊断技术的发展	(237)
7.1.3 电控汽油机故障诊断技术	(240)
7.2 基于神经网络的电控汽油机故障诊断	(245)
7.2.1 基于神经网络故障诊断的途径	(246)
7.2.2 基于神经网络电控汽油机故障诊断的特点	(247)
7.2.3 BP神经网络的建立及其故障诊断	(248)
7.3 基于模糊神经网络的电控汽油机故障诊断	(254)
7.3.1 模糊逻辑和人工神经网络的结合	(255)
7.3.2 模糊神经网络的结构	(257)
7.3.3 模糊神经网络的建立及其故障诊断	(257)
7.4 基于模糊神经网络的故障诊断专家系统	(262)
7.4.1 专家系统的基本概念	(262)
7.4.2 模糊神经网络与专家系统的结合	(264)
7.4.3 模糊神经网络故障诊断专家系统总体结构	(265)
7.4.4 电控汽油机智能故障诊断系统	(266)
本章小结	(274)
附录A MATLAB 程序清单	(276)
附录B MATLAB 函数一览表	(297)
附录C MATLAB 函数分类索引	(303)
参考文献	(305)



第 1 章 绪 论

1.1 引 言

人类在社会生产力极大提高和经济规模空前扩大的同时，全球资源短缺、环境污染和生态破坏的积累，已经对社会经济的发展和人类自身生存构成了严重的威胁。随着汽车工业的飞速发展，汽车产量和汽车保有量将大幅度增长，在给人的生活带来巨大影响的同时，也给环境和人的健康带来了巨大的压力。20 世纪 70 年代初的石油危机向人类提出需要节能的警告。在这种形势下，人类不得不重新审视自己的社会经济行为模式，以探索新的发展战略。作为现代文明的汽车同样受到了如何持续发展的挑战，全世界的汽车工业都加快了探索汽车工业与环境、社会协调发展道路的步伐，汽车与环境的相容性研究已成为汽车发展的主题之一。同时降低发动机的排放、噪声等保护人类生存环境的呼声也日益高涨。

目前，机动车辆消耗的燃料占全世界石油消耗总量的一半，汽车保有量的增加更加剧了能源供应的紧张程度；另一方面汽车排放的废气占全世界温室气体排放总量的 1/5。在世界上将近一半的城市里，汽车排放的废气如今已成为空气污染的最大污染源。机动车保有量的增加使世界各地的城市笼罩在废气中。随着社会对环境与能源问题的日益关注，人们一直在围绕汽车强动力、节能、低污染等性能寻求着最佳方案。

伴随着 20 世纪中叶电子工业的高速发展，汽车与电子技术结合在一起，成为汽车工业发展的重要标志。随着计算机和电子技术的发展，采用电子控制技术已成为解决汽车质量与性能诸多问题的最佳方案。它能有效改善发动机的动力性、经济性及排放指标，是迄今为止实现发动机高效率、低污染的最有效、最简捷的途径之一，因此在排放法规日趋严格的西方发达国家中得到越来越广泛的应用。进入 20 世纪 80 年代以来，国际上汽车工业微电子化发展势头更加迅猛，特别是发动机微电脑控制系统的应用，给发动机性能带来了一系列质的变革。电子技术在满足发动机排放法规、进一步提高燃油经济性、提高安全驾驶性能等社会要求的背景下，从 20 世纪 80 年代初开始，先后被各大汽车生产厂用来控制喷油定时和喷油量。目前在美国、西欧和日本市场上的汽车，几乎全部采用了电控技术。先进的电控技术已成为汽车工业发展的必然趋势。目前，发动机电子控制的内容一般包括燃油喷射控制、点火及爆震控制、怠速控制、废气再循环控制、增压控制，以及发动机自诊断和故障安全系统等。多数轿车都已装用发动机管理系统，对发动机各个系统进行综合控制。

随着汽车电控技术的应用，发动机结构越来越复杂，功能越来越完善，自动化程度越来越

越高,排放法规越来越严格,汽油发动机(简称汽油机)电子控制方法由过去简单的开环控制发展到闭环反馈控制。在控制策略和理论方面,也从以传统的查表法和 PID 控制方法向最优控制、自适应控制、神经网络控制、模糊控制和预测控制等现代控制理论方向发展,智能控制在发动机控制中的应用成为现在的一个研究热点。

