

控制论和计算机应用于医学

—原理和实例

赵似兰
A·A 费尔芬 编著

科学出版社

R319
251

控制论和计算机应用于医学 ——原理和实例

赵似兰 A. A. 费尔芬 编著

国家自然科学基金 资助项目
国家教委博士点基金

科学出版社

1993

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书以生物医学工作者为主要对象,介绍应用控制论方法揭示生物医学系统中实现控制和调节的机理,以及控制参数的提取和医疗自动化等内容。本书通过大量生物医学实例,阐明控制论的基本理论和应用方法,是一本学以致用入门书。

全书内容包括控制论的基本概念,建立模型的基本方法,房室系统建模、辨识及非线性系统分析,生物反馈,生物信号处理,最优控制和医疗自动化等。各章后均附有复习思考题,以便读者检查学习效果。

本书可作为医科大学各专业本科生和研究生的教科书或参考书,也可供控制理论及数理工作者参考。

控制论和计算机应用于医学 ——原理和实例

赵似兰 A. A. 费尔芬 编著

责任编辑 李淑兰

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

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

1993 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
1993 年 8 月第一次印刷 印张: 15 3/4
印数: 1—1 220 字数: 357 000

ISBN 7-03-003320-5/TP·245

定价: 15.00 元

序

生物控制论是一门边缘学科,它主要研究生物体如何通过信息的接收、编码、传递、存储和处理来实现各种调节和控制的机理。

在当今科学飞速发展的时代,生物医学工作者理解和掌握控制论的基本知识和方法,从而解决生物医学方面的问题,建立新的学术观点是非常重要的。

作者根据多年来在教学、科研工作中的实践,参阅了大量国内外文献,编写了《控制论和计算机应用于医学——原理和实例》一书。该书的特点是通过用控制论的方法解决医学问题的实例,来阐明生物控制论的基本概念和方法,使读者能运用控制论的基本思想解决一些用传统医学所不能解决的问题,并提出新的观点,发展新的医学理论,使生物医学工作向客观、定量、现代化和自动化迈进。因此该书是生物医学各学科的学生、研究生、临床医师、科研工作者的一本很好的参考书。

王德炳

1989.2.

前 言

控制论应用于生物医学,主要是研究生物体如何通过信息的接收、编码、传递、存储和处理,最终实现控制的机理。这是生命现象的本质问题之一。在此基础上,再进一步对生物体的生理和病理现象实现人工控制(即治疗和预防疾病),这不仅能对诊断、治疗和预防疾病等提出新的概念、思路和方法,也将使传统医学走向客观、定量、动态研究的新阶段。另一方面,对生物体中信息接收、编码、传递和处理方式的进一步阐明,也将有可能给目前的计算机科学、信息科学、自动化技术等带来新的飞跃。

(当前,电子计算机的广泛普及使医学工作有了突破性的进展。例如旧的测试技术(X光、超声、同位素应用等)与信号处理及计算机自动化技术相结合,出现了多种多样的计算机断层造影(亦称各种CT造影),它们能检测到以前无法测到的体内软组织结构,为癌症的早期诊断及各种脑部疾患的诊断提供了十分有力的新手段。这些年来,各种医学临床及实验用的电子仪器中,常常带有微处理机,能自动对被测信号进行滤波、频谱分析处理(见第十一章)或通过建立数学模型(见第二章)来提取一些用传统方法无法直接观测到的信息,从而大大提高了诊治水平。)但由于人体系统极端复杂,加上人和人之间,尤其是各种病人之间的系统状态有很大的差别,而各种处理信号和数学模型等方法都只是近似地在某些主要问题上反映人体系统的特征,医学工作者如果不了解其分析的依据以及分析结果和实际之间可能出现的误差,盲目地对计算结果作不恰当的运用、解释,则不但无助于得到正确的诊治意见,甚至还会引起不必要的疑虑。(目前微型计算机已在国内广泛普及,许多大医院正在计划或建立医院计算机自动化的信息系统。这种医院信息系统的建立,将使整个医院工作发生根本性的改变。)生物医学工作者要适应新的形势、掌握新的技术,就必须学习新的知识并学会使用微机。

60年代以来,国内外已出版了一些有关控制论在生物医学中应用的图书^[1-7],但其核心理论和方法涉及到较深的数学内容,致使生物医学工作者难于理解控制论方法的实质,这就使控制论方法在生物医学中的进一步应用受到很大的限制。为使这门新兴学科能在我国生物医学现代化中发挥其应有的作用,作者在编写本书时,根据多年来对医科大学生及医学研究生讲授生物控制论课程及系统生理病理学课程的实践经验,采取了以下一些具体措施:

(1) 通过医学中各不同领域内的各种典型实例,讲述生物医学领域中,用控制论方法解决实际问题的完整解题过程。

(2) 通过最易于为生物医学工作者理解和掌握的房室系统建模实例,介绍现代控制理论中的系统辨识方法。

(3) 对每个数学难点,首先阐明其解决问题的意义,数学内容的生物学(或实际)背景,运用的条件、结论和根据,然后将其分解成一些易于掌握的固定步骤。

(4) 强调在生物医学的各个不同领域中,充分利用读者本身的专业知识建立物理、化

学等模型的重要性,以启示读者掌握控制论的核心内容即建立模型的方法。

作者希望通过以上措施,能使读者掌握控制论的思路和本质,提出一些用传统的实验方法不能或难于观测解决,而应用控制论方法则可迎刃而解的问题,并能与控制论和数理工作者开展协作。

本书第一、二章通过实例一般性地介绍控制论的基本概念、内容和方法以及在生物医学工作中的重要作用,使读者了解控制论在生物医学领域中能解决哪些类型的问题。第三至五章介绍稳态反馈系统的调节特性,以及由生理解剖知识建立系统模型方框图(这是荷兰费尔芬教授多年来对医学生讲授系统生理病理学的经验总结)的方法。在第五章末尾,还介绍了近年来国外很受重视,国内亦正在建立中的生物反馈治疗方法。它是一种通过特定条件下的自我锻炼来控制有关生理状态的方法。本书五章以前的内容,即使只有中学数学基础的读者,亦能理解其基本精神。第六章以后介绍动态系统的分析,要求读者具有微积分的知识。第六、七章主要介绍传递函数和线性系统分析。传递函数的定量表示需通过拉普拉斯变换方法,这是一个复变函数的积分运算式。这里我们只向读者介绍为什么必须引入这个运算式,在什么条件下可以用这个变换,并向读者介绍通过查变换表和运用变换定理的方法,按一定的机械步骤,就可以准确地作出变换的详细过程。至于系统分析部分,则着重介绍二阶线性常系数系统的特性分析。通过这一类最简单实例的介绍,就能对系统分析的轮廓有所了解,也较容易根据初等代数的知识来理解方框图的运算及系统的整体定量特征。第八、九两章通过解决以药物动力学问题为主要背景的房室系统建模问题,来介绍现代控制理论中的系统辨识的基本思想、方法及解题步骤,指出每个步骤的难点和解决方法,并提供解决实际问题的计算机程序。由于生物系统本质上是非线性的,很多问题必须考虑其非线性特性,故第十章用少数实例介绍了非线性系统的特性、图形表示和一般解非线性系统的方法,以期读者能看懂文献及图形表示。以上讨论的内容,都假设系统中的变量是确定性的,实际上的生物系统,往往带有随机的特征,由生物体测得的信号也往往带有不同程度的噪声,在做系统分析和辨识时,常需先滤除信号中的噪声,然后才能提取出系统的特征信息,因此在第十一章中,我们介绍了随机信号的特征提取及一般的处理方法。第十二章介绍最优控制和自适应控制的应用,由于作者这方面的工作实践较少,因此主要引用了黄秉宪同志编著的《医学中的生物控制》一书中的有关内容。第十三章介绍了医疗自动化,即计算机在医院中全面应用的概况以及应用后的实效。为便于读者自学,每章末提供了一些复习思考题,供读者随时检查自己的阅读效果。

本书的编著得到首都医学院刘曾复教授和北京医科大学王德炳教授的大力支持,他们详细审阅了全书,提出了很多宝贵的意见。在内容的取材上,得到了中国科学院自动化研究所黄秉宪研究员、中国科学院生物物理研究所汪云九研究员、复旦大学顾凡及副教授、清华大学杨福生教授、中国科技大学张作生教授、北京大学全镐锡高级工程师、天津医药科学研究所何绍雄研究员、天津医科大学田心等的帮助。夏武超详细校阅了全稿,耿惠敏绘制了全部图稿。特此致谢。

由于作者水平所限,书中不足之处,敬请读者批评指正。

赵似兰

A. A. 费尔芬

1989.3.

目 录

序.....	i
前言.....	iii
第一章 引言.....	1
1.1 控制论的基本概念	1
1.2 控制论的形成和基本内容	6
1.3 控制论对生物学的重要作用	12
思考题.....	18
第二章 控制论的基本方法.....	19
2.1 建立研究问题的模型系统	19
2.2 由实验资料辨识系统参数	29
2.3 最优控制	31
思考题.....	32
第三章 体内稳态反馈系统.....	33
3.1 体内稳态反馈调节作用	33
3.2 反馈调节系统的基本构成	34
3.3 稳态反馈系统的疾病	37
思考题.....	38
第四章 稳态调节系统的方框图.....	39
4.1 稳态反馈系统的基本环节和图示	39
4.2 系统的参考标准和不可调节变量	42
4.3 感受器和比较器	43
4.4 控制器的特性和生理解剖背景	44
4.5 多细胞元件	45
4.6 由生理解剖结构建立方框图	46
思考题.....	48
第五章 稳态反馈系统疾病的诊治.....	49
5.1 疾病的起因	49
5.2 稳态反馈调节系统疾病的分类	51
5.3 稳态反馈系统疾病的诊断和治疗	56
5.4 生物反馈治疗	61
思考题.....	66
第六章 动态系统的方框图表示.....	67
6.1 动态系统的数学表示	67

