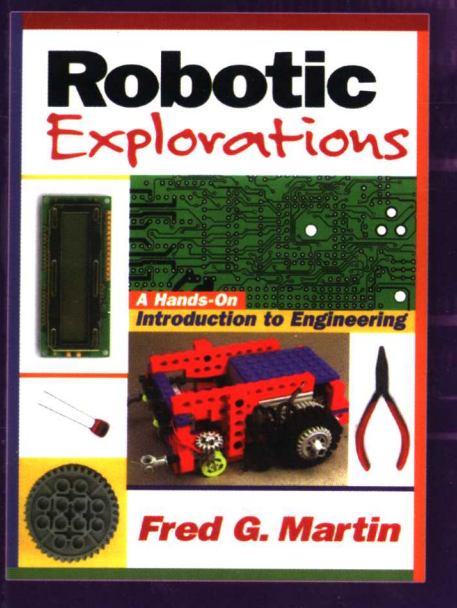


机器人探索

——工程实践指南

Robotic Explorations

A Hands-on Introduction to Engineering



[美] Fred G. Martin 著

刘 荣 等译

宗光华 审校

国外计算机科学教材系列

机器人探索 ——工程实践指南

Robotic Explorations
A Hands-on Introduction to Engineering

[美] Fred G. Martin 著

刘 荣 等译
宗光华 审校

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书是以MIT的机器人设计课程为基础编写而成的,内容基本上涵盖了机器人技术的相关知识,包括机械系统构建、控制系统硬件配置、控制算法软件编制等。与其他机器人书籍不同的是,本书更注重机器人的实用技术,通过讲授比赛型机器人的制作和控制,使读者了解有关机器人的知识。更为重要的是,通过这种学习方式,可以更好地激发读者的创造性思维,提高他们工程设计及解决工程问题的能力。书中附有大量的练习和图片,可以帮助读者更好地理解 and 掌握所学内容。

本书适合有一定机电技术基础的读者使用。可以作为高校的高年级本科生以及低年级研究生机器人实践课的教材。广大的机电技术爱好者也可以以此书为指导,搭建自己的机器人。

Simplified Chinese edition Copyright © 2004 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Robotic Explorations: A Hands-on Introduction to Engineering, ISBN: 0130895687 by Fred G. Martin. Copyright © 2001. All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和Pearson Education培生教育出版亚洲有限公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有Pearson Education培生教育出版集团激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2003-3502

图书在版编目(CIP)数据

机器人探索——工程实践指南/(美)马丁(Martin, F. G.)著;刘荣等译.-北京:电子工业出版社,2004.8
(国外计算机科学教材系列)

书名原文:Robotic Explorations: A Hands-on Introduction to Engineering

ISBN 7-5053-9911-X

I. 机... II. ①马... ②刘... III. 机器人技术-教材 IV. TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第082787号

责任编辑:杜闽燕

印 刷:北京智力达印刷有限公司

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:26.5 字数:729千字

印 次:2004年8月第1次印刷

定 价:39.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

出版说明

21世纪初的5至10年是我国国民经济和社会发展的关键时期,也是信息产业快速发展的关键时期。在我国加入WTO后的今天,培养一支适应国际化竞争的一流IT人才队伍是我国高等教育的重要任务之一。信息科学和技术方面人才的优劣与多寡,是我国面对国际竞争时成败的关键因素。

当前,正值我国高等教育特别是信息科学领域的教育调整、变革的重大时期,为使我国教育体制与国际化接轨,有条件的高等院校正在为某些信息学科和技术课程使用国外优秀教材和优秀原版教材,以使我国在计算机教学上尽快赶上国际先进水平。

电子工业出版社秉承多年来引进国外优秀图书的经验,翻译出版了“国外计算机科学教材系列”丛书,这套教材覆盖学科范围广、领域宽、层次多,既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。这些教材涉及的学科方向包括网络与通信、操作系统、计算机组织与结构、算法与数据结构、数据库与信息处理、编程语言、图形图像与多媒体、软件工程等。同时,我们也适当引进了一些优秀英文原版教材,本着翻译版本和英文原版并重的原则,对重点图书既提供英文原版又提供相应的翻译版本。

在图书选题上,我们大都选择国外著名出版公司出版的高校教材,如Pearson Education 培生教育出版集团、麦格劳-希尔教育出版集团、麻省理工学院出版社、剑桥大学出版社等。撰写教材的许多作者都是蜚声世界的教授、学者,如道格拉斯·科默(Douglas E. Comer)、威廉·斯托林斯(William Stallings)、哈维·戴特尔(Harvey M. Deitel)、尤利斯·布莱克(Uyless Black)等。

为确保教材的选题质量和翻译质量,我们约请了清华大学、北京大学、北京航空航天大学、复旦大学、上海交通大学、南京大学、浙江大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、西安交通大学、国防科学技术大学、解放军理工大学等著名高校的教授和骨干教师参与了本系列教材的选题、翻译和审校工作。他们中既有讲授同类教材的骨干教师、博士,也有积累了几十年教学经验的老教授和博士生导师。

在该系列教材的选题、翻译和编辑加工过程中,为提高教材质量,我们做了大量细致的工作,包括对所选教材进行全面论证;选择编辑时力求达到专业对口;对排版、印制质量进行严格把关。对于英文教材中出现的错误,我们通过作者联络和网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订。

