



21st CENTURY
实用规划教材

21世纪全国应用型本科

大机械系列 实用规划教材



机械工程控制基础

主 编 韩致信



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

TH-39/97

2008

21 世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材

机械工程控制基础

主 编 韩致信



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书主要讨论自动控制系统的一般分析和综合方法及基本理论, 主要内容包括: 绪论, 控制系统的数学模型, 控制系统的时域分析法, 控制系统的频域分析法, 控制系统的综合与校正, 离散控制系统。

作为机械类专业本、专科基础教材, 本书涵盖了经典控制理论的基本原理和基本知识, 内容与机械类研究生课程现代控制理论相衔接。

本书可作为高等院校近机类专业本、专科学生学习控制工程基础课程的教材或参考书, 也可作为从事机械工程和电气工程工作的技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程控制基础/韩致信主编. —北京: 北京大学出版社, 2008.1

(21世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材)

ISBN 978-7-301-12354-6

I. 机… II. 韩… III. 机械工程—控制系统—高等学校—教材 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 083161 号

书 名: 机械工程控制基础

著作责任者: 韩致信 主编

责任编辑: 郭穗娟

标准书号: ISBN 978-7-301-12354-6/TH·0015

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 河北滦县鑫华书刊印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787mm×1092mm 16开本 15.5印张 354千字

2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

定 价: 25.00元

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

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

丛书总序

殷国富*

机械是人类生产和生活的基本工具要素之一，是人类物质文明最重要的一个组成部分。机械工业担负着向国民经济各部门，包括工业、农业和社会生活各个方面提供各种性能先进、使用安全可靠的技术装备的任务，在国家现代化建设中占有举足轻重的地位。20世纪80年代以来，以微电子、信息、新材料、系统科学等为代表的新一代科学技术的发展及其在机械工程领域中的广泛渗透、应用和衍生，极大地拓展了机械产品设计制造活动的深度和广度，改变了现代制造业的产品设计方法、产品结构、生产方式、生产工艺和设备以及生产组织模式，产生了一大批新的机械设计制造方法和制造系统。这些机械方面的新方法和系统的主要技术特征表现在以下几个方面：

(1) 信息技术在机械行业的广泛渗透和应用，使得现代机电产品已不再是单纯的机械构件，而是由机械、电子、信息、计算机与自动控制等集成的机电一体化产品，其功能不仅限于加强、延伸或取代人的体力劳动，而且扩大到加强、延伸或取代人的某些感官功能与大脑功能。

(2) 随着设计手段的计算机化和数字化，CAD/CAM/CAE/PDM 集成技术和软件系统得到广泛使用，促进了产品创新设计、并行设计、快速设计、虚拟设计、智能设计、反求设计、广义优化设计、绿色产品设计、面向全寿命周期设计等现代设计理论和技术方法的不断发展。机械产品的设计不只是单纯追求某项性能指标的先进和高低，而是注重综合考虑质量、市场、价格、安全、美学、资源、环境等方面的影响。

(3) 传统机械制造技术在不断吸收电子、信息、材料、能源和现代管理等方面成果的基础上形成了先进制造技术，并将其综合应用于机械产品设计、制造、检测、管理、销售、使用、服务的机械产品制造全过程，以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产，提高对动态多变的市场的适应能力和竞争能力。

(4) 机械产品加工制造的精密化、快速化，制造过程的网络化、全球化得到很大的发展，涌现出 CIMS、并行工程、敏捷制造、绿色制造、网络制造、虚拟制造、智能制造、大规模定制等先进生产模式，制造装备和制造系统的柔性可与重组已成为 21 世纪制造技术的显著特征。

(5) 机械工程的理论基础不再局限于力学，制造过程的基础也不只是设计与制造经验及技艺的总结。今天的机械工程学科比以往任何时候都更紧密地依赖诸如现代数学、材料科学、微电子技术、计算机信息科学、生命科学、系统论与控制论等多门学科及其最新成就。

上述机械科学与工程特征和发展趋势表明，现代机械工程学科越来越多地体现着知识经济的特征。因此，加快培养适应我国国民经济建设所需要的高综合素质的机械工程学科人才的意义十分重大、任务十分繁重。我们必须通过各种层次和形式的教育，培养出适应世界机械工业发展潮流与我国机械制造业实际需要的技术人才与管理人才，不断推动我国机械科学与工程技术的进步。

为使机械工程学科毕业生的知识结构由较专、较深、适应性差向较通用、较广泛、适

*殷国富教授：现为教育部机械学科教学指导委员会委员，现任四川大学制造科学与工程学院院长

应性强方向转化,在教育部的领导与组织下,1998年对本科专业目录进行了第3次大的修订。调整后的机械类专业变成4类8个专业,它们是:机械类4个专业(机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、过程装备与控制、工业设计);仪器仪表类1个专业(测控技术与仪器);能源动力类2个专业(热能与动力工程、核工程与核技术);工程力学类1个专业(工程力学)。此外还提出了面向更宽的引导性专业,即机械工程及自动化。因此,建立现代“大机械、全过程、多学科”的观点,探讨机械科学与工程学科专业创新人才的培养模式,是高校从事制造学科教学的教育工作者的责任;建立培养富有创新能力人才的教学体系和教材资源环境,是我们努力的目标。