6.2	拉普拉斯变换	69
6.3	传递函数	77
6.4	系统方框图的构成	78
	思考题	80
第七章	线性系统分析	83
7.1	线性系统的一些基本环节	83
7.2	线性系统的频率特性	85
7.3	反馈控制系统	91
	思考题	105
第八章	多变量系统的状态方程及房室模型	106
8.1	房室系统简介	106
8.2	房室系统建模举例	112
8.3	系统的状态方程	120
	思考题	123
第九章	系统辨识简介	124
9.1	实验设计	124
9.2	求出模型的理论解	124
9.3	估算最优拟合参数	124
9.4	估算未知函数	133
9.5	模型的合理性检验	133
9.6	系统辨识实例	133
	思考题	152
第十章	非线性系统简介	153
10.1	引言	153
10.2	非线性环节的图形表示	154
10.3	非线性生物系统实例	156
10.4	非线性系统的辨识方法	166
	思考题	168
第十一章	医学信号处理	169
11.1	引言	169
11.2	用叠加法滤除随机噪声	170
11.3	频谱分析	171
11.4	相关分析	178
11.5	时间序列建模	180
11.6	生理信号的滤波问题	182
11.7	应用实例	184
	思考题	193
第十二章	最优和自适应控制在医学中的应用	194
12.1	引言	194

12.2	药物的最优给药方案	194
12.3	癌症化疗的最优控制	195
12.4	输液方案的最优控制	197
12.5	血糖系统的自适应控制和人工胰脏	200
12.6	血压的自适应控制	202
12.7	假肢的控制	204
12.8	人工器官的控制问题	205
	思考题	206
第十三章	医疗自动化	207
13.1	临床自动监护系统	207
13.2	计算机辅助诊断系统	213
13.3	医院信息系统	219
	思考题	223
附录 I	复数	224
附录 II	线性常系数微分方程的解	225
附录 III	矩阵	229
附录 IV	随机现象的数学描述	233
	参考文献	239

第一章 引言

1.1 控制论的基本概念

控制论 (cybernetics) 是一门边缘科学 (frontier science), 它和很多学科重叠交错, 很难规定其确切的研究范围, 其定义不下数十种, 但其核心内容和创始人维纳所规定的内容基本一致。维纳定义的内容是:

控制论是研究生物与机器中关于信息 (information) 的传递 (transmission) 和处理 (processing), 以及借助于信息的传递和处理来实现控制 (control) 的科学。

为进一步理解定义的内容, 先介绍几个基本概念。

1.1.1 控制论的概念

“控制”这个术语, 人们在谈话中常常用到, 它含有调节、操纵、管理、指挥的意思。在此是指:

某个主体即控制器 (controller) 使其他的对象即效应器 (effector) 按一定的目的来动作^[8]。

控制作用在生理和病理学中是最重要的研究内容之一。例如, 各级神经系统是如何控制心、胃、肌肉等等复杂作用的, 当控制器出现故障时会产生哪些不正常现象, 以及当控制失常时, 如何由症状寻找病因等等。这些都是生命现象中的基本问题, 也是医学理论和实践中需要研究的最基本问题。

例 1.1 人看见一物体并以手取物 (图 1.1)。

这是一种控制作用, 在此例中, 人的神经系统是控制器, 它使手 (效应器) 按人的意愿取物。

例 1.2 温度控制系统。

(1) 要保持室温基本恒定, 譬如说在 20°C 左右, 可以用两个控制器, 一是加热器, 一是散热器。当室温高于 20°C 时, 自动关闭加热器, 启动散热器, 当室温低于 20°C 时, 自动关闭散热器, 启动加热器, 以控制室温保持在 20°C 左右。

(2) 在人体内, 也存在着各种复杂的生理控制系统, 生理控制系统的内容一直是生理学研究的对象。图 1.2 简略地表示了体温控制系统的控制过程。可以看出, 体温的控制过程完全类似于室温控制系统。在正常人体内, “核心体温”近似保持常数约 37°C , 一天内约有 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的变化。当外界温度大幅度降低, 核心体温低于 37°C 时, 体内就通过产热系统 (如代谢加快),

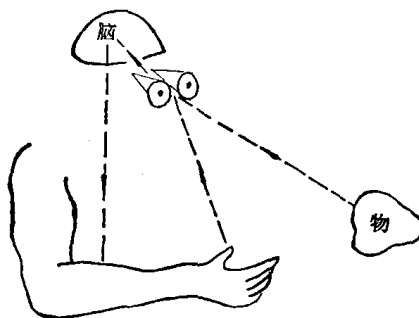


图 1.1 以手取物^[9]

