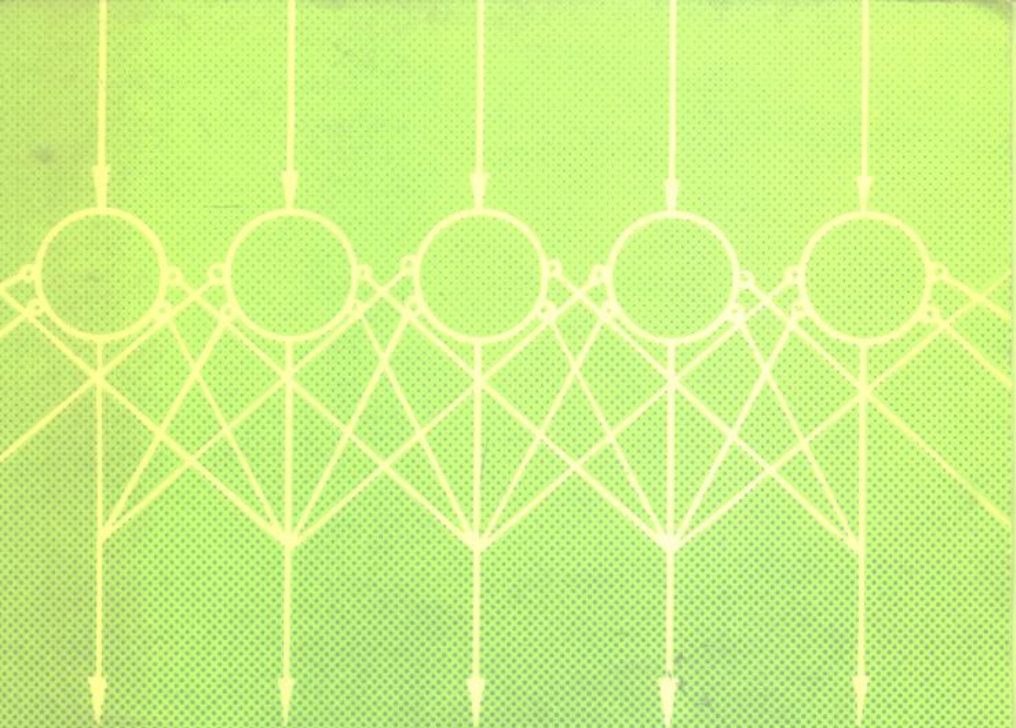




生物控制论 研究方法

汪云九 顾凡及 编著

科学出版社

生物控制论研究方法

汪云九 顾凡及 编著



363409

科学出版社

1986

内 容 简 介

生物控制论是一门迅速发展中的学科。它从综合的、整体的角度来研究各种生物系统中的控制调节和信息过程,建立起它的功能模型,并定量地研究生物系统的动态特性,从而为生物科学的发展开辟了一个新的重要的方面。本书紧密结合生物研究的实例,详细介绍了生物控制论的基本概念、理论和方法,以及如何把它们应用到生物科学的研究中去,尤其着重介绍了生理系统分析。本书可作为高等院校生物物理专业、生理专业和生物医学工程专业的高年级学生、研究生以及对此有兴趣的生物学工作者的教科书或参考书。

生物控制论研究方法

汪云九·顾凡及 编著

责任编辑 王爱琳

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986年9月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1986年9月第一次印刷 印张:13 1/2

印数:0001—3,700 字数:304,000

统一书号:13031·3276

本社书号:4464·13—10

定 价: 3.15 元

读 书 人 语

系统科学用于生物、农、医等各种科学的研究，是这些科学近三十年来的研究策略问题。从现状来看，目前在这些科学中存在有两种新的研究策略，可以名之曰还原策和模拟策。模拟策就是以系统科学的观点、方法作为基础的一种研究策略，它重视生物系统的组织性和整体性，着眼于生物系统的各种过程和其间的相互作用。三十年来，在这样的策略下所进行的研究工作和公开发表的论文是十分繁多的。这些工作都是专门课题，发表在生物学、生理学、医学、物理学和工程学等专门期刊里面，有关的评论和专著书籍相对地来说比较少，从这些著作的内容来看，使人感觉有的过于一般，有的又过于专门，既能反映现状又适于教学和自学的教材性书籍，在当前则是缺少的，特别是在国内。

