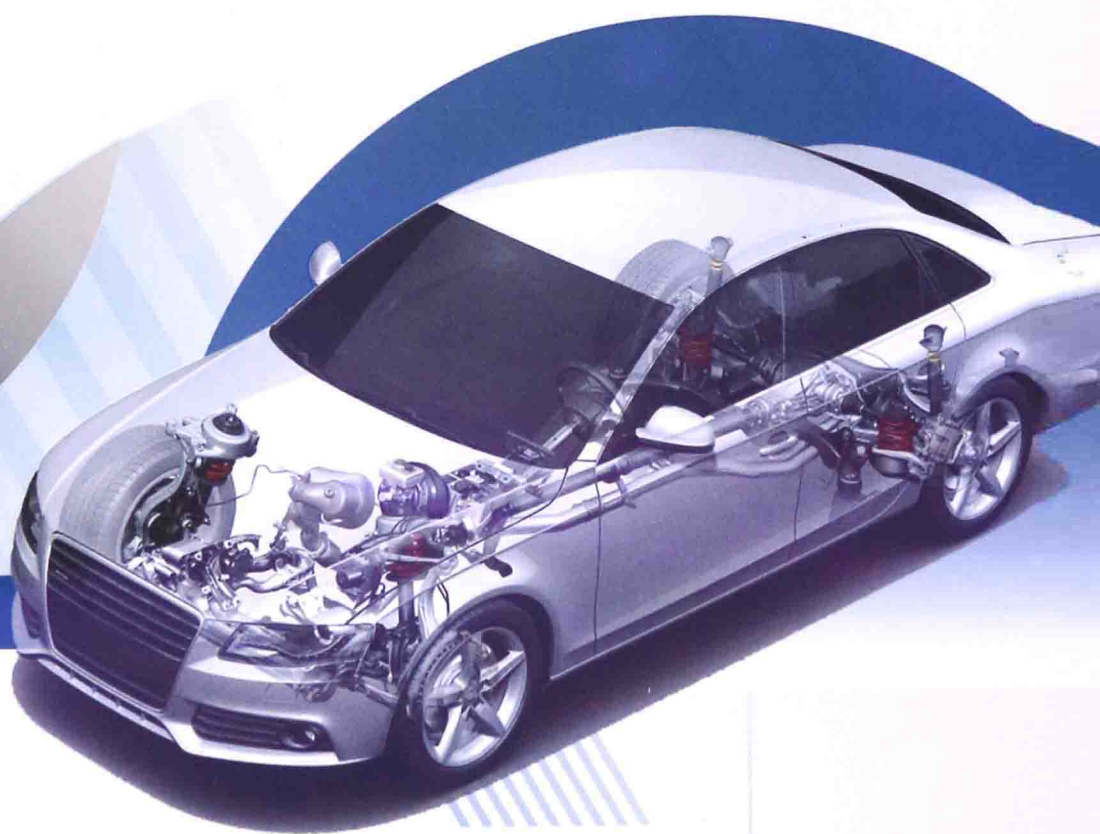


普通高等教育机电类规划教材

汽车电子 控制技术

第2版

周云山 张军 © 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育机电类规划教材

汽车电子控制技术

第2版

主编 周云山 张 军
参编 李 克 宋晓琳
主审 于秀敏



机械工业出版社

本书内容在第1版的基础上进行了修删和增补,对于内容深度超过本科要求的内容、陈旧的内容以及与其他课程重复的内容都进行了删减;另外增加了电控座椅、转向助力、定速巡航等内容。全书从系统的基本概念入手,介绍了有关汽车电子控制系统的组成、工作原理、性能指标以及对给定的性能指标进行控制系统设计的方法和步骤。本书对发动机电控燃油喷射、电子点火、防抱死制动、防滑驱动、电子控制悬架、自动变速器等常用的电子控制装置作了详细介绍;对电子空调、安全气囊、刮水器与电控门窗、电子导航、电控座椅、电控转向助力、定速巡航等汽车辅助功能的电子控制装置仅作一般介绍。

本书可作为高等学校本科车辆工程专业教材,也可供汽车行业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车电子控制技术/周云山,张军主编.—2版.—北京:机械工业出版社,2014.6

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 978-7-111-46094-7

I. ①汽… II. ①周…②张… III. ①汽车—电子控制—高等学校—教材 IV. ①U463.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第044220号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:冯春生 责任编辑:冯春生 贺贵梅 卢若薇

版式设计:赵颖喆 责任校对:张晓蓉

封面设计:张静 责任印制:刘岚

北京鑫海金澳胶印有限公司印刷

2014年6月第2版第1次印刷

184mm×260mm·10印张·240千字

标准书号:ISBN 978-7-111-46094-7

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

我国汽车行业的快速发展与汽车电子技术的不断进步要求学校的教学内容要与时俱进。本书第1版出版后颇受读者喜爱，同时广大读者也对本书提出了许多宝贵的意见。部分读者认为关于控制与仿真的内容深度超出了对本科生的要求；部分读者认为书中有些内容与《汽车构造》内容重复；部分内容稍显过时；作为本科生教学用书容量偏大等。针对这些意见，我们在第2版中进行了相应的修删。删去了部分陈旧内容及与《汽车构造》重复的内容，删去了部分理论深度过深的内容，在第三章增加了部分发动机控制系统的新内容，在第八章增加了电控座椅、转向助力、定速巡航等内容。

本书对常用的几种电子控制装置，如发动机电控燃油喷射、电子点火及其他发动机控制系统、电子控制悬架、防抱死制动、防滑驱动控制、汽车自动变速作了较为详细的介绍。在第八章，讲述汽车辅助功能的电子装置，内容包括：电子空调、安全气囊、刮水器与电控门窗、电子导航、电动座椅、转向助力、定速巡航等。由于这些辅助的电子装置涉及许多汽车专业以外的知识，以及本门课程的学时限制，本书对辅助的电子装置仅作了一般性介绍。