随着汽车用途的日益广泛、使用量的急剧增加,以及其结构和技术的不断进步,汽车由过去单一的以机械结构为主体的产品到目前的以机电液相结合的复杂产品,使汽车故障诊断问题日益突出。电子控制技术的广泛使用不仅提高了汽车的动力性、舒适性、操作性和安全性,也使汽车更加先进复杂,这样对汽车维修人员就提出了更高的要求。产品结构的复杂化、系统功能的多样化、控制过程的自动化,以及显示信息的智能化都成为汽车故障诊断过程中值得注意并且必须考虑的关键问题。汽车是一个复杂的机电一体化系统,它由数千种零部件所构成,而发动机是汽车的动力源,是汽车的“心脏”,汽车的一些基本技术性能都直接或间接地与发动机的性能相联系,因此保证发动机正常工作显得尤为重要。但是由于发动机的结构复杂,工作条件恶劣,在长期的使用过程中处于各种环境下,承受着各种压力,因此,其故障率较高。汽车发动机故障诊断技术,是在发动机不解体或不完全解体的前提下,依靠先进的传感器技术和检测技术,采集发动机的各种具有某些特征的动态信息,并对这些信息进行各种分析、处理、区分和识别,确认其异常表现,预测其发展趋势,查明其产生原因、发生部位和严重程度,提出针对性的维修措施和处理方法,因此车用发动机故障诊断技术的研究具有很高的理论意义和实用价值。

汽车工业是一个国家工业化发展的重要标志,我国近年来汽车的销售量和汽车的保有量特别是微型轿车迅速增长,每年都要花费大量外汇进口外国电控产品。随着我国正式加入 WTO,以及国内庞大的汽车需求量对各大汽车公司的吸引,我国的汽车工业要面对世界级汽车巨头的打压。据有关机构预测,21 世纪全球范围内能够存活的特大型汽车生产集团将整合至 6~8 家。而我国汽车工业的整体水平同国外相比差距很大,无论整车设计、制造技术的积累,还是人力、物力、资金的投入都无法和国外大的汽车生产厂商抗衡。同时,随着电子控制、计算机、通信等技术的迅猛发展,对汽车电子控制水平的要求也越来越高,许多中高级轿车中电子产品占整车价值的比重,已经从 20 世纪 80 年代的不到 10% 上升到现在的 30% 左右,并且还会继续上升。

目前我国汽车电子的专业研究人员相对较少,在汽车发动机的电子控制技术和故障诊断技术方面与国外相比还存在着较大差距,这对迎接国际市场的竞争十分不利,这将大大限制我们民族工业的发展,并且这也成了制约我国汽车工业发展的瓶颈。汽车工业是国民经济发展的支柱产业,各种国内名牌轿车的成功体现了引进国外先进技术为汽车工业的发展注入的生机和活力,使我们可以在消化吸收先进科技成果的同时,发展我们自己的科技力量,以尽早赶超世界先进水平,这是汽车工业真正能够腾飞的必由之路。发展汽车发动机电子控制系统的智能控制策略和故障诊断技术对节约能源,改善环境,提高汽车安全性,增强国防力量

也具有重要意义。

未来汽油发动机技术发展需要解决两个难题,一个是油耗要降低到30%以上,另一个是排放要满足超低排放要求。目前使用的汽油机电喷系统大多是进气管喷射方式,它可使汽油机的动力性、经济性得到很大改善。为使CO、HC和NO_x等有害气体的排放量降低,可与三效催化转换器匹配,但是以牺牲经济性为前提的。随着对节能要求和对有害物质排放量限制的提高,要求汽油机能兼顾节能和降低排放。稀薄燃烧能满足这个要求,缸内直喷大多采用稀薄燃烧技术,缸内直喷式燃烧方式(Gasoline Direct Injection, GDI)汽油机既具有柴油发动机低燃料消耗的特点,又具有汽油机高输出的优势,改变了油气混合机理,冷启动时不再需要过量供油,而且可采用稀薄分层燃烧技术,可有效降低HC等有害气体排放,在保持动力性指标的同时,具有很好的燃油经济性。分层燃烧的汽油机可稳定在空燃比为20~25的范围内工作,分层燃烧缸内直喷汽油机空燃比的稀限已提高到40以上,如果采用了废气再循环EGR技术,那么空燃比可以提高到55。另外,汽油混合动力技术也可满足节能和降低排放的要求。当然随着发动机技术的提高,其电控技术也会要求越来越高。