此外,我们还将与国外著名出版公司合作,提供一些教材的教学支持资料,希望能为授课老师提供帮助。今后,我们将继续加强与各高校教师的密切联系,为广大师生引进更多的国外优秀教材和参考书,为我国计算机科学教学体系与国际教学体系的接轨做出努力。

电子工业出版社

教材出版委员会

- | | | |
|-----|-----|---|
| 主 任 | 杨芙清 | 北京大学教授
中国科学院院士
北京大学信息与工程学部主任
北京大学软件工程研究所所长 |
| 委 员 | 王 珊 | 中国人民大学信息学院院长、教授 |
| | 胡道元 | 清华大学计算机科学与技术系教授
国际信息处理联合会通信系统中国代表 |
| | 钟玉琢 | 清华大学计算机科学与技术系教授
中国计算机学会多媒体专业委员会主任 |
| | 谢希仁 | 中国人民解放军理工大学教授
全军网络技术研究中心主任、博士生导师 |
| | 尤晋元 | 上海交通大学计算机科学与工程系教授
上海分布计算技术中心主任 |
| | 施伯乐 | 上海国际数据库研究中心主任、复旦大学教授
中国计算机学会常务理事、上海市计算机学会理事长 |
| | 邹 鹏 | 国防科学技术大学计算机学院教授、博士生导师
教育部计算机基础课程教学指导委员会副主任委员 |
| | 张昆藏 | 青岛大学信息工程学院教授 |

译者序

机器人是20世纪人类最伟大的成就之一。随着机器人技术的迅速发展和广泛应用,国内越来越多的人对它产生了兴趣,特别是很多青少年也积极投身到各类机器人的实践活动中。中央电视台从2002年开始举办全国大学生机器人大赛以来,更是在大学生以及相当多的中学生中掀起了一股机器人热潮。但这也对机器人技术的知识普及和教育提出了更高的要求。目前,国内有关机器人技术方面的书籍包含的理论知识较多,适合于专业人士阅读,而面向普通爱好者的实践应用型的书籍却很少。

本书以MIT的“机器人设计”课程为基础编写而成。作为世界上最富盛名的理工科大学,MIT在培养学生的实践能力和创新精神方面有着独特的方法。本书作者Fred G. Martin早年曾是MIT人工智能研究小组中的学生成员。在研究中他发现,机器人是学习和实践各种控制理论的理想载体,于是他和几位同事一同在MIT创立了“机器人设计”课程。书中介绍的Handy Board控制卡和Interactive C编程语言就是作者及同事为这门课程亲手开发而成的。这门课的教学方法比较独特,它以机器人比赛的形式贯穿起机器人的知识学习、机电制作和程序编写,通过“寓教于赛”达到“寓学于乐”的目的。目前,类似的课程形式已在全美和其他许多国家的大学及中学机器人教育中普及。

本书内容基本上涵盖了机器人技术的相关知识,包括机械系统构建、控制系统硬件配置、控制算法软件编制等。与其他机器人教科书不同的是,本书没有抽象的理论知识讲述,而是更注重机器人的实用技术,通过讲授比赛型机器人的制作和控制,使读者掌握有关机器人的知识。在机械系统方面,介绍了电机、减速齿轮、常用机构,以及它们之间的装配关系;在控制硬件方面,讲解了控制芯片和接口的原理及编程方法,以及各种传感器的工作原理及使用方法;控制软件方面,除了介绍各种控制方法外,还列举了大量实用化的控制程序。书中附有大量的练习和图片,可以帮助读者更好地理解所学内容。本书还涉及许多机器人比赛设计和参赛技巧等方面的内容。

本书适合有一定机电技术基础的读者使用。既可作为大学高年级本科生或低年级研究生机器人实践课的教材,也可作为中学生制作机器人、参加机器人比赛的指导书。广大的机电技术爱好者也可以以此书作为参考,搭建自己的机器人。

参加本书翻译工作的有刘荣(第1章、第2章、第6章)、李锡江(第3章)、石龙(第4章)、余志伟(第5章)、王宁(附录A)、张厚祥(附录B)、孙明磊(附录C)、衡进(附录D)、吴跃民(附录E)、于占泉(附录F)和于燕波(附录G)。全书由刘荣负责统稿和整理,北京航空航天大学的宗光华教授参与了本书翻译工作的指导和审校。

鉴于译者水平有限,难免有错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

致 谢

本书内容是以麻省理工学院 (MIT) 的“机器人设计”课程为基础编写而成的。该课程最早由 Mike Parker 开设,但最初两年的课程教学只是软件方面的编程比赛。在 Mike 的不懈努力下,从第三年起他邀请了 Randy Sargent 和我来进行硬件方面的开发和教学工作。

Randy 和我一起为学生们开发了一系列的控制卡和软件。之后, Pankaj Oberoi 又加入到这项工作中,他对教学工作倾注了大量的精力,并表现出很强的组织才能。

在从事上述工作期间,我还是 MIT 媒体实验室里由 Seymour Papert 领导的研究小组中的一名研究生。Seymour 给予我大量的帮助和教导,包括他有关学习的一些具有启发性和争议性的思想、他所提出的将计算融合于教学游戏的特殊观点,以及他尽善尽美的工作方式。

