

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

# 实用 运动控制 技术

Applied  
Motion Control  
Technologies

丛爽 李泽湘 编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

# 实用运动控制技术

## Applied Motion Control Technologies

丛 爽 李泽湘 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

运动控制技术是一门综合性、多学科交叉的技术，是“推动新的产业革命的关键技术”，其发展是“制造自动化前进的旋律”。运动控制系统和产品得到了越来越广泛的应用。本书全面、深入地介绍各种实用运动控制技术，包括：伺服电机及其驱动技术，运动控制中的传感器和控制器，运动控制系统的设计，单轴运动控制技术，多轴运动协调控制技术，提高运动控制系统控制精度的技术，倒立摆系统的控制技术，复杂机器人控制技术，以及基于网络的远程运动控制技术等。

本书的目的，是为运动控制领域的工程师、产品制造厂商和广大用户，在设计、制造和选择运动控制系统或部件时给予技术上的指导和帮助，同时为高校自动化、电机和机械等专业的本科生和研究生提供教材或参考书。

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

实用运动控制技术 / 丛爽, 李泽湘编著. —北京: 电子工业出版社, 2006.1  
ISBN 7-121-02045-9

I. 实… II. ①丛… ②李… III. 自动控制系统 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 141399 号

责任编辑: 张来盛 zhangls@phei.com.cn,

印 刷: 北京市海淀区四季青印刷厂

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: 21.25 字数: 544 千字

印 次: 2006 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 29.80 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 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

## 前 言

运动控制是 20 世纪 90 年代在国际上兴起的一个多学科交叉的研究领域,它主要以含有快速电机运动的执行机构为基础,结合现代电力电机技术、控制理论与技术、计算机技术、传感器技术等进行全新的控制系统的设计,以达到运动控制所要求的高速、高精度的要求。与该领域配套的产品公司近年来也在国内如雨后春笋般地快速发展起来,这使得越来越多的人用到运动控制系统装置,越来越多的人接触与运动控制相关的理论与技术,当然在应用中也少不了遇到需要解决的有关运动控制的实际问题。如何能够让初学者很快地进行运动控制中某一方向的专业研究,如何能够让运动控制的产品制造商了解用户的要求,同时,使运动控制装置的使用者较快地了解有关运动控制相关的关键知识,更好地利用产品,在装置上做出高水平的实验结果来,这些都是人们关心并希望能够找到答案的。

2000 年底在香港举行第 19 届中国控制会议期间,我们在一起谈论需要有一本关于实用运动控制技术方面的书籍,两人一拍即合,随即在第二年开始投入书籍内容的准备中。转眼 5 年即将过去,这期间,我们曾经多次在香港或内地专门或利用其他参会时间进行了章节安排以及具体内容的讨论,同时,也借助于国家自然科学基金项目,通过培养研究生,做了大量的研究工作,总的愿望是写一本能够给多方面人员读的实用的运动控制技术书。

运动控制领域在最近 20 年里发生了不少重要的变化,其中最主要的,是运动控制标准模块的发展使得人们只需花费较少的努力就可以集成系统。在十多年以前,构造一个伺服系统需要从最基本的元件开始设计控制器,甚至包括放大器也是如此。现今开发出的模块化设计,允许设计师不必是设计运动控制系统的伺服控制专家,只需懂得到市场上去购买能够完成任务的系统装置或部件就可组成系统。对于希望设计或想了解运动控制系统的人,本书提供了一个解释系统操作和设计的轮廓,并且不要求读者需要具备一定的控制理论知识。本书的特点是,力求全面地对运动控制的各个方面进行实用性的介绍。不去深究元器件内部的复杂结构,抓住实用的外部特性,阐述组成系统的各部件间的联系;从如何去选择以及用好一个部件,并组成合适的系统的角度去分析各部件的特性;从系统的角度以及达到系统期望的目标出发,去介绍各种行之有效的控制策略与方法。让不同领域、不同层次以及不同要求的人员都能从本书中获得所需要的东西。

本书在介绍了有关伺服电机及其驱动技术、运动控制中的传感器和控制器等组成运动控制系统的重要部件后,对运动控制系统设计中运动控制系统部件的选择以及最优化设计方面的技术问题进行了阐述,并着重对位置伺服系统控制技术中不同系统的位置控制方式、闭环伺服系统的性能分析等关键问题进行了分析与讨论,还给出了具体的设计实例以帮助读者理解这些问题。然后,重点放在单轴运动控制和多轴运动协调控制的技术方面,主要是在具体的应用与实现的硬件、算法以及实用技术上,让各类读者能看懂,并且能学会。同时在硬件及系统确定之后,作为提高系统控制精度的实用技术方法,对运动控制系统实现中常用到的