今天国内许多研究部门广泛地开展这类研究工作，不少大学的生物学、生物物理学、医学、生物医学工程学等专业开设了生物控制论之类的课程，一种适合自学和教学的教材性质的书籍显然是十分急需的，而本书的出版则正是及时解决了这一问题。本书作者都是正在从事这方面工作而且有一定实际经验的同志。从内容上看，本书是可以满足研究人员、教员、大学生、研究生等各种读者的需要的，相信本书对推动国内这方面的研究和教学工作会起一定的良好作用。拜读书稿，不胜愉快，草书数语，聊表衷情。

首都医科大学教授刘曾复

序

生物控制论是一门迅速发展中的学科,它从综合的、整体的角度来研究各种生物系统中的控制调节和信息过程,建立其功能模型并定量地研究生物系统的动态特性,从而为生物科学的发展开辟了一个新的重要的方面。

各门自然科学的发展几乎都要经历观察、实验和理论各阶段。生物科学由于研究对象的复杂性,使这个过程特别漫长,至今还有不少生物学家认为生物学研究就是观察和实验;但是也有生物学家认为,今天生物科学的情况和十九世纪中叶化学的情况很为相似,它已积累了大量的观察和实验事实,所缺乏的只是一个理论框架把这些事实都统起来。不管这种说法是否确切,但有一点在我们看来是肯定无疑的,即生物科学的定量化和理论化至少已经是生物学家不得不面临的问题了。不管生物科学的对象如何复杂,它终究是要走一切自然科学发展的共同道路的。

在生物科学量化、理论化的过程中,一方面从分析的角度发展了象分子生物学、量子生物学这样的学科,从越来越基础的水平去研究生命现象中的基本物理、化学过程;另一方面又从综合的角度发展了象生物控制论这样的学科,从整体的观念出发去研究复杂的生物系统是怎样由一些相对说来要低级一些的部分组织而成的,它们又怎样和环境相互作用,完成特定的功能。这样的两个方面是相辅相成的,单独哪一个方面都不可能完全解释生命现象。生物科学发展的这两个方面都是生物科学和一些精密科学相互渗透的结果。因此,今天

物理学、化学、数学和控制论的语言也都成了生物科学的基本语言。自然，生物控制论也就引起了生物学家日益广泛的兴趣，许多生物学工作者希望有一本有关生物控制论的便于自学的入门性教材，本书就是对这种要求的一个尝试。

作者曾为中国科学技术大学生物物理系的高年级学生讲授过生物控制论的课程，以后又分别在中国科学院生物物理研究所举办的短期讨论班、中国科学技术大学以及复旦大学生物系的生物物理专业讲过有关的课程，本书就是在这些讲稿的基础上结合自己的研究工作，重新整理、修改和补充的结果。

本书的目的是企图说明生物控制论的基本概念、理论和方法，以及如何把它们应用到生物科学的研究中去，因此生物控制论的具体成就在书中主要是作为说明如何应用其基本概念、理论和方法的例子而加以引入的。在例子的选取上，我们着眼于是否能清楚地说明基本内容。因此，生物控制论的许多成就虽然十分重要，但由于比较繁复，对于初学者掌握生物控制论的基本内容来说不一定有利，我们就未引入。我们希望本书能成为生物物理专业和生物医学工程专业的高年级学生、研究生以及对此有兴趣的生物学工作者的基础参考书。

生物控制论目前主要是应用工程技术中发展起来的一套控制和信息理论去研究各种各样的生物系统，这就使得无论在工具方面还是在对象方面，它的范围都十分广泛。因此要想在一本书中哪怕只是罗列一下生物控制论的所有成就都是不可能的，而且这也不是写本书的目的。因此，有不少重要的内容，可能根本就没有在本书中提到，这恐怕也是任何一本象“生物控制论”这样涉及面广的著作所不可避免的。此外，本书在内容和例子的选取上不可避免地带有作者的经历和兴趣的痕迹。虽然如此，作者还是期望读者读完本书之后，对生物