本书由周云山、张军主编。第二章由湖南大学宋晓琳、张军编写，第三章由湖南大学李克、张军编写，第八章由湖南大学张军编写，其余各章由湖南大学周云山编写。

本书由吉林大学于秀敏教授主审。他仔细地阅读了全书的原稿，并提出了许多建设性的意见，在此表示最诚挚的谢意。

在本书编写过程中，研究生曹成龙、冯坤、栾文博、赵志强、王建德参与了部分工作，在此也表示感谢。

在本书编写过程中，引用了一些国内外期刊、文献资料，充实了本书的内容，借此机会向有关作者表示感谢。

编 者



第1版前言

现代汽车技术的进步在很大程度上归结为汽车电子技术的进步，汽车电子技术对汽车工业的促进作用已成为当今社会的共识。于是汽车电子技术的教科书也在不断涌现，从汽车电子控制的结构原理、使用与维修，到电子控制系统理论与设计，不仅数量多，而且门类齐全。但要编著一本用作高等学校汽车专业《汽车电子技术》的通用教材，仍感难度较大。困难之一：教材的深度定位较难，内容太浅，可能成为科普性读物，太深又唯恐陷于专题研究之中。困难之二：汽车电子技术涉及较多学科领域，很难在各个方面都达到专业的水平。

为此，编者根据多年从事汽车电子控制的体会，对常用的几种电子控制装置，如发动机电子喷射、电子点火、电子控制悬架、防抱制动、防滑驱动控制、汽车自动变速作了较为详细的介绍。在第八章，讲述汽车辅助功能的电子装置，内容包括：电子空调、安全气囊、刮水器与电控门窗、电子导航等。由于这些辅助的电子装置涉及许多汽车专业以外的知识，以及本门课程的学时限制，本书对辅助的电子装置仅作了一般性介绍。

本书收集了大量的国内外最新资料，从系统的基本概念入手，由浅入深讲述了有关汽车电子控制系统的工作原理、性能指标、系统的动态模型，以及对给定的性能指标，在满足动态模型约束条件下进行控制系统设计的方法和步骤。

本书由周云山、钟勇主编。第二章由湖南大学钟勇、宋晓琳编写，第三章由湖南大学钟勇、李克编写，第十章由湖南大学宋晓琳、钟勇、李嫩编写，其余各章由吉林大学周云山编写。

本书由吉林大学李幼德教授主审。他仔细地阅读了全书的原稿，并提出了许多建设性的意见，在此表示最诚挚的谢意。

在此书撰稿过程中，引用了一些国内外期刊、文献的资料，充实了本书的内容，借此机会向有关文章的作者表示感谢。

编 者

目 录

第2版前言	
第1版前言	
第一章 绪论	1
第一节 汽车电子技术的发展	1
第二节 汽车电子产品的特征	2
第三节 电子控制系统的共性问题	3
第四节 汽车电子控制系统的组成	3
第五节 汽车电子控制系统建模与标定	5
第二章 发动机燃油供给的电子控制系统	8
第一节 概述	8
第二节 汽油机的电子控制	11
第三节 电子控制多点汽油喷射系统	16
第四节 柴油机的电子喷射系统	23
第三章 电子点火及发动机的其他控制系统	31
第一节 数字点火控制系统	31
第二节 怠速控制	43
第三节 废气再循环控制	45
第四节 燃油蒸发排放物控制	48
第五节 发动机管理系统发展的新技术	49
第四章 汽车防抱死制动系统	55
第一节 概述	55
第二节 轮胎与路面之间的相互关系	55
第三节 单轮车辆系统的数学模型	57
第四节 ABS 逻辑控制算法	60
第五节 ABS 的整车控制	64
第六节 ABS 与主要部件	70
第五章 驱动控制	74
第一节 概述	74
第二节 ASR 的原理	75
第三节 ASR 的控制方法	76
第六章 电子控制悬架	84
第一节 悬架的力学模型	84
第二节 悬架的力学模型和性能评价	88



第三节	半主动悬架控制	91
第四节	悬架的整车控制	93
第五节	主动悬架控制	94
第六节	系统的组成	96
第七节	电子空气悬架	98
第七章	汽车自动变速传动	105
第一节	概述	105
第二节	有级机械式自动变速器	106
第三节	液力机械传动自动变速器	107
第四节	金属带式无级自动变速器	114
第八章	汽车辅助装置的电子控制系统	122
第一节	汽车电子空调	122
第二节	电子安全气囊	129
第三节	刮水器及车窗玻璃电子控制系统	135
第四节	电子导航系统	137
第五节	座椅电子控制系统	140
第六节	动力转向	144
第七节	巡航控制系统	150
参考文献		153

第一章 绪 论

第一节 汽车电子技术的发展

汽车电子技术的发展可归结为几个方面的原因：首先是由于电子技术的发展，给汽车电子装置的发展提供了必要的物质条件。回顾汽车电子的发展史，就间接地记录了电子技术的发展史。其二是商家对扩大市场份额和附加利润的不断追求。其三是不断适应各个时期的社会背景（如高速公路网的发展、能源危机和环境污染等），满足人类对汽车使用性能的更高要求（舒适性、安全性、操纵方便以及因人类所有活动对最新信息的依赖而需要增加新的功能等），这是促进汽车电子产品发展的一个最重要的原因。电子学的发展与相关的社会背景促进了汽车电子技术的发展，如图 1-1 所示。