后来在我攻读博士学位期间,我又有幸与另外两位杰出人士一起工作。Edith Ackermann 是我的博士导师,正如在我的博士论文中所说的那样,她是一位能在我看来只是一堆有趣的事情中发现问题并找出其中内在联系的学者。Don Schön 是我的研究工作伙伴,他投入了大量的时间同我一起讨论工作,他提出的“设计实际上是设计人员在某一条件下与各种材料的对话”这一见解至今仍然影响着我。

作为 MIT 媒体实验室的赞助者,LEGO 公司一直支持我的工作,他们直接参与了“机器人设计”这个课程项目,并在其他方面做了大量工作。这里,我想首先感谢 LEGO 的工程师 Allan Toft,他在 1987 年驻 MIT 期间与我一起研制了我们的第一个“可编程块”。

我刚认识 Steve Ocko 的时候他还是 MIT 的一名研究人员,之后他加入 LEGO 公司工作了很多年。Steve 爱玩的性格和他孩子般的创造力给了我许多启发。也许我还没有意识到,正是他教会了我如何运用 LEGO 的技术来进行设计。

作为 LEGO 在美国 Dacta 地区教育支部的主管,Robert Rasmussen 是我多年的密友和工作支持者。在他的小组中,我还要感谢 Cathy Fett 和 Allen Demers, Cathy 帮助我校对了本书的原稿,而 Allen 完成了大量书中有关 HandyBug 机器人的设计工作。

本书的出版还得到了其他很多人的关心和支持。首先是 Tim Cox,当时他是 Benjamin-Cummings 出版社的材料收集编辑。在看到我的“机器人设计”课程讲稿后, Tim 就认为这些介绍机器人的材料如果出版将会相当受欢迎。非常感谢 Tim 对我的信任和他提出的想法。

在最初酝酿本书出版时, Benjamin-Cummings 出版社正处于被 Addison-Wesley 出版社收购的过程中。其后不久, Addison-Wesley 就变成了 Addison Wesley Longman 出版社。在那段动荡的时间里, Paul Becker 一直负责本书的出版管理。

最后 Prentice Hall 出版社又收购了 AWL 中的一些部门, Tom Robbins 和 Barbara Till 就接手了本书出版的管理工作。Tom 在看到本书已基本完稿后就启动了实质出版工作,这也促使我尽快完成了书稿。Barbara 帮我完成了本书最后的编辑和校稿。在此感谢 Tom 和 Barbara 两位辛勤的工作。

我还要感谢由本书编辑组织的审阅人员。这里要特别感谢 Maja Mataric, 她不仅提出了许多有价值的观点和意见,还帮助撰写了书中的附加说明;另外还要感谢 Rich Drushel, 他为本书机器人竞赛部分的内容做了大量工作。

最后,我要感谢我的妻子 Wanda,正是她的支持和鼓励使我能在本书出版的繁杂工作中一直保持乐观的精神。

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	反馈控制、控制论及机器人学	1
1.2	玩具的启示	3
1.2.1	LEGO/Logo	8
1.2.2	可编程砖块	8
1.2.3	“机器人设计”比赛课程	9
1.3	本书相关技术	10
1.3.1	Handy Board 控制卡	10
1.3.2	交互式 C 语言	12
1.3.3	“LEGO Technic”	13
1.4	本书结构及概要	15
第 2 章	第一台机器人	17
2.1	交互式 C 语言及 Handy Board 控制卡	17
2.1.1	交互式 C 语言指令	18
2.1.2	电机	18
2.1.3	传感器	20
2.1.4	文件及函数	21
2.1.5	主函数	22
2.2	“HandyBug” 机器人	24
2.2.1	“HandyBug 9645” 机器人	24
2.2.2	“HandyBug 9719” 机器人	40
2.3	第一段控制程序	56
2.3.1	接插电机与传感器	56
2.3.2	避障	57
2.3.3	避障练习	58
2.3.4	乌龟运动	58
2.3.5	乌龟运动练习	60
2.4	Braitenberg 车	60
2.4.1	单电机与单传感器车	60
2.4.2	双电机与双传感器车	61
2.4.3	多传感器车	63
2.4.4	光敏传感器	64
2.4.5	编程 Braitenberg 车	64
2.5	光线及接触敏感性	69
2.5.1	光敏及接触传感器练习	70
2.6	随机性	70
2.6.1	随机运动练习	72

2.7	突发情况与后感知	72
2.7.1	突发情况	73
2.7.2	后感知	73
2.7.3	意外处理与后感知练习	77
2.8	小结	77
第3章	传感器	78
3.1	传感器接口	78
3.1.1	数字输入	79
3.1.2	模拟输入	80
3.1.3	欧姆定律	81
3.1.4	欧姆定律练习	83
3.2	传感器的制作	83
3.2.1	插头连线	83
3.2.2	传感器安装	86
3.3	开关量传感器	86
3.3.1	开关量传感器制作	87
3.3.2	开关量传感器应用举例	89
3.4	光敏传感器电路	90
3.4.1	单光电管电路	90
3.4.2	差分光电管传感器	93
3.4.3	偏振光搜寻	97
3.5	电阻式位置传感器	98
3.5.1	弯曲传感器	98
3.5.2	电位计	98
3.6	反射式光电传感器	101
3.6.1	应用	102
3.6.2	接口	103
3.6.3	传感器制作	104
3.6.4	环境光校正	107
3.6.5	练习及项目	108
3.7	对射式传感器	109
3.7.1	接口	111
3.7.2	制作对射式传感器	111
3.7.3	物体探测	112
3.7.4	对射式传感器练习	112
3.8	旋转编码器	112
3.8.1	编码器计数	113
3.8.2	驱动软件	115
3.8.3	速度测量	117
第4章	电机、齿轮和运动机构	119
4.1	直流电机	119
4.1.1	练习	120
4.2	齿轮传动	123