直线/圆弧插补方法性能与技术以及实验过程中必须考虑到的去噪方法专门进行了介绍。作为实例，倒立摆控制系统作为一个典型的运动控制装置安排了一章，其中挑选了单级倒立摆系统模型的建立及动态特性分析、系统的控制器设计、旋转平行倒立摆系统控制中的关键技术，以及二级倒立摆在 Simulink 环境下的实时控制。在复杂机器人控制技术中，以多自由度并联机构的控制技术为例，考虑了连续轨迹控制、多轴协调运动和同步控制技术。最后，对基于网络的远程运动控制技术与控制器的设计进行了初步的分析。

本书的目的主要是帮助工程师理解影响电机驱动器中各部件性能的原因，对选择电机及传感器给予系统协调上的指导，给运动控制系统的产品供货商提供技术上的建议，给大专院校的研究生提供可使用的运动控制技术，为广大运动控制用户实际设计和选择高精度的运动控制系统提供参考与帮助。

在这里要特别感谢为本书作出贡献的人们，他们是：已经硕士毕业的张冬军、杜浩藩和成慧（Cheng H.），硕博连读生张耀欣、尚伟伟、梁艳阳和刘宜，博士生郑桦以及硕士生魏子翔。

本书的出版得到了电子工业出版社的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指教。

丛爽（中国科学技术大学）

李泽湘（香港科技大学）

2005 年 10 月

# 目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 基本术语	(1)
1.2 运动控制技术的发展历史	(5)
1.2.1 自动控制技术的起源	(5)
1.2.2 伺服机构的提出及自动控制理论的发展	(7)
1.2.3 机器人和机电一体化技术的诞生	(9)
1.2.4 电气伺服驱动及运动控制器的进步	(11)
1.2.5 运动控制的应用领域	(14)
1.3 现代控制理论与技术的发展和趋势	(18)
1.3.1 现代控制理论的发展	(18)
1.3.2 运动控制中的关键技术	(21)
1.3.3 运动控制技术的发展趋势	(23)
第 2 章 伺服电机及其驱动技术	(26)
2.1 直流伺服电机	(27)
2.1.1 基本结构和伺服原理	(27)
2.1.2 直流电机的驱动技术	(30)
2.1.3 直流电机的驱动控制	(34)
2.2 交流伺服电机	(37)
2.2.1 无刷直流伺服电机	(39)
2.2.2 两相交流伺服电机	(42)
2.2.3 交流伺服电机的驱动技术	(44)
2.3 特殊直流电机	(47)
2.3.1 力矩电机和直接驱动电机	(47)
2.3.2 直线伺服电机	(48)
2.4 步进电机	(51)
2.4.1 步进电机概述	(51)
2.4.2 步进电机驱动器	(55)
2.4.3 步进电机的控制	(56)
2.4.4 步进电机的应用	(59)
2.5 步进电机和交流伺服电机性能比较	(60)
2.6 运动控制系统中的传动机构	(62)

<b>第 3 章 运动控制中的传感器</b> .....	(65)
3.1 引言 .....	(65)
3.2 直接编码式传感器 .....	(67)
3.2.1 增量式编码器 .....	(68)
3.2.2 增量式光电编码器的几个基本问题 .....	(69)
3.2.3 绝对式编码器 .....	(70)
3.2.4 编码式传感器的读码技术 .....	(73)
3.3 分解器 .....	(73)
3.3.1 RDC 转换器的软件 .....	(74)
3.3.2 分解器误差和多速分解器 .....	(75)
3.4 电荷耦合图像传感器 .....	(75)
3.5 激光式数字传感器 .....	(77)
3.5.1 激光相位调制式传感器的工作原理 .....	(78)
3.5.2 干涉条纹的辨向和细分技术 .....	(79)
3.5.3 对光源、接收元件和调整装置的要求 .....	(79)
<b>第 4 章 运动控制中的控制器</b> .....	(81)
4.1 引言 .....	(81)
4.2 可编程逻辑控制器 .....	(83)
4.3 微处理器 .....	(85)
4.4 数字信号处理器 .....	(86)
4.5 通用运动控制器及 Galil DMC-2100 简介 .....	(90)
4.6 GT-400-SV 四轴伺服运动控制器简介 .....	(92)
<b>第 5 章 运动控制系统设计</b> .....	(100)
5.1 运动控制系统的总体性能要求和设计任务 .....	(100)
5.2 运动控制系统部件的选择 .....	(102)
5.2.1 执行电机 .....	(105)
5.2.2 电机驱动器 .....	(111)
5.2.3 位置和速度传感器的选择 .....	(115)
5.2.4 运动控制器的选择原则 .....	(118)
5.2.5 系统部件的选择实例 .....	(120)
5.3 最优化设计 .....	(128)
5.3.1 最优化设计问题的提出 .....	(128)
5.3.2 速度最优化设计 .....	(130)
5.3.3 齿轮速率最优化设计 .....	(135)
5.3.4 最优电机选择 .....	(137)