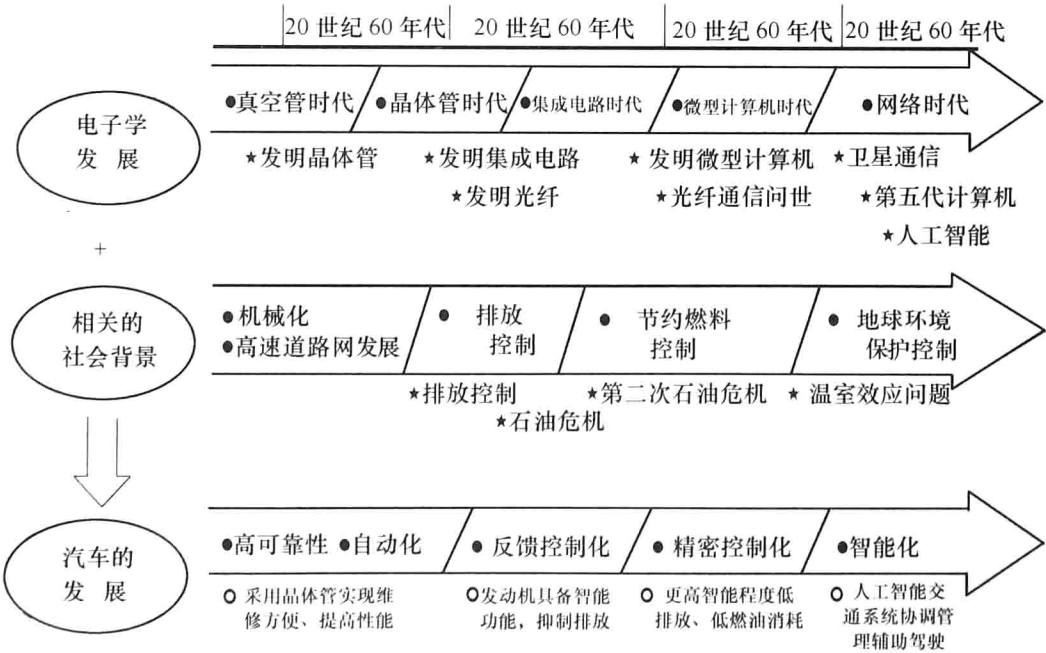


图 1-1 电子学、社会背景与汽车发展

可见，随着电子学的发展，为了适应环境、社会和人类对完美的不断追求，汽车电子产品经由初期的电子-机械替代（操作自动化）过渡到反馈控制（目标量化控制），现已发展到精确量化的控制阶段，今后将朝着多目标综合控制（使整车的综合性能精确量化至最优状态）和智能化控制的方向发展。例如由发动机燃油喷射、供油间断和制动干预组成的驱动控制系统（ASR），可使汽车的驱动性能和燃油经济性达到最佳状态，并使汽车在弱附着路面条件下保持良好的操纵稳定性。在此基础上，再结合防抱死制动系统（ABS）和动力转向控制则可使汽车在各种非稳态条件（低附着系数或高速行驶）下的不同工况（汽车加速

或制动）实现操纵稳定性的精确控制。总的发展趋势是，汽车电子控制系统获取的内部和外部信息越来越多，功能越来越强，智能化程度越来越高，可靠性越来越高。未来的先进安全车辆（Advanced Safety Vehicle, ASV）系统将包括主、被动安全装置以及自动驾驶装置、车辆之间的通信装置，如图 1-2 所示。在紧要时刻，自动驾驶装置可以直接干预驾驶员的操作，确保人车的安全。

