

项国波 著

机械工业出版社

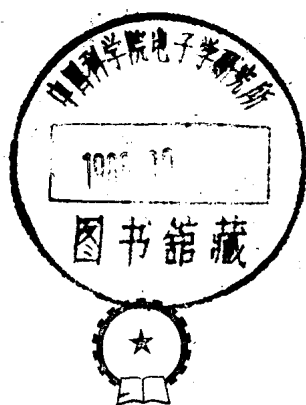
LTAE最佳控制



73.8-
658

ITAE 最佳控制

项国波 著



机械工业出版社

8610709

本书介绍控制论中最基本的问题和概念，着重介绍线性控制论中的ITAE最佳调节律（I表示积分，T表示时间，A表示绝对值，E表示误差）及其在工程上的实现方法，在必要的地方，定性地介绍了非线性效应对线性系统稳定性和最佳调节律的影响。书中还介绍了控制论的形成；讨论了最佳控制的提法；对几种最佳控制律进行了评述；讨论了最佳控制的相对性和绝对性的辩证关系；给出了状态元和最佳结构实现等新概念。

本书主要供从事控制论研究和应用的工程技术人员阅读，有关专业的高校师生也可参考。

ITAE最佳控制

项国波 著

责任编辑 王中玉 严蕊琪

封面设计 刘 珊

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张 11 1/8·字数 246 千字

1986年2月北京第一版·1986年2月北京第一次印刷

印数 0,001—2,920·定价 2.65 元

科技新书目：113-97

统一书号：15033·6107

9483/12
前言

ITAE 最佳调节律，早在1953年就有两位美国学者D. Graham和R. C. Lathrop研究过，但是长期没有在工程中获得广泛的应用。1977年后，经我们重新研究，发现如果加以发展和应用，可以设计出性能指标非常好的控制系统。后来，有些同志在几个领域中，对这一最佳调节律进行试验研究和应用，得到令人满意的结果。因此，现在有必要对这一最佳调节律的发展情况、基本原理和工程应用中的设计方法加以系统的介绍，以期在工程系统中加以推广应用，并在应用过程中再充实和提高。

本书大体上包括两部分内容，前五章叙述控制论中最基本的一些概念，这一部分内容，对初学者和从事于这些内容教学工作的同志有参考价值。后两章介绍ITAE最佳调节律和它的综合设计方法，并附有若干应用例题。其中有的例题已在工程中获得应用；有的已做了实验研究；有的是属于应用研究。这些内容是为工程研究和实际工作者写的。

本书讲的是线性理论，这是一个约束空间，但我们常常要穿越这个约束空间，讲些非线性效应。因为所谓“线性”总是相对的，非线性才是绝对的。许多系统在极限运行情况下，不可避免要进入非线性空间，因而不得不用非线性方法分析它们对系统运行状态的影响。研究表明，正是这些非线性的存在，决定了系统运行的基本性质。此外，我们还讨论频率法和状态空间法的统一问题，提出了开环 A 矩阵和最佳

■

结构实现等新的问题。

福建省中心检验所工程师程芸同志协助我编写；航天工业部高级工程师于景元同志、中国科学院系统科学研究所韩京清副研究员、清华大学自动化系郑学坚副教授对本书初稿进行了仔细地审阅，并提出宝贵意见，在此一并致谢。

项国波
一九八三年四月
于福州大学沁园

目 录

绪论	1
第一章 三种基本控制原理	11
1.1 引言	11
1.2 扰动调节原理	12
1.3 负反馈调节原理	17
1.4 复合调节原理	23
1.5 怎样选择控制原理	24
1.6 自动调节系统的分类简述	25
1.7 系统的职能结构及其敏感度	30
1.8 控制系统的品质指标	36
参考文献	39
第二章 基本的数学工具	41
2.1 行列式及其基本性质	41
2.2 矩阵的定义	47
2.3 矩阵的基本运算	50
2.4 矩阵的基本变换	53
2.5 矩阵的微分和积分	56
2.6 非本质非线性系统的线性化方法	57
2.7 线性系统微分方程的列写方法	63
2.8 系统的频率特性	71
2.9 傅里叶级数	74
2.10 傅里叶变换	77
2.11 拉普拉斯变换	81
2.12 若干简单函数的拉氏变换	84
2.13 象函数 $F(p)$ 的零点和极点	87
2.14 拉氏变换的基本性质	91

2.15 用拉普拉斯变换求解线性微分方程	96
参考文献	99
第三章 典型环节和状态元	100
3.1 引言	100
3.2 传递函数及其基本性质	101
3.3 传递函数的典型环节	104
3.4 积分环节的状态元和频率特性	106
3.5 惯性环节的状态元和频率特性	108
3.6 振荡环节的频率特性和状态元	110
3.7 一阶微分环节的状态元和频率特性	113
3.8 二阶微分环节的频率特性和状态元	115
参考文献	118
第四章 控制系统的数学描述	119
4.1 引言	119
4.2 开环和闭环状态的传递函数	120
4.3 由环节的传递函数求系统的传递函数	125
4.4 控制系统的无静差度和静差系数	129
4.5 传递函数的标准化	135
4.6 三种典型控制系统状态方程标准型	140
参考文献	147
第五章 线性系统的稳定判据	148
5.1 引言	148
5.2 线性系统的稳定条件	151
5.3 代数稳定判据	158
5.4 幅角定理	166
5.5 米哈依洛夫稳定判据	170
5.6 Nyquist稳定判据	173
5.7 对数频率特性	189
5.8 典型环节的对数频率特性	191

