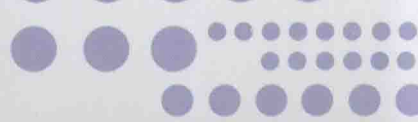


控制理论基础

Kongzhi Lilun Jichu

康宇 王俊 杨孝先 编著



中国科学技术大学出版社

控制理论基础

Kongzhi Lilun Jichu

康 宇 王 俊 杨孝先 编著



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书力图对控制理论的数学工具、重要理论结果与应用给予综合介绍,使读者对控制理论的发展、应用以及控制系统的设计有一个基本了解.全书内容共分为三部分:第一部分(第1~6章)介绍了控制系统的数学模型、运动分析、能控性、能观性、结构分解、实现与稳定性;第二部分(第7章)介绍了自适应控制与自校正设计;第三部分(第8~9章)介绍了最优控制与逆最优控制.本书强调基础性、严谨性和前沿性,对主要结果尽可能从基本概念出发作详尽论述.

本书可作为高等学校数学类、自动化类专业高年级本科生的教材,也可作为普通高校控制科学与工程学科研究生的教材,也可供有关人员参考和自学.

图书在版编目(CIP)数据

控制理论基础/康宇,王俊,杨孝先编著. —合肥:中国科学技术大学出版社, 2014.4

ISBN 978-7-312-03094-9

I. 控… II. ①康… ②王… ③杨… III. 控制论—高等学校—教材
IV. O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 007426 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
<http://press.ustc.edu.cn>
印刷 合肥现代印务有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 710 mm×960 mm 1/16
印张 21.5
字数 349 千
版次 2014 年 4 月第 1 版
印次 2014 年 4 月第 1 次印刷
定价 36.00 元

前 言

本书是以中国科学技术大学数学科学学院、少年班与 2000 班的应用数学专业开设的选修课“控制论”的讲义为基础,再加上近年来控制系统优化方面的最新研究成果编写而成的。该课程从 2000 年开始一直讲授至今,每学期大约 60 学时。

N. Wiener 于 1948 年出版的专著《控制论 (或关于在动物和机器中控制与通信的科学)》,标志着控制论作为科学的一门重要分支正式诞生。借助控制论的研究热潮,一个重要的分支研究领域——控制理论迅猛发展起来了,本书的目的就是介绍这一理论。这是因为,一方面在当今世界各国的高等学校已设有专门研究控制理论的专业,另一方面在中国学术界把控制论的理论与控制理论等同起来。控制理论的特点是以数学模型化方法为主,并应用于自动控制领域。它基本上略去了 Wiener《控制论》中神经生理学和神经病理学的范畴,因而专注于数学与控制问题的处理技术和设计方法。全书共分 9 章。第 1 章是概论,介绍了控制理论的产生、发展、意义、作用与基本模型;第 2 章讨论了控制系统的数学模型;第 3 章讨论了线性控制系统的能控性、能观性与结构分解;第 4 章讨论了系统的稳定性与控制;第 5 章讨论了线性定常系统的实现;第 6 章讨论了最优控制问题;第 7 章讨论了自适应控制问题的提出与自校正设计;第 8 章介绍了与非线性系统稳定、镇定、逆最优控制有关的一些基本概念、基本定理与数学基础;第 9 章讨论了逆最优控制问题。书中配有习题。读者通过对本书的学习,了解控制问题的来源与形成过程,对数学在其中的作用有着基本的认识,掌握控制理论最基本的知识,为今后实际运用控制论的方法与结果打下一定的基础。

本书第 1~2 章由杨孝先编著,第 3~5 章由康宇编著,第 6~9 章由合肥学院自动化教研室王俊编著。全书由杨孝先统稿。在本书的编写过程中,我们得到了中国科学技术大学自动化系丛爽教授的指导,也得到了研究生钱坤宏、付欣欣、杨

红广三位同学的帮助, 在此对他们表示衷心的感谢!

因经验与水平的关系, 本书难免有错漏或不妥之处, 热切期望专家与读者批评指正.