<b>第 6 章 位置伺服系统控制技术</b> .....	(139)
6.1 不同系统的位置控制方式 .....	(139)
6.2 闭环伺服系统的性能分析 .....	(143)
6.2.1 系统性能的分析过程 .....	(144)
6.2.2 几个系统性能分析的例子 .....	(144)
6.3 闭环伺服系统的设计 .....	(155)
<b>第 7 章 单轴运动控制系统控制技术</b> .....	(159)
7.1 单轴运动控制系统组成 .....	(159)
7.2 单轴运动控制系统模型辨识 .....	(161)
7.2.1 电机正反向线性模型辨识 .....	(162)
7.2.2 电机非线性摩擦力矩模型 .....	(164)
7.3 PID 控制算法 .....	(165)
7.3.1 PID 控制规律的离散化 .....	(165)
7.3.2 PID 控制器参数的选择 .....	(168)
7.4 PD 串联校正和速度负反馈 .....	(170)
7.4.1 速度负反馈 .....	(171)
7.4.2 PD 串联校正 .....	(171)
7.4.3 速度负反馈和 PD 串联校正比较 .....	(172)
7.5 几种速度负反馈形式的比较 .....	(173)
7.5.1 测速电机直接模拟量负反馈 .....	(173)
7.5.2 测速电机测量电压 A/D 转换后的速度负反馈 .....	(174)
7.5.3 光电编码器位置信号差分近似速度反馈 .....	(175)
7.6 PID 和 PI-D 控制 .....	(176)
7.7 相位超前-滞后控制策略 .....	(178)
7.8 复合控制 .....	(178)
<b>第 8 章 多轴运动协调控制技术</b> .....	(180)
8.1 多轴运动控制器及其控制方案 .....	(180)
8.2 二自由度机械臂控制技术 .....	(182)
8.2.1 二自由度机械臂实验平台 .....	(183)
8.2.2 机械臂工作空间分析 .....	(184)
8.2.3 机械臂运动学解 .....	(184)
8.2.4 直角坐标空间运动路径规划算法 .....	(189)
8.2.5 直线插补和圆弧插补算法 .....	(191)
8.3 机器人系统的软件系统结构 .....	(192)
8.3.1 机器人系统中的类对象 .....	(192)
8.3.2 机器人系统中类对象间的关系及其软件实现 .....	(193)
8.4 机器人图形示教系统的设计与实现 .....	(200)



<b>第 9 章 提高运动控制系统控制精度的技术</b> .....	(205)
9.1 直线/圆弧插补方法与技术 .....	(206)
9.1.1 直线插补 .....	(207)
9.1.2 圆弧插补 .....	(212)
9.1.3 小结 .....	(221)
9.2 几种消除噪声和干扰的技术 .....	(222)
9.2.1 数字滤波算法 .....	(223)
9.2.2 系统的量测噪声及消除 .....	(227)
9.2.3 消除量测噪声的滤波器设计 .....	(228)
9.2.4 用统计方法消除尖峰干扰 .....	(230)
9.2.5 平稳随机干扰下的最小方差控制 .....	(231)
9.3 小波去噪 .....	(233)
9.3.1 小波去噪原理 .....	(234)
9.3.2 阈值的选取和阈值量化 .....	(235)
9.3.3 MATLAB 中的小波去噪应用 .....	(236)
<b>第 10 章 倒立摆系统控制技术</b> .....	(241)
10.1 倒立摆系统概述 .....	(241)
10.2 单级倒立摆系统 .....	(243)
10.2.1 系统模型的建立及动态特性分析 .....	(243)
10.2.2 单级直线倒立摆系统的控制器设计 .....	(247)
10.2.3 倒立摆控制系统的仿真 .....	(249)
10.2.4 倒立摆控制系统软硬件结构 .....	(250)
10.2.5 实验结果及对比分析 .....	(254)
10.3 旋转平行倒立摆系统控制的关键技术 .....	(257)
10.3.1 动态系统数学模型及其线性化 .....	(257)
10.3.2 起摆的能量控制技术 .....	(259)
10.3.3 旋转平行倒立摆的平衡控制技术 .....	(261)
10.3.4 系统仿真及实际控制结果与分析 .....	(262)
10.4 二级倒立摆在 Simulink 环境下的实时控制 .....	(265)
<b>第 11 章 复杂机器人控制技术</b> .....	(269)
11.1 多自由度并联机构的控制技术 .....	(269)
11.1.1 并联机构的特性及其分析 .....	(270)
11.1.2 并联机构的动力学模型 .....	(273)
11.1.3 PD 控制 .....	(274)
11.1.4 增广 PD 控制 .....	(275)
11.1.5 计算力矩控制 .....	(276)
11.1.6 最优控制器的设计 .....	(276)