使体温升高。当核心体温高于 37°C 时,通过散热系统(如通过皮肤出汗和肺的蒸发),使体温降低。

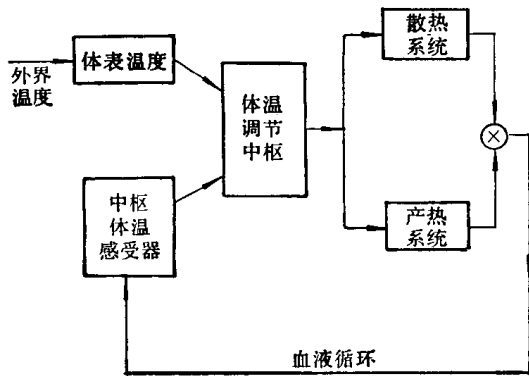


图 1.2 体温系统示意图

例 1.3 户主发现房屋着火时,立刻打电话通知消防队,消防队员闻讯后驾驶消防车至着火地点,扑灭火灾。这也是一种控制作用。

1.1.2 信息的概念

按照维纳的控制论定义,要实现控制,必须有信息的传递和处理(或称加工)。什么是信息呢?通俗地说是指消息、情报、指令、密码等等,它可以通过文字(或符号)及编码(如电子计算机中表示数字和文字的二进位码, binary code)来量化表示。这种对事物、概念或指令的一种形式化的表示,我们称之为数据。它能用人工或自然方式进行通信、解释或处理。

信息的定义是根据数据所用的人为约定赋予数据的意义。

信息与数据是不可分离而又有一定区别的概念。信息是数据所表达的客观事实,数据是信息的载体。信息和数据都反映客观现实世界的情况,数据比较具体,它依赖于具体的介质与编码方法,而信息则是比较抽象的认识,不随载荷它的物理装置的改变而改变。

信息已成为人类赖以生存的基本资源之一。信息有可共享性、可处理性、可传输性、可扩充性、可替代性等特点。

在例 1.1 中,物体的空间位置就是一种信息,它通过光线传递到视网膜,视网膜接收到光所表示的物体位置信息后,由神经纤维将此信息标记在神经细胞的电活动中(即神经元放电中),通过神经元脉冲放电序列,将信息传递到脑的视觉中枢(见图 1.1),在视觉中枢将该信息进行处理,转换成控制肌肉活动的信息,仍通过神经元脉冲放电序列,将信息传递到脑的运动中枢,以控制手去抓住物体。在例 1.2(a) 中,室内温度是信息,通过温度计传递到一种可由温度控制的开关装置,控制产热和散热。在例 1.3 中,着火和着火地点都是信息,由户主传递到消防队,消防队员再开车到着火地点救火。以下介绍几个有关的名称。

1.1.2.1 信息通道

信息传递的路线称为信息通道(channel),也就是信息发送者到信息接收者之间的信息传递路径。例如例 1.1 中的信息通道就是从物体位置通过视网膜传递到脑视觉中枢,然后再传递到脑运动中枢,再传到控制手运动的肌肉,最后再把手的位置反馈到视网膜,这个信息通道也就是图 1.1 中虚线表示的通道,箭头表示信息传递的方向。

1.1.2.2 信息传递

将信息不改变内容地由一个位置传送到另一个位置称为信息传递,例如在例 1.1 中,光将物体的位置信息由物体所在的部位传递至视网膜。

1.1.2.3 信息处理

在信息传递过程中,原有的信息,按照某种规则,转换成另一种信息,这种转换过程称为信息处理.如在例 1.1 中,由光信号所表示的物体位置信息,经中枢神经系统处理后,就转换成可以控制肌肉去抓物体的神经元放电的信息.又例如在人体血压系统中,延脑心血管中枢通过压力感受器获得关于动脉血压的信息,通过中枢神经及心肌血管平滑肌转换成控制心脏搏动与血管舒张和收缩的信息.

1.1.2.4 信息载体

信息在传递和处理过程中,需要以某种物质(或能量)作为载体(carrier),通过载体的物理状态来反映信息.信息本身蕴含在载体的时空模式中.如人与人通过语言交换信息是以声波(空气振动)为载体的.在人体内部,信息传递是以神经电脉冲、神经介质或各种体液内的物质为载体的.如视觉信息是由眼内的视网膜感受光刺激后,产生相应的神经电脉冲,经视神经传入大脑的.而在神经元(细胞)交换的突触处,信息藉神经介质进行化学传递.在人与机器、机器与机器之间以及机器内部广泛地采用了电信号、光信号、声信号以及各种形态的物质或能量作为载体.

相同的信息可以采用不同形态的物质或能量作为载体,例如同一条消息,它从广播电台传送到听众的过程中,就采用了各种信息载体.从播音员到话筒是藉声波传播,从话筒到无线电发射机是藉各种电压、电流信号,从发射天线到接收天线是藉电磁波传播,从收音机天线到扬声器又是藉电压、电流信号,最后扬声器藉声波将这条消息告诉听众.