要达到这一目标,进行适应现代机械学科发展要求的教材建设是十分重要的基础工作之一。因此,组织编写出版面向大机械学科的一系列教材就显得很有意义和十分必要。北京大学出版社和中国林业出版社的领导和编辑们通过对国内大学机械工程学科教材实际情况的调研,在与众多专家学者讨论的基础上,决定面向机械工程学科类专业的学生出版一套系列教材,这是促进高校教学改革发展的重大决策。按照教材编审委员会的规划,本系列教材将逐步出版。

本系列教材是按照高等学校机械学科本科专业规范、培养方案和课程教学大纲的要求,合理定位,由长期在教学第一线从事教学工作的教师立足于21世纪机械工程学科发展的需要,以科学性、先进性、系统性和实用性为目标进行编写,以适应不同类型、不同层次和学校结合学校实际情况的需要。本系列教材编写的特色体现在以下几个方面:

(1) 关注全球机械科学与工程学科发展的大背景,建立现代大机械工程学科的新理念,拓宽理论基础和专业基础知识,特别是突出创造能力和创新意识。

(2) 重视强基础与宽专业知识面的要求。在保持较宽学科专业知识的前提下,在强化产品设计、制造、管理、市场、环境等基础理论方面,突出重点,进一步密切学科内各专业知识面之间的综合内在联系,尽快建立起系统性的知识体系结构。

(3) 学科交叉与综合的观念。现代力学、信息科学、生命科学、材料科学、系统科学等新兴学科与机械学科结合的内容在系列教材编写中得到一定的体现。

(4) 注重能力的培养,力求做到不断强化自我的自学能力、思维能力、创造性地解决问题的能力以及不断自我更新知识的能力,促进学生向着富有鲜明个性的方向发展。

总之,本系列教材注意了调整课程结构,加强学科基础,反映系列教材各门课程之间的联系和衔接,内容合理分配,既相互联系又避免不必要的重复,努力拓宽知识面,在培养学生的创新能力方面进行了初步的探索。当然,本系列教材还需要在内容的精选、音像电子课件、网络多媒体教学等方面进一步加强,使之能满足普通高等院校本科教学的需要,在众多的机械类教材中形成自己的特色。

最后,我要感谢参加本系列教材编著和审稿的各位老师所付出的大量卓有成效的辛勤劳动,也要感谢北京大学出版社的领导和编辑们对本系列教材的支持和编审工作。由于编写的时间紧、相互协调难度大等原因,本系列教材还存在一些不足和错漏。我相信,在使用本系列教材的教师和学生的关心和帮助下,不断改进和完善这套教材,使之在我国机械工程类学科专业的教学改革和课程体系建设中起到应有的促进作用。

2006年1月

前 言

我们所处的时代被称为信息技术时代，站在时代之巅，放眼世界，瞧——
一圈圈信息网络正在上传下达、争分夺秒地传送无穷无尽的信息；
一艘艘宇宙飞船正在遨游太空、夜以继日地探索浩瀚星空的奥秘；
一台台发电机组正在开足马力、源源不断地发出用之不竭的电能；
一条条生产线正在隆隆运转、不知疲倦地创造取之不尽的财富；
一个个机器人正在埋头苦干、无私无畏地从事繁重危险的劳动；
一套套交通信号系统正在站岗执勤、风雨无阻地指挥车流、人流和飞机轮船；
这一幅幅画面是那样的美妙神奇，令人不禁思绪纷纷、感慨万千·····

比如“上九天揽月，下五洋捉鳖”，这在几十年前还只是人们的梦想，只能在神话传说或童话小说中看到一星半点想象的灵光，可哪知如今这梦想已经成真，人类还真的上至九天月宫、下至东海龙宫，处处留下了“到此一游”的足迹。

又比如，“千里眼”和“顺风耳”是神话小说《西游记》中的天神，然而今天，人类发明了射电天文望远镜，用它瞭望，岂止千里，万里星空也是洞若观火；人类创造了信息网络，用它辨听，不借顺风，也让“秀才不出门，全知天下事”。

再比如，当前迅猛发展日趋成熟的纳米技术、克隆技术、基因控制技术等，几十年前即使最乐观最富于想象的预言家也不敢想象，今天却已经渗透到人们的日常生活、已经改变了并且正在更深入地改变着世界的面貌。

·····

凡此种种，都是建立在机械技术和自动控制技术基础之上的。如今的机械，种类之多可谓无所不有，应用之广可谓无孔不入，功能也实现了数控化、柔性化、集成化、自动化和智能化，真正延伸、加强、扩大甚至在一定程度上取代了人的能动作用。自动控制已成为普遍控制方式，大到航天飞机、航空母舰，小到电动玩具、电子手表，等等，都离不开自动控制。机械功能的数控化、柔性化、集成化、自动化和智能化也是建立在自动控制技术基础之上的。

机械工程和控制工程，这两大学科可以说是一对形影不离、相得益彰的孪生兄弟。任何机械都离不开控制技术，反过来说控制技术离开机械也就成了无本之木。

作为自动控制技术的结晶，自动控制理论不仅是一门重要的技术学科，还是一门卓越的自然辩证法，处处贯穿着系统的观点、运动的观点、内因外因的观点、事物相互作用相互联系的观点、主要矛盾和次要矛盾的观点等，闪烁着辩证法的光芒。这些对于启迪人们的思想，培养和提高人们分析问题和解决问题的能力是十分有益的。学习和掌握这门学科的基本理论和知识，对于当今的机械和电子工程师来说是十分必要的。因此，现在自动控制理论不仅是高等院校自动化和电子信息类专业本专科学生的必修课，也是机械类专业本、专科学生的必修课。

