

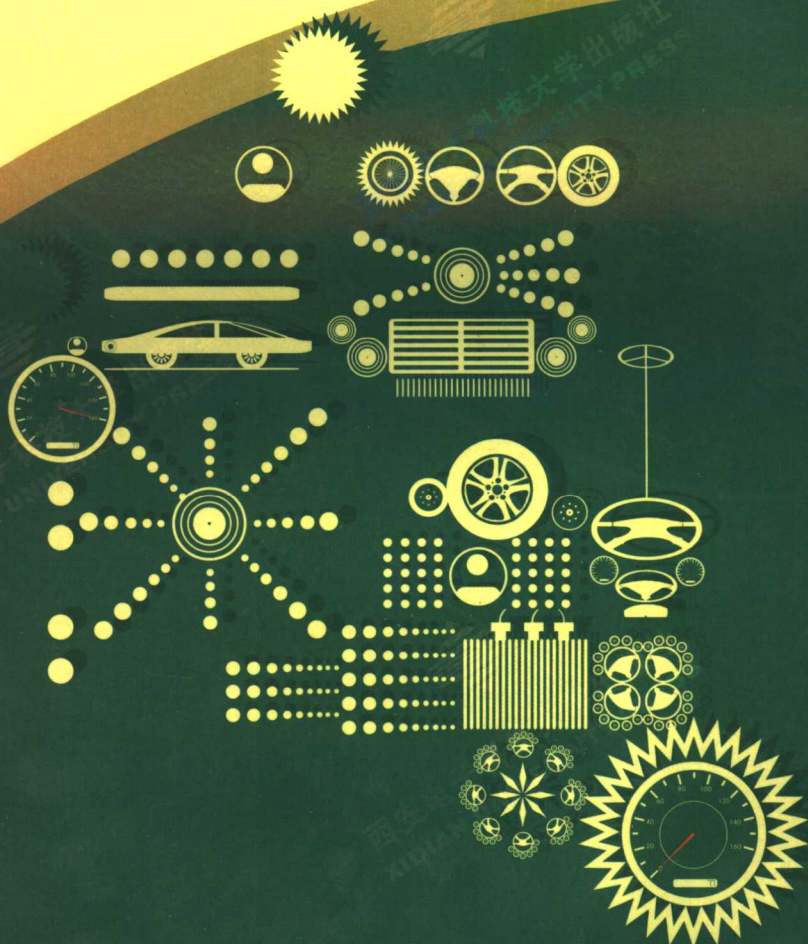
面向
21
世纪

中国高等职业技术教育研究会推荐
机电类专业高职高专规划教材

汽车单片机 与车载网络技术

主编 于万海

主审 张卫钢



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

中国高等职业技术教育研究会推荐

面向 21 世纪机电类专业高职高专规划教材

汽车单片机与车载网络技术

主 编	于万海						
副 主 编	李晓伟	罗新闻					
参 编	李祥峰	吉庆山	梁春兰	赵 飞	刘建华		
	刘卫泽	陶炳全	曾宪钧	李 川	马金刚		
主 审	张卫钢						

西安电子科技大学出版社

2007

内 容 简 介

本书分两个部分介绍了汽车单片机和车载网络技术。第一部分(第1~4章)阐述了汽车单片机的特点、组成和原理,电子控制单元(ECU)的组成和工作原理,典型的汽车单片机和电子控制单元,汽车单片机系统的故障类型、检测诊断及检修实例。第二部分(第5~8章)阐述了车载网络的特点、组成和工作原理,典型的车载网络传输系统实例,车载网络通信系统的故障类型、检测诊断及检修实例。

本书旨在通过对原理和典型车型实例的分析,使读者能够举一反三、触类旁通,切实掌握汽车故障检修的思路、方法和步骤。

本书可作为高职高专院校汽车专业的教材,也可作为汽车维修技术人员、汽车生产和科研人员的参考书。

★本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

汽车单片机与车载网络技术 / 于万海主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.4

中国高等职业技术教育研究会推荐. 面向 21 世纪机电类专业高职高专规划教材

ISBN 978-7-5606-1792-3

I. 汽... II. 于... III. ①汽车—单片微型计算机—高等学校: 技术学校—教材

②汽车—计算机网络—高等学校: 技术学校—教材 IV. U463.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 014585 号

策 划 马晓娟

责任编辑 张 玮 马晓娟

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com>

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2007年4月第1版 2007年4月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 16

字 数 374千字

印 数 1~4000册

定 价 20.00元

ISBN 978-7-5606-1792-3/TK·0006

XDUP 2084001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

序

进入 21 世纪以来,随着高等教育大众化步伐的加快,高等职业教育呈现出快速发展的形势。党和国家高度重视高等职业教育的改革和发展,出台了一系列相关的法律、法规、文件等,规范、推动了高等职业教育健康有序的发展。同时,社会对高等职业教育的认识在不断加强,高等技术应用型人才及其培养的重要性也正在被越来越多的人所认同。目前,高等职业教育在学校数、招生数和毕业生数等方面均占据了高等教育的半壁江山,成为高等教育的重要组成部分,在我国社会主义现代化建设事业中发挥着极其重要的作用。