编著者

2013 年 12 月

目 次

前言	i
第 1 章 概论	1
1.1 控制理论的产生与发展	1
1.2 控制的意义与作用	4
1.2.1 控制系统	4
1.2.2 恒值系统与随动系统	6
1.2.3 线性系统与非线性系统	6
1.2.4 连续系统与离散系统	7
1.2.5 单变量系统与多变量系统	7
1.3 控制系统的基本模型	7
第 2 章 控制系统的数学模型	10
2.1 状态空间模型	11
2.1.1 动态方程	11
2.1.2 非线性动态系统的线性化	19
2.2 状态转移矩阵的一般提法	22
2.2.1 线性时变系统的状态转移矩阵	26
2.2.2 线性定常系统的解	32
2.3 离散时间控制系统	38
2.3.1 线性控制系统的离散化	38
2.3.2 离散线性定常控制系统的解法	40
2.4 传递函数模型	42
2.5 传递函数矩阵	45
2.6 传递函数矩阵相互连接的模型	46
2.6.1 串联环节的传递函数矩阵	46
2.6.2 并联环节的传递函数矩阵	48
2.6.3 反馈环节的传递函数矩阵	49

2.6.4 一般的传递函数矩阵.....	51
第 3 章 线性控制系统的能控性与能观性.....	56
3.1 线性控制系统的能控性.....	56
3.2 线性控制系统的能观性.....	65
3.3 能控性与能观性的对偶关系.....	73
3.4 线性定常控制系统的分解.....	74
3.5 离散时间线性系统的能控性与能观性.....	77
第 4 章 稳定性.....	83
4.1 稳定性的概念.....	83
4.2 线性定常系统稳定性的代数判据.....	84
4.3 离散时间线性系统的稳定性.....	87
4.4 线性时变系统的稳定性.....	88
4.5 非线性系统的稳定性.....	89
4.5.1 非线性定常系统的稳定性.....	89
4.5.2 非线性时变系统的稳定性.....	91
4.6 Lyapunov 稳定性理论.....	92
4.6.1 正定函数与负定函数.....	93
4.6.2 Lyapunov 的稳定性判据.....	94
4.6.3 线性系统情形.....	97
4.6.4 构造 Lyapunov 函数的方法.....	100
4.7 稳定性的频率判据.....	106
4.7.1 n 次多项式的稳定性频率判据.....	106
4.7.2 开环传递函数为 $G(s) = Q(s)/P(s)$ 的控制系数的稳定频率判据.....	108
4.7.3 线性定常系统的 Nyquist 稳定性判据.....	109
4.8 稳定性与控制.....	117
4.8.1 输入 - 输出稳定性.....	118
4.8.2 线性反馈控制与稳定性.....	119
4.9 状态渐近估计器与调节器的设计.....	124
4.9.1 状态渐近估计器的构造.....	125
4.9.2 状态渐近估计器与状态调节器的分离原理.....	126
4.9.3 降维状态渐近估计器.....	128
第 5 章 线性定常系统的实现.....	136
5.1 控制系统的外部表示.....	136
5.2 线性定常控制系统的实现.....	142
5.3 最小实现.....	149

5.4	传递函数矩阵的能控实现与能观实现	152
5.5	离散时间控制系统的参数辨识	169
第 6 章	最优控制	174
6.1	性能指标	174
6.1.1	性能的度量	174
6.1.2	最优控制的存在性与唯一性介绍	176
6.2	Bellman 方程与 Pontryagin 最大值原理	177
6.2.1	Bellman 方程与值函数	177
6.2.2	Pontryagin 最大值原理	181
6.2.3	最大值原理的充分条件	184
6.3	一般的最大值原理	185
6.3.1	控制变量受约束的情形	185
6.3.2	只有状态变量受约束的情形	187
6.3.3	一种通用的公式	187
6.4	线性调节器问题与 Riccati 矩阵微分方程	190
6.5	线性调节器问题与稳定性	193
6.6	跟踪给定值问题	201
6.6.1	问题的套用提法	202
6.6.2	问题的正确提法	203
6.6.3	二阶系统跟踪给定值的最优设计	204
6.6.4	多输入 - 多输出系统的跟踪给定值 z 的问题	206
第 7 章	自适应控制	212
7.1	自适应控制的提出与设计方法	212
7.1.1	自适应控制的提出	213
7.1.2	自适应控制的设计方法	214
7.2	基于优化控制策略的自校正器	218
7.2.1	最小方差调节器	219
7.2.2	最小方差控制律	224
7.2.3	最小方差自校正器	229
7.3	LQG 自校正器	232
7.3.1	Kalman 滤波器	233
7.3.2	滤波器与状态观测器的关系分析	237
7.3.3	LQG 系统的分离特性	238
7.3.4	随机系统的最优控制律	238
7.3.5	二元性原理 (双重效应)	239
7.3.6	LQG 自校正调节器	241