作为机械类专业本专科学生学习控制理论的基础教材，本书内容涵盖了经典控制理论

的基本原理和基本知识，恰好地与机械类研究生课程现代控制理论相衔接。

本书主要是为满足应用型大学的教学需要编写的，在编写中，编者充分考虑了学生的基础知识状况，尤其重视处理好以下几个关系。

1. 加与减

在选材上，本书坚持为机械服务、机电结合、实用够用、吐故纳新的原则，着重介绍有较高理论和应用价值的基本原理和方法，舍弃了那些没有普遍应用意义或与研究生阶段的课程内容联系不紧密或重复的内容，增加了与计算机控制有关的新内容。

2. 简与繁

本书对重点和难点，着重演绎论证；对一般和简单内容，予以概括说明。力求做到重点突出、繁简适中。针对每一个重点和难点内容，配置了例题，有些内容直接用例题予以阐释，将深奥的原理简单明了地贯穿和溶解于具体的应用方法之中。

3. 鱼与渔

本着“授人以鱼不如授人以渔”的理念，本书注重从方法论的角度，论述如何观察思考问题，抽象概括问题，分析解决问题，以求提高学生认识、分析和解决问题的能力。

4. 因与果

本书力求将认识论的观点和方法贯穿于演绎论证之中，对一般内容，从因到果、由表及里、由此及彼，循序渐进地予以阐释，以求条理清晰；对复杂深奥的内容，运用因果倒置、先果后因、先识后证的方法进行倒叙，以求深入浅出、通俗易懂；对于交叉引用和应用的内容，注重前呼后应、相互印证，以使学生会融会贯通。

5. 点、线、面与体

控制理论的许多定理都是由一系列知识点、线、面构成的体系，合理划分和恰当布置点、线、面、体内容，有助于学生对定理的认知和理解。根据不同特点和难度，对有些定理，按照由点到线、由线到面、由面到体、或由个性到共性、由浅入深的方式进行求证和推论；对有些定理，反其道而行之，采用化整为零、各个击破的方式进行论证。

6. 透与精

在论述方面，本书除了注重逻辑性、通俗性、汉语语法规范性等以外，还特别重视处理好分析透彻与文字精练两者间的关系。在分析透彻的前提下力求文字精练，在文字精练的基础上力求分析透彻。

抱着写一本好书，出一部精品的愿望，编者在编写过程中付出了艰辛的劳动。特别是张洁、杨萍和姚运萍等同志也对本书进行了仔细审阅和精心校对，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平所限，书中疏漏在所难免，恳请广大读者不吝赐教。编者联系邮箱是 hanzx@lut.cn 或 hanzx_rob@sina.com。

编者
2007年8月

目 录

第 1 章 绪论..... 1	习题二..... 43
1.1 引言..... 1	第 3 章 控制系统的时域分析法..... 46
1.2 自动控制的基本控制方式及 自动控制系统的组成..... 2	3.1 控制系统的稳定性分析..... 46
1.2.1 开环控制..... 2	3.1.1 判定线性系统稳定性的 基本准则..... 46
1.2.2 闭环控制..... 3	3.1.2 劳斯稳定性判据..... 49
1.2.3 复合控制..... 4	3.2 控制系统的瞬态响应分析..... 54
1.2.4 自动控制系统的基本组成..... 5	3.2.1 一阶系统的单位阶跃响应..... 55
1.3 自动控制系统的类型..... 7	3.2.2 二阶系统的单位阶跃响应..... 56
1.3.1 按输入信号的运动规律 进行分类..... 7	3.2.3 系统的瞬态响应性能指标..... 60
1.3.2 按系统元件的信号特性或 描述系统动态特性的数学 模型进行分类..... 7	3.2.4 高阶系统单位阶跃响应的 一般规律..... 68
习题一..... 9	3.3 控制系统的误差分析..... 71
第 2 章 控制系统的数学模型..... 10	3.3.1 有关稳态误差的基本概念..... 72
2.1 拉普拉斯变换..... 10	3.3.2 典型控制信号作用下系统的 稳态误差和稳态误差系数..... 73
2.1.1 拉氏变换及其性质..... 10	3.3.3 有扰动外作用时系统的 稳态误差..... 79
2.1.2 拉氏逆变换..... 18	习题三..... 80
2.2 微分方程..... 20	第 4 章 控制系统的频域分析法..... 83
2.2.1 线性单元(泛指元件或系统, 下同)的微分方程..... 20	4.1 频率特性定义..... 83
2.2.2 线性定常微分方程的 拉氏变换解法..... 24	4.2 频率特性几何表示法..... 86
2.2.3 线性系统的重要特性..... 25	4.2.1 幅相频率特性图..... 86
2.3 传递函数..... 25	4.2.2 对数频率特性图..... 97
2.3.1 传递函数基本概念..... 25	4.3 闭环系统的频率特性..... 112
2.3.2 系统的特征根、极点和零点... 27	4.3.1 闭环系统的频率特性..... 112
2.3.3 传递函数的一般表达式..... 28	4.3.2 控制系统频域性能指标..... 112
2.3.4 基本环节及其传递函数..... 28	4.4 最小相位传递函数与最小 相位系统..... 115
2.4 系统的结构图及其等效变换..... 33	4.5 控制系统稳定性的频域分析法..... 117
2.4.1 结构图符号及系统结构图..... 33	4.5.1 奈奎斯特稳定性判据..... 117
2.4.2 结构图的等效变换..... 35	4.5.2 奈奎斯特稳定性判据 的推论..... 129