4.2.1	齿轮啮合	125
4.2.2	练习	125
4.3	电子控制	126
4.3.1	H 桥式电机驱动电路	126
4.3.2	使能控制和方向逻辑	127
4.3.3	主动制动	128
4.3.4	速度控制	128
4.3.5	Handy Board 卡控制电路	130
4.3.6	练习	131
4.4	伺服电机	132
4.4.1	伺服控制信号	133
4.4.2	产生控制波形	135
4.4.3	连续旋转	136
4.4.4	练习	136
4.5	LEGO 设计	137
4.5.1	结构	137
4.5.2	传动装置	140
4.5.3	机构	147
4.5.4	练习	152
第 5 章	控制技术	153
5.1	简单反馈控制	153
5.1.1	墙面跟踪	154
5.1.2	平滑转弯控制算法	157
5.1.3	练习	159
5.2	比例微分控制	160
5.2.1	比例控制	161
5.2.2	微分项	166
5.2.3	练习	167
5.3	顺序控制	168
5.3.1	“Robo-Pong” 比赛	168
5.3.2	顺序控制策略	171
5.3.3	练习: Groucho 控制程序	175
5.3.4	控制出口条件	176
5.3.5	练习: 具有时间错误检测功能的 Groucho 程序	182
5.4	响应控制	182
5.4.1	带优先级的控制程序	183
5.4.2	优先级处理算法的工作原理	190
5.4.3	响应控制应用	194
5.4.4	练习: 响应控制	195
5.5	小结	197
第 6 章	高级传感技术	199
6.1	相差式旋转编码器	199
6.1.1	构造说明	200

6.1.2	驱动程序	202
6.1.3	驱动程序使用方法	207
6.1.4	相差式编码器练习	207
6.2	红外传感技术	208
6.2.1	信号调制与解调	208
6.2.2	接近觉传感器	212
6.2.3	接近觉传感器的用法	212
6.2.4	IR LED 练习	214
6.2.5	高级红外接近觉传感技术	214
6.2.6	红外通信技术	225
6.3	Polaroid 6500 型超声测距传感器	244
6.3.1	接线方法	247
6.3.2	基本驱动程序	248
6.3.3	具有空白关闭功能的驱动程序	250
6.3.4	测试程序	251
6.3.5	测量时间与实际距离的换算	251
6.3.6	声呐传感器练习	251
6.4	Sharp GP2D02 型光电测距传感器	252
6.4.1	接线方法	254
6.4.2	接线注意事项	254
6.4.3	传感器通信时序	255
6.4.4	驱动程序	255
6.4.5	光电传感器测距练习	258
6.5	传感器数据处理	258
6.5.1	机器人寻线跟踪	258
6.5.2	固定阈值	259
6.5.3	参数化阈值	260
6.5.4	阈值滞后	260
6.5.5	示教标定	261
6.5.6	永久标定	263
6.5.7	传感器历史记录	263
附录 A	Handy Board 控制卡系统说明	279
附录 B	机器人组装技术	343
附录 C	串行通信与数据采集	350
附录 D	Handy Board 控制卡性能指标	357
附录 E	交互式 C 语言参考	367
附录 F	机器人比赛	395
附录 G	相关信息	411
参考文献		413

第1章 绪 论

欢迎阅读本书。表面上看,这是一本关于移动机器人系统实践、技术与理论的普通教材,但实际上本书与其他大多数课本不同,它是通过讲述机器人的制作过程来阐明其中的原理和知识的。在这个过程中,读者不仅能学到有关机器人的知识,还将学到一些其他技术学科的知识,如电子学、机械学和计算科学方面的知识。更重要的是,通过自己开动脑筋参与到制作活动中,读者还能学到如何进行工程设计以及解决工程实际问题的实践经验。

本书后面的章节将会涉及到有关电路焊接、电机、齿轮以及控制芯片等方面的大量知识,但在此之前,本章首先要简要地回顾一下关于反馈控制的一些思想,因为反馈控制是机器人技术的核心。

然后将介绍一个看上去与机器人无任何联系的故事——我的玩具收藏。所介绍的这些玩具对本人有非常重要的意义,因为它们伴我从小成长,但它们又不是普通的玩具,而是与本书所讲述的内容有关。介绍这些玩具是为了帮助年轻读者更好地掌握有关过程处理、编程以及控制算法等技术上的关键思想。

在我的“玩具故事”后面将展开对某些更高级玩具的讨论,它们包括自20世纪60年代以来在麻省理工学院(MIT)设计的玩具。与我童年的玩具一样,这些MIT玩具的设计目的也是用来帮助儿童学习。

本书也采纳了上述思想,即用某种高级玩具(不妨称之为教育技术)来辅助教学。这种经过特殊设计的玩具可以激发学生的思维,并教会他们如何面对工程挑战。换言之,本书将利用这种高级玩具来辅助制作移动机器人,从而使读者腾出时间从事真正的研究工作,去思考和处理机器人设计的技术问题。