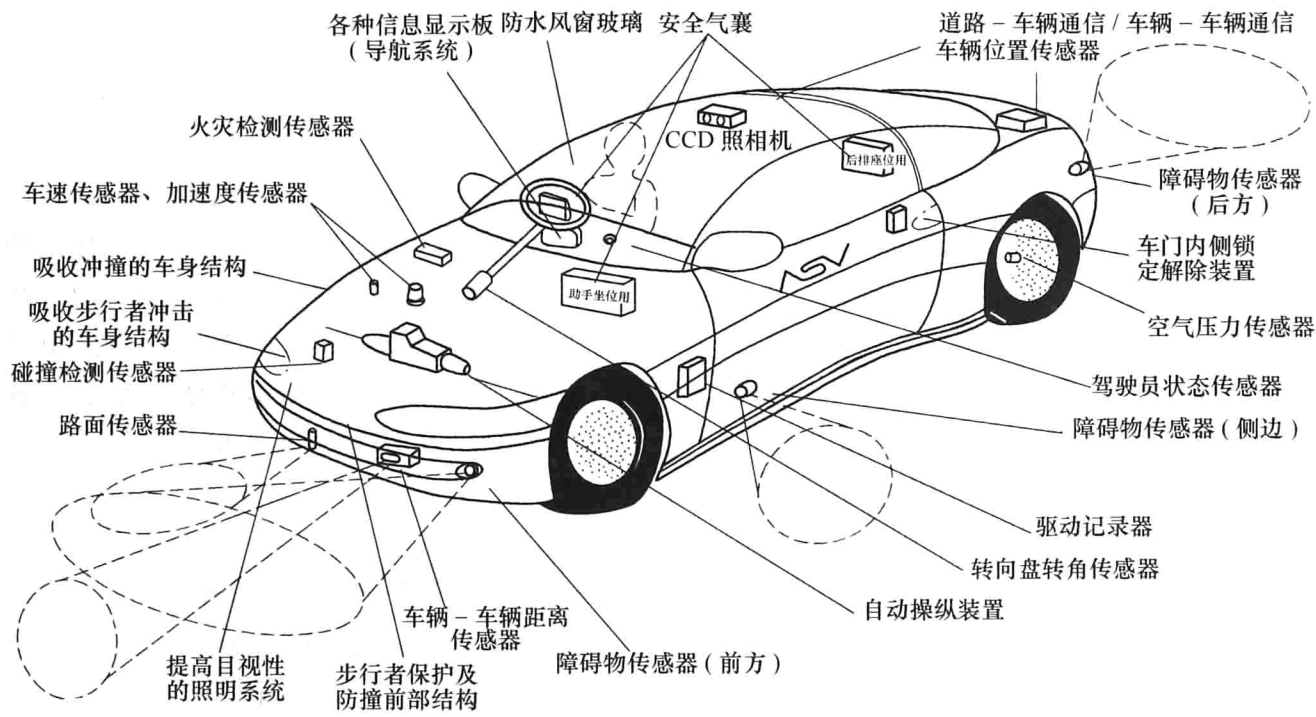


图 1-2 先进安全车辆（ASV）系统概念车

第二节 汽车电子产品的特征

汽车作为一种交通工具，行驶速度高，必须绝对安全可靠，所以能在汽车上应用的电子产品必须具备图 1-3 所示的特征。首先，汽车电子产品在性能方面应能满足各种使用要求。在这一先决条件下，汽车电子产品必须是大量生产的，装车成本很低。其次，汽车电子产品还必须能克服苛刻的工作环境，在不同工况下都能正常工作，以保证汽车行驶绝对安全、可靠。此外，所开发的汽车电子控制装置都必须在生产成本、抗干扰能力、工作条件及可靠性等方面进行严格考核后，才能批量投入生产。

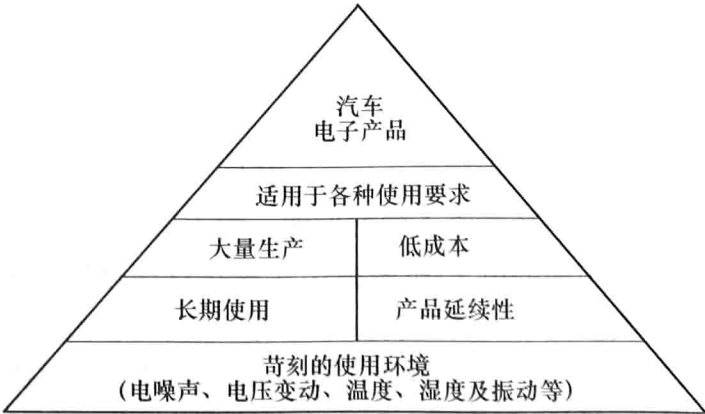


图 1-3 汽车电子产品的特征

第三节 电子控制系统的共性问题

汽车作为一种最为普及的交通工具，涉及相当多的性能指标。仅汽车本身的性能指标就包括燃油经济性、动力性、尾气排放、制动性、操纵稳定性、平顺性、安全性以及弱附着路面的通过性等。为了满足人类多方面的需求，还有许多附加的功能，诸如自动空调、安全气囊、自动车窗、防盗器、通信设备、自动导航仪等其他自动装置。目前，这些附加电子装置的装车比例也在不断扩大。从控制对象看，这些系统是完全不同的，但从设计方面看，这些电子控制系统又有共同之处，如图 1-4 所示。电子控制系统的共性问题如下：

(1) 动态建模 对于需满足既定要求的电子控制系统，通常都要建立控制系统的动态模型（或标定系统的数据模型）。

(2) 传感装置 为了实现对被控对象的精确控制，电子控制系统都需要通过传感装置测量被控对象的变化信息。

(3) 执行机构 电子控制系统都需要通过执行机构把期望的动作要求转换为准确的动作。

(4) 操作系统 Windows 是计算机最广泛采用的操作系统，对于汽车电子控制系统也一样。为了提高电子控制系统的可靠性，优化其对外部事件的响应和管理能力，必须开发满足功能要求的操作系统。汽车电子控制系统的操作系统包括外围设备管理、底层驱动、调试故障诊断及各 ECU 之间的数据通信。

(5) 控制算法 电子控制系统均需要设计控制算法，即根据测量信号（对象输出）与期望动作要求（对象输入）之间的偏差，基于系统的动态模型进行控制器的设计，以满足系统在不同条件下的使用要求。

(6) 电子控制装置 电子控制装置又称作 ECU（Electronic Control Unit）是实现控制算法（软件或程序）的载体——硬件装置。

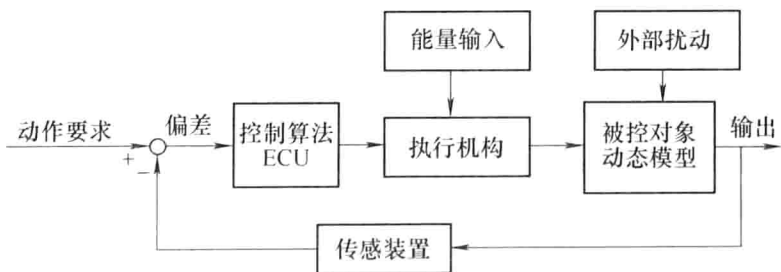


图 1-4 控制系统的一般结构框图

第四节 汽车电子控制系统的组成

一般来说，汽车电子控制系统由传感器、ECU 和执行机构组成。

一、传感器

随着电子技术的发展，汽车 ECU 普遍采用的是以微处理器为核心的数字系统，具有很

强的信息处理功能。为了最大限度地提高汽车的使用性能（如燃油经济性、动力性、可靠性、乘坐舒适性、安全性、操作方便性等），需要接收各种必要的信息，进而输出相关指令以实现各类精确控制。传感器就用来提供这些必要的信息，在某些汽车上，仅传感器就多达50个。例如提高发动机性能，关键在于精确控制喷油量和点火时刻，确定这两个参数就需要很多信息，在汽车上就得装设温度传感器、空气流量计、曲轴位置传感器以及测定排气中氧气浓度的氧传感器等。如果没有各类传感器提供发动机、汽车行驶的工作状态和外部环境条件，ECU就失去了控制目标。可以说，汽车电子技术成功与否在很大程度上取决于传感器。车用传感器的类型及用途见表1-1。