4.5.3 系统的相对稳定性.....	133	6.2 信号的采样、保持及转换.....	187
4.5.4 高阶系统时域性能指标与频 域性能指标间的近似关系.....	138	6.2.1 采样过程.....	187
习题四.....	139	6.2.2 采样定理.....	190
第 5 章 控制系统的综合与校正.....	143	6.2.3 零阶保持器.....	192
5.1 系统综合与校正概述.....	143	6.2.4 A/D 与 D/A 转换.....	194
5.1.1 系统设计指标.....	143	6.3 Z 变换及其反变换.....	195
5.1.2 系统设计的一般过程和 系统校正的基本概念.....	144	6.3.1 Z 变换.....	196
5.2 基本控制规律.....	146	6.3.2 Z 反变换.....	206
5.2.1 比例(P)控制律.....	147	6.4 离散系统的数学模型.....	209
5.2.2 比例微分(PD)控制律.....	147	6.4.1 差分方程及其解法.....	209
5.2.3 积分(I)控制律.....	148	6.4.2 脉冲传递函数.....	211
5.2.4 比例积分(PI)控制律.....	149	6.5 离散系统的稳定性分析.....	216
5.2.5 比例积分微分(PID)控制律....	150	6.5.1 [s]平面到[z]平面的映射.....	216
5.3 串联校正.....	151	6.5.2 离散系统稳定的充分 必要条件.....	217
5.3.1 串联超前校正.....	151	6.5.3 W 变换及基于 W 变换的 离散系统的稳定性分析.....	218
5.3.2 串联滞后校正.....	158	6.6 离散系统的稳态误差分析.....	223
5.3.3 串联滞后-超前校正.....	164	6.6.1 离散系统稳态误差的 计算方法.....	223
5.3.4 串联校正综合法.....	169	6.6.2 离散系统的型别与 稳态误差系数.....	223
5.4 反馈校正.....	173	6.7 离散系统的瞬态响应分析.....	225
5.4.1 反馈校正作用.....	173	6.7.1 瞬态响应分析方法.....	225
5.4.2 确定反馈校正装置的 综合法.....	176	6.7.2 采样器和零阶保持器对 系统动态性能的影响.....	227
5.5 顺馈校正与复合控制系统.....	180	6.7.3 闭环脉冲传递函数极点分布 与系统瞬态响应的关系.....	229
5.5.1 按输入补偿的复合 控制原理.....	180	习题六.....	232
5.5.2 按扰动补偿的复合 控制原理.....	182	参考文献.....	234
习题五.....	183		
第 6 章 离散控制系统.....	185		
6.1 有关离散控制系统的基本概念.....	185		

第 1 章 绪 论

内容提示: 本章介绍有关自动控制系统的基本概念, 包括自动控制系统的控制方式、组成和类型等。

教学要求: 弄清自动控制系统的控制方式和基本组成, 理解并熟记有关术语的定义和含义。

1.1 引 言

本书主要讨论有关自动控制系统的基本理论和研究方法。

所谓自动控制, 指的是在没有人直接参与的情况下, 利用控制器自动调节和控制机器设备或生产过程(统称为被控对象)的工作状态、使之保持不变或按预定规律变化的一种技术。

自动控制技术可使生产过程具有高度的准确性, 能有效地提高产品的性能和质量并同时节约能源和降低材料消耗; 能极大地提高劳动生产率并同时改善劳动条件和减轻劳动强度; 能有效地提高各种武器装备的命中率、增强攻击能力, 等等。

自动控制系统广泛存在于国民经济的各行各业、方方面面。例如, 能按预先设定的工艺程序自动切削工件, 从而加工出预期几何形状的数控机床和加工中心; 能按照预定航行轨迹自动升降和飞行的无人驾驶飞机; 能自动发射导弹并将其引导到被攻击目标的导弹发射系统和制导系统; 等等, 这些都是自动控制系统。

由于用途的不同, 自动控制系统的物理结构和组成千差万别, 但它们有一个共同的特点和规律, 即系统内部的一个(或一些)物理量按照预定的方式自动地控制另一个(或另一些)物理量, 使之保持不变或按照期望的方式变化。这种用一个(或一些)物理量按照预定的方式自动地控制另一个(或另一些)物理量, 使之保持不变或按照期望的方式变化的普遍规律是自动控制技术的精髓, 研究和表述这种普遍规律的理论体系就是自动控制理论。

自动控制理论作为一门独立的学科, 始于 20 世纪 40 年代, 经过半个多世纪的发展, 现在已经形成了一个庞大的体系, 有很多分支。根据发展阶段的特点, 这一理论体系可分为经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论三大部分。

经典控制理论是以传递函数为数学基础的一种理论, 应用该理论能方便而简单地分析和设计单输入单输出线性定常系统。

现代控制理论是以状态空间模型和矩阵理论为基础的一种理论, 应用该理论能分析和设计多输入多输出系统, 这些系统可以是定常的, 也可以是时变的, 可以是线性的, 也可以是非线性的, 可以是连续的, 也可以是离散的。