7.3.7 LQG 自校正控制器	244
7.4 基于常规控制策略的自校正器	247
7.4.1 极点配置自校正调节器	248
7.4.2 极点配置自校正控制器	253
7.4.3 自校正 PID 控制器	256
7.4.4 有限拍无纹波控制器	260
第 8 章 稳定、镇定与逆最优控制	264
8.1 Lyapunov 定理和 LaSalle-Yoshizawa 定理	264
8.2 控制 Lyapunov 函数与 Sontag 公式	267
8.3 扰动抑制	269
8.4 随机形式的 Lyapunov 定理与 LaSalle 定理	273
8.5 逆最优控制问题	277
第 9 章 逆最优控制	280
9.1 受扰非线性系统的逆最优控制	280
9.1.1 问题描述	280
9.1.2 逆最优控制器的设计	283
9.1.3 性能估计	287
9.1.4 实例仿真	287
9.2 受扰非线性系统的逆最优跟踪	289
9.2.1 问题描述	289
9.2.2 逆最优控制器设计	293
9.2.3 数值仿真	299
9.3 随机非线性系统自适应逆最优控制	300
9.3.1 问题描述	301
9.3.2 全局依概率渐近稳定	305
9.3.3 逆最优控制器设计	309
9.3.4 设计举例	312
9.3.5 输出反馈逆最优控制	313
9.4 统计特性不确定随机系统稳健自适应逆最优控制	320
9.4.1 问题描述	320
9.4.2 全局依概率渐近稳定	326
9.4.3 自适应逆最优控制器设计	331
9.4.4 设计举例	333
参考文献	336

第 1 章 概 论

1.1 控制理论的产生与发展

据传约在公元前 300 年, 古希腊就把控制理论中的反馈控制原理应用于水钟与油灯之中. 我国古代的中医名著《黄帝内经》就早已体现了控制理论的朴素思想, 并且我国在公元前就早已发明了铜壶滴漏计时器、指南车及多种天文仪器. 这些控制装置的发明都促进了当时社会的政治、军事及经济等的发展和进步.

控制理论是自动控制理论的简称. 它产生于 18 世纪中叶英国的第一次技术革命, 当时在工程界用控制理论来研究调速系统的稳定性问题. 由于加工精度的提高, 调速系统的稳定性反而变差了! 1868 年, J. C. Maxwell 提出调速系统可用三阶常微分方程来描述, 其稳定性能用特征根的位置与形式来研究. 此后, E. J. Routh 等人先后得到能用常微分方程描述的系统的特征根具有负实部的充要条件. 1892 年, A. M. Lyapunov 给出用能量函数, 即 Lyapunov 函数的正定性与它关于时间一阶导数的负定性来判别的系统稳定性准则, 从而总结与发展了系统稳定的古典时间域分析法, 简称时域法. 随着通信与信息处理技术的迅速发展, H. Nyquist 给出以实验为基础的稳定性频率响应分析法, 简称频率法, 并给出判别稳定性的 Nyquist 判据.

二次世界大战期间, 由于军事上的需要, 雷达及火力等控制系统有较大发展. 频率法被推广到离散系统、非线性系统与随机系统中. 20 世纪 40 年代, 在工程上发展了自动控制、通信工程、计算技术等, 生物方面发展了神经生理学与神经

病理学等. 不过相互之间还存在着专业的“鸿沟”, 几乎没有什么交流和往来. 然而, 以著名数学家 N. Wiener 为首的一批科学家认识到, 动物和机器中的控制与通信过程存在着许多共性, 尤其是信息的传输、变换处理过程有许多共同规律, 如反馈控制原理等, 并认为客观世界存在着三大要素: 物质、能量、信息. 虽然在物质构造与能量转换方面, 动物与机器有着显著的不同, 但在信息传输、变换处理方面有着惊人的相似之处. 经不同学科、不同专业学者的相互交流、相互启发, 大家共同感到有必要也有可能建立一门综合性的边缘学科, 研究各种不同的控制系统如动物或机器, 或社会经济等控制过程中的共同规律和方法. N. Wiener 在系统地总结了前人成果的基础上, 于 1948 年出版了名著《控制论 (或关于动物与机器中控制与通信的科学)》. 该书的问世, 对现代科学与生活的各个方面产生了重要影响. 控制、反馈、信息、通信等这些来源于《控制论》中的术语, 不仅出现在许多学科之中, 而且已成为人们日常生活中的用语. 书中论述了控制论的一般术语, 推广了反馈控制的概念, 为控制论这门学科的形成奠定了基础.