表 1-1 车用传感器的类型及用途

系 统	传 感 器	用 途
发动机	进气压力（或空气流量）传感器、空燃比传感器、曲轴转角传感器、爆燃、发动机转速传感器、进气温度传感器、冷却液温度传感器、冷却液负压阀、冷却液温度传感器、冷却液温度开关	燃油喷射、废气再循环（EGR）率、点火时间的程序控制，冷却液温度调节，怠速稳定控制，空燃比修正反馈控制，爆燃区控制
变速器	挡位置开关、节气门开度传感器、车速传感器、制动开关、驻车制动开关、发动机转速传感器	换挡控制、闭锁离合器控制、起步离合器控制
车身行驶	车速传感器、轮速传感器、车高传感器、结露开关、车外开关、车内开关、车外温度传感器、车内温度传感器、日照传感器、湿度传感器、冷却液温度开关	巡航控制、车身高度控制、防抱死制动、防结露车窗、悬架系统控制、车内空调（包括日照、湿度）、前照灯控制、防眩目后视镜、雨滴检测刮水器
显示诊断	发动机转速传感器、车速传感器、燃油剩余量传感器、冷却液温度传感器、机油油压传感器、方位车距离传感器、进气压力传感器、燃油流量传感器、排气温度传感器	车速、发动机转速、里程表、燃油剩余量显示，冷却液液位、制动液液位、排气温度报警

除非特别的原因，应该选用直接测量的传感器，而不选用间接的。从数学上讲，位移、速度和加速度是可以相互表达的，即从位移信号可推出速度和加速度信号。然而，由于传感器的测量噪声，一般很难由其中的一个信号重构其他的信号。尤其是当信号的工作频率与测量噪声频率在同一个范围内或相隔很近时，即使采用滤波技术，也不能达到预期的效果。

二、执行机构

常用的执行机构根据驱动能量的不同可分为三类，即液压元件、气动元件和电器元件。但是，也有一些特殊的执行机构是利用材料的特殊性质来完成期望动作的。例如，控制发动机冷却液循环的节温器，是利用材料的热膨胀特性，在冷却液温度超过规定的温度后，自动打开强制循环冷却液的通道。对于小功率和运动伺服系统，一般采用电器元件，如节气门开度控制、散热器冷却风扇等。对于大功率系统，可采用液压元件和气动元件。如果结构尺寸要求很严格，则采用液压传动（如轿车）；如果结构尺寸要求较宽，则多采用气动（如货车电子悬架、防抱死制动系统）。常用的执行机构见表1-2。

表 1-2 常用的执行机构

名 称		驱 动 能 源	应 用 举 例
电 机	直流电动机	电能	刮水器
	伺服电动机	电能	节气门开度控制
	步进电动机	电能	节气门开度控制、电控悬架阻尼与刚度控制
控制阀	2/2 开关阀	液压/气动	防抱死制动、驱动控制、自动变速器（AT）
	3/3 开关阀	液压/气动	防抱死制动、驱动控制、自动变速器（AT）
	比例压力阀	液压/气动	起步离合器、无级（CVT）金属带夹紧力控制
	比例流量阀	液压/气动	无级（CVT）连续传动比控制
继电器		电能	电磁阀驱动、电动机驱动
电磁铁	比例	电能	电磁离合器、比例液压阀
	开关	电能	开关电磁阀

第五节 汽车电子控制系统建模与标定

一、电子控制系统的建模

为了实现精确控制，系统模型的设计非常重要。汽车电子控制系统的模型包括动态模型和静态模型，比较典型的动态模型有汽车整车动力学模型、防抱死制动模型、驱动控制模型等，常用的静态模型有发动机数据模型、各种液压阀控制电压（电流）与流量/压力输出特性模型。可以通过三种不同的方法获得电子控制系统的模型，如理论推导、试验标定和系统辨识。理论模型能准确、全面地描述电子控制系统的动态和稳态特性，是深入了解系统本质特性的钥匙。像悬架、ABS 及整车驱动系统的力学模型等，是建立在牛顿力学基础上的理论模型。然而，在许多场合导出理论模型就非常困难，有时也是不可能的。例如发动机就很难用一个解析表达式来描述其全部特性，所以，无论是发动机控制还是传动系统与发动机的动态匹配控制，都是采用发动机在稳态工况下的标定数据模型。一般而言，静态数据模型可以解决任意复杂系统的定量描述问题，但当系统的动态特性起着主导作用时，用静态模型描述可能会产生较大的误差。系统辨识可以提供包括动态特性在内的参数模型。在实际应用中，人们习惯把系统辨识的动态参数模型与稳态数据模型结合起来，用以改善数据模型的精度。

二、汽车电子控制系统的标定

从提高效率、降低开发成本的角度出发，汽车工程师一直试图通过理论模型来描述汽车的控制问题以及在计算机上一步完成控制算法的开发。然而由于汽车环境和工作条件的多变性，使得汽车的控制系统的开发根本做不到这点。在实际应用中所采用的标定看起来笨拙，却已成为汽车控制系统开发的一种最有效的模式，并被归纳总结为固化的开发流程。只是这种标定的难度被行业夸大得近乎神秘，好像是功能性的电子控制系统，非国外的大公司开发不可。实际上电子控制系统的标定很简单，只是需要首先把一个复杂问题分解为许多简单问题，然后将简单问题连接起来。这里以汽车起步离合器（多片湿式、液压压紧）为例，简