智能控制理论是以人工智能和运筹学为基础的一种理论, 应用该理论可以分析和设计存在干扰、环境和参数变化及模型误差等因素的未知系统。

作为自动控制理论的基础性教材，本书主要讨论经典控制理论。

1.2 自动控制的基本控制方式及自动控制系统的组成

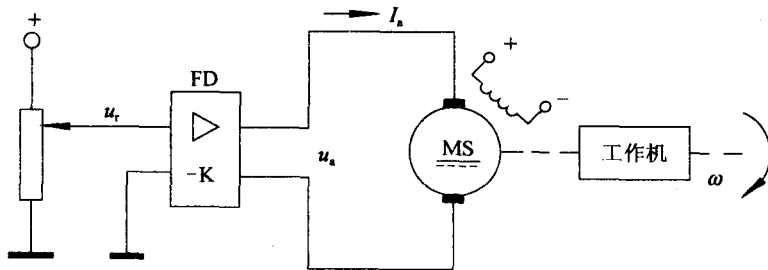
自动控制的基本控制方式有三种，即开环控制、闭环控制、复合控制。

1.2.1 开环控制

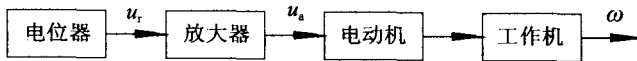
图 1.1(a)所示为由电位器、放大器(FD)、直流电动机 MS 及工作机组成的一个最简单的速度控制系统的物理模型。该系统的任务是控制工作机的转速，使之保持期望值，其工作原理如下：

工作机转速 ω 的大小取决于电动机的转速，电动机的转速又取决于其电枢电压 u_a ，电枢电压 u_a 是放大器的输出电压，其大小正比于电位器电压 u_r 。由于各元件的输入和输出特性是一定的，所以，工作机的转速 ω 取决于电位器电压 u_r 。当 u_r 一定时， ω 也是一定的，欲改变 ω ，只须改变 u_r 。 u_r 和 ω 之间存在一一对应关系。该系统的被控制对象是工作机，称为被控对象，被控制的物理量是工作机转速 ω ，称为系统的被控量(也称输出量或输出信号)；用来控制 ω 变化的原始物理量是电位器电压 u_r ，它是预先给定的系统输入电压，称为系统的参考输入量(也称输入量或输入信号或控制信号)；产生输入量的电位器称为输入元件或给定元件。

根据工作时信号的变换过程，上述工作原理可用如图 1.1(b)所示的结构框图表示。图中的方框表示构成系统的元件(或装置)及其特性，矢线表示系统中的信号(亦即物理量)及其传递方向。从该图可以看出，在这个速度控制系统中，信号的传递是单方向的，只存在输入端对输出端的顺向作用，而没有输出端对输入端的反作用，这样的控制称为开环控制，相应的系统称为开环控制系统。



(a) 开环控制系统物理模型



(b) 开环控制系统工作原理框图

图 1.1 开环速度控制系统结构图

开环控制系统的特点是结构简单、容易实现且便于调整，缺点是抗干扰能力差。系统内部扰动(如组成元件因摩擦发热而产生的性能漂移)和外部扰动(如工作机负载的变化)都会引起实际输出量偏离期望值。一旦输出量偏离了原期望值，系统本身无能力纠正，只有

通过重新调整输入量来纠正。因此，开环控制系统的控制精度取决于系统的校准精度及其保持校准值的能力。

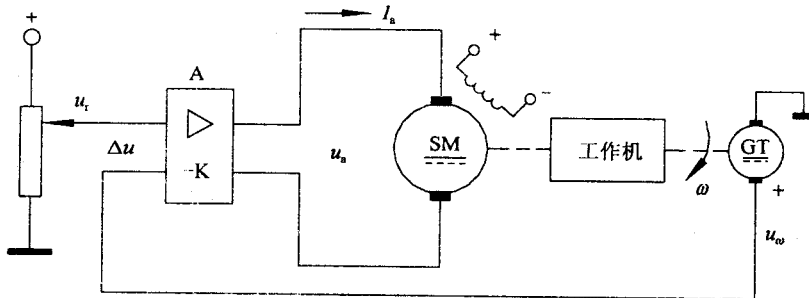
开环控制系统在国民经济的各个部门有着广泛的应用，如自动售货机、自动洗衣机、自动生产线、数控机床以及用于交通指挥的红绿灯控制系统等，都是开环控制系统。

1.2.2 闭环控制

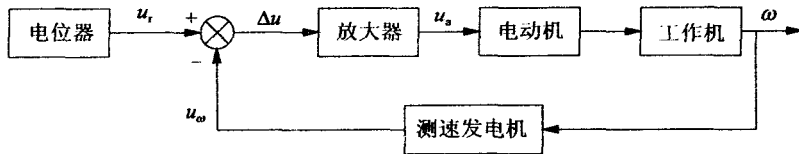
图 1.2(a)所示系统是在图 1.1(a)所示系统的基础上引进直流测速发电机和反向串接电路而成的，其任务也是控制工作机的转速 ω ，使之保持期望值。该系统的参考输入量也是电位器电压 u_r ，输出量仍是工作机转速 ω ，其工作原理如下：