信息载体的变化规律取决于所携带的信息内容.仍以电台广播为例,如果播送不同内容的消息,则首先是播音员发出声波波形、频率不同的信号,相应地,话筒输出的电压或电流信号的波形、频率也不同,经过发射机由天线发射出的电磁波的调制也不同,收音机接收到的信号也不同,最后送到扬声器中的频率波形也就各异,这样就将不同内容的消息告诉了听众.

1.1.2.5 信息的编码

早在信息论建立之前,人们就会把消息表示成易于理解的各种编码(encode)信息.例如,塔尖上不挂灯表示无敌人进犯;敌人从陆地上来,挂一盏红灯;敌人从海上进犯,挂两盏红灯.这就是用 0, 1, 2 的编码来表示的信息.如果挂三盏红灯,人们也会理解到是敌人同时从陆地及海上来,即信息的一些组合(运算)亦能用编码来表示.

信息的编码有各种不同的方式,对信息进行编码的目的是为了对信息进行各种处理,如存储于计算机,以便随时对它进行各类统计分析、查询和检索以及进一步提取信息等等.信息总是和某种实际载体联系在一起,并通过载体的一方面或多方面特性反映出来.载体的每一特性,我们称为一个基本元素,这个元素的内容可以用语言的符号(如英文字母或符号等)或样本空间的点(即数字或其组合)对它们进行编码.这里我们再举一个离散信息编码的例子,它也不难推广到一般连续的情况.例如要了解某系学生的性别、年龄和成绩情况时,我们可通过每个学生的姓名、性别、年龄、成绩这四个基本元素的编码值来表示某全部信息,如果该系有 596 名学生,就可把全部学生的姓名按次序写在人名册上,用

001 到 596 这 596 个数值分别对应于名册上每个姓名的次序号, 从而对应于每个学生的姓名, 这是编码中的第一个基本元素, 用一个 3 位十进制数表示。其次把性别男、女用符号 M 及 F 来表示, 这是编码中第二个基本元素。然后再对第三个基本元素年龄进行编码, 由于已知学生的年龄在 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 的范围内, 因此可用 0, 1, 2, ..., 7 来表示 8 种不同的年龄, 最后一个基本元素是成绩, 它有优、良、及格、不及格四种, 我们可以用 A, B, C, D 来编码, 把这四个基本元素组合起来(例如可以把四种基本元素的编码值按顺序自左至右排列起来), 就形成了反映某学生的全部情况的事件。在本例中共有 596 个不同的事件, 它反映了全部学生的情况。例如, 事件 036F3A 表示, 名册上的第 36 个学生是女生, 年龄 21 岁, 成绩优。

1.1.2.6 信号

在信息的传递和处理过程中, 信息是由载体的活动方式来表示的。例如反映心肌活动的心电信息, 是通过用心电图仪测出的电位值随时间变化的曲线来表示的, 在此, 电位这个物理量就是心电信息的载体, 该载体的活动方式就是电位值随着时间而变化。这种载体的活动方式称为信号 (signal), 它随时间和/或空间而变化。我们可以将这些信号定量地表示成曲线 (curves)、符号 (symbols)、密码 (codes) 及数学函数 (mathematical functions) 等等。这里我们研究的信息处理过程, 主要是通过观察和分析信号来进行。

1.1.3 系统的概念^[9]

1.1.3.1 系统的定义

“由有规则的相互作用或相互依赖的一些环节(或元件)连接起来的整体”称之为系统。

对一具体的构件, 究竟是作为系统还是作为元件来研究它, 需视此构件在研究问题中的作用来确定。例如在研究由大量神经元组成的神经网络特性时, 所研究的网络整体是系统, 其中每一神经元是元件。然而神经元本身又是由细胞体、树突、轴突等组成的整体, 在研究细胞动力学时, 又可将神经元当作系统。

由控制的概念可知, 要实现控制作用, 必须有控制元件和效应元件, 并按一定的规则组成系统, 因此在研究控制作用的机制和特性时, 控制、信息和系统三方面的理论和概念是不可分割的统一整体。

1.1.3.2 控制系统

控制系统是一个具有一定功能, 可以完成某种控制任务的系统。它包括了控制元件和效应元件。为实现准确的控制, 通常还要将效应元件执行控制命令的情况, 返回到控制元件, 这就需要一个反馈 (feedback) 装置。不论是工程控制系统或是生物控制系统, 都有类似的结构, 这可用图 1.3 的框图来表示。在本书范围内所涉及的系统, 一般都是指控制系统。

1.1.3.3 控制系统的输入、输出和扰动

控制系统的输出 (output), 通常就是被控制量, 如温度、血压等, 也就是可以测出的系统状态。控制系统的输入 (input), 通常是被控制量所要求的给定值或一个在允许范围内