述汽车电子控制系统的标定过程。

1. 汽车起步离合器的标定内容

(1) 汽车起步离合器的基本功能

- 1) 快速接合、分离发动机与车轮之间的动力。
- 2) 起步速度能够反映驾驶员的操作意图。
- 3) 坡道起步不溜坡，不熄火。
- 4) 接合平顺，起步无冲击。

(2) 工作环境

- 1) 路面坡道变化（上坡到下坡）。
- 2) 外部温度变化。
- (3) 系统状态的老化
 - 1) 摩擦片摩擦因数变化。
 - 2) 主要元件的特性老化。
 - 3) 离合器间隙的变化。

2. 汽车起步离合器标定的基本步骤

(1) 系统模型常态标定（基本策略） 通过大量的试验可知，汽车起步离合器接合压力的变化过程如图 1-5 所示，假设汽车在平路面上以中节气门开度起步，可以满足使用要求。让汽车在平路面上以小节气门开度起步，不断改变油压变化率，找到使综合性能达到使用要求的油压变化过程，就得到第二条压力曲线。同样，汽车在平路面上大节气门开度起步，可找到第三条压力曲线。如果节气门开度任意变化，则只要根据实际值在这三条曲线之间进行插值就可以了。标定的曲线越多，对节气门开度变化的适应能力越好，但数据量越多，单片计算机需要处理的数据量就越大，应用中要根据实际情况综合进行考虑。由于起步离合器没有压力传感器，实际控制过程并不是依据压力曲线进行标定，而是根据发动机的转速，在大、中、小三个节气门开度下标定发动机转速与执行机构控制量之间的关系。在任意节气门开度下，最后通过插值方式求得发动机转速对应的控制规律。为了进一步反映驾驶员的操作意图，可增加节气门开度变化率信息量，用节气门开度和节气门开度变化率两参数来确定，一般分为 5 个等级，即慢、较慢、中、较快、快。

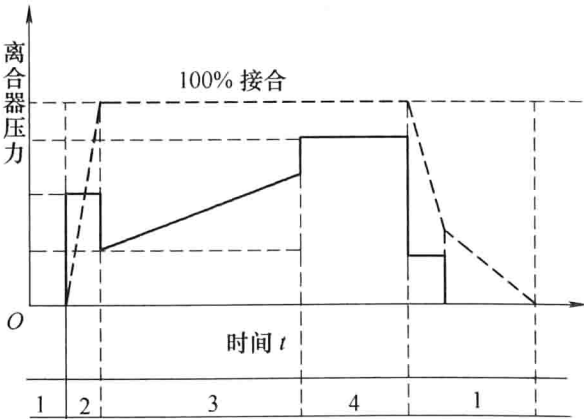


图 1-5 起步离合器接合压力变化
1—离合器分离阶段 2—离合器充油阶段
3—离合器压力增加阶段 4—离合器接合阶段

(2) 对环境变化的修正

1) 温度变化的标定。由于变速器工作时的温度升高很快，因此温度变化标定费时，费用也高。需要恒温控制装置，尤其是极限低温，还需要特别的试验条件。在大、中、小三种节气门开度条件下，测绘温度在 -30°C 、 -15°C 、 0°C 、 20°C 、 40°C 、 60°C 时满足综合使用性能的变化曲线，再比较不同温度条件对起步特性的影响，就可以确定控制量的修正值了。

由于变速器中都装有温度传感器,因此只要经过精确标定,那么在任意温度条件下就能够容易地计算出基本控制量的修正值。

2) 坡道影响的标定。由于没有特殊的坡道传感器,因此坡道影响的标定就比较粗略,主要解决发动机不熄火、整车不溜坡、发动机不空转的问题。

(3) 对系统元件老化特性的修正

1) 离合器传递转矩的大小在相同条件下取决于摩擦片的摩擦因数。摩擦片的摩擦因数是变化的,新摩擦片的摩擦因数最大,经使用后很快就趋于稳定了。

2) 离合器的间隙大小影响汽车的起步平顺性。从离合器开始使用直到失效期间,其间隙一直都在变化,因此需要修正压力曲线随时间变化而变化的规律。同时,还要考虑电磁阀随使用时间变化而变化的衰减特性,以及控制电路老化时的衰减特性。

3) 系统状态的老化一般根据汽车的里程和使用时间来推断,虽然并不是十分精确,但也能够抓住问题的实质,足以满足使用性能的修正要求。完成老化标定的工作量很大,需要确定各主要元件经历一个寿命周期的特性变化,修正决策需要的试验数据很多,但整个过程的实现却相当简单。

4) 需要指出的是,标定的模式不是唯一的,“条条大路通罗马”,只要积极付诸行动,并且具有独立自主的精神,就一定可以探索出具有中国特色的标定新模式。

作为本章的结尾,引出一个业内普遍困惑的问题:汽车电子产品自主开发的条件具备吗?已达到开发的门槛条件了吗?答案是肯定的,不是汽车电子产品开发的门槛高,而是过高地估计了汽车电子产品开发的难度,结果在困难面前失去了信心。中国汽车工业走自主开发的道路已成为必然趋势,一批在汽车电子领域的开拓者在自主开发中迅速崛起,照亮了我国民族汽车工业走自主创新之路,鼓舞了民族的士气。我国汽车工业已经取得的辉煌业绩预示着我国全面开发汽车电子产品的时代即将来临。

第二章 发动机燃油供给的电子控制系统

发动机燃油供给系统的主要任务是根据发动机不同工况的要求，配制相应空燃比和数量的可燃混合气连续不断地供入发动机各个气缸，从而保证发动机的正常运转。目前，汽油机的燃油供给方式有化油器式和喷射式两种。