测速发电机的轴固联于工作机轴上，当工作机轴旋转时，测速发电机的电枢两端产生一个正比于转速 ω 的电压 u_w ，该电压被传输到输入端，与输入电压 u_r 反向串联，形成电压差信号 $\Delta u = u_r - u_w$ ， Δu 送入放大器放大后变为电动机电枢电压 u_a ， u_a 使电动机旋转，电动机驱动工作机做功。与图 1.1 所示的开环速度控制系统不同，这个控制系统能抑制系统内部扰动和外部扰动对被控量的影响，当被控量的实际值因受内外扰动作用而偏离期望值时，系统就自动进行调节，以使其重新趋于期望值。例如，假设与系统参考输入量(电位器电压) u_r 对应的输出量(工作机转速)是期望值 ω ，如果系统内外扰动导致实际输出量 $\tilde{\omega}$ 大于期望值 ω ，则测速发电机电压 u_w (u_w 正比于 $\tilde{\omega}$) 将会随之增大，当 u_w 增大时，电压差信号 $\Delta u = u_r - u_w$ 就减小， Δu 一减小， u_a 就随之减小。因 u_a 是电动机电枢电压，所以 u_a 的减小必然使电动机转速下降。这一调节过程不断进行，直到工作机转速重新趋于期望值 ω 为止。反之，如果内外扰动使实际输出量 $\tilde{\omega}$ 小于期望值 ω ，则测速发电机电压 u_w 将会随之减小，从而电压差信号 $\Delta u = u_r - u_w$ 将增大，进而电动机电枢电压 u_a 也将随之增大，于是电动机转速将上升。这一调节过程不断进行，直到工作机转速重新趋于期望值 ω 为止。由此可见，只要实际输出量 $\tilde{\omega}$ 不等于期望值 ω ，系统就自动进行调节，以使其朝着期望值的方向变化。同时，从上述调节过程可以看出，在该系统中，真正起控制作用的信号已不再是输入量本身 u_r ，而是由输入量 u_r 和正比于输出量 ω 的测速发电机电压 u_w 两者形成的电压差 Δu 。

从工作时信号的变换过程来看，上述工作原理可用如图 1.2(b)所示的结构框图表示。图中，图形符号 \otimes 表示两个信号相叠加(由反向串联电路实现)，正负号表示两个叠加信号极性相反。从该图可以看出，在这个速度控制系统中，输入端对输出端有顺向作用，而输出端对输入端也有反向作用。换言之，信号的传递不再是单方向的，而是从输入端传输到输出端，又从输出端传输到输入端，形成了一个封闭的环链，这样的控制称为闭环控制，相应的系统称为闭环控制系统。



(a) 系统物理模型



(b) 系统工作原理框图

图 1.2 闭环速度控制系统结构图

在闭环控制系统中，输出端对输入端的反向作用称为反馈，从输出端引出并直接或经变换后传输到输入端去的信号称为反馈信号。由输入信号和反馈信号反向叠加后形成的信号称为偏差信号。偏差信号通常是由被称为比较元件的电路或机构产生的。由于闭环控制是以信号反馈为前提的，故闭环控制和闭环控制系统又有反馈控制和反馈控制系统之称。

在闭环控制系统中，真正起调节作用的信号已不再是输入量，而是偏差信号，这与开环控制系统有着明显的不同。闭环控制系统的最大优点是能抑制系统内部扰动和外部扰动对被控量的影响，使被控量保持在期望值上。换言之，闭环控制系统具有自动纠正输出量偏离期望值的能力。因此，在闭环控制系统中，可用精度较低的元件实现精度较高的控制，而这在开环控制系统中是无法实现的。

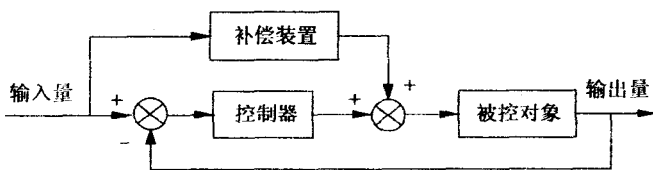
闭环控制系统的缺点是使用的元件多、线路复杂、成本高，系统分析和综合也比较麻烦，如果参数选配不当，系统还会产生振荡甚至无法正常工作。另外，由于真正起控制作用的信号是偏差信号，系统要调节就必须有偏差存在，所以实际输出量一般不可能与由输入量和控制规律规定的期望值完全保持一致，只能趋于期望值，也就是说输出量的实际值与期望值之间是有误差的。这种误差完全是原理性的，不是因为系统受到内部或外部扰动而产生的。

一般来说，当系统元件本身的参数稳定而又没有外部扰动作用且系统的输入量能够预先确定时，多采用开环控制，否则，采用闭环控制。

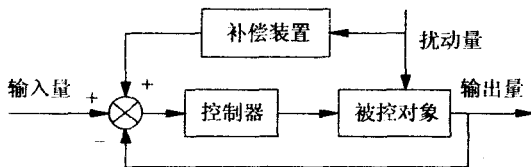
1.2.3 复合控制

复合控制系统是在闭环控制系统的基础上再附加一条开环控制通路而形成的一种控制系统。典型的复合控制系统结构图如图 1.3 所示。在这种控制系统中，附加的开环控制通路的作用主要是提供一个输入补偿量，以补偿由闭环系统的原理性误差或内外扰动引起的控制精度之不足并同时改善系统的动态性能。按照补偿对象的不同，补偿方式分为按输入量的补偿[见图 1.3(a)]和按扰动量的补偿[见图 1.3(b)]两种。前者的补偿作用主要是给控制量提供一个补偿量，以减小或消除存在于闭环系统的原理性误差；后者的补偿作用主要是事先给扰动量提供一个补偿量，以减小或消除扰动对输出量的影响。

复合控制系统具有控制精度高、动态性能好的优点，应用十分广泛。目前，在火炮、雷达、飞机自动驾驶仪等对控制精度和动态性能两者同时要求较高的控制系统中，一般都采用复合控制。