1.2 汽车发动机电控系统的现状及发展趋势

为了提高发动机的性能,降低有害排放,满足严格的排放法规要求,电子控制技术在汽车中得到了广泛的应用,从发动机的汽油喷射、点火装置、怠速装置、进气控制、废气排放系统控制、故障自诊断,到汽车底盘的动力传动系统、行驶系统、转向系统等都普遍地采用了电子控制。因此,发动机电控技术的研究和应用日益受到人们的重视。采用以微处理器为主的控制系统,实现对发动机的数字控制后,电控系统可以根据发动机的各种运行工况,实现最佳空燃比和点火控制,使混合气燃烧充分,发动机运行工况优化,有效地改善了汽车发动机的动力性、经济性和排放指标。

随着人们对汽车使用要求的不断提高和计算机技术及控制理论的发展,汽车电子化程度越来越高。汽车电子化的发展过程基本上可以分为三个阶段:第一阶段,从20世纪60年代中期到20世纪70年代末期,在汽车产品中采用电子装置,以改善部分机械部件的性能;第二阶段,从20世纪70年代末期到20世纪90年代中期,在汽车设计和生产中形成“机电一体化”的思想与技术;第三阶段,从20世纪90年代中期至今,重点开始广泛应用计算机网络与信息技术,使汽车更加自动化、智能化。

电控发动机始于20世纪60年代中期,由于这项新技术给整个汽车工业带来了巨大的生命力,因此在短短的时间里获得了迅速的普及和发展。美、日等国汽车发动机电子控制的发展,都是基于汽车废气排放标准的不断强化及半导体工业的迅猛发展。电子工业的发展,又为发动机电控系统提供了高精度、大容量的存储器、传感器、驱动器及各种控制元件,正是这两方面因素大大推动了电子技术在发动机上的推广应用。

在 20 世纪 70 年代中期开始采用单片机控制的数字式发动机集中控制系统。1967 年德国 Bosch 公司最先开发了一种 D-Jetronic 型电控电磁阀式新型进气管汽油喷射系统,它以进气压力为控制参数,并装在 VW—1600 轿车上,出口美国,它开创了汽油喷射技术的里程碑,但由于该装置仅能满足 1979—1980 年欧洲和美国的排放法规,不久 D-Jetronic 就被 L-Jetronic 所取代。后来美国通用汽车公司开发了采用微处理器的点火控制,在这一装置中采用了曲轴位置传感器来获取转速信号,利用进气压力传感器监测进气压力,根据存储在 ROM 中的程序确定点火正时,属于开环控制。与机械式方法相比,电子控制的自由度大为增加,发动机输出功率和燃油经济性都有显著提高。

到 20 世纪 80 年代,随着单片机技术的发展,出现了 12 位和 16 位单片机,使单一功能控制技术被整机集中控制所取代,同时实现优化的点火正时和精确的空燃比控制,以满足更加严格的排放要求。例如, Bosch 公司开发的 Motronic 系统,集喷油和点火控制于一体,并可以在一定程度上对系统进行诊断和自诊断,以后逐步加入了与三元催化转换器配套的控制技术、碳罐控制、辛烷值开关、怠速控制和爆震控制等。