因此,本书既是一本技术参考书,也是一本项目指导书,同时还是一本有关基本原理和理论的书籍。通过本书的学习,不仅要学到机器人的设计和制作,更重要的是学会怎样进行工程设计和工程发明,因为即便所有的零件都放在那里,也要通过你自己的创意才能将它们组装起来。

1.1 反馈控制、控制论及机器人学

机器人系统实际上就是一种能检测自身状态并根据这些状态采取行动的设备,但这种反馈控制思想却有一段漫长而有趣的历史。在Otto Mayr的“The Origins of Feedback Control”一书中,作者详细论述了从古代到现在世界上反馈理论在工程系统中的应用[May70]。

反馈控制的思想最早形成于古希腊,并被用在当时的计时仪器中,但后来它却逐渐被人遗忘,直到欧洲文艺复兴时才被重新找回。下面将简要介绍反馈思想从古至今的发展进程。

最早采用反馈控制的发明之一是水钟。为了产生恒定的水流,水钟里采用了一种浮阀来调节水箱中的水量。恒定的水量会在水箱中一个精密的导流孔上施加恒定的压力,因而产生均匀的水流。水钟再用其他装置测量从导流孔流出的水量,然后把水流量换算为经过的时间。

浮阀的工作原理是通过检测水箱中的水位来控制流入水箱的水量,当水面低于设定水位时,阀就打开使水流入水箱。事实上,这种早期水钟采用的机构与现代家庭中抽水马桶里的水位调节机构基本相同,然而这种机构在当时却是一种少有的创新。

浮阀在当时可能是第一款自调节装置,也就是一种能感知所要调节的物理量,进而采取措施控制这一物理量的机构。如果当时没有浮阀,就不可能产生恒定的水流,水钟也就不能保持精确,为其他活动提供准确计时了。

上述蕴藏着反馈概念的水钟早在大约公元1200年就由阿拉伯人创造出来,但它一直没有传入欧洲。然而,正是西方的发明家们在几百年后才又重新找回反馈控制的思想。

近代欧洲研制的第一个反馈控制系统是17世纪初期Cornelis Drebbel发明的调温炉。Drebbel是一位多产发明家,他的其他发明包括望远镜、显微镜以及潜艇。Drebbel研制调温炉的目的纯粹是为了辅助他的化学试验(试验中要用到烟火材料和猩红染料)。后来Drebbel的女婿,内科医生Johan Sibertus Kuffler曾经尝试过将他的调温炉商业化,但最后以失败告终。

Drebbel调温炉的工作原理与浮阀水位调节器相似。在炉内有一个单独的腔室,腔室中装有一定量的水银;当炉内温度升高而使水银膨胀时,腔室中的水银面将上升,并带动一个节气阀关闭以减小流入炉内的空气量,从而降低炉内燃烧热量的产生。

虽然Drebbel的成果没有得到广泛应用,但其他人却将他的发明记载下来,并传给了其他的工程人员。18世纪中叶,物理学者Réaumur为了孵化小鸡重新启用了调温炉。有趣的是,在以后的50多年里,大多数关于调温方面的研究都与小鸡孵化有关。

调温设备研究的突破来自于18世纪后期法国工程师Bonnemain的成果。Bonnemain通过检测炉内的温度,随后再控制对炉子的加热量,从而大大改进了调温机构。法国、英国和德国的权威杂志都相继介绍了Bonnemain的调温机构,从而使他的成果得到广泛认知。Bonnemain在巴黎郊外建了一个养鸡场,使用的就是他发明的新孵化器,他为皇家宫廷培育了大量的食用鸡(直到法国革命爆发,之后对禽类产品的需求大幅度减少)。Bonnemain的调温式孵化器可以说是第一台工业化的同类设备,而不只是在实验室中使用。

孵化器之后,反馈控制还应用到风车和锅炉上。在风车上,风扇的尾翼能始终将主风轮对准风的来向,从而保持旋转磨石对谷粒的压力;蒸汽锅炉上,反馈系统起到调节炉内蒸汽气压的作用。但是,反馈控制在工程效果和公众认知方面取得真正突破还应该算是蒸汽机车上的调速器。

在伦敦的Boulton & Watt蒸汽机厂里,总工程师James Watt采用了一种风车上曾经用过的离心机构来控制他们生产的蒸汽引擎的输出转速。Watt称这种机构为“节速器”,它通过检测蒸汽引擎的实际速度来节流调整引擎上的蒸汽流入阀。如果蒸汽引擎的速度慢下来,就让更多的蒸汽流入,相反如果速度太快就要减少蒸汽的流入量。图1.1展示了Watt发明的机构原理。

当时,Watt认为这种机构只是某种已知原理的一种新应用,并不认为它是一项新的发明。Watt曾经写道:节速器的原理以前已经应用于水车或风车的调节机构上。

到了19世纪初期,Watt的节速器已经名声远扬,并成为当时工程教科书的讲解范例。Watt节速器的反馈思想和特殊机构使它被公认为是工业革命的动力源泉,它甚至被推崇为人类驾驭技术力量的象征。

虽然前面所述的反馈控制思想在今天看来都是属于自动控制技术的范畴,但在20世纪之前自动控制技术还一直是机械工程的一个特殊分支。直到世纪之交,经典的数学理论(如微积分论)才使人们对速度控制有了更规范的认识。在20世纪初期,电气工程的广泛应用促进了新控制理论的发展,其中以Laplace和Nyquist为代表的科学家们创建了许多新的技术,这些技术至今仍应用于自动控制系统的分析中。