变化的量。如果是人为地给系统一个有目的输入，这种输入往往又称为给系统的刺激或称为对系统的控制量。扰动或干扰（disturbance）是指影响控制系统正常工作的不利因素，如生产过程中负荷的变化，生物机体受到的伤害性刺激，信号测量中的噪声等。

1.1.3.4 自动调节系统和自动跟踪系统

在扰动的影响下，能自动保持输出（被控制量）在给定的允许范围内变化的系统，称为自动调节（automatic regulation）系统，常简称为调节系统，这是一种最常见的控制系统。如工业生产过程中的温度、压力、流量调节系统。生物机体内绝大部分的控制系统也都是调节系统，如血压、体温、呼吸、内分泌激素等调节系统，这类有自动调节作用的系统，能使人体在各种不同的外界刺激下保持体内的稳态。

输出能按某种规律自动跟随输入变化的系统，称为自动跟踪（autotrack）系统或随动系统。如雷达对目标运动的自动跟踪系统，视觉控制中眼球对目标运动的自动跟踪系统。

1.1.3.5 闭环控制系统和开环控制系统

开环（openloop）控制系统是控制作用不依赖于系统输出的控制系统。在图 1.3 中，如果去掉反馈联系的环节，就成为开环控制系统。

闭环（closedloop）控制系统是指控制作用在某种程度上依赖于系统输出的控制系统。图 1.3 的系统就是闭环系统。

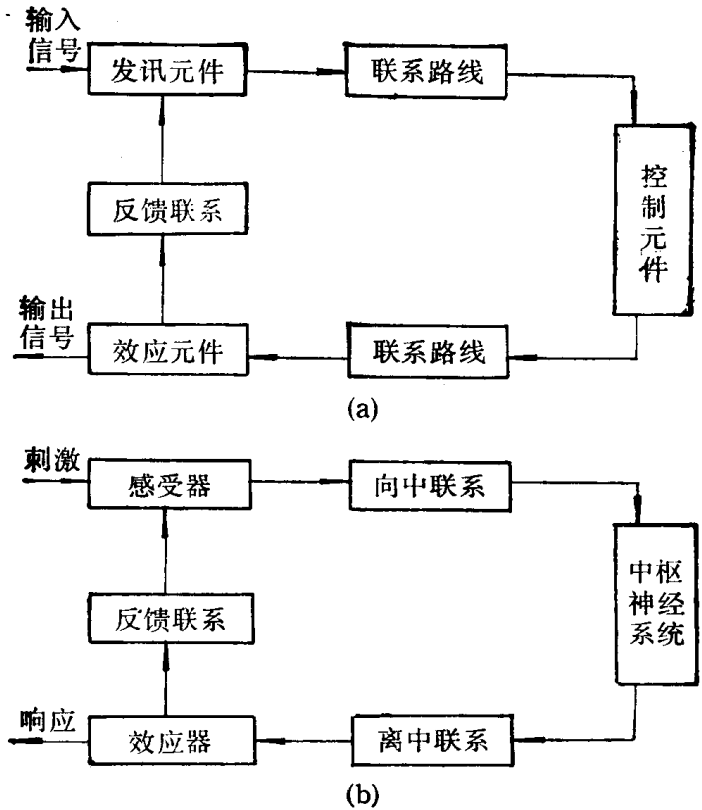


图 1.3 工程和生物控制系统的主要环节和联系方式

1.1.3.6 反馈

反馈是闭环控制系统的特征,是指系统的输出或系统的另外一些受控变量 (controlled variable) 和系统的输入作比较后,形成的一种合适的调节作用。

反馈对系统的影响是:

- (1) 增加控制作用的精确度;
- (2) 减少非线性性和畸变效应;
- (3) 增加频带宽度。

从上面介绍的概念可知,控制论是一门研究生物系统、工程系统、社会系统、经济系统等共同控制机理的科学。其研究的核心内容不着重于控制系统的实际物质结构,而着重于寻找系统内信息的传递通道,观察通道中各不同部分信息载体活动时所测得的信号,并通过对不同部分的信号转换过程的分析,来研究信息的处理过程,从而定量地掌握系统控制作用的特征和机理。

1.2 控制论的形成和基本内容

1.2.1 控制论形成的历史^[10]

控制论学科的形成是生产发展的必然结果。在生产发展过程中,人们逐渐创造出更

复杂的机器以便更多地代替人的体力劳动。在创造各种机器的过程中,逐渐形成了一类专门起控制和调节作用的部件。瓦特发明的蒸汽机上的离心调节器 (centrifugal governor) (图 1.4) 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 ω) 恒定。通过阀门,蒸汽进入汽缸,当汽缸中压力增大时,轴速加快,这时联在轴上的滑杆由于小球向上运动使 θ 角增大,轴环上升,联在轴环上的杠杆就使阀门关小,于是进入汽缸的蒸汽量减少,气缸中压力降低,使轴的转速 ω 减慢,这又使 θ 减小,轴环下降,其结果又拉开阀门增加蒸汽的流量。调节器就是以这样的方式控制转轴的转速,使其保持基本恒定的。这样的控制作用就称为调节。