控制论的基本精神和方法会有所领会，而且可以把它们应用到自己的工作中去。如果能做到这一点的话，作者就将感到最大的满足。

由于生物控制论在本质上是定量的，因此作者在本书中没有回避数学工具，但是作者也不想为了追求数学上的严格而引入其过深的内容，因此在这两者之间不得不作出某种权衡。作者假定读者已学过大学微积分和常微分方程初步（例如已念完樊映川著《高等数学》一书），读本书所必须具备的数学基础就是如此。作者还假定读者已具备矩阵代数和概率论的初步知识，对于那些没有学过这两门课程的读者，本书给出了阅读本书必须用到的有关这两门课程的初步知识作为附录，读者在掌握了附录中的内容之后，再读本书时应该不再有原则上的困难。当然，对于想深入学习生物控制论的读者，附录中的内容是不够的，还需要进一步阅读有关的专著。至于其他的数学知识，本书在用到的时候都预先加以说明，不再要求读者预先具备这方面的知识。

一般说来，生物控制论的内容目前大致上可以分为生物系统分析和神经控制论两大范畴。本书的重点是生物系统分析，而对神经控制论仅作了初步介绍。本书在内容的编排上分为四个大部分共 15 章。第一大部分包括 1、2 两章，是属于概论性质的。第 1 章扼要地介绍了生物控制论的历史背景、对象和特点，使读者对这门学科的全貌有一个概括的了解。第 2 章介绍了控制论的一些基本概念，如系统、模型、控制、信息等。有了这些概念就可以使我们以共同的语言来统一处理生物体与自动机器，理解到生物体和自动机器中控制与信息过程的共同性，从而为进一步的研究打下基础。另一方面，在强调了生物体与自动机器共性的同时，本章也特别指出了生物系统和对它的研究方法上的特殊性，从而提醒读者在从控制

论的普遍概念出发去研究生物系统的同时,还必须时时注意到生物系统的特殊性。第二大部分包括第3章到第12章,基本上是生物系统分析的内容。第3章介绍了研究生物系统时常用的一些刺激形式,以及在时间域上根据系统对某些典型刺激的瞬态响应评价系统特性的方法。第4、5、6三章介绍了在频率域上分析线性系统特性的经典方法。第4章介绍了这个方法的数学基础——拉普拉斯变换和傅里叶变换。第5章介绍了传递函数和频率特性,并讨论了确定某些生物系统的传递函数和频率特性的实际方法。第6章介绍了系统的稳定性概念,以及用实验方法判断系统的稳定性。鉴于反馈在控制系统中的重要性,在前面章节关于反馈论述的基础上,第7章进一步讨论了反馈在生物系统中的作用,以及生物反馈系统中的一些特殊问题。第8章讨论了生物系统分析中很有实用意义的一类技术——房室分析,此外也把它作为状态变量方法的一个特例,使读者更易于理解专讲状态空间分析一章的内容。第9章到第12章是系统分析的新方法在生物系统研究上的应用。第9章介绍了状态空间分析,第10章介绍了随机信号分析,第11章介绍了生物系统中的非线性问题及其某些处理方法,第12章介绍了生物系统辨识的初步内容,着重介绍了状态方程的最小二乘法参数估计及白噪声方法,这些方法在相当程度上也适用于对非线性系统的辨识问题,因此在某种意义上也是第11章的继续。第三大部分包括第13、14两章,介绍了神经控制论的初步内容。第13章介绍了感觉信息处理。由于视觉信息处理在感觉信息处理中最为重要,研究也最多,因此该章着重讨论了视觉信息处理的基本原则,第14章则讨论了神经系统的基本元件——神经元的特性和模型,在此基础上又讨论了一些比较简单的神经网络。但这一章只能认为是非常入门性的,要比较详细、深入地讨论这

个问题,应该是另一本专著的内容了。最后一部分(第 15 章)是对生物控制论历史与现状的简单回顾,并对未来加以展望,指出生物控制论今后可能的发展趋势。

本书只能认为是生物控制论的一本入门性读物,对于希望深入研究生理系统分析的读者,作者愿意推荐下列几本书: E. Basar: “Biophysical and Physiological System Analysis” (Addison-Wesley Pub. Co., Inc. 1976) (该书已有中译本: 巴沙著,郁贤章译,《生物物理和生理系统分析》,科学出版社,1979); P. Z. Marmarelis, V. Z. Marmarelis: “Analysis of Physiological System—The Whitenoise Approach” (Plenum Press, 1978); S. A. Talbot, U. Gessner: “System Physiology” (John Wiley & Sons., 1973)。前两本书方法论的意义较强,后一本书则对各种生理系统的具体研究成果涉及较广。当然国际性的生物控制论专门杂志 “Biological Cybernetics” 也是深入研究所必需的参考材料。我们期望读者读完本书之后阅读上述材料会感到更为方便。