在高等职业教育大发展的同时,必须重视内涵建设,不断深化教育教学改革。根据市场和社会的需要,不断更新教学内容,编写具有鲜明特色的教材是其必要任务之一。

为配合教育部实施紧缺人才工程,解决当前机电类精品高职高专教材不足的问题,西安电子科技大学出版社与中国高等职业技术教育研究会在前两轮联合策划、组织编写了“计算机、通信电子及机电类专业”系列高职高专教材共 100 余种的基础上,又联合策划、组织编写了“数控、模具及汽车类专业”系列高职高专教材共 60 余种。这些教材的选题是在全国范围内近 30 所高职高专院校中,对教学计划和课程设置进行充分调研的基础上策划产生的。教材的编写采取在教育部精品专业或示范性专业(数控、模具和汽车)的高职高专院校中公开招标的形式,以吸收尽可能多的优秀作者参与投标和编写。在此基础上,召开系列教材专家编委会,评审教材编写大纲,并对中标大纲提出修改、完善意见,确定主编、主审人选。该系列教材着力把握高职高专“重在技术能力培养”的原则,结合目标定位,注重在新颖性、实用性、可读性三个方面能有所突破,体现高职高专教材的特点。第一轮教材共 36 种,已于 2001 年全部出齐,从使用情况看,比较适合高等职业院校的需要,普遍受到各学校的欢迎,一再重印,其中《互联网实用技术与网页制作》在短短两年多的时间里先后重印 6 次,并获教育部 2002 年普通高校优秀教材奖。第二轮教材共 60 余种,在 2004 年已全部出齐,且大都已重印,有的教材出版一年多的时间里已重印 4 次,反映了市场对优秀专业教材的需求。本轮教材预计 2006 年全部出齐,相信也会成为系列精品教材。

教材建设是高职高专院校基本建设的一项重要工作,多年来,各高职高专院校都十分重视教材建设,组织教师参加教材编写,为高职高专教材从无到有,从有到优、到特而辛勤工作。但高职高专教材的建设起步时间不长,还需要做艰苦的工作,我们殷切地希望广大从事高职高专教育的教师,在教书育人的同时,组织起来,共同努力,为不断推出有特色、高质量的高职高专教材作出积极的贡献。

中国高等职业技术教育研究会会长

2005 年 10 月

李宗尧

面向 21 世纪

机电类专业高职高专规划教材

编审专家委员会名单

- 主任:** 刘跃南 (深圳职业技术学院教务长, 教授)
- 副主任:** 方新 (北京联合大学机电学院副院长, 教授)
- 刘建超 (成都航空职业技术学院机械工程系主任, 副教授)
- 杨益明 (南京交通职业技术学院汽车工程系主任, 副教授)

数控及模具组: 组长: 刘建超 (兼) (成员按姓氏笔画排列)

- 王怀明 (北华航天工业学院机械工程系主任, 教授)
- 孙燕华 (无锡职业技术学院机械与汽车工程系主任, 副教授)
- 皮智谋 (湖南工业职业技术学院机械工程系副主任, 副教授)
- 刘守义 (深圳职业技术学院工业中心主任, 副教授)
- 陈少艾 (武汉船舶职业技术学院机电工程系主任, 副教授)
- 陈洪涛 (四川工程职业技术学院机电工程系副主任, 副教授)
- 钟振龙 (湖南铁道职业技术学院机电工程系主任, 副教授)
- 唐健 (重庆工业职业技术学院机械工程系主任, 副教授)
- 戚长政 (广东轻工职业技术学院机电工程系主任, 教授)
- 谢永宏 (深圳职业技术学院机电学院副院长, 副教授)

汽车组: 组长: 杨益明 (兼) (成员按姓氏笔画排列)

- 王世震 (承德石油高等专科学校汽车工程系主任, 教授)
- 王保新 (陕西交通职业技术学院汽车工程系讲师)
- 刘锐 (吉林交通职业技术学院汽车工程系主任, 教授)
- 吴克刚 (长安大学汽车学院教授)
- 李春明 (长春汽车工业高等专科学校汽车工程系副主任, 教授)
- 李祥峰 (邢台职业技术学院汽车维修教研室主任, 副教授)
- 汤定国 (上海交通职业技术学院汽车工程系主任, 高讲)
- 陈文华 (浙江交通职业技术学院汽车系主任, 副教授)
- 徐生明 (四川交通职业技术学院汽车系副主任, 副教授)
- 韩梅 (辽宁交通职业技术学院汽车系主任, 副教授)
- 葛仁礼 (西安汽车科技学院教授)
- 颜培钦 (广东交通职业技术学院汽车机械系主任, 副教授)

项目策划: 马乐惠 **策 划:** 马武装 毛红兵 马晓娟

前 言

随着电子技术在汽车中的应用和发展,特别是在20世纪80年代以后,各种基于提高和改善安全、节能、舒适及环保等性能的电子控制系统在汽车中得到了广泛应用,这些电子控制系统的核心部件是电子控制单元(ECU),而这些电子控制单元的核心是单片机(它负责信号的采集、运算和控制输出)。因此,汽车单片机在汽车电子控制系统中的地位至关重要,是核心中的核心。另外,各个电子控制系统之间并非完全独立、互不相干,它们之间需要不同程度的信息共享,如果采用传统的连接方式,势必导致汽车电线数量的急剧增加,在这种情况下,车载网络技术便应运而生,为提高汽车性能和减少线束数量提供了有效的解决途径。