第一节 概 述

一、传统供油方式

化油器式燃油供给是汽油机的传统供油方式，其构成如图 2-1 所示。化油器式燃油供给系统的燃油配给过程是利用空气流经节气门上方喉管处产生的负压将燃油从浮子室中连续吸出，这部分燃油经与空气自行混合后被吸入各气缸内燃烧做功使发动机运转。

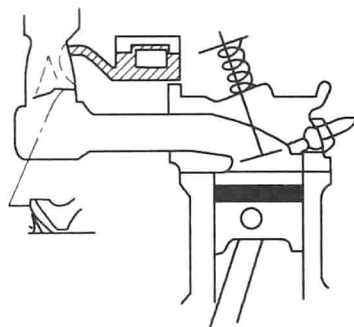


图 2-1 化油器供油方式的构成

二、可燃混合气的配制要求

通常用空燃比来表示可燃混合气的成分。空燃比对发动机的动力性、燃油经济性及排放性均有较大的影响。下面着重讨论空燃比与发动机性能之间的关系。

1. 空燃比对发动机性能的影响

通常把吸入发动机气缸的空气与燃油的质量比称为空燃比，一般用 A/F 表示。

从理论上分析，1kg 汽油完全燃烧变成 CO_2 和 H_2O 时，需要 14.7kg 的空气，故此时的空燃比为 14.7，称之为理论空燃比。在发动机气缸内的实际燃烧过程中，燃烧 1kg 汽油所消耗的空气量不一定正好就是理论所需求的空气量，也就是说系统所提供的实际空气量可能大于理论空气量，也可能小于理论空气量，这与发动机的结构和使用工况密切相关。通常把实际空气量与理论空气量的比值称为过量空气系数，用字母 α 表示。当 $\alpha = 1$ 时，混合气为理论空燃比混合气；当 $\alpha > 1$ 时，混合气为稀混合气；当 $\alpha < 1$ 时，混合气为浓混合气。

空燃比对发动机性能的影响如图 2-2a 所示。根据分析得知，当空燃比约为 12.5 ($\alpha = 0.85$) 时，由于其燃烧速度最快，发动机所产生的转矩最大，故发动机的动力性最好，所以又称其为功率空燃比。当空燃比约为 16 ($\alpha = 1.09$) 时，由于混合气较稀，有利于汽油完全燃烧，故可降低发动机的油耗，因为此时发动机的燃油经济性最好，故又称其为经济空燃比。

可燃混合气燃烧后排出的废气成分除 CO_2 和 H_2O 外，还有空气中没有参与燃烧的 N_2 、剩余的 O_2 、没有被完全燃烧的 HC、燃烧不完全的 CO 及高温富氧条件下燃烧生成的 NO_x 。

此外，从图 2-2b 中还可看到 CO、HC 及 NO_x 三种有害成分的质量分数随空燃比的变化趋势。其中 CO 和 HC 以理论空燃比为界，随着混合气变浓而逐渐上升，而在空燃比略大于理论空燃比的区域内，CO 及 HC 的质量分数均比较低。但由于 NO_x 是高温富氧的产物，故在 $\alpha = 1.1$ 左右时将出现最大值。

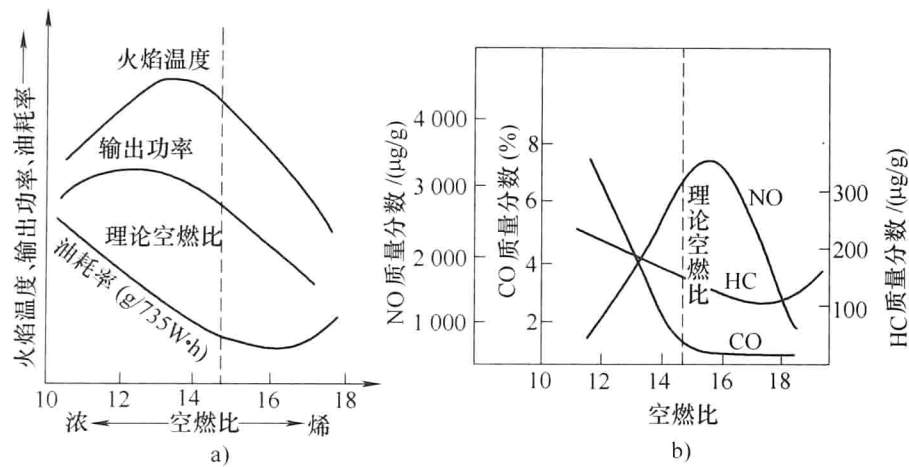


图 2-2 空燃比与发动机转矩、燃油消耗率、有害排放物排放质量分数之间的关系
a) 空燃比与温度、输出功率、燃油消耗率的关系 b) 空燃比与有害排放物质量分数之间的关系

由此可见，发动机的性能与空燃比有着密切的关系，但影响的程度和变化规律各不相同。所以，如何精确控制混合气的空燃比是比较复杂而又非常重要的问题。

2. 发动机各种工况对混合气的要求

发动机在实际运行过程中，不同工况下对可燃混合气空燃比的要求是不同的，即使是在同一工况下，由于其在工作范围内是不断变化的，发动机对可燃混合气空燃比的要求也是不同的。下面主要从稳定工况和过渡工况两种情况进行分析。

(1) 稳定工况对混合气的要求 发动机的稳定工况是指发动机已经完全预热并进入正常转动，而且在一定时间内转速和负荷没有突然变化的情况。稳定工况又可分为怠速工况、小负荷工况、中等负荷工况、大负荷工况和全负荷工况等几种情况。