11.1.7	仿真实验的性能对比及其分析 .....	(277)
11.2	提高控制精度的并联机构速度规划 .....	(279)
11.2.1	速度限制 .....	(279)
11.2.2	加速度限制 .....	(280)
11.2.3	并联机构期望运动轨迹的描述 .....	(281)
11.2.4	S型与梯形速度规划算法及实验分析 .....	(282)
11.3	多轴协调运动中的交叉耦合控制 .....	(285)
11.3.1	基于频域法的传统交叉耦合控制 .....	(286)
11.3.2	基于轮廓误差传递函数的交叉耦合控制 .....	(287)
11.3.3	基于任务坐标系的多变量的交叉耦合控制 .....	(288)
11.3.4	基于无源性的交叉耦合控制 .....	(290)
11.3.5	各种设计方法的性能比较 .....	(290)
11.3.6	交叉耦合控制与轨迹规划结合的综合设计 .....	(291)
11.4	轮廓控制的误差补偿技术 .....	(293)
11.4.1	非耦合轮廓控制 .....	(293)
11.4.2	耦合轮廓控制 .....	(294)
11.5	多轴运动控制的同步控制技术 .....	(295)
<b>第 12 章</b>	<b>基于网络的远程运动控制技术 .....</b>	<b>(298)</b>
12.1	基于 Internet 的远程控制系统的结构 .....	(298)
12.2	远程控制系统的实现方式 .....	(300)
12.2.1	远程控制系统的软件实现方式 .....	(300)
12.2.2	远程控制系统的硬件实现方式 .....	(302)
12.3	远程控制中的延时 .....	(303)
12.4	延时的解决方法 .....	(304)
12.4.1	Smith 预估器的补偿控制 .....	(304)
12.4.2	预测控制 .....	(305)
12.4.3	基于事件的智能控制 .....	(305)
12.4.4	监督控制 .....	(306)
12.5	网络控制中不同结点驱动方式对系统性能影响 .....	(307)
12.5.1	不同驱动方式下的系统状态方程 .....	(308)
12.5.2	结点的驱动方式对系统性能的影响 .....	(311)
12.5.3	不同结点驱动方式的特点分析 .....	(312)
12.6	基于预测控制的确定性延时补偿技术 .....	(312)
	<b>参考文献 .....</b>	<b>(316)</b>
	<b>术语索引 .....</b>	<b>(324)</b>

# 第 1 章 概 述

人类在长期的生产和生活实践中通过自身的聪明才智，不断地创造出各种类型的新工具来替代人的手工劳作，降低劳动强度，提高工作效率。这些工具的产生不仅将人类从繁重的体力劳动中解放出来，而且通过人类在使用过程中对其结构和性能的不断改进，逐步变成了技术更加先进的装置与设备，其生产能力和制造技术也进一步得到提高。人类在长期的发明创造中，不断地总结经验，将感性认识逐渐上升为理性认识，形成了各种有规律可循的理论与方法，从而加速了技术的普及和应用。

现代社会中的各个领域，正广泛采用自动控制理论及技术。且不说在宇宙的航行、导弹的制导和飞机的驾驶中，自动控制系统具有特别重要的作用，就是在一般的工业生产过程和机器制造业中，自动控制技术也是一个不可缺少的重要组成部分。例如，机器零件的加工、检验和装配，生产过程的温度、压力、流量都可以进行自动控制。生产部门依靠自动控制提高了产品质量和劳动生产率，降低了生产成本，并且随着现代控制理论不断发展，使整个生产过程更加自动化。

运动控制本身就是一类具有特殊要求的自动控制。运动控制技术是一项综合技术，如何能够把这项综合技术在具体实践中运用得当，达到人们期望的要求，这是本书希望达到的目的。为了能够对运动控制及其技术在自动控制中的地位有一个更加清楚的认识，本章从有关运动控制的系统、理论、技术的基本术语出发，讲述运动控制的发展历史，介绍简要运动控制的关键技术和发展趋势。

## 1.1 基本术语

“自动控制”是指采用某种控制装置使机器设备的运行或生产过程自动地按照事先给定的规律进行，使一个或数个物理量（如电压、电流、速度、温度、流量等）能够在一定的精度范围内按照给定的规律变化。如果将工作的机器设备称为“被控对象”，将表征其工作状态的物理量称为“被控量”，将给定的规律称为“命令信号（或参考输入）”，则“控制”的任务又可概述为：采用适当的控制策略使被控对象的被控量等于参考输入。这个任务如果由人来完成，则为人工控制；如果靠自动装置承担，即在没有人的直接参与下，利用控制装置自动操纵被控对象，使被控量保持恒定或按一定规律变化，则称为自动控制。由自动控制装置与被控对象组成的系统称为“自动控制系统”。