汽车单片机和车载网络技术日趋广泛的应用,给汽车维修人员提出了更高的技术要求,不了解汽车单片机和网络技术,就不可能全面了解新一代汽车电子控制系统,汽车的使用和维修就会遇到障碍。为了帮助广大汽车维修人员掌握汽车单片机系统和车载网络技术的应用和检修技术,特编写本书。

本书分为汽车单片机系统和车载网络两部分。第1~4章系统地介绍了汽车单片机的特点、组成和工作原理,电子控制单元(ECU)的组成和工作原理,典型的汽车单片机和电子控制单元,汽车单片机系统的故障类型、检测诊断及检修实例;第5~8章详细地阐述了车载网络的特点、组成和工作原理,典型的车载网络传输系统实例,车载网络通信系统的故障类型、检测诊断及检修实例。本书旨在通过原理和典型车型实例的分析,使读者能够举一反三、触类旁通,切实掌握车辆故障检修的思路、方法和步骤。

本书的编写以内容和结构的先进性和实用性为原则,内容翔实、图文并茂、通俗易懂,可作为高职高专院校汽车专业的教材,也可作为汽车维修技术人员、汽车生产和科研人员的参考书。

本书由邢台职业技术学院于万海担任主编,李晓伟、罗新闻担任副主编,参加编写工作的还有邢台职业技术学院的吉庆山、梁春兰、赵飞、刘卫泽、陶炳全、曾宪钧、李祥峰、马金刚、李川和石家庄铁道学院的刘建华等。

本书由张卫钢担任主审。

本书在编写过程中,参考了大量国内外技术资料和文献,得到了许多同行的大力支持,在此谨向所参考资料的作者及关心、支持本书编写的同行们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,竭诚欢迎读者和业内专家批评指正。

作 者

2006年12月

目 录

第 1 章 汽车电子控制系统发展概述	1	2.5 时钟发生器模块 CGM	36
1.1 汽车电子控制技术的发展历程	1	2.5.1 时钟发生器模块的结构	36
1.2 汽车电子控制系统的优越性	2	2.5.2 晶体振荡及外接电路	37
1.3 控制理论基础	2	2.5.3 时钟发生器模块寄存器	38
1.3.1 PID 控制	2	2.5.4 PLL 参数选择	40
1.3.2 最优控制	4	2.5.5 PLL 编程步骤	41
1.3.3 自适应控制	5	2.6 基本输入/输出	42
1.3.4 模糊控制	6	2.6.1 并行 I/O 口概述	42
第 2 章 汽车单片机	9	2.6.2 A 口	42
2.1 单片机概述	9	2.6.3 B 口	43
2.1.1 单片机的含义	9	2.6.4 C 口	44
2.1.2 单片机在汽车电子控制系统中的 应用	9	2.6.5 D 口	44
2.1.3 Motorola 单片机简介	9	2.6.6 E 口	44
2.2 MC68HC908GP32 单片机基本结构	10	2.6.7 I/O 端口寄存器的设置	45
2.2.1 MC68HC908GP32 单片机内部结构 性能概述	10	2.6.8 键盘中断模块 KBI	45
2.2.2 MC68HC908GP32 单片机引脚功能 ...	11	2.7 A/D 转换模块	47
2.2.3 M68HC08 系列单片机的 CPU 结构 ...	13	2.7.1 概述	47
2.2.4 MC68HC908GP32 单片机存储器 组织	14	2.7.2 A/D 转换模块的寄存器	48
2.3 M68HC08 系列单片机指令系统	18	2.7.3 A/D 转换编程步骤	49
2.3.1 单片机指令系统概述	18	2.8 串行异步通信模块	49
2.3.2 M68HC08 系列单片机汇编语言 指令格式	19	2.8.1 概述	49
2.3.3 寻址方式	19	2.8.2 M68HC08 系列微控制器的串行 通信模块	51
2.3.4 指令系统	21	2.8.3 初始化与收/发数据编程的基本 方法	55
2.4 复位、系统初始化设置、中断与低功耗 模式	29	2.9 串行外设接口 SPI	56
2.4.1 复位	29	2.9.1 SPI 基本工作原理	56
2.4.2 系统初始化设置	30	2.9.2 MC68HC908GP32 微控制器的 SPI 模块结构	57
2.4.3 中断	31	2.9.3 SPI 编程基本方法	60
2.4.4 低功耗模式	34	2.10 定时器模块	60
		2.10.1 定时器的结构	61
		2.10.2 定时器模块寄存器	62