20 世纪 80 年代后期,高性能的 16 位单片机问世,它适用在更加复杂的实时处理、实时控制的系统中。16 位单片机丰富的软件资源和丰富的性能可以使发动机的控制策略更趋丰富和完善,尤其是在自学习、故障诊断及失效保护等方面。有些系统还将发动机及自动变速箱的电子控制做在一起,形成动力总成集中控制。点火系统采用无分电器分配式点火系统,它取消了分电器,直接由控制器和驱动器产生几个点火信号,依次将几个点火线圈充电来产生各缸点火所需的电压,直接输送到火花塞。无分电器的点火系统除了具有一般电子点火系统的优点外,还具有使发动机的设计自由度更大,克服了分电器点火系统分火头与电极之间的磨损和电蚀,并大大降低了电磁干扰,没有任何运动件,它具有寿命长,维修性能好等优点。

20 世纪 90 年代,32 位单片机开始逐步得到应用,硬件上还采用了可编程逻辑阵列、DSP 技术、微处理器外围芯片大规模集成化等电子技术。微处理器外围芯片一般把信号处理电路、输入缓冲电路、输出驱动电路、外部存储器或电源等元件集成在一起,大大提高了集成度,减少了电控单元的空间。20 世纪 90 年代后期与 90 年代初期相比,相同尺寸的芯片效率提高了 4 倍,单片机在功能方面将更能满足汽车发展的需要。数字信号处理 DSP 技术可以应用在复杂的处理中,如爆震信号等。硬件功能的增强使控制能够向整车方向发展,如在上海通用汽车公司生产的 Buick 轿车上采用了多种电子控制系统,动力总成(含发动机和变速箱)控制系统(PCM)、防抱死制动与牵引力控制系统(EBCNF-EBTCM)、车身控制系统(BCM)等。其中,PCM 采用无分电器点火系统和进气道多点顺序喷射系统。发动机控制包括空燃比、点火及爆震控制、燃油蒸发净化、怠速、排气再循环、冷却风扇及空调离合器。

从 20 世纪 90 年代开始,随着排放法规的日益严格和新型传感器的不断出现,以及人们



对整机综合性能的要求日益提高,给电控系统的实时性、可靠性和灵活性提出了更高的要求,现代发动机的控制向着多任务、智能化和集成化方向发展。其控制精度越来越高,控制范围越来越广。例如,在汽车传动系统上应用了电控变速器,实现了变速器换挡的最佳控制,与发动机运行工况得到最佳的匹配,以降低油耗。此外,在汽车的防抱死制动系统(Anti-lock Brake System, ABS)、安全气囊、信息显示系统、空调,以及在汽车导航系统中电控技术都得到了越来越广泛的应用。控制功能与控制项目的扩展,微机控制的智能化程度也越来越高,其电子控制单元(Electronic Control Unit, ECU)已从普通的8位机逐步发展到16位、32位,甚至64位已逐步使用。而且,不仅有通用型微机和单片机,专用的汽车微机也已研制出来,并使用64 KB的大容量的EPROM存储器,同时微机的时钟频率也进一步高速化,由6 MHz发展到12 MHz、18 MHz,而且更高。当前ECU的发展总趋势是从单系统单机控制向多系统集中控制过渡。不久,汽车电控系统将采用计算机网络技术,把发动机电控系统、车身电控系统、底盘电控系统及信息与通信系统等的ECU相连接,形成机内分布式计算机网络,实现汽车电子综合控制,其控制的实时性和精确性不断提高。目前,新型的汽车电子控制主要包括发动机、底盘、安全装置、车身、信息与通信5大部分。其中,发动机部分包括电控燃油喷射控制(Electronic Fuel Injection, EFI)、进气增压控制、空燃比控制、电控点火控制、爆震控制、怠速控制(Idle Speed Control, ISC)、排气再循环控制(Exhaust Gas Recirculation/Recycle, EGR);底盘部分包括传动系统、转向系统、制动系统、行驶系统及悬架控制;安全装置包括自动安全带、安全气囊、雷达防撞、盗车报警、防盗系统等;车身控制包括电动车窗、电动门锁、电动后视镜、电动车顶、电动天线、空调、自动座椅、收放机及电视机;信息与通信系统包括电子仪表显示、导航行驶、车载电话及传真等。