自动控制的基本原理，是在整个控制系统中引入“负反馈”，形成“反馈控制系统”。通常，将系统检测出来的输出信号送回到系统的输入端，并与参考输入信号比较的过程称为反馈。若反馈信号与输入信号相减，则为负反馈；反之，若相加，则为正反馈。一般意义下的反馈控制系统可以用图 1.1 所示的系统结构图来表示。一个控制系统不论多么

复杂，都可以通过对其功能的分析将整个系统分为几个环节，各个环节都可以用一个元件或部件来表示，参见图 1.1。其中，输入元件用来对输入量  $r(t)$  进行预处理，使其输出量为系统的参考输入信号  $y_r(t)$ ；反馈元件用来产生与输出量  $y(t)$  有一定函数关系的信号  $y_o(t)$ ，并把这个信号反馈到系统的输入端；比较元件用来对参考输入信号和反馈信号进行比较，并产生反映其偏差信号  $e(t)$  的元件；放大变换元件的作用是把偏差信号放大并进行能量形式转换，以适应执行元件要求；执行元件是直接对被控对象进行控制的装置或元件；被控对象（或被控过程）是反馈系统中所要求控制的装置或生产过程。

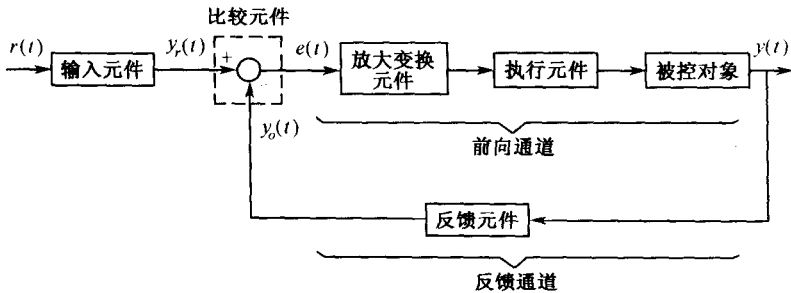


图 1.1 常规的自动控制系统结构图

在反馈控制系统中，如果给定的输入量保持常量或者随时间缓慢变化，而系统的基本任务是在有扰动的情况下，使实际的输出变量保持期望的数值，这类系统就称为“自动调节系统”。采用恒温器作为控制器的室内加温系统，就是一种自动调节系统。将恒温器的温度给定值与室内的实际温度进行比较就得到偏差，而室外温度的变化量是该系统的扰动，自动调节系统的任务就是保证所要求的室内温度不受室外温度（扰动）变化的影响。如果系统的期望输入是时间的函数，控制的目标是使系统的输出变量跟踪期望的输入信号，这类系统就称为“自动跟踪系统”。

其被控量是位移、速度或加速度等机电变量的反馈控制系统，称为“随动控制系统”，简称“随动系统”或“伺服系统”。随动控制系统是运动控制系统的最早提法。

事实上，除了反馈控制外，对不同的被控过程的自动控制方式可以是不同的。这种实现自动控制的方式就是控制系统的类型。在实际应用中，存在着大量不同的控制方法与系统类型，并且可以通过不同的角度来得到各种不同的分类方法。比如反馈控制系统又称为“闭环控制系统”，这是因为系统的输出信号对控制作用有直接的影响。其输出量对其控制作用没有影响的系统，称为“开环控制系统”。开环控制系统既不需要测量元件对输出量进行测量，也不需要将它反馈到系统的输入端与输入量进行比较。因此，对应于每一个给定的输入量，便有一个固定的输出量与之对应，系统的精度只取决于系统前向通道中控制器的作用。洗衣机就是开环控制系统的实例，它的浸湿、洗涤和漂清的过程是顺序进行的，无须对其输出信号（即衣服的清洁程度）进行测量；管理交通道路的红绿灯是另一个典型的开环控制的例子。

人本身就是一个具有高度复杂控制能力的闭环系统。例如，人可以用手准确地去拿起放在桌上的书、笔等物。这个出现于日常生活中的习以为常的现象，正好体现了闭环

控制的原理。当人去拿书时，大脑送出一个信号命令手执行任务，这时眼睛连续观测手的位置，并将这个信息送入大脑；然后，由大脑判断手对于书的偏差，并根据所判断出的偏差大小发出命令控制手臂移动，使偏差减小。只要这个偏差存在，上述过程就要反复进行，一直到手拿到书，偏差才减小为零，人便完成了用手拿书的控制过程。在此，手是被控对象，手的位置为被控量，控制目的是使手的位置到达书的位置，并拿起书。控制作用是通过眼睛、大脑和手臂的配合来实现的。