2.10.3	计数功能与定时功能	64	5.1.4	车载网络分类和协议标准	105
2.10.4	输入捕捉功能	64	5.2	车载网络基本原理	109
2.10.5	定时器的输出比较功能	66	5.2.1	信息交换	111
2.10.6	脉宽调制 PWM 输出功能	67	5.2.2	功能元件	112
第 3 章	汽车电子控制单元	69	5.2.3	数据传递过程	114
3.1	ECU 的基本结构	69	5.3	网关	117
3.1.1	ECU 的基本功能	69	5.3.1	网关的概念	117
3.1.2	ECU 的基本构成	70	5.3.2	网关的实质	118
3.2	电源电路	71	5.3.3	网关“处理”内容	118
3.3	输入电路	72	5.4	数据传递安全性和故障特点	119
3.3.1	模拟量输入通道	73	5.4.1	内部故障管理	119
3.3.2	数字量输入通道	73	5.4.2	诊断说明	120
3.4	输出电路	74	第 6 章	几种典型车载网络原理	121
3.4.1	模拟量输出通道	74	6.1	概述	121
3.4.2	数字量输出通道	75	6.2	CAN 数据总线	121
3.5	ECU 的可靠性	76	6.2.1	大众、奥迪车 CAN 数据总线简介	123
3.5.1	ECU 的工作环境	76	6.2.2	大众、奥迪车 CAN 的链路	124
3.5.2	ECU 的可靠性设计	77	6.2.3	动力 CAN 数据总线	125
3.5.3	ECU 的抗干扰措施	77	6.2.4	舒适/信息 CAN 数据总线	127
第 4 章	汽车电子控制单元实例及检修	79	6.2.5	CAN 数据总线上的阻抗匹配	130
4.1	发动机电子控制单元实例	79	6.3	LIN 总线	131
4.1.1	玛瑞利单点电脑	79	6.3.1	概述	131
4.1.2	玛瑞利单点电脑主要器件介绍	81	6.3.2	LIN 主控制单元	132
4.1.3	玛瑞利单点电脑的工作原理	84	6.3.3	LIN 从控制单元	132
4.1.4	玛瑞利单点电脑点火控制电路分析	85	6.3.4	数据传递	133
4.1.5	喷油电路分析	86	6.3.5	防盗功能	137
4.1.6	怠速控制电路分析	87	6.3.6	自诊断	137
4.1.7	其他电路	88	6.4	MOST 总线	138
4.2	电子控制单元的检修	90	6.4.1	概述	138
4.2.1	检修工具	90	6.4.2	多媒体的传输速率	139
4.2.2	检修方法	90	6.4.3	控制单元的结构	140
4.2.3	玛瑞利单点电脑主要电路检修	91	6.4.4	光电二极管	141
4.2.4	Motronic 1.5.4 电脑故障检修	92	6.4.5	光导纤维	141
4.2.5	SIEMENS 5WPx 电脑故障检修	95	6.4.6	光纤总线内的信号衰减	144
第 5 章	车载网络技术简介	97	6.4.7	光导纤维的维护	146
5.1	概述	97	6.4.8	MOST 总线的环型结构	146
5.1.1	车载网络的发展史	97	6.4.9	MOST 总线系统状态	147
5.1.2	技术术语	101	6.4.10	MOST 总线的诊断	149
5.1.3	车载网络结构	104	6.5	Bluetooth TM	151

6.5.1 Bluetooth™ 简介	151	7.3.5 别克荣御车载通信网络	182
6.5.2 Bluetooth™ 的由来	151	7.4 东风雪铁龙毕加索轿车 VAN 总线系统	184
6.5.3 Bluetooth™ 的构造	152	7.4.1 VAN 总线	185
6.5.4 Bluetooth™ 的性能	152	7.4.2 智能控制盒(BSI)	186
6.5.5 Bluetooth™ 的数据安全性	152	7.4.3 东风雪铁龙毕加索轿车 VAN 控制功能举例	189
6.5.6 Bluetooth™ 的诊断	153	第 8 章 车载网络传输系统故障与检测	196
6.6 诊断总线	153	8.1 CAN-Bus 总线系统的故障类型	196
6.6.1 诊断总线简介	153	8.1.1 汽车电源系统故障引起的车载网络传输系统故障	196
6.6.2 诊断总线的诊断条件	154	8.1.2 节点故障	197
6.6.3 诊断总线的地址格式扩展	154	8.1.3 链路故障	198
6.6.4 诊断插头的针脚布置	154	8.2 车载网络传输系统的基本诊断步骤和检测方法	198
6.7 奥迪 A8 数据总线网络的控制功能举例	155	8.2.1 基本诊断步骤	198
6.7.1 开关显示照明亮度调节控制	155	8.2.2 双线式车载网络传输系统的检测方法	199
6.7.2 右转向灯闪光控制	156	8.3 车载网络传输系统的波形分析	200
6.7.3 危险警报闪光控制	157	8.3.1 动力 CAN-Bus 的波形分析	200
6.7.4 防盗器闪光(警报)控制	157	8.3.2 舒适 CAN 和信息 CAN	203
6.7.5 高级钥匙开锁控制	158	8.3.3 动力 CAN 的 DSO 故障波形	206
6.7.6 高级钥匙关锁控制	160	8.3.4 舒适 CAN 和信息 CAN 的 DSO 故障波形	210
6.7.7 近光灯控制	161	8.4 终端电阻的检测	217
6.7.8 近光灯(自动)控制	162	8.4.1 终端电阻的检测电路	217
6.7.9 车内灯控制	163	8.4.2 终端电阻的测量步骤	218
第 7 章 几个典型车系的总线传输系统	166	8.4.3 总电阻的测量值	218
7.1 奔驰控制局域网络系统	166	8.4.4 单终端电阻的测量值	218
7.1.1 奔驰控制局域网络简介	166	8.4.5 终端电阻的示值读取	219
7.1.2 控制局域网络的工作过程举例	169	8.5 读取测量数据块	219
7.2 2003 款宝马 745iL E65/E66 底盘网络控制	176	8.5.1 读取测量数据块中的 CAN 通信状态	220
7.2.1 2003 款宝马 745iL E65/E66 底盘网络控制简介	176	8.5.2 读取测量数据块的工作状态	220
7.2.2 车辆网关系统	178	8.5.3 连续“单线”的原因	221
7.2.3 宝马 745iL 控制局域网络的工作流程举例	178	8.5.4 “单线”和“双线”交替变化的原因	221
7.3 通用车系车载网络系统	179	8.5.5 读取测量数据块	221
7.3.1 UART 串行通信网络	179		
7.3.2 Class-2 串行通信网络	180		
7.3.3 LAN 串行通信网络	180		
7.3.4 别克君威 Class-2 串行通信网络	181		