本书在编著过程中曾得到中国科学院生物物理研究所郑竺英同志和复旦大学生物系包正同志的鼓励,并得到中国科学院自动化研究所黄秉宪同志和潘华同志、中国科学院上海生理研究所孙复川同志和北京医科大学赵似兰同志的帮助,中国科技大学无线电系张作生同志也提出了宝贵的意见,顾舒章同志为我们誊清了原稿,作者谨向他们致以深切的谢意。囿于作者的水平,书中一定会有不少缺点甚至错误,希望读者批评指正。

作者

目 录

序	vii
第 1 章 导论	1
1.1. 控制论	2
1.2. 生物控制论	9
第 2 章 基本概念	15
2.1. 系统	15
2.2. 模型	20
2.3. 控制	25
2.4. 信息	34
2.5. 生物系统举例	43
2.6. 生物系统及其研究方法的特点	53
第 3 章 系统的时间特性	59
3.1. 研究生物系统常用的一些刺激形式	59
3.2. 生物系统瞬态响应指标的分析	65
第 4 章 拉普拉斯变换和傅里叶变换	71
4.1. 复数和复变函数	72
4.2. 拉普拉斯变换	77
4.3. 用拉普拉斯变换求解线性微分方程	83
4.4. 傅里叶变换	87
4.5. 脉冲响应、卷积和卷积定理	90
第 5 章 传递函数和频率特性	95
5.1. 单输入-单输出线性定常微分系统	96
5.2. 传递函数	96
5.3. 频率特性	100

5.4. 例子: 鲎复眼中单个小眼的动态分析 (I)·····	107
5.5. 典型环节 ·····	110
5.6. 由系统的对数频率特性确定传递函数 ·····	127
第 6 章 稳定性 ·····	131
6.1. 稳定性概念 ·····	132
6.2. 稳定性判据 ·····	135
6.3. 例子: 脑缺血加压反应的研究 ·····	142
第 7 章 生物反馈系统 ·····	148
7.1. 反馈对系统特性的影响 ·····	148
7.2. 体内稳态 ·····	153
7.3. 反馈与振荡 ·····	162
7.4. 生物系统的给定值问题 ·····	164
7.5. 生物反馈 ·····	166
第 8 章 房室分析 ·····	170
8.1. 房室分析举例 ·····	170
8.2. 房室分析的实质和应用范围 ·····	172
8.3. 房室分析的图解方法 ·····	176
第 9 章 状态空间分析法 ·····	178
9.1. 引言 ·····	178
9.2. 用拉普拉斯变换解状态方程 ·····	181
9.3. 线性定常系统状态方程的解 ·····	190
9.4. 我国人口发展过程的预测 ·····	193
第 10 章 生物信号分析初步 ·····	208
10.1. 信号的平稳性和各态历经性·····	208
10.2. 自相关函数和互相关函数·····	210
10.3. 功率谱·····	216
10.4. 生理信号的滤波问题·····	219
10.5. 对生理信号的叠加处理·····	224

10.6. 低频漂移的消除·····	229
10.7. 脑自发活动和诱发电位的分析·····	231
第 11 章 生物系统中的非线性问题 ·····	243
11.1. 生物系统中的非线性现象·····	243
11.2. 描述函数·····	249
11.3. 非线性的计算机分析·····	252
11.4. 非线性系统的数值分析·····	265
11.5. 非线性房室分析·····	272
11.6. 相空间法·····	280
第 12 章 系统辨识 ·····	283
12.1. 系统频率特性和权函数的辨识·····	284
12.2. 状态方程的参数估计·····	287
12.3. 白噪声方法·····	291
第 13 章 感觉信息处理 ·····	306
13.1. 感觉系统概述·····	306
13.2. 单个感受器的特性·····	309
13.3. 侧抑制网络·····	315
13.4. 感受野·····	328
第 14 章 神经元模型与神经网络 ·····	352
14.1. 神经元·····	352
14.2. 神经元模型·····	355
14.3. 神经网络·····	360
14.4. 感知机·····	368
14.5. 小脑网络·····	375
第 15 章 结语 ·····	379
附录 I. 矩阵代数 ·····	383
附录 II. 概率论 ·····	396
参考文献 ·····	410