在实际系统中，如果各个元件的输入/输出特性都是线性的或可以线性化的，这样的系统又称为“线性控制系统”。线性系统的性能可以用线性微分方程描述，并可以使用叠加原理。当系统中含有非线性特性的元件时，所组成的系统则称为“非线性控制系统”。非线性系统不能采用叠加原理。常用的分析非线性系统的工程方法，有相平面法和描述函数法。

如果从被控变量的响应速度的快慢上对系统的控制类型进行分类，可以分成过程控制和运动控制两大类。

过程控制是工业生产过程的自动控制，其被控量主要是温度、压力、流量、液位等所谓过程控制量。所谓过程，是指在某设备中将原料经过适当处理得到产品的这段生产过程。过程控制主要应用于化工、石油、冶炼等工业的生产中，以保持其生产过程所需的环境条件或配料比例。

运动控制是以机械运动为主要生产方式，以电机为主要被控对象的快速、高精度的控制。运动控制与常规自动控制的不同点，在于其目的是为了完成一定高精度的快速控制任务。为了达到上述目的，需要专门的或比常规控制系统性能要求更高的元件与技术。在各种先进技术不断发展的今天，已经使得运动控制系统中的每个元件发展成为带有控制功能的部件或子系统。对应于自动控制系统的结构图，可以画出一一般形式的运动控制系统的方框图如图 1.2 所示。其中，预处理器在需要时采用，可以是模拟部件，也可以进行数字处理；执行机构常常是指电机及其驱动器的组合，早期自动控制系统中用来对执行元件进行放大变换的元件属于执行机构中的驱动放大部件；控制器实际上是用来对组成整个控制系统后的系统输出性能进行控制的运动控制板；传感器是用来测量系统输出并转换成所需形式的变换器。

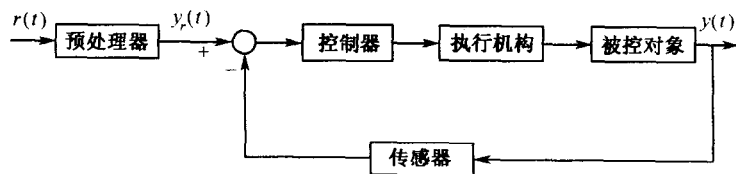


图 1.2 一般形式的运动控制系统方框图

下面对组成运动控制系统的相关术语进行简单的介绍。

### 1. 运动控制系统

运动控制系统是由被控对象、数字传感器、电机-驱动系统及相关的运动控制板集合

而成的系统。

## 2. 被控对象

将被操纵的机器设备称为被控对象，简称过程。设备是由一些部件组合而成，其作用是完成一个特定的动作或一系列动作。在本书中我们称被控机器设备（如数控机床、机器人、倒立摆等）为被控对象，而将表征其工况的关键参数称为被控量，将对这些工况参数所希望达到的值称为期望值（或给定值、参考输入、命令信号）。

## 3. 电机驱动系统

电机（又称马达）驱动系统是由电机及其驱动器组成的，其中驱动器提供电机功率，使得电机做旋转或直线运动。

## 4. 运动控制器

运动控制器是专门为运动控制而设计制造出的运动控制板。运动控制器可以分成 3 大类：

（1）可编程控制器（PLC）——根据生产过程和工艺要求预先编制并写入的程序，对执行机构发出控制指令的控制器，它能完成逻辑判断、定时、计数、记忆和算术运算等功能，特别适合于取代复杂的继电器控制逻辑电路。

（2）运动控制器——能够控制速度和位置的一个或一定数量的轴，或独立承担协调运动，除了用在闭环控制回路中之外，现代运动控制器还用来提供有限的管理设备、输入/输出通道、通信，以及有机床或机器人（robot）执行的设计函数所需要的安全电路。

（3）多轴计算机辅助控制器——常使用在数控机床或复杂机器人中，该类控制器是为特殊领域的应用而开发的，一般由原始设备制造商（OEM）提供产品。

## 5. 数字传感器

传感器是将被测量（包括各种物理量、化学量和生物量等）变化成系统可识别的、与被测量有确定对应关系的有用电信号的一种装置。运动控制系统中常用的数字传感器有：增量式传感器、绝对式传感器、光学传感器、触觉传感器等。