8.6 故障存储	222	8.8.5 2002 款上海波罗(POLO)轿车 故障	230
8.6.1 动力 CAN 故障存储记录	222	8.8.6 奔驰 S320 加油转速故障	231
8.6.2 舒适 CAN 和信息 CAN 故障存储 记录	222	8.8.7 奔驰 W220 轿车驾驶员侧的门控 系统故障	235
8.6.3 故障查询过程	223	8.8.8 2002 款大切诺基无法启动故障	237
8.7 CAN-Bus 的导线维修	224	8.8.9 上海别克 GL 轿车 ABS 报警灯亮 故障	239
8.8 总线传输系统故障实例	224	8.8.10 上海别克 GL 轿车总线控制系统 故障	241
8.8.1 高尔夫动力总线单线故障	224	8.8.11 上海帕萨特 B5 室内灯故障	244
8.8.2 波罗(POLO)轿车不能启动故障	225		
8.8.3 帕萨特 B5 1.8T 舒适总线故障	226		
8.8.4 2001 款大切诺基故障	228		

第 1 章 汽车电子控制系统发展概述

1.1 汽车电子控制技术的发展历程

20 世纪中期，微电子技术发展迅猛，这给汽车工业的发展带来了蓬勃的生机，可以说汽车电子控制技术的发展是由电子技术的发展而带动起来的。

20 世纪 50 年代到 70 年代末主要是发展独立性的零部件，利用电子装置来改善部分机械部件的性能。1948 年晶体管问世；1955 年晶体管收音机开始在汽车上投入使用；1960 年硅二极管整流式交流发电机取代了直流发电机；1963 年晶体管电压调节器和晶体管点火装置开始在汽车上安装使用，逐步实现集成化；1970 年变速器的电子控制装置在汽车上投入使用。

20 世纪 70 年代末到 80 年代中期主要是发展一些独立系统，汽车电子控制技术开始形成，大规模集成电路得到广泛的应用。1973 年美国通用汽车公司采用 IC 点火装置并逐渐普及；1976 年美国克莱斯勒公司首先研制出由模拟计算机对发动机点火时刻进行控制的电子点火系统；1977 年美国通用公司开始采用数字式点火时刻控制系统；1980 年单点喷射式电子控制燃油喷射装置应用在汽车上，之后电喷技术逐渐成熟，并开始大规模使用。

20 世纪 80 年代中期到 90 年代末主要是开发各种车辆整体的电子控制系统，以微处理器为核心的微机控制系统在汽车上开始大规模地使用，其技术逐渐成熟完善，并向智能化发展，进入了汽车电子化的时代。

2000 年以后汽车电子控制系统进入智能化和网络化时代。汽车产品大量采用人工智能技术，并利用网络技术进行信息的传递与交换，汽车技术更加自动化、智能化。

随着汽车电子控制技术的飞速发展，汽车电子设备的成本占汽车总成本的比重约越来越大，其具体应用见表 1-1。

表 1-1 汽车电子控制系统的应用

系统类别	电 子 装 置
动力控制系统	电子点火系统、电子控制燃油喷射系统、废气再循环控制系统、电子控制强制怠速系统、排放控制等
安全与底盘电子系统	自动变速器、防滑差速器、动力转向、四轮转向、制动防抱死、驱动防滑、巡航控制、悬架控制、自动安全带、安全气囊、雷达防撞、倒车报警器、防盗系统等
车身电子系统	电动车窗、电动门锁、电动后视镜、电动天线、自动空调、座位调节系统等
信息与通信系统	电子声音复制、声控操作、音响、车内计算机、车载电话、交通控制信息系统、电子仪表显示、局域网技术等

1.2 汽车电子控制系统的优越性

电子技术在汽车发动机及整车上的广泛应用，使得汽车在各种工况下始终处于最佳的工作状态，各项性能指标都获得了较大改善，例如燃油消耗降低、动力性提高、排气污染减少，并大大提高了汽车工作的可靠性、安全性和乘员舒适性。电子技术可使汽车、道路、环境和乘员之间形成一个完整的系统网络，这是采用任何机械的办法都无法达到的。

电子装置运行极为精确，并且本身不会磨损。若把电子技术应用于汽车控制与监测，利用其自学习功能和一些闭环控制，使生产中、运行中产生的一些误差受到严格控制，这将改善汽车的功能效用，并能延长汽车的维修周期和使用寿命。

电子装置的通用性较好，各种传感器、报警器、计算机系统软件等，比机械部件更容易换装到各种车辆上。

随着电子技术的发展，电子电路集成化程度越来越高，因而电子装置具有体积小、重量轻、故障率低、使用方便等优点。并且随着高新技术的飞速发展，电子产品的价格不断下降，品种越来越多，产量越来越大，因而电子装置在各个领域都得到了广泛应用。