当前,对于发动机控制方面的研究工作主要集中在两个方面,即对控制系统功能的扩充和探索新的控制方法。随着电子技术的发展,汽车发动机控制趋于集成化,一种是在一个大容量的微机中进行全部的集中控制,另一种是在控制系统中装多个微机,进行分类处理。微处理器必须输入/输出多个信号,而且为了保证控制精度,控制策略日趋复杂,高性能、高速、存储容量大,能平行处理多个任务,对操作系统进行严格软件管理的微处理器是汽车电子技术发展的首要因素。在扩充控制功能的同时,许多研究人员也在积极地研究新的控制方法,试图使发动机的控制更为精确和合理。

随着汽车工业的发展,传统的查表法和古典的PID控制,已不能满足要求,各种控制理论在汽车发动机各系统中的应用越来越广泛,发动机控制的理论和方法,从过去的查表法和PID等基于经典理论的控制方法,向以状态空间、最优理论和自适应理论、神经网络和模糊逻辑等现代控制理论方法发展。目前,国外电控系统已不再局限于脉谱图(又称MAP图)和稳态工况控制,主要研究在模型上采用了神经网络和模糊理论;在影响因素上考虑了氧传感器、管壁油膜、进气压力传感器等的非线性特性,同时考虑了传感器具有的时滞特

性；在控制方法上采用了自适应控制、预测控制、变结构控制等现代控制技术；并集中力量解决暂态工况控制和空燃比控制的高精度问题。例如，M.D.Lenshner 等人利用发动机转速的波动量作为衡量燃烧过程稳定性的依据，进行空燃比的控制使发动机处于稀限运转状态。研制成的稀限控制器在不改变汽车使用性能的情况下，使燃料经济性得到改善。美国 Purdue 大学的 WP.Mihelc 等人进一步探讨了用转速测量发动机处于稳定性的方法，提出了稳定性指标，在此基础上，研制了怠速控制系统工况自适应系统，使怠速转速处于发动机稳定工作的底限。由于缸内压力能够反映出燃烧的状态，人们试图用此作为反馈信号对发动机进行控制，利用缸内最大压力出现的时刻控制点火提前角，以获得最大转矩。并用压力信号波形监测爆震以对其进行控制。Hata 和 Asano 通过试验研究了循环压力信号变化与空燃比的关系，证明可用缸内压力信号评价发动机燃烧的稳定性，用以作为稀燃混合比控制的反馈信号。德国慕尼黑理工大学的 Ulrich Lenz 和 Dierk Schroeder 等人提出了用人工智能技术进行瞬态空燃比精确的控制方法。此方法首先采用动态平均值模型对发动机进行建模；然后在平均值模型的基础上，利用人工智能技术和神经网络的学习识别能力识别非线性系统的特性，以进行反馈控制，从而使瞬态的空燃比得到精确的控制。英国诺丁汉大学的 P.J.Shayler 和 Goodman 等人也提出了采用前馈反向传播（BP）神经网络识别供油通路系统特性的方法，该系统经过合适的试验数据样本训练后，可以精确控制燃油量。Tohru Takahashi 等人利用系统辨识的方法建立发动机怠速工况的状态空间数学模型。J.F.Cassidy 等人在发动机一个特定转速-转矩点建立了线性模型，并在模型基础上，探讨了线性二次型 LQ（Linear Quadratic）控制理论的应用。此外，日本的首田容之和片柴秀昭也在发动机上进行了线性二次型 LQ 控制理论应用的研究。

当前，国际汽车电子产品市场正在突飞猛进地发展。这对于正处于发展初期的我国汽车电子行业来说，将是很严峻的挑战。未来的汽车是电子化汽车，我国汽车欲走向世界，推向国际市场，必须坚实地迈出走向电子化的一步。我国对车用发动机电子控制的研究工作如同我国汽车工业本身一样，起步比较晚。目前与世界先进水平相比，还存在很大的差距。我国在“八五”期间的汽车工业发展规划中，就已经把开发电控汽油喷射发动机列入重点研究课题。汽车工业“九五”科技发展规划要点中指出，汽车电子控制技术仍然是汽车工业“九五”计划中的重点科技攻关方向，其主要内容是开展防抱死制动系统、柴油机电子控制、安全气囊、电动助力转向、电控悬架系统、自动变速器等电子控制系统的研究开发。为了加快我国汽车电子技术应用的发展，国家主管部门提出了发展汽车电子产品的设想，指出发展汽车电子产品的基本任务是为我国汽车工业，尤其是轻型汽车和轿车工业提供先进的汽车电子产品，为国产汽车现代化和进入国际市场提供电子技术和装备，为国内保有车辆提供电子化改造的手段和装备。