在过去的几十年里，随着控制系统所涉及的领域的拓展和用途的增加，人们对其在可靠性、精确性以及操作速度上的要求越来越高。这些不断提高性能的要求，随着工程技术各个不同领域的自身发展而得以满足，同时也更加促进了自动控制系统的成长。这一切也使得控制系统中的各种部件不再像以前那样简单：执行机构中的机械部分更加复杂，电子学功率放大与驱动部分更加紧凑，传感器也更加精密与智能。所有这些结果导致今天的自动控制系统中运动控制系统的设计变成了一门工程技术。运动控制不仅仅是对运动的控制，而且是对固定在物体周围的物件（如机器人）的运动协调。控制意味着更多目标的实现，而不仅仅是产生一个运动轨迹。不论是执行机构，还是传感器，都位于系统内部，与系统的其他部件装在一起并组成一个统一的功能系统共同工作。因此，在进行运动控制系统的开发与设计时，不能单纯考虑机械部分的问题，还要同时兼顾其

他所需的部件，考虑这些部件组合后对整体系统所带来的相互影响。为了能够对运动控制系统及其技术有更深入的认识，有必要了解运动控制技术的发展历史。

## 1.2 运动控制技术的发展历史

由于运动控制系统涉及的领域众多，科学技术的不断发展与进步使得运动控制系统的组成及其设计方法，与几十年前甚至十年前传统的电机控制系统相比有了很大的不同。新技术、新设备和新方法的融入，已使得运动控制系统在国民经济与日常生活中起到越来越重要的作用。本节将以自动控制技术及其相关领域的发展为主线，来探讨运动控制技术及其系统设计的变化过程，为认识和掌握运动控制系统的组成以及运动控制系统的设计过程打下基础。

### 1.2.1 自动控制技术的起源

自动控制是人类在认识世界和发明创新的过程中发展起来的一门重要的科学技术。依靠它，人类得以从繁重的体力劳动和重复的手工操作中解放出来，从事更富有创造性的工作。人类从依靠自身的聪明才智制造出第一把石刀开始，就利用制成的石刀，获得更多的劳动果实，又制出更好的生产工具。早在 3 000 多年前，埃及、巴比伦和中国就先后出现了自动计时漏壶（见图 1.3）。中国还产生了指南车（见图 1.4）以及多种天文仪器。这些控制装置的发明，促进了当时社会经济的发展。



图 1.3 中国西汉漏壶

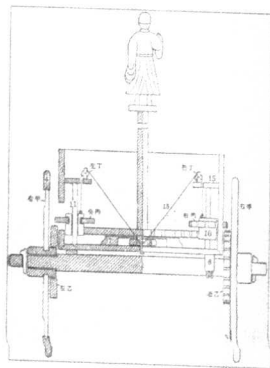


图 1.4 中国马钧研制的用齿轮传动、自动指示方向的指南车（公元 235 年）

真正工业工程中自动控制的应用距今只有 200 多年的历史。早期的控制对象主要是轮船驾驶。当时随着航海船只体积及速度的增加，单靠人力已不能胜任，需要采用大功率辅助导航装置，于是人们想到利用蒸汽功率来操作导航系统。

英国的瓦特（Watt）于 1788 年使用离心式调速器控制蒸汽机的速度。斯克尔斯（Sickels）于 1849 年发明了世界上第一台蒸汽导航引擎。第一艘具有闭环控制功能的蒸汽轮船是由英国人葛莱（Gray）于 1859 年设计的，称为“大东方（Great Eastern）”号（见图 1.5）。可以说在 1868 年以前，大部分自动控制技术还处于直觉制作阶段，人们在劳作过程中，加入机械转换装置，以减轻人类的劳动负担。用一个多功能的模块方框图来表示早期导航系统的工作过程（如图 1.6 所示）。从图 1.6 中可以看出，在人参与的控制系统中，人手起了驱动和执行装置的作用，用来对被控物体进行操作，人的感觉器官是测量装置，用它感受被控物体的控制结果，人脑作为中枢控制装置对所获得的信息进行分析、比较，并作出判断和决策。由此可见，在人参与的简单控制系统中，已包含有执行、测量和控制等各个环节。