1.3 控制理论基础

1.3.1 PID 控制

PID 控制即比例-积分-微分控制，它是连续系统中技术较成熟、应用最广泛的一种控制方式。PID 控制最大的优点是不需了解被控对象的数学模型，只需根据经验进行调节器参数的在线整定，即可获得满意的结果；它的不足之处是对被控对象参数的变化比较敏感。

1. 微机 PID 控制系统原理

PID 控制可用微机实现，称做数字 PID 调节器。微机 PID 控制系统的原理见图 1-1。

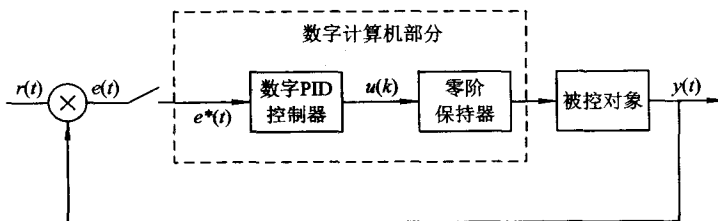


图 1-1 微机 PID 控制系统基本原理

微机 PID 控制系统的基本结构方案由反馈原理组成，其输出 $y(t)$ 被反馈到输入端，输入信号 $r(t)$ 与反馈信号 $y(t)$ 比较后的偏差 $e(t)$ 送到数字 PID 控制器，控制器得到调节控制量 $u(k)$ ，再经过被控对象输出，即根据偏差的变化来调节控制量。另外，计算机只能处理离散的数字量，这样在采集输入信号时就必须通过采样器把传感器提供的模拟量先转换成离

散的数字量，然后经 A/D 转换器转换成二进制数字量，而在输出信号时又必须把离散的数字量转换成执行机构所需要的连续的模拟量。图 1-1 中的零阶保持器实际上就是 D/A 转换器。

2. PID 控制规律及调节作用

PID 控制规律的连续形式表达式为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] + u_0 \quad (1-1)$$

(1) $K_p e(t)$ 为比例控制项，其中 K_p 为比例系数。比例的调节作用就是按比例来控制系统的偏差，系统一旦出现了偏差，比例控制立即产生调节作用以减少偏差。加大比例，可以加快调节、减少误差，但是过大的比例会使系统的稳定性下降，甚至造成系统的不稳定。

(2) $\frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau$ 为积分控制项，其中 T_i 为积分时间常数。积分的调节作用使系统消除稳态误差，提高无差度。当存在误差时，积分调节开始进行，直至误差消失，积分调节停止，积分调节输出为常数。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_i ， T_i 越小，积分作用就越强，反之则积分作用越弱。加入积分调节可使系统稳定性下降，动态响应变慢。积分调节作用常与另两种调节规律结合，组成 PI(比例-积分)调节器或 PID 调节器。

(3) $T_d \frac{d}{dt} e(t)$ 为微分控制项，其中 T_d 为微分时间常数。微分的调节作用反映了系统偏差信号的变化率，具有预见性，能预见偏差变化的趋势，能产生超前的控制作用，在偏差还没有形成之前，已被微分调节作用消除。因此，微分的调节可以改善系统的动态性能。在微分时间选择合适的情况下，可以减少超调量和调节时间。微分作用对噪声干扰有放大作用，因此过强的微分调节对系统抗干扰不利。此外，微分反映的是变化率，而当输入没有变化时，微分作用输出为零。微分调节作用不能单独使用，需要与另外两种调节规律相结合，组成 PD(比例-微分)或 PID 调节器。

(4) u_0 为控制量的基准值，即偏差 $e(t) = 0$ 时的控制量。

另外，如前所述，因计算机控制是采样控制系统，只能由采样时刻的偏差值来计算控制量，故控制规律只能用数值计算的方法逼近，因此式(1-1)的离散化处理的数学表达式为

$$u(t) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} + u_0 \quad (1-2)$$

式中， $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 为本次和上次的采样偏差值； T 为采样周期，如果 T 取得足够小，这种逼近会相当准确。

3. PID 参数控制

在汽车电子系统中，很多被控对象的模型会因负荷的不同和运行时其他因素的变化而发生变化，PID 控制的效果在很大程度上取决于 K_p 、 T_i 、 T_d 等参数的选择，这时可采用变参数 PID 控制以适应变化的工况。常用的变参数 PID 控制有查表法变参数 PID 控制和模糊 PID 控制。

1) 查表法变参数 PID 控制

将适应不同负荷时控制系统的各组 K_p 、 T_i 、 T_d 参数以表格的形式存放在计算机内，工作时对负荷进行采样，根据采样的负荷值，从表格中查得对应的 K_p 、 T_i 、 T_d 等参数进行控制。

2) 模糊 PID 控制

运用模糊理论来设计 PID 控制器，可称之为模糊 PID 控制。其基本思想是：将偏差 e 和偏差变化率 \dot{e} 平面分成不同的区，在不同的区采用不同的 K_p 、 T_i 、 T_d 对系统进行控制。而不同的 K_p 、 T_i 、 T_d 由 e 和 \dot{e} 值从控制表中查得，这个控制表是通过模糊控制理论的操作经验总结得到的。