控制论是一门典型的横向学科, 即着重于研究控制过程的数学关系, 它是由自动控制、通信工程、计算技术、神经生理学、神经病理学、数学等有关学科相互结合而产生的, 突破了工程技术与生物科学之间的传统界限, 跨越了两大领域之间的“鸿沟”. 不过控制论仍然按照“分久必合, 合久必分”的规律向前发展. 1954 年, 钱学森的名著《工程控制论》问世了, 这对推动控制论的应用起了很大的作用. 其后, 又相继分化出生物控制论、经济控制论及数学控制论等. 它们都是将控制论的思想、观点、方法用于工程、生物学、经济学、社会和教育等各方面进行纵向深入发展. 控制理论是借助于控制论的热潮而进一步迅猛发展的研究领域, 一般可分为三个阶段.

第一阶段: 早期控制装置. 时间为英国的第一次技术革命之前, 都是付诸实践的早期控制装置, 都属于自动控制技术问题, 还没有上升为理论.

第二阶段: 古典控制理论时期. 时间为 19 世纪末到 20 世纪初的这个阶段, 主要集中于研究系统的稳定性. 1868 年, J. C. Maxwell 发表了论文《论调节器》, 文中他用三阶常微分方程来描述一类蒸汽机的飞球调节器的动态性能. 在 1877 年和 1896 年, 数学家 Routh 与 Hurwitz 分别独立地提出了两种等价代

数形式的系统稳定判据. 直到 1940 年, 这些结果基本上满足了控制工程师的需要. 1892 年, Lyapunov 发表了论文《运动稳定性的一般问题》, 并在数学上给出了稳定的精确定义, 提出了著名的研究系统稳定性问题的 Lyapunov 稳定性方法, 该方法为线性与非线性系统理论奠定了坚实的理论基础, 已成为后来一切有关稳定性问题研究的出发点. 1932 年, Nyquist 发表了《线性系统的稳定性判据》, 把频率分析法引进了控制理论的领域. 该分析方法不仅为控制工程师们提供了一种研究系统稳定性的有力武器, 也推动了控制理论的发展. 1945 年, Bode 发表了《网络分析与反馈放大器设计》, 提出了闭环负反馈系统. 文中将反馈放大器原理应用于控制系统之中, 这是一个重大突破. 1948 年, Evans 发表了《根轨迹法》, 为控制理论提供了一个简单有效的方法. 于是控制理论的第二个阶段基本上完成了, 即建立在 Lyapunov 稳定性概念、Nyquist 判据以及 Evans 根轨迹法上的控制理论, 常称为古典控制理论.

第三阶段: 现代控制理论时期. 时间为 20 世纪 50 年代至今. 1954 年, 钱学森用英文发表了《工程控制论》. 它是由古典控制理论向现代控制理论发展的启蒙著作, 影响很大, 1957 年被译成俄文与德文, 1958 年才被译成中文, 1959 年又被译成日文. 它是自动控制领域中引用率最高的名著. 1957 年, R. Bellman 发表了《动态规划论》, 解决了多阶段决策问题. 1960 年, Pontryagin 发表了《最优控制的极大值原理》, 阐述了最优控制的必要条件; 同年, R. Kalman 发表了《最优滤波与线性最优调节器》, 提出了著名的 Kalman 滤波器. 控制理论的重点从单变量控制转到多变量控制, 从自动调节控制转向最优控制, 由线性系统转向非线性系统, 从定常系统转向时变系统. 这就形成了现代控制理论, 而他们的工作就奠定了现代控制理论的基础. 从 1960 年到 1980 年这一段时间内, 无论是确定系统与随机系统的最优控制, 还是复杂的自适应与学习控制, 都得到了充分的研究. 从 1980 年至今, 现代控制理论的进展集中于稳健 (robust) 控制、 H_∞ 控制及其相关课题, 并向着大系统理论、智能控制与量子控制等方向发展.

总之, 控制理论目前还在急速地向更纵深处发展. 无论在数学工具、理论基础, 还是在研究方法上, 它都不只是古典控制理论的简单延伸与推广, 更是认识上的一次飞跃.

控制理论是一门多学科性的技术科学,其任务是对各类系统中的信息传输与转换关系进行定量分析,并由这些定量关系预测整个系统的行为.没有定量分析,就没有控制理论.故在控制理论的研究中广泛地利用各种数学工具,几乎所有的数学分支的理论都渗透到控制理论的研究中.因此,控制理论可作为应用数学的一个分支.数学在控制理论的研究中有着双重作用:其一是利用数学建立合理的数学模型来精确描述系统;其二是建立数学模型后,利用数学理论解决所提出的控制系统,并期望提出新的数学问题.