近年来，随着我国电子和汽车工业的发展，对汽车电子技术应用方面也做了大量的研究与开发工作，取得了许多可喜的成果。我国的一些高校和科研单位如清华大学、北京理工大

学、上海交通大学、北方交通大学、吉林工业大学、浙江大学和长春汽车研究所等,从20世纪80年代初就开始对发动机电控系统进行了研究,并取得了很大的进展,部分研究已达到国外同等研究水平。但我国对这项技术的研究和开发与国外相比仍存在一定的差距,主要问题是控制的精确性、可靠性,而国外却经历了近50年的发展,已经形成完整的开发体系和完善的市场。

发动机电子控制系统的核心是控制算法的确定和实现。也就是说控制策略是实现发动机电子控制的重要保证,先进的控制策略必须选用合适的控制理论来支撑,使用于单变量线性定常系统的经典控制理论,如PID控制,在发动机控制系统已得到了广泛的应用。但由于发动机被控制的对象往往是时变和非线性的,而且随着汽车工业的发展,被控制的参数越来越多,采用以现代控制理论,适用于多输入/多输出时变系统的现代控制理论方法已成为必然。国内对最优控制、自适应控制理论、神经网络控制、遗传算法和模糊控制等现代控制理论在发动机控制算法上的应用也进行了大量的研究工作。从整体上看,我国在汽车发动机电控系统的控制策略研究方面一直紧跟国外学术动态,对新理论、新方法、新趋势等方面的把握和研究非常及时,逐步取得了一些很有价值的研究成果。例如,张翠平的汽油机怠速稳定性的模糊控制仿真研究;陈恒的基于遗传算法的发动机模糊控制;韩以伦的基于多智能体系的发动机智能控制仿真与试验研究;姜丁的EFI系统自学习模糊控制的研究;姜述刚的遗传算法在电控发动机控制参数优化中的应用;于秀敏的多点喷射汽油机自适应控制系统;侯志祥的车用发动机过渡工况空燃比的先进控制策略;杨斌的瞬态空燃比控制策略研究及智能控制的应用;何文华的汽油机喷油与点火系统智能控制的研究;邵千钧的基于小脑模型神经网络的点火提前角控制怠速稳定性的研究;姜卓的汽油机新型ECU的硬件设计与喷油控制策略研究;赵光宙的应用神经网络模糊控制器的发动机怠速控制等都很有借鉴意义和参考价值。

汽车电子控制系统是现代汽车中技术含量最高、利润空间最大的部件之一,长期以来一直受到汽车生产厂商及零部件供应商的高度重视。在高科技飞速发展的今天,随着人们对汽车的安全性、动力性、经济性、操作性、舒适性、排放法规等方面的要求不断提高,汽车上电控系统作为电子装备典型代表,其应用无疑会越来越广泛。在汽车作为微利产品的今天,电控系统的成本控制必须能够满足大批量生产要求,高性价比的产品级电控系统设计无疑是一个挑战。作为产品级电控系统,其中的软件部分是实现控制功能的核心,体现了电控系统科技含量的主要部分,同时又是利润的主要来源。但软件的实现过程是经过长时间的经验积累及大量的投入后得到的,电控系统软件作为零部件供应商的核心机密,其保密工作非常严格,因此从公开资料中获取电控系统设计中具体的、细节性的信息几乎是不可能的。实用的电控系统软件要求简洁,高可靠,响应迅速、精确。电控系统控制逻辑、控制算法不仅要有充分的理论依据,而且要经过长期的实践检验。开发一套实用的、完全自主知识产权的电控系统控制软件,除了要在理论上进行详尽的分析,在计算机上进行仿真计算外,还需要经过