1.3.2 最优控制

1. 概述

在日常生活中，我们都有这样的经验，无论做什么事都希望以最小的代价获得最大的收获。例如在学习上，我们希望掌握最好的学习方法，以便在最短的时间内取得最好的学习成绩；在工作时，我们更愿意用最轻松愉快的方式来取得最满意的工作效果。这些看似平常的日常现象，其中包含了现代控制理论中的“最优化”思想。将上述这种“最优化”的观点应用于工程实践中，便产生了在社会生活各个方面得到广泛应用的最优控制技术。

最优控制是现代控制理论的一个重要组成部分。一个典型的最优控制问题描述如下：被控系统的状态方程和初始条件给定，同时给定目标函数，然后寻找一个可行的控制方法使系统从输出状态过渡到目标状态，并达到最优的性能指标。

2. 最优控制法的基本原理

设状态方程的规范表达形式为

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + D\xi \\ Y = CX \end{cases} \quad (1-3)$$

式中： A 为系统矩阵； B 为控制矩阵； C 为输出矩阵； D 为扰动矩阵； X 为状态向量； U 为控制向量； Y 为输出向量； ξ 为扰动向量。

评价控制系统性能的二次型目标函数为

$$J_V = \int_0^{\infty} (X^T Q X + U^T R U) dt \quad (1-4)$$

式中： Q 为状态变量的加权矩阵； R 为控制变量的加权矩阵。第一项是要使系统尽快从非零状态转移到零状态，即系统的调整时间要短，超调量要小，但调整时间越短，控制量越大，能量也越大；第二项就是要抑制调节过程中的控制量，使控制量在执行机构允许的范围内并且节能。 Q 、 R 都是加权矩阵，可用随机的方法来决定。 Q 、 R 取不同的值表示对不同的分量加不同的权系数，如果认为某一个分量特别需要约束，则对它所加的权系数较大；如果认为某一个分量无关紧要，可以不加约束，则对它所加的权系数为零。由于对控制向量 U 的每一个分量都需约束，因此矩阵 R 为正定对称矩阵。对状态向量 X ，则不一定

每个分量都需加以约束，故矩阵 Q 可取为半正定对称矩阵。实践证明，正确选取加权矩阵的值十分重要，不同的加权矩阵得到不同的系统性能。

最优控制算法实质上是在约束条件下求解极值的问题。

应用极值原理，求解最优控制问题，使 J_V 为最小，可得到著名的 Riccati 方程：

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (1-5)$$

由此可求出矩阵 P ，继而求出反馈控制矩阵 K 为

$$K = R^{-1}B^T P$$

这样可解出控制向量 U 为

$$U = -KX$$

1.3.3 自适应控制

在日常生活中，所谓自适应是指生物能改变自己的习性以适应新环境的一种特征。因此，自适应控制器是这样一种控制器，它能不断地修正自己的特性以适应对象和扰动的动态特性的变化。

自适应控制的研究对象是具有一定程度不确定性的系统，这里所谓的“不确定性”是指描述被控对象及其环境的数学模型不是完全确定的，其中包含一些未知因素和随机因素。任何一个实际系统都具有不同程度的不确定性，这些不确定性有时表现在系统内部，有时表现在系统外部。从系统内部来讲，描述被控对象的数学模型的结构和参数，设计者事先并不一定能准确知道；从系统外部来讲，外部环境对系统的影响可以等效地用许多扰动来表示，而这些扰动通常是不可预测的。此外，还有一些测量时产生的不确定因素进入系统。面对这些客观存在的各式各样的不确定性，如何设计适当的控制系统，使得某一指定的性能指标达到并保持最优或者近似最优，这就是自适应控制所要研究并解决的问题。

自适应控制也是一种基于数学模型的控制方法，它和常规的反馈控制和最优控制不同的只是自适应控制所依据的关于模型和扰动的先验知识比较少，需要在系统的运行过程中去不断提取有关模型的信息，使模型逐步完善。具体地说，就是依据系统的输入/输出数据，不断地优化模型参数，随着控制过程的不断进行，模型会越来越准确，越来越接近于实际，这种模型的控制作用也将随之不断地改进。也就是说，控制系统具有一定的适应能力。例如，当系统在设计阶段，由于对象特性的初始信息比较缺乏，系统在刚开始投入运行时可能性能不理想，但是只要经过一段时间的运行，控制系统逐渐适应，最终将自身调整到一个满意的工作状态。

常规的反馈控制系统对于系统内部特性的变化和外部扰动的影响都具有一定的抑制能力，但是由于控制器参数是固定的，当系统内部特性的变化或者外部扰动的变化幅度很大时，系统的性能常常会大幅度下降，甚至不稳定。因此对那些对象特性或扰动特性变化范围很大、同时又要求经常保持高性能指标的系统，采取自适应控制是合适的。同时也应当指出，自适应控制比常规反馈控制要复杂得多，成本也高得多，因此只是当用常规反馈控制达不到所期望的性能时，才会考虑采用自适应控制。

1.3.4 模糊控制

1. 模糊现象

人们在日常生活中碰到的大量事物都具有模糊性，如“大与小”、“高与矮”、“胖与瘦”等，很难在它们之间划分出一条截然分明的界限，这类现象称为模糊现象。研究这一类模糊现象的数学称为模糊数学。

2. 模糊控制的特点

模糊控制实质上是一种非线性控制，从属于智能控制的范畴。模糊控制的基本思想是模仿人工控制活动中人脑的模糊概念和成功的控制策略，运用模糊数学将人工控制策略用计算机来实现。模糊控制不依赖于系统的精确数学模型，因而对系统参数的变化不敏感。另外，它的控制算法是基于若干条控制规则，算法非常简捷，适合于像汽车这一类快动态系统。模糊控制具有如下一些突出特点：