第1章 导 论

第二次世界大战前后,由于工业、军事和宇航等尖端技术的需要并随着电子技术的发展,自动化程度得到了迅速的提高。在这些实践活动的基础上产生了诸如控制论(cybernetics)、系统论(system theory)这样一些理论学科。它们研究了由许多元件(或部件)所组成的具有复杂功能的系统的分析与综合问题。钱学森曾经把控制论和相对论、量子论并列为二十世纪上半叶科学理论的三大伟绩,认为是人类认识客观世界的三大飞跃。这些学科的产生与发展和生物学研究之间也有着密切的关系,并对它产生了很大的影响。

生物体是由生物大分子、细胞器、细胞、器官、系统等逐级构成的统一整体。它是一种高度组织化的复杂系统,其内部存在着极为复杂的各种联系和相互作用。此外,生物体与环境之间也不断地保持着物质、能量和信息上的交流。生物体的行为乃是生物与它的环境相互作用的产物。所以对于生物体的研究除了用分析的方法阐明生物体中基本的物理、化学过程之外,还必须从整体的、系统的角度出发进行研究。虽然整体的、系统的观点早已有之,并非从今日始,但是长期以来一直没有找到合适的理论工具。直到控制论、系统论等等这样一些新兴理论产生之后,我们才有了研究复杂系统的适当的理论工具。这些观点、理论、方法和工具的应用,不仅大大推进了工程技术中对自动系统的研究,而且也为生物学研究别开了新生面。

六十年代以来,应用控制论、系统论、信息论等来研究生

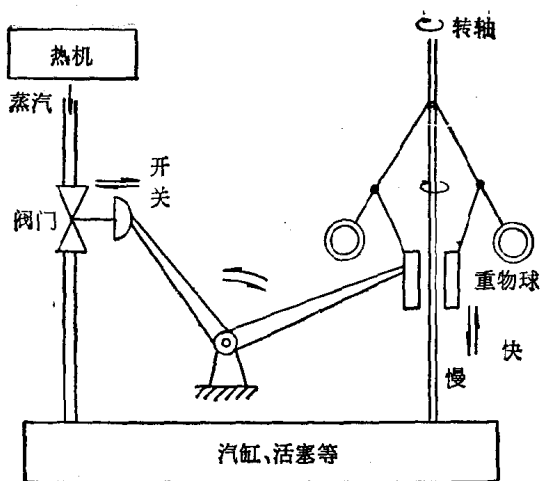
物学,已作了大量的尝试和努力,也取得了许多成果,它已成为生物科学中年轻而合法的一员。但是这并不意味着这一分支已经很成熟了。由于生物系统的极端复杂性,现有的理论、方法和工具对于生物系统来说,也许仍过于简单。必须在研究生物系统的过程中逐步加以发展和完善。

虽然如此,目前对生物系统中的调节控制和信息处理过程,已经有了大量的研究,这是一个十分活跃、内容十分广阔的领域。要想罗列它的全部内容和成果已成为十分困难的事了,而且对于从事某一生物系统研究的人员来说,也没有太大的必要。但是研究各种生物系统中的控制和信息问题,有很大的共同性,无论在研究方法和使用的数学工具等方面都有许多相同之处。本书的目的就在于介绍研究生物系统中控制过程和信息过程的方法,介绍一些常用的理论工具。至于具体的生物系统,我们只是选择了一些具有一定代表性的典型例子,来说明怎么样把这些理论和方法应用到生物系统的研究中去。

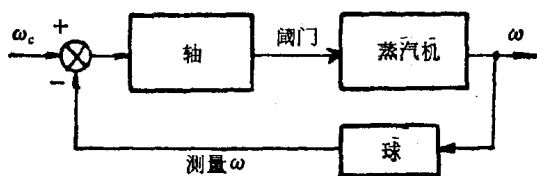
为了使读者对生物控制论的背景、对象与特点有一个概括的了解,我们将在下面对控制论和生物控制论的这些方面扼要地加以介绍。

1.1. 控制论

随着社会生产力的发展,简单的工具已不再能满足需要,开始制造各种比较复杂的机器来代替人的部分劳动。在这些机器之中,逐渐分化出专营调节、控制的部件。瓦特发明的蒸汽机上的离心调节器(图 1.1-1)就是现代机器中最早的调节器,它可以保持某一参数(如转速)的恒定。以后又陆续发明了各种调节器,可以保持少数几个参数的恒定。在这样大量实践活动的基础上,开始逐步建立起关于调节和控制的一般