控制工程的下一次大发展浪潮出现在第二次世界大战,当时军事装备(如雷达、导弹和自动导航设备)的研究开发是推动这次发展的原动力。战争结束后,这些研究成果又在更广的范围得以应用。Norbert Wiener曾是战争时期著名的战争科学家之一,战后他将研究重点从反馈控制在武器上的应用转

到思考反馈更广义的内涵，特别是反馈在生物系统中的作用。Wiener 于 1948 年出版了一本名为“Cybernetics: Control and Communication in the Animal and the Machine”的书，该书成为许多现代思潮的起源，一些学科领域，如社会学、心理学、生物学以及工程学都受到 Wiener 研究[Wie48]的影响。

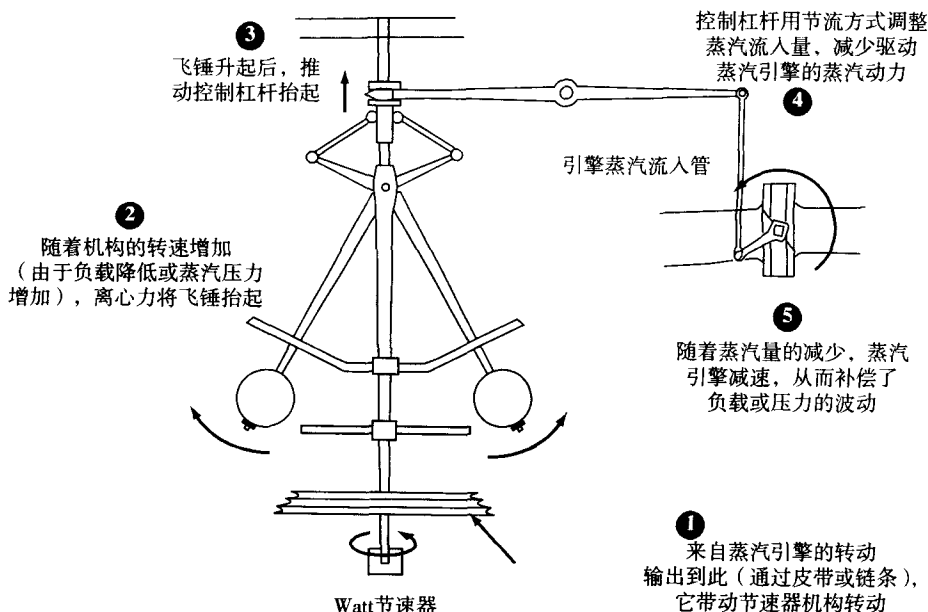


图 1.1 Watt 用于蒸汽引擎速度反馈控制的节速器

Wiener 在书中创造了“控制论”这个专业术语，它代表了控制与通信理论的整个领域。该术语源于希腊词 κυβερνήτης，意思是“掌舵人”。“控制论”一词揭示了 Watt 蒸汽引擎里著名的离心节速器所代表的中心意义。

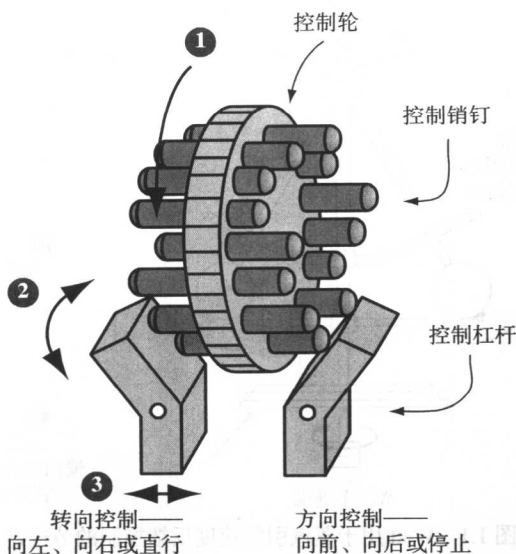
Wiener 的研究只是世界更全面认知反馈在社会、经济和生物系统中所起作用的一部分。从 20 世纪 40 年代后期到 20 世纪 50 年代初期，英国的神经生理学家 W. Grey Walter 开发出了第一台真正意义的“机器人动物”，它是专门设计用来模仿生物行为的一台移动电控机器人[Wal51]。由于 Walter 的机器人早于晶体管的发明，因此它的运动通过用电池供电的真空管器件进行控制。仅依靠 6 只真空管，Walter 的机器人就能表演诸如光追踪（定向运动）、随机行走以及找回自己的站舍给电池充电等行为。

为了强调其机器人的生物相似性，Walter 给他的机器人命名为“乌龟”，并给每个机器人取一个有趣而非科学的名字，如“机器乖乖”、“机器智者”等。Walter 的乌龟机器人后来也启发 Seymour Papert 将他为儿童设计的可编程机器人称为“乌龟”，并影响到 Valentino Braitenberg 的机器人“汽车”（以上两人的机器人将在后面探讨）。