(1) 模糊控制是一种基于规则的控制。它直接采用语言型控制规则，出发点是现场操作人员的控制经验或相关专家的知识，在设计中不需要建立被控对象的精确数学模型，因而使得控制机理和策略易于接受与理解，设计简单，便于应用。

(2) 由工业过程的定性认识出发，比较容易建立语言控制规则，因而模糊控制对那些数学模型难以获取、动态特性不易掌握或变化非常显著的对象非常适用。

(3) 基于模型的控制算法及系统设计方法，由于出发点和性能指标的不同，容易导致较大的差异；但一个系统的语言控制规则却具有相对的独立性，利用这些控制规则间的模糊连接，容易找到折中的选择，使控制效果优于常规控制器。

(4) 模糊控制算法是基于启发性的知识及语言决策规则而设计的，这有利于模拟人工控制的过程和方法，增强控制系统的适应能力，使之具有一定的智能水平。

3. 模糊控制的工作原理

模糊控制系统的框图如图 1-2 所示。

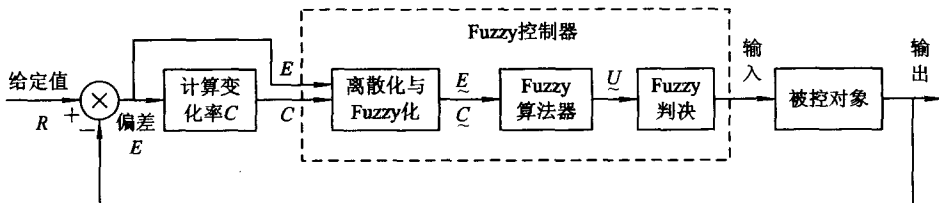


图 1-2 模糊控制系统框图

模糊控制的基本方法如下。

1) 将精确的量模糊化

此处的精确量是指模糊控制器的输入量和控制量的基本论域(研究某一具体问题总是把议题限制在某一范围内，称为论域)。常用的论域是系统的偏差 e 、偏差变化率 \dot{e} 和控制量 u 。

精确量模糊化的规则是一样的，现以偏差 e 为例。设偏差 e 的基本论域为 $[-x, x]$ ，偏差 e 所取的模糊集论域为 $[-n, -n+1, \dots, 0, \dots, n-1, n]$ ，即可得到精确量模糊化的

量化因子 $K_p = n/x$ 。实际一般做法是将 n 值设定为 6，若偏差 e 的变化不在 $[-6, +6]$ 内，而在 $[a, b]$ 内，则可通过变换公式 $y = 12[x - (a+b)/2]/(b-a)$ ，把 $[a, b]$ 间变化的变量 x 转化为在 $[-6, +6]$ 之间变化的变量 y 。

2) 将模糊量分解成模糊子集

精确量模糊化后的模糊变量继续划分成几个不同的模糊子集。模糊子集的划分方法有一定的主观性，一般根据经验来定，但习惯上多分成 8 个子集，即相应地为

正大(PL)，正中(PM)，正小(PS)，正零(PO)

负零(NO)，负小(NS)，负中(NM)，负大(NL)

模糊子集划分完成以后，模糊隶属函数也就构成了，模糊隶属函数将 0~1 之间的变数值分配给每一个模糊子集，如表 1-2 所示。

表 1-2 精确量离散化所得模糊子集的隶属函数

隶属度 变量挡 \ 元素	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
负大(NL)	1.0	0.8	0.7	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
负中(NM)	0.2	0.7	1.0	0.7	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0
负小(NS)	0	0.1	0.3	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0
负零(NO)	0	0	0	0	0.1	0.6	1.0	0	0	0	0	0	0
正零(PO)	0	0	0	0	0	0	1.0	0.6	0.1	0	0	0	0
正小(PS)	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.3	0.1	0
正中(PM)	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.3
正大(PL)	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.7	0.8	1.0

3) 构造模糊控制规则集

设 \underline{E} 、 \underline{C} 、 \underline{U} 分别表示偏差 e 、偏差变化率 \dot{e} 和控制量 u 的模糊量，那么典型的模糊控制规则集如表 1-3 所示。

表 1-3 典型控制规则集

\underline{C} \ \underline{E}	NL	NM	NS	NO	PO	PS	PM	PL
NL	×	×	PL	PL	PL	PL	NM	NL
NM	PL	PL	PS	PM	PM	PM	NM	NL
NS	PL	PM	PS	PS	PS	PS	NM	NL
0	PL	PM	PS	0	0	NS	NM	NL
PS	PL	PM	NS	NS	NS	NS	NM	NL
PM	PL	PM	NM	NM	NS	NS	NL	NL
PL	PL	PM	NL	NL	NL	NL	×	×

注：表中“×”表示不可能出现的情况。

控制规则集是实践经验的总结，它由若干模糊条件语句组成，若 $\underline{E} = \text{NL}$ ，则不论 \underline{C} 为何值，都应使 e 迅速下降，故取 $\underline{U} = \text{PL}$ ；若 $\underline{E} = \text{NO}$ ， $\underline{C} = \text{PS}$ ，则取 $\underline{U} = \text{NS}$ 以消除偏差……。