今后,一旦某个系统被一组数学方程(确定的或随机的)所描述,并被处理成一种适当的数学形式,而不管系统是什么,其分析方法就与系统属性无关,这有助于找出各种系统之间的相似性.当掌握了所介绍的控制理论的种种基本方法后,由于各种方法的应用都不是绝对的,按一个控制系统的已知因素与复杂程度,可只使用其中的一种方法或将若干种方法结合起来使用,且可最大限度地利用各种方法的优点.从控制理论的整个发展史不难发现,数学家大多是推动控制理论发展的积极参与者,他们都将自己擅长的专业领域的理论作为研究控制理论的基础,取长补短,把控制理论推向不同的方向.

1.2 控制的意义与作用

1.2.1 控制系统

在种种生产过程及生产设备中,总要使某些物理量(如温度、速度、压力、位置等,称为控制量或者受控量)保持恒定或按照一定规律变化.为此,应在生产过程中或生产设备在无人直接参与的情形下,利用控制器进行及时的调整,以消除外界干扰与影响而达到所要求的结果.这就称为控制.

控制理论研究的对象是系统,它是控制系统的简称.系统是由多个具有一定特性的物理体或元部件作为其构成要素,并按一定的规律组合而成的有着特殊功

能的有序整体. 它可以是工程的、生物的、经济的、社会的等等. 但在控制理论中, 总是抽去系统的具体属性, 如物理的、社会的, 将其抽象为一般意义下的系统进行研究. 于是, 系统就是受控制的对象或控制的过程, 如化学过程、经济学过程、生物学过程.

控制器或控制装置 是使控制对象具有期望的性能或状态的控制设备. 它接收输入信号或偏差信号, 再按控制器给定的规律给出控制量或操作量, 送到控制对象或执行元件.

系统输出或受控量 即受到控制的量. 它表征受控对象或控制过程的性能与状态, 并称系统输出为对系统输入的响应. 操作量是一种由控制装置改变的量值或状态, 是施加在控制对象上的量, 也可称为控制量.

目标值 即控制目的, 是人为给定的, 使系统具有预定性能或预定输出的激发信号.

外部干扰或外部扰动 是干扰和破坏系统具有预定性能与预定受控量的干扰信号, 当扰动来自系统外部时, 就称为外部干扰, 它也是系统的输入量之一.

检测装置或测量元件 是观测或测量控制对象的某种性能和特征的机构.

比较点 是将检测装置测量到的值(称为观测量)与目标值进行比较, 从而计算出与目标值之间的差值, 即误差或偏差.

特性 是指系统的输入与输出之间关系, 可用特性曲线来直观地描述和观察系统, 并分为静态特性与动态特性. 静态特性是指系统稳定后, 表现出来的输入与输出之间的关系. 在控制系统中, 静态是指各参数或信号的变化率为零, 静态特性表现为静态放大倍数. 动态特性是输入和输出处于变化过程中表现出来的特性, 即从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程.

方框图 控制系统是由各种固有功能的子控制系统构成的, 表示各个子控制系统之间的结合情况及各子系统的输入和输出, 且知道作为控制系统的整体行为会受到怎样的影响, 并把各个子控制系统都用一个方框来表示, 同时注上文字或代号, 由各个方框之间的信息来传递关系, 用有向线段把它们依次连接起来, 标明相应的信息, 就得到整个控制系统的方框图.

1.2.2 恒值系统与随动系统

恒值系统是指给定的输入一经设定就保持不变, 期望输出维持在某一个特定值上. 其主要任务是当被控制的量受到某种干扰而偏离期望值时, 通过控制作用使之尽可能地恢复到期望值. 若由于结构的原因不能完全恢复到期望值, 则误差应不超过规定允许的范围, 例如, 液位控制系统、离心调速器等都属于这一类型的系统. 易见, 克服干扰的影响是该类型控制系统设计中要解决的主要问题.

随动系统是指按给定信号 (即事先不能确定的随机信号) 的变化规律, 主要任务是使输出快速、准确地随给定值的变化而变化, 也称为随动控制系统. 易见, 由于输入给定值在不断地变化, 设计好控制系统的跟随性能就成为这类控制系统中要解决的主要问题. 当然, 随动系统的抗干扰性能也不能被忽视, 但与跟随性能相比应放在第二位来解决, 如加热炉温度控制系统、军事上的雷达跟踪控制系统、航天的自动导航控制系统等.