(a) 按输入量补偿的复合控制



(b) 按扰动量补偿的复合控制

图 1.3 复合控制系统结构图

1.2.4 自动控制系统的基本组成

1. 自动控制系统的基本组成

任何一个自动控制系统，不论是电气的还是机械的、也不论是简单的还是复杂的，都是由一些基本元件组成的。按照职能作用来区分，这些基本元件及其在系统中的相互联系可用图 1.4 表示，现分述如下。

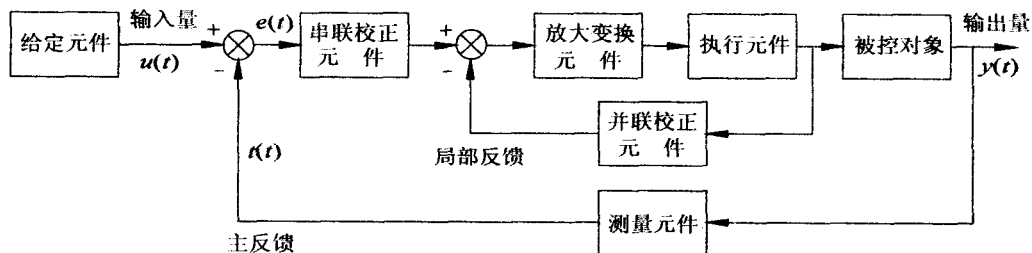


图 1.4 反馈控制系统基本组成

输入元件(又称给定元件): 其职能是产生与输出量的期望值相对应的系统输入量。图 1.2 所示闭环速度控制系统中的电位器即是输入元件。

反馈元件: 其职能是产生与输出量有一定函数关系的反馈信号。这种反馈信号可能是输出量本身，也可能是输出量的函数。在图 1.2 所示闭环速度控制系统中，测速发电机是反馈元件。

比较元件: 其职能是比较由给定元件给出的输入量和由反馈元件传来的反馈信号，并产生反映两者差值的偏差信号。在图 1.2 所示闭环速度控制系统中，偏差信号是电压差 Δu ，比较元件是给定电压 u_i 和反馈电压 u_o 的反向串联电路。

放大变换元件: 其职能是把比较元件给出的偏差信号进行放大并完成不同能量形式的转换，使之具有足够的幅值、功率和需要的信号形式，以便驱动执行元件去控制被控对象。由电子管、晶体管、集成电路、闸流晶体管等组成的电压和功率放大器是常用的电信号放

大元件, 电液伺服阀是把电能变换为液压能的能量变换和放大元件。

执行元件: 其职能是直接驱动被控对象运动, 以使被控量(亦即输出量)发生变化。常用的执行元件有各种电动机、液压马达、液压缸等。

被控对象: 就是控制系统所要操纵和控制的对象。在图 1.2 所示闭环速度控制系统中, 被控对象是工作机。

校正元件(又称校正装置): 其职能是校正系统的品质特性使之达到技术指标要求。

在工程实际中, 比较元件、放大元件及校正元件常常合并在一起形成一个装置, 这样的装置称为控制元件或控制器。

2. 自动控制系统的基本变量及表示符号

视系统构成和考察问题角度的不同, 控制系统的变量是形形色色不胜枚举的, 有些具有物理意义(亦即是物理量), 有些只具有数学意义没有物理意义(亦即是纯数学量), 但就其在系统中的共性职能来说, 可分为以下一些基本变量。

输入信号(又称输入量或给定量、控制量或控制信号) $u(t)$: 为控制输出信号按预定规律变化必须提供给系统的物理量。

输出信号(又称输出量或被控量) $y(t)$: 与输入信号存在一定函数关系的物理量, 其变化规律是系统控制的对象, 必须按规定的方式变化。

反馈信号 $b(t)$: 从输出端或中间环节引出来并直接或经过变换以后传输到输入端比较元件中去的信号(或者是从输出端引出来并直接或经过变换以后传输到中间环节比较元件中去的信号)。

反馈信号有正负之分, 如果引入比较元件的反馈信号的方向与输入信号的方向相同, 那么这两个信号比较(叠加)的结果使得控制作用增强了, 这样的反馈称为正反馈, 反馈信号为正; 反之, 如果引入比较元件的反馈信号的方向与输入信号的方向相反, 则两者比较(叠加)的结果使控制作用减小了, 这样的反馈称为负反馈, 反馈信号为负。

另外, 反馈有主反馈和局部反馈之分。从输出端到输入端的反馈称为主反馈, 从中间环节到输入端或者从输出端到中间环节的反馈称为局部反馈。如果系统的主反馈信号直接取自系统的输出端而不经任何变换, 即 $b(t) = y(t)$, 则这样的系统称为单位反馈系统; 反之, 如果系统的主反馈信号是由输出信号经反馈元件变换而得, 那么这样的系统就是非单位反馈系统。

偏差信号(简称偏差) $e(t)$: 是比较元件的输出, 等于输入信号与主反馈信号之差, 即 $e(t) = u(t) - b(t)$ 。在单位反馈系统中, 主反馈元件只有信号测量和传递功能而无变换功能, 因而主反馈信号就等于输出信号, 即 $b(t) = y(t)$, 故偏差就等于输入信号与输出信号之差, 即 $e(t) = u(t) - y(t)$ 。