1.2 玩具的启示

我的童年是在 20 世纪 60 至 70 年代，在那个时期的美国，科学技术得到了空前重视，并且有许多关于学生科技教育的创新。当时，工程师们发明了很多玩具来帮助学习计算机，这些用塑料、木头或纸张制作出的简单玩具能展示计算机编程或计算原理的某些知识。我记得在我 8 岁的时候见过一辆电池驱动的玩具车，它很像现在的无线电遥控车，可以前进和后退，也能像普通车一样转弯。不同的是这种玩具车不是由人直接控制，而是通过预先把销钉放到控制轮上来编程控制的。

玩具车控制机构的中心控制轮由一个齿轮带动并以固定的速度缓慢转动。为了给小车编程,需要将三种不同长度的控制销钉放入控制轮中,当控制轮转动时,上面的销钉就会依次压到两侧的控制杠杆上。其中一个控制杠杆通过机械装置与小车的转向系统相连,在不同长度销钉的作用下小车就能实现直行、向左转以及向右转的动作;另一个控制杠杆则控制小车的运动方向,如前进、后退和停止。通过规划并选择不同的转向和方向控制销钉组合,就能给小车的运动编程,走出一条特定的路径(如图 1.2 所示)。



可编程玩具车“在引擎盖下”的机构。箭头1所示为控制轮在小齿轮(图中未示)带动下转动。不同长度的控制销钉顺序压过控制杠杆的开口槽(箭头2),控制杠杆再通过机械装置连接到转向和方向控制机构上(箭头3)。

图 1.2 机械编程玩具车的控制机构

对于年纪非常小的孩子来说,一般的无线遥控车要比用身体直接操作的小车难理解得多,因为他们更喜欢手握方向盘来驾驶身外的物体。但上述可编程玩具车却能激发孩子对运动更深层的思考,因为他们不是直接控制车的运动,而是通过编程事先对车的运动进行规划,而且这个程序就具体体现在控制轮上的销钉上。

然而,上述机械玩具车当时并没有取得很大的商业成功。十年后,Milton-Bradley公司模仿这种机械车的理念开发了一种电子控制的玩具车,而且这种名为“Big Trak”的玩具车获得了巨大的成功。“Big Trak”的外表像坦克,它是第一台用微处理器控制的玩具车,通过键盘输入运动程序。这种玩具车的基本原理和前面介绍的机械玩具车相同,区别在于它是通过电子编程而非机械编程。现在“Big Trak”车已不再生产,但后来Valiant Technology公司也开发了一种蛋形机器人“Roamer”^①,它具有与“Big Trak”车相似的运动可编程能力。“Roamer”机器人现在已成为英国小学校里学习有关角度和运动知识的教具之一,这种设备之所以流行就是因为它可以立刻实现“通过程序构筑运动过程”这一理念。

可编程玩具车也许设计出来只是当做玩具,而Digi-Comp计算机却是计算机科学家专门设计用于教育的设备。Digi-Comp计算机实际上也算是一种机械编程玩具,但它不是用来控制其他设备的

① “Roamer”机器人在美国由Harvard Associates负责代理。请查看附录G获取有关Valiant Technology公司和Harvard Associates的联系方式。

状态的(像玩具车的转向装置),而是像现在真正的计算机一样操作它自己的内部状态,正如在它的使用手册封面上所宣称的那样,Digi-Comp是“世界上第一台塑料制成的真正能操作的数字计算机”。

图1.3为Digi-Comp计算机的结构示意图。计算机内有三块滑动板,每块板都可以有两种位置,分别代表“0”状态和“1”状态。操作人员先将塑料管(图中未示)放到伸出的输入键上,然后再启动一个计时机构使一组垂直的逻辑棒前后摆动。在Digi-Comp计时过程中,这些逻辑棒就会撞上塑料管,并带动滑动板。

计算机正面视图

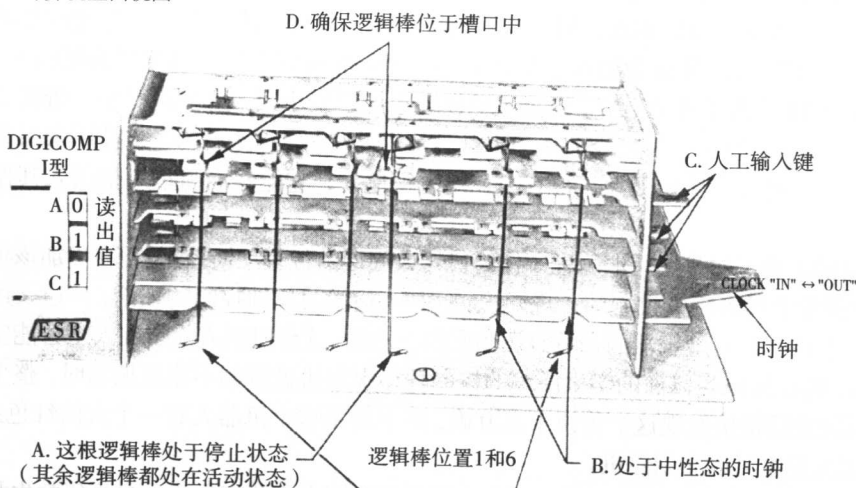


图1.3 Digi-Comp 计算机

Digi-Comp计算机是靠灵活排放塑料管的位置来实现编程的,但当我还是一个小孩子的时候,尽管知道塑料管是这台机器的核心,却很难明白它们是怎样精确地使Digi-Comp完成不同子功能的。现在当我再以计算机专家的身份读过它的使用手册后,虽然感叹这个机构的设计精巧,但不再感觉神秘莫测,其实这些塑料管的作用就是使Digi-Comp上的滑板不断执行置位和复位操作。