1.2.3 线性系统与非线性系统

线性系统是指系统中各元件的输入、输出特性都呈线性特性, 控制系统的状态和性能可用线性微分或差分方程来描述. 若控制系统的微分或差分方程的系数都是常数, 就称为线性定常系统; 若微分或差分方程的系数为时间的函数, 则称为线性时变系统. 由于线性系统理论, 特别是线性定常系统比较成熟, 因此, 当系统参数随时间的变化不太大、可用常值来对待时, 为了分析、设计的方便, 常常视之为线性定常系统.

控制系统中只要存在一个非线性元件, 控制系统就由非线性微分方程或差分方程来描述, 这种控制系统就称为非线性系统.

1.2.4 连续系统与离散系统

连续系统是指控制系统中的各个元件的输入、输出信号都是时间的连续函数。这类控制系统是用微分方程来描述的。

当控制系统的状态和性能用差分方程来描述时,称为离散系统。在实际物理系统中,信号的表现形式为离散信号的情形并不多见,常常是因控制上的需要,人为地将连续信号离散化(并称为采样)。由于离散系统的数学描述与连续系统不同,故分析研究方法也不同。随着计算机控制的广泛应用,离散系统理论也越来越显得重要。

1.2.5 单变量系统与多变量系统

不同控制系统的输入与输出的数目是不同的。仅有一个输入与一个输出的系统称为单输入—单输出系统,简称为单变量系统。这只是从外部变量的数目而言,但系统内部变量可以是多种形式的。当系统的输入或输出变量的数目多于一个时,就称为多变量系统。它是现代控制理论研究的主要对象。在数学上,以状态空间法为基础来研究与分析多变量系统。

1.3 控制系统的基本模型

在以各种各样的目的进行自动控制的系统中,归纳起来有两种基本模型。一种是开环控制系统模型,它是一种最简单的控制模型或控制方式,其特点是控制量或输入与受控制量或输出之间只有前向通路,而无反向通路,即控制作用的传递路线不是闭合的。这时控制系统的输出量对控制作用无任何影响,故称为开环

控制系统, 简称开环控制, 其方框图如图 1.1 所示。

要预知外部干扰, 并在控制过程中对干扰进行观测是困难的, 即要预先考虑到外部干扰而决定控制量或输入是不可能的。这时, 开环控制便无能为力, 故它的精度不高, 从而大大地限制了这种控制模型的应用范围。但因其结构简单、造价低廉, 且系统的稳定性不是重要问题, 故在精度要求不高的情形下仍被广泛应用, 例如十字路口的红绿灯控制系统。这时, 输入量是红绿灯开关的时间, 总的车流量是此系统的输出, 一般情形下二者之间的关系可满足要求。不过, 有时会出现一种情况, 即在一个方向, 如东西方向上, 无车辆或行人通过, 可仍然是绿灯, 而另外一个方向, 如南北方向上, 有很多的车辆或行人要通过却是红灯时间。由于输出量不能影响输入量, 故效果不佳。



图 1.1 开环控制方框图

另一种是闭环控制系统模型。这时系统的输出量经过合适的检测装置将观测值的全部或一部分返回到输入端, 使之与输入量进行比较 (称为反馈)。输出量或受控量的反馈值与输入量或目标值之差, 就是系统的检测偏差。由此检测偏差产生对系统受控量的控制。若系统是按检测偏差的大小和方向进行工作的, 并使偏差减小或消除, 使输出量复现输入量, 则把建立在反馈基础上的“检测偏差用来纠正偏差”的原理称为反馈控制原理。由反馈控制原理组成的控制系统称为反馈控制系统。它的特点是, 控制作用不是直接来自给定的输入, 而是来自系统的检测偏差。由于这种自成循环的控制作用, 信息的传输路径形成一个闭合环路, 故称为闭环。总之, 凡是系统的输出信号对控制作用能有直接影响的系统, 就称为闭环控制系统。这种能把系统的输出信息反送到系统的输入的装置或元件, 就称为反馈元件, 使输入发生所需要的变化的信号称为反馈信号。反馈控制系统或闭环系统是普遍存在的。例如, 人体本身就是一种反馈控制系统, 人体的体温和血压等都是经过生理反馈的方式保持常态。反馈的作用使得人体对外界干扰相当不敏感, 从而