偏差信号只存在于闭环系统之中, 它是闭环控制系统的实际控制信号。换言之, 在闭环控制系统中, 真正起调节和控制作用的信号不是控制信号(亦即输入信号)本身, 而是由控制信号和主反馈信号通过比较元件形成的偏差信号。

误差信号(简称误差) $\varepsilon(t)$: 输出信号的期望值与实际值之差。由于输出信号的期望值只是一个理想值, 在实际系统中是无法测量的, 故误差是一个理论值。

扰动信号 $n(t)$: 系统本身不需要的、来自系统内部和外部的、对系统输出信号产生影

响的一切干扰信号通称为扰动信号,例如,由电源电压波动、环境温度和湿度变化及压力的变化、负载变化等引起的各种干扰系统正常工作的信号。尽管扰动信号是有害信号,但它是客观存在,对系统来说也是一种输入外作用,故也把它归入输入信号的范畴。

值得一提的是,在自动控制工程这门学科中,信号和变量这两个术语不加区分,信号也即变量,变量也即信号。正因为此,以上许多术语都有多种称法。在后续讨论中,为叙述方便,通常此处用信号一词而在彼处用变量一词。

1.3 自动控制系统的类型

由于自动控制技术发展很快,应用很广,加之看问题的角度不同,因此自动控制的分类方法很多。

1.3.1 按输入信号的运动规律进行分类

按输入信号的运动规律来分类,控制系统可分为以下3种类型。

1. 恒值控制系统(又称自动调节系统)

恒值控制系统的特点是输入信号(参考输入量)是一个恒值,控制任务是尽量消除干扰的影响,使输出信号以一定的准确度保持在期望值上。在生产过程中,用来控制温度、湿度、压力、流量、电压、电流、频率、速度等的自动控制系统多为恒值控制系统。

2. 程序控制系统

程序控制系统的特点是输入信号按预先设定的规律(或程序)变化,亦即输入信号是随时间变化的已知函数。数控机床就是一个典型的程序控制系统。

3. 随动控制系统(又称自动跟踪系统)

随动控制系统的输入信号是预先未知的随时间任意变化的函数,系统的任务是使输出信号以尽可能小的误差跟随输入信号的变化。例如,雷达自动跟踪系统、火炮自动瞄准系统、各种电信号记录仪等都是随动控制系统。

1.3.2 按系统元件的信号特性或描述系统动态特性的数学模型进行分类

按照系统元件的信号特性或描述系统动态特性的数学模型来分类,控制系统可分为如下一些类型。

1. 线性系统和非线性系统

如果组成系统的所有元件的输入/输出信号特性具有线性关系,则这种系统称为线性系统;反之,只要系统中有一个元件的输入/输出特性呈非线性关系,那它就是非线性系统。线性系统的运动规律可用线性微分方程或差分方程来描述,而非线性系统的运动规律只能用非线性微分方程或非线性差分方程来描述。

在工程实际当中,严格来说一切系统都是非线性系统。但许多系统的非线性特性并不很强,把它们当作线性系统来处理,结果与实际差别不大,故为便于研究,一般视为线性

系统。

2. 连续系统和离散系统

若系统中所有信号均为时间 t 的连续函数, 则称这类系统为连续系统; 反之, 只要系统中有一个信号是脉冲序列或数字编码, 则这样的系统称为离散系统。连续系统运动规律可用微分方程来描述, 离散系统运动规律可用差分方程来描述。

3. 定常系统和时变系统

如果组成系统的所有元件的参数不随时间的进程而变化, 那么描述系统运动规律的微分方程或差分方程中的各个系数也不会随时间的进程而变化, 这样的系统称为定常系统。工程实际中的系统, 绝大多数是定常系统, 但也有少数这样的系统, 其组成元件的参数是随时间的延续而变化的, 从而导致描述系统动态特性的微分方程或差分方程中的一个(或几个)系数是时间 t 的函数, 这种系统称为时变系统。运载火箭就是时变系统的例子, 它的质量随时间的延续而变化。

4. 单输入/单输出系统和多输入/多输出系统

所谓单输入/单输出系统(又称单变量系统), 指的是只有一个输入信号和一个输出信号的系统; 而多输入/多输出系统(又称多变量系统)指的是具有多个输入信号和多个输出信号的系统, 包括有一个输入信号多个输出信号的系统和有多个输入信号一个输出信号的系统。

以上这 4 种分类方法表面上看起来各有各的含义, 各自孤立存在, 其实不然, 它们反映的是同一事物的不同侧面。一个系统, 不论它是恒值控制系统还是随动控制系统、亦或程序控制系统, 它都可以既是线性的、又是连续的、还同时是定常的和单变量的, 这样的系统可称为单变量线性定常连续系统。同理, 还有单变量线性时变连续系统、多变量线性定常离散系统等组合称法, 不再一一列举。

最后指出, 尽管自动控制理论是人们伴随着技术实践、在长期广泛研究自动控制系统的一般原理的基础上建立起来的, 反映的是自动控制系统的普遍规律, 但这些普遍规律也存在于一般的物理系统之中, 不为自动控制系统所独有, 况且自动控制系统本身也是物理系统, 自动控制理论也已被广泛应用于其他许多学科, 所以在后续章节的讨论中, 为便于说明原理, 所涉及的系统不一定是真正意义上的自动控制系统, 更多的是易于理解的一般物理系统(或元件), 亦即通常所说的广义动力学系统, 与此相适应, 在表述时, 不再称控制系统, 而直呼系统。