尽管Digi-Comp的塑料结构稍显粗陋,编程方法也比较神秘,但它的确是一台计算机。它所具有的操作功能包括:类似“与”和“或”的布尔操作、二进制计数、移位操作以及分类等。

Digi-Comp计算机虽然功能有限,但考虑到它仅是由塑料和几根金属棒搭建而成的,它所具有的能力应该算很出色了。就我个人而言,它的功能已经达到了其设计目的,即向我传递了有关二进制数、逻辑操作以及简单计算机理的知识,这些知识对我以后更好地认识Radio Shack TRS-80计算机起了很大的帮助作用。

TRS-80计算机是我童年时期的最后一种玩具,它也是以“家用计算机”形象销售的第一代机器,当然也成了计算机迷们的玩偶。我有幸得到一台型号为“Level II BASIC”的TRS-80计算机,它能支持浮点数运算并有汇编语言编程界面。那台计算机本身的内存只有4 KB,后来我将它扩展到了16 KB。

早期计算机和当代计算机之间的一大区别在于当时还没有商用软件,因此计算机用户不得不自己去探索它的工作原理,这也成为早期家用计算机的主要用途。实际上,当时的每位计算机用户也都是计算机编程的好手。

早期计算机和现代计算机之间的另一区别是早期计算机非常简单,以至于那些一流的计算机迷们对计算机内部的每个功能层次都了如指掌,从它的CPU指令集,到存储映像的硬件和视频显示

器,以及计算机固定存储器中内置的系统软件。而今天的计算机,无论是它的硬件还是软件设计都非常复杂,很难完全把它们了解清楚。因此,单纯从计算机教育的观点看,早期的计算机无疑具有显著的优点。

在拿到我的TRS-80计算机后,我首先学习的是BASIC语言,进一步又学习了怎样用计算机的Z-80机器语言进行编程,然后再学习它的硬件系统,最后学会了怎样修补操作系统以及直接调用计算机内置操作程序的子程序。

然而,我当时想研究但却没有足够的知识去完成的课题是将计算机与真实世界连接起来。这个愿望直到我上了大学才得以实现,因为我发现机器人技术正是计算机与真实世界之间的纽带。

在大学二年级时,我有幸加入了 Warren Seering 的研究小组。当时作为机械工程系的教师,Seering 还在MIT的人工智能(AI)实验室里领导一个研究小组。这个研究小组研制了一种机器人手臂,它能沿X、Y和Z三轴直线运动(也称“笛卡儿坐标”机械手),它被用来探索新的机器人制造技术。这个机器人体积很大,很有力,但也很危险,它能轻而易举地把误入其作业空间的人手打断。

我当时的主要工作是编写汇编程序作为机器人底层的位置反馈控制器。在参加该项目研究的同时,我也在课堂上学习反馈控制的正规知识,这种一边学习反馈控制的理论,一边又用自己编写的程序控制一个庞大而危险机器的奇特经历使我终身难忘。这台机器人安装在人工智能实验室所在大楼的第9层,曾经传说当以前的学生所编的控制程序引起机械臂的不稳定振动时,整个大楼都会跟着抖动。而我来后很快发现这个传说千真万确,所幸的是这个机器人有一个大的红色急停按钮,一旦有异常情况发生可以立刻停机。

之所以讲述以上这些个人的学习经历,主要是为了同大家分享作为一名青年学生我自己总结的学习经验,而其中重要的一条就是亲自动手参与到研究实践中,因此本书所提供的练习几乎都要求读者亲自动手进行试验。

我读研究生后,就跟随 Seymour Papert 一起工作。Papert 是所谓“解释性学习法”的主要倡导人之一,他的主要研究方向就是为这种学习法提供技术支持。下面暂时中断我的个人历史,介绍一下本书内容的来龙去脉,因为它们与 Papert 的研究关系密切。

Seymour Papert 既是一名数学家也是一位计算机科学家,在20世纪60年代他曾是MIT人工智能实验室的主任之一,也是那时人工智能研究领域的先驱。当时人工智能提出了强化创造力和智能刺激的观点,研究人员甚至开发了一种名为Lisp的程序语言,并用这种语言编程来探索、验证和支持他们关于人类智能本质的想法。

Papert 希望把这种探索的思路引入到儿童学习中,特别是数学的学习,因为当时小孩子的数学基础普遍较差,他相信那是由于在他们环境里缺乏挑战而且接触“数学的东西”太少。在20世纪60年代后期到70年代初,Papert 领导开发了Logo,一种专为儿童设计的编程语言。Logo吸收了很多Lisp语言的设计思想,如交互式的界面,但Logo的语法更简单,更容易学会。

Papert 还专门出版了一本关于如何教儿童用Logo编程的书,书名是“Mindstorms”。书中他曾用在教室里学习法语与亲自到法国去学法语做了类比,他认为之所以在法国学习法语更容易是因为说法语是与真实生活密切相关的很自然的行为,比如想吃冰淇淋卷的时候,你只能用法语去问人要;相反在教室里说法语只是一种角色扮演式的对话,不会有真实的感觉。Papert 就是想用Logo语言来创造一种环境,让孩子们能够轻松自然地与数学概念打交道,这与到法国学习法语是一个道理。