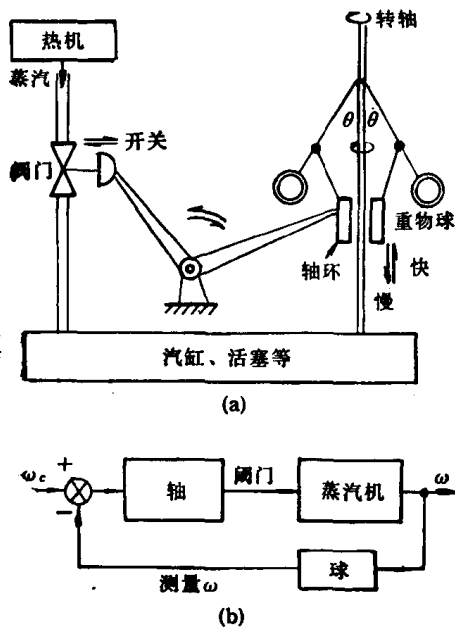


图 1.4 (a) 瓦特的离心调节器; (b) 瓦特离心调节器方框图^[7]

人们又不断发明了模拟手工劳动的机器。在发明新机器的过程中,人们也要求了解人体内的控制作用,即人是如何指挥手做工的。也就是说,

人们要求研究机器和人体中的共同控制原理。

1.2.2 生物体内各级水平的控制或调节系统举例

生物体内的各个不同部分和不同结构的各级水平上,即从整体水平、系统水平、器官

水平、细胞水平直到分子水平都存在着各种不同模式的十分复杂的控制或调节过程。这些过程往往都是维持生命和健康生活所不可缺少的。是生命现象中的本质问题之一。在人体中，起主要控制作用的有两大系统，即神经系统和内分泌系统。一般地，神经系统控制人体的快速动作，如骨骼肌肉运动。内分泌系统对体内的各种代谢功能起重要控制作用，例如控制细胞内的化学反应速率，或控制通过细胞膜的物质运输过程。有些激素在几秒内生效，而有的则是在几天、几周、数月甚至数年持续地长期发生作用。在此我们概括地例举一些体内存在的控制系统。

1.2.2.1 整体水平的调节系统

例 1.2 中的体温调节系统就是整体水平的调节系统。它使人体能在不同温度的外界环境条件下，保持核心体温恒定在 37°C 左右。

1.2.2.2 系统水平的调节系统

图 1.5 的血液循环系统就是系统水平的调节系统。这是一种十分精致的调节系统，通过它可对人体内的细胞提供各种基本的营养物质，并使很多循环参数(如心输出量、血压、心率等等)保持基本稳定。

图 1.5 是血液循环系统的示意图，它由两个主要环路组成。在水平虚线下部是体循环部分，在水平虚线上部是肺循环部分，在两个环路中，血液都是由心脏流至动脉，通过小动脉和毛细血管后流入静脉，然后再流回心脏。心脏输出的血量和流回心脏的血量应该是相同的。在图中两个循环环路中，都用可扩张的囊表示动脉，另外用更大的可扩张性的囊表示静脉。动、静脉之间的联系是小动脉和毛细血管。可以认为，血流在一切大的血管中循环时，近似于无阻抗的流动，而在小动脉和毛细血管中流动时，则有相当大的阻抗。要使血流通过“有阻抗”的小血管，心脏要在高压条件下将血流排入小动脉。在体循环中，心缩期的收缩压约 120 mmHg^1 ，在肺循环中约 22 mmHg 。1971 年 Guyton 建立了一个循环系统模型，包括 18 个子系统和 354 个环节，用临床可测资料代入模型后，进行计算机仿真(simulation)获得了很多定量的有用信息。但仍不足以描写实际系统的许多细节。

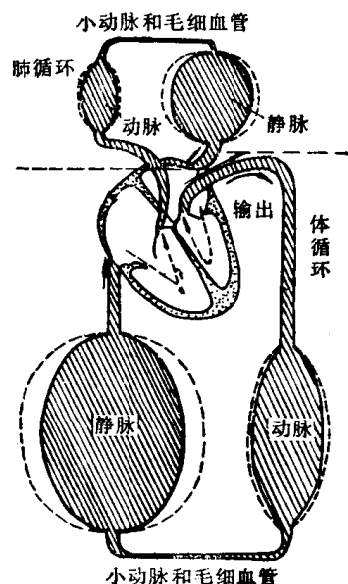


图 1.5 血液循环系统路线图^[11]

1.2.2.3 器官水平的控制系统

图 1.6 的半规管(semicircular canal)系统就是器官水平的控制系统。半规管是一个环形的平衡器官，管内充满着内淋巴液。在人体的每个内耳中有三个互相垂直的半规管，控制对三个不同方向的平衡。例如，当头部突然作水平旋转时，由于头角位 ϕ 的加速转动，在水平半规管中终帽会因内淋巴液的带动，发生偏斜，即图 1.6 中的偏转角 φ 。