(a)



(b)

图 1.1-1 瓦特的离心调节器的示意图 (a);
瓦特离心调节器的方框图 (b)。

理论。

电子学的发展,特别是电子计算机的发明,使得自动化达到一个更高的发展阶段。电子计算机部分地取代了人作为控制者的功能。

在第二次世界大战期间,飞机大量投入实战,对敌方造成很大的威胁。当时,英国发明了雷达,可以在远距离发现飞机目标,于是人们想把它与高射炮联系起来,组成一个防空的自动高炮控制系统。这是一个完整的自动控制系统,既有目标

检测装置、提前量计算装置,又有效应装置。美国数学家维纳参与了这个系统的设计工作。他在某些数学分支(例如随机过程)方面很有造诣,又是一位兴趣十分广泛的专家,与生理学家有很多交往并亲自参与了一些电生理实验。在设计自动火炮控制系统中,他对系统中的控制和信息过程¹⁾有了深刻的了解。联系到生理学和生物学中的控制、信息问题,维纳及其同事发现两者之间有着深刻的共同性。例如他们发现要解释某些随意活动,只牵涉到神经和突触的基本物理、化学过程是不够的,而且还必须涉及到神经系统作为一个整体的活动;他们发现传统的反射弧概念是不够完整的,还必须考虑到反应反过来通过感官(不论是本体感受器,还是别的特殊感受器)再进入神经系统的环行过程——这就是控制工程师们所谓的反馈作用——才能理解象捡起铅笔这样一类的随意运动。也只有考虑到这些反馈作用才能解释象运动失调这样的反馈障碍和目的震颤这样的反馈过度的病理现象。

因此,对于各种各样的自动机和动物来说,假定我们只着眼于它们中间的控制与信息过程,而撇开它们其他的具体特性不管,那么大体上说来,它们都有着下面的结构:它们都具有专门接收外界信号的接收装置(在动物体中相应的是感受器);作出反应的执行装置(效应器)和它所作用的受控对象;根据接收装置送来的信号进行处理,从而决定执行装置应如何动作的控制装置(中枢神经系统),此外还有这些装置之间的联结线路(传入神经和传出神经)。一般说来,执行装置动作的结果(受控对象的实际状态)往往通过某些接收装置(感受器或内感受器)而又汇报给控制装置(反馈联系),控制装置

1) 为了行文简单起见,我们把信息的接收、传递、存储、处理和反馈过程简称为“信息过程”。除了特别要强调上述各个方面的场合之外,我们在下文中都这样做。

即按照实际情况与预期目标的偏差采取进一步的措施。我们可以用一个框图(图 1.1-2)来表示这种结构。

当时人们也注意到神经元的“全或无”性质和开关网络的“断或通”性质之间很相类似,1943年专攻数理逻辑的数学家 Pitts 和神经生理学家 McCulloch 合作就此写了一篇文章,试图用二值逻辑来解释神经网络的活动。这是对神经网络进行数学描述的第一次重大的尝试。

维纳早在电子计算机研制成功之前就指出过,一台理想的能自动进行算术运算和逻辑运算的计算机必须是建立在二进制的基础上的,因此在他看来,计算机的基本单元和神经元颇相类似,而计算机又能完成以前一直被认为只能由人脑完成的某些功能,因此他当时认为计算机应该是人脑的一个合乎理想的模型。

差不多在同时,维纳和 Shannon 等人各自从不同的需要出发发展起关于信息传递及编码的定量理论——信息论。

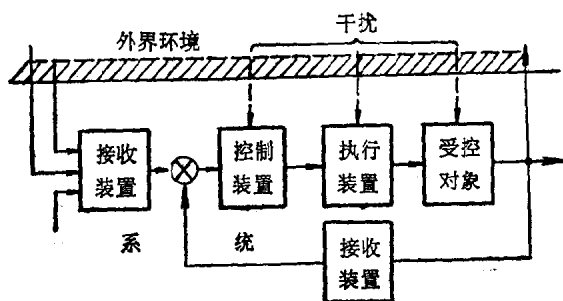


图 1.1-2 控制系统的框图。

正是在这样大量实践的基础上,维纳及其同事认识到,有关信息和控制的一系列核心问题在本质上是统一的,而不管这些问题是机器中的还是活的机体中的。而另一方面,由于当时关于这些问题的文献缺乏统一,没有任何共同术语,甚至