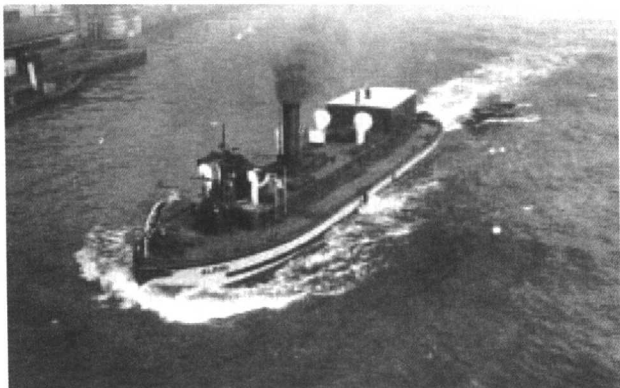


图 1.5 英国葛莱（Gray）设计的第一艘全自动蒸汽轮船——“大东方”号

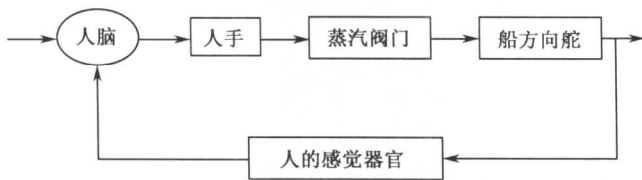


图 1.6 早期导航系统的工作过程

虽然蒸汽机开始了人类生产过程的机械化，但其监督与调整过程的工作仍需要通过人工来完成。工人要不断照料机器的动作，用眼、耳等感官系统来直接获取生产过程的信息，然后由大脑对这些信息进行处理，作出是否改变机器运行状态的决策，并通过手对机器的直接调整来执行这一决定。20 世纪初，逐渐开始产生了能对各种物理量进行精确测量的敏感元器件，这样使得控制决策的执行由执行机构取代了手对机器的直接调整，但是控制决策还需由人直接作出，整个生产过程还需人的直接参与。这一状况对一



些日益要求精密化、快速化的现代工业控制系统越来越不能令人满意，因为人的思维在速度、可靠性和耐力方面都显得不够，越来越不能胜任不断增长的性能的要求。

瓦特的离心式调速器开始将人从控制过程环节的直接参与中解脱来。他利用机械动力学原理，实现了如图 1.7 所示的控制系统。伴随这一解脱过程的，是人类对各类系统自动控制的设计由本能与经验逐步转移到理性和科学上来。从对自动控制过程的每一个环节只作为一个孤立的器件来认识，发展到作为一个系统中的系统部件来认识。自动控制理论以及伺服机构的产生正是自动控制技术不断发展和推动的结果。

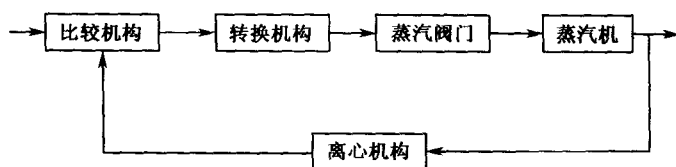


图 1.7 离心调速器实现的自动控制系统结构图

## 1.2.2 伺服机构的提出及自动控制理论的发展

在早期自动控制系统的设计与实现的过程中，人们发现，在不断提高控制系统精度的同时，常常伴随着系统自身剧烈的震荡甚至不稳定的现象。1868 年麦克斯韦 (Maxwell) 利用离心式调速器的微分方程模型，提出了有关线性系统稳定性的判据，使自动控制技术前进了一大步。19 世纪末 20 世纪初，随着对航船的稳定性及自动导航兴趣的增加，人们对伺服机构产生了更大的兴趣。美国人斯派瑞 (Sperry) 于 1908 年提出了海船上用的陀螺仪——运动稳定器 (active stabilizer)，他还发明了多种不同的人工伺服阀，被广泛应用于轮船、鱼雷 (torpedo) 和飞机的控制中，对实用自动导航系统的发展作出了重要贡献。1911 年液压驱动的伺服控制系统，解决了蒸汽驱动对精确定位控制的困难。1922 年，美国俄籍工程师米诺斯基 (Minorsky) 发表了一篇对位置反馈控制系统进行详细分析的文章。米诺斯基在其文章中提出了三项控制律，也就是今天人们熟知的比例-积分-微分 (PID) 控制。1927 年，美国的布莱克 (Black) (见图 1.8) 提出了放大器性能的负反馈方法。

1931 年，美国麻省理工学院 (MIT) 的布什 (Bush)、海增 (H. Hazen) 和维纳 (N. Wiener) 等人 (分别见图 1.9、图 1.10 和图 1.11) 合作建立了世界上第一台模拟计算机 (differential analyzer) (见图 1.12)。在此期间，海增还完成了伺服机构理论的基础研究，并于 1934 年发表了两篇文章，一篇是关于伺服机构理论的，另一篇是关于高性能伺服机构的设计与测试的。他在文章中第一次使用了“伺服机构 (servomechanism)”这个术语，明确指出负反馈能够使伺服机构系统的行为性能主要取决于输入与输出之间的偏差，并能够明显地减少放大器中参数变化及其非线性所带来的影响。

“伺服” (servo) 一词源于拉丁语，其含义为“奴隶”。一个伺服机构是利用负反馈原理引入的一个控制行为，使输出服从于输入的一类系统。伺服机构是通过反馈，使用检测到的偏差来修正机械性能的自动装置。它首先被用在火炮瞄准器以及海上导航的装置