1) 怠速工况和小负荷工况。怠速工况是指发动机对外无功率输出且以最低稳定转速运转的情况。此时，混合气燃烧后所做的功，一方面用于克服发动机内部的阻力，另一方面用于保证由发动机驱动且此时需正常工作的设备（如空调压缩机、发电机等）的运作，并使发动机保持最低转速稳定运转。汽油机怠速转速一般为 300 ~ 1 000r/min。在怠速工况下，节气门处于关闭状态，此时，吸入气缸内的可燃混合气不仅数量极少，而且汽油雾化蒸发也较差，进气管中的真空度很高，当进气门开启时，气缸内压力仍高于进气管压力，结果使得气缸内的混合气废气率较大。此时，为保证混合气能正常燃烧，就必须提高其浓度，如图 2-3 中的 A 点。随着负荷的增加和节气门略微开大而转入小负荷工况时，吸入混合气的品质逐渐得到改善，所以在小负荷工况时，发动机对混

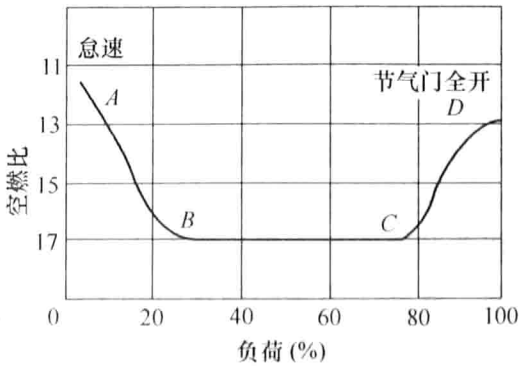


图 2-3 汽油机负荷变化时
所需的混合气空燃比

混合气成分的要求如图 2-3 中的 *AB* 线段所示。也就是说, 发动机在小负荷运行时, 供给的混合气也应加浓, 但加浓的程度随负荷的增加而减小。

2) 中等负荷工况。汽车发动机大部分工作时间都处于中等负荷状态。此时, 节气门已有足够大的开度, 上述影响因素已不复存在, 因此可供给发动机较稀的混合气, 以获得最佳的燃油经济性。这种工况相当于图 2-3 中的 *BC* 段, 空燃比为 16 ~ 17。

3) 大负荷工况和全负荷工况。在大负荷工况时, 节气门开度已超过 $3/4$, 此时应随着节气门开度的增大而逐渐加浓混合气以满足发动机功率的要求, 如图 2-3 中的 *CD* 段。但实际上, 在节气门尚未全开之前, 如果需要获得更大的转矩, 则只要把节气门进一步开大就能实现, 没有必要使用功率空燃比来提高功率, 而应当继续使用经济混合气来达到省油的目的。因此, 在节气门全开之前所有的部分负荷工况都应按经济混合气配给。只是在全负荷工况时, 节气门已经全开, 此时为了获得该工况下的最大功率必须供给功率混合气, 如图 2-3 中的 *D* 点。在从大负荷工况过渡到全负荷工况的过程中, 混合气的加浓也是逐渐变化的。

(2) 过渡工况对混合气的要求 汽车在运行中的主要过渡工况可分为冷起动、暖机和加、减速三种形式。

1) 冷起动。冷机起动时, 发动机要求供给很浓的混合气, 以保证混合气中有足够的燃油蒸气, 使发动机能够顺利起动。但在冷起动时燃油和空气的温度都很低, 燃油蒸发率很小, 为了保证冷起动顺利, 要求混合气的空燃比加浓到 2:1 才能在气缸内形成可燃混合气。

2) 暖机。发动机冷起动后, 各缸开始依次点火而做功, 发动机温度逐渐上升。发动机在暖机过程中, 由于温度较低, 燃油雾化较差, 因此也需要 A/F 较小的浓混合气, 而且随着发动机温度的增加空燃比逐渐增大, 直至达到正常工作温度为止, 发动机进入怠速工况。

3) 加、减速。发动机的加速是指发动机的转速突然迅速增加的过程。此时, 驾驶员猛踩加速踏板, 节气门开度突然加大, 进气管压力随之增加, 由于燃油的流动惯性和进气管压力增大后燃油蒸发量的减少, 大量的燃油颗粒被沉积在进气管壁面上形成厚油膜, 而进入气缸内的实际混合气则瞬时被稀释, 严重时会出现过稀, 使发动机转速下降。为了避免这一现象发生, 在发动机加速时, 应向进气管喷入一些附加燃油以弥补加速时的暂时稀释, 进而获得良好的加速性。

当汽车减速时, 驾驶员迅速松开加速踏板, 节气门突然关闭, 此时由于惯性作用发动机仍保持很高的转速, 因此进气管真空度急剧增高, 促使附着在进气管壁面上的燃油蒸发汽化, 并在空气量不足的情况下进入气缸内, 造成混合气过浓, 严重时甚至熄火。因此, 在发动机减速时, 应供给较稀的混合气, 以避免这一现象的发生。

尽管汽车发动机的化油器可利用空气流经喉管时产生的负压将燃油连续吸出、雾化、蒸发并与空气混合后形成可燃混合气, 同时还可通过一些辅助装置对不同工况下的混合气浓度进行校正, 能基本满足发动机的工作要求, 但是, 这种供油方式无法使发动机在燃烧过程中得到最佳空燃比的混合气。特别是在低温、低速状态下, 汽油的雾化效果较差, 使燃烧室内所获的混合气空燃比有较大的误差, 而且不能保证各缸供油均匀, 造成发动机冷起动性能较差。此外, 由于传统化油器无法根据进气量对燃油进行精确计量和控制, 因此无法达到现代汽车的设计标准, 严重影响了汽油机性能的进一步提高。

根据以上分析, 要实现对发动机空燃比的精确控制, 以满足发动机在各种工况和条件下所需最佳空燃比的要求, 采用化油器式燃油供给系统是无法做到的。