1) $1\text{ mmHg} = 133.322\text{ Pa}$ 。

于是连在终帽下的传入神经便立即将这种偏斜的信息(φ 角)传至前庭核和中枢桥脑网状结构,最后通过动眼核到达眼外肌控制眼位角的变化(见图 2.3),从而在人旋转过程中,使眼睛有保持定向的能力。

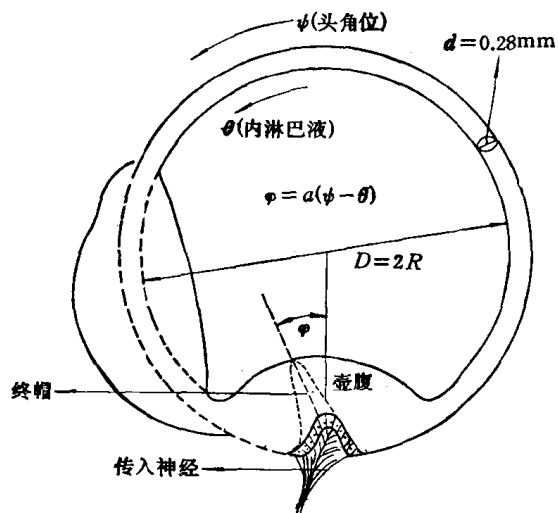


图 1.6 半规管系统

作用下被包入细胞膜内的情况。蛋白质的存在使膜表面特性发生变化,凹陷下去并迅速包住蛋白质[如图 1.7(a) 中的 C]。接着包含蛋白质的这部分凹陷膜,从细胞表面裂开,形成被吞噬的小颗粒而进入细胞膜内[如图 1.7(a) 的 D]。什么原因使细胞膜扭曲而形成小颗粒至今尚不清楚。人们只知道完成这一过程需要从细胞内获得能量,这能量是由一种称为 ATP (adenosine triphosphate) 酶的物质来提供的,其化学结构如图 1.8 所示。

颗粒出现在细胞内以后,一个或多个溶菌酶就立刻来侵犯它,把水解酶送到颗粒中,见图 1.7 (b)。这样,一个助消化的颗粒就形成了,水解酶开始水解蛋白质、糖元质、类脂体、核酸、粘多糖类及颗粒中的其他物质。水解后的产物是氨基酸、葡萄糖、脂肪酸、磷酸盐等等,然后这些物质通过膜的扩散进入细胞质中。

1.2.2.5 分子水平的控制系统

细胞内的能源调节是通过 ATP 释放的能量进行的。在各种酶的作用下,细胞内的食物和氧起化学反应,这些酶控制着它们的反应速率和路径并按确定的方向释放能量。从营养物质的化学反应释放的能量用于形成 ATP,其形成过程见图 1.9。注意,ATP 是一种核苷酸,由氨基腺嘌呤五碳、核糖及三个磷酸盐根组成。后两个磷酸根称为高能磷酸键和分子磷酸键,它们和分子的其余部分联接着,高能键在图 1.8 中用符号“~”表示,每个键断裂时在人体的生理条件下可释放大约 8000

1.2.2.4 细胞水平的控制系统

细胞要生存和生长,必须从其周围的体液中摄取营养物质和其他一些物质。这些物质可以有几种不同的方式通过细胞膜进入细胞内。这里只介绍一种特异的吞噬功能。图 1.7 (a) 示出了细胞的一种吞噬步骤,这是一种以小颗粒的方式来摄取少量的细胞外液和被溶解的物质过程。图中显示了最初的三个蛋白质分子在简单的胞饮

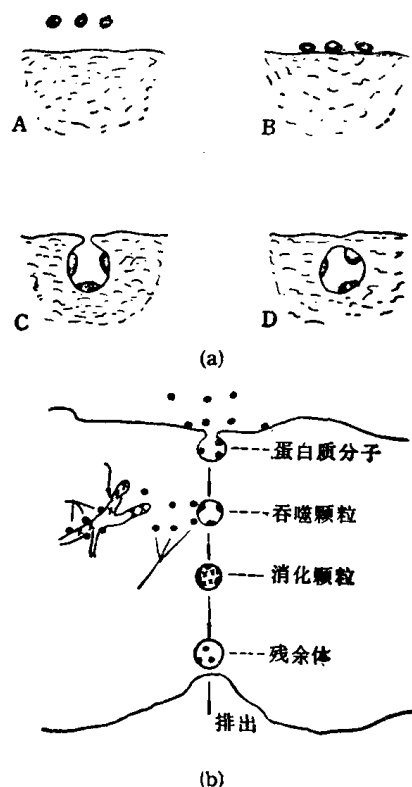


图 1.7 细胞摄取食物的过程^[11]。(a) 吞噬机制; (b) 在吞噬颗粒中由酶消化物质的过程