5.9	单环自动控制系统对数频率特性的近似绘制法	197
5.10	对数频率特性的稳定判据	199
5.11	稳定裕量	202
5.12	利用对数频率特性分析多环系统的稳定性	206
	参考文献	211
第六章 ITAE最佳调节律		213
6.1	引言	213
6.2	最佳性能指标的提法	214
6.3	几种最佳性能指标的评述	228
6.4	ITAE最佳调节律参数的确定	247
6.5	时域中闭环系统ITAE最佳调节律的标准型	255
6.6	开环传递函数及其状态方程标准型	259
6.7	ITAE最佳结构及其开环A矩阵	263
	参考文献	287
第七章 ITAE最佳调节律的综合设计——几个应用实例		289
7.1	引言	289
7.2	可综合准则	290
7.3	电液伺服系统的ITAE最佳调节律的综合设计	303
7.4	晶闸管直流传动控制系统中的ITAE最佳调节律的综合设计	308
7.5	ITAE调节器	326
7.6	同步发电机的ITAE最佳励磁控制	332
7.7	最佳结构实现	344
7.8	非线性效应对ITAE最佳调节律的影响	347
	参考文献	348

绪 论

现在，在人类社会许多领域中得到广泛应用的自动化技术和控制理论，就其基本原理来说只有三种：扰动调节原理、反馈控制原理和复合控制原理。尽管自动化技术很早就有了，但是从广泛的技术中抽象、概括出基本原理来却是近几个世纪的事。

例如，我国祖先制造的指南车，可能始于公元前2698年至2599年的黄帝时代^{〔1〕}，或者公元前139年至78年的东汉时代^{〔2〕}。就是说，至少在两千多年前就开始应用自动化技术了。但是，把指南车的控制原理搞清楚，却是在控制论发展到相当水平的本世纪60年代。这时，人们才知道它的控制原理是控制论中三大基本原理之一——扰动调节原理。现在，在中小型同步发电机电压自动调节器中，已经获得广泛应用的各种形式的相复励系统，知道它的工作原理也是扰动调节原理的人也不多。

反馈控制原理应用于生产实践和科学实验比扰动调节原理晚。据考证，公元1086~1089年的北宋哲宗元祐初年，我国的苏颂和韩公廉制成的水运仪象台，是按偏差调节原理，亦即负反馈控制原理制造的，但探明其原理也是本世纪的事^{〔1〕}。

复合控制原理，顾名思义，它是由扰动调节原理和负反馈调节原理相结合而形成的一种综合性的控制原理。它把系统中经常出现的主要扰动按扰动调节原理加以补偿，余下的次要扰动，按负反馈调节原理加以控制，因此，这两个原理

8610709

的优点，它兼而有之，而它们的缺点又能相互弥补^[4]，因而它成为现代设计高精度自动化技术的主要原理。在发电机调压系统中，常用的带电压校正器的相复励系统也是按这个原理设计的。现在有人把这一原理叫做“鲁棒性”或“强壮性”，这是因为按这一原理设计的系统具有很强的抗干扰能力，因而给它这种形象的说法。

控制论中这三种基本控制原理，尽管很早就在生产实践中得到应用，但是被人类认识并自觉地应用它们来解决生产、科学实验中出现的問題，大约是在本世纪30年代前后。这是因为这门技术科学的发展是建立在其他各种技术科学综合发展的基础上，要从那样广泛的技术领域中概括出普遍适用的共同规律来，就不能不依赖于其它技术科学发展的广度和深度了。

1868年，在英国运行的75000台离心式调速器中，绝大多数出现了“幌动”。这一现象，吸引了很多工程师、物理学家和数学家的兴趣。当时，英国的物理学家J.C.Maxwell把这种幌动现象变成线性微分方程来研究^[5]。从那时起，经1877年的Routh和1895年的Hurwitz，前后27年，终于形成了适用于解决低阶微分方程描述的控制系統稳定性問題的数学工具了。这就是代数稳定判据的形成过程。

显然，光是代数稳定判据是形不成控制理论体系的。1932年，在贝尔电话公司工作的H.Nyquist提出了著名的稳定性的频率判据^[6]，不仅解决了当时阻碍长距离电话通讯中出現的关键技术问题——负反馈放大器的稳定性問題，而且很快地从它的发源地——电子学——扩伸到机械、航空、航海和新兴的化学工业等技术领域中去。到本世纪50年代，就成为控制論的主要内容了，即使在状态空间法达到全盛的60年

代,频率法也是解决地面上工业控制系统的主要设计工具。可以说,频率法的建立和完善过程就是控制论初步形成的过程。

频率法的出现是和电力工业以及电子管放大器的发展分不开的。由于电力工业的发展,需要对具有正弦函数的电压和电流信号组成的交流网络进行计算,于是建立了复数运算和复变函数论^[7],这就为频率法的建立准备了数学工具;另一方面,是社会发展的需要。1915年,美国贝尔实验室为了敷设一条长距离的电话线,遇到了大量的技术困难,其中最为关键的技术问题是长距离输送电话信息带来的信息衰减和畸变问题,这是两个相互关联,而又必须同时加以解决的技术问题。根据当时电子管放大器的技术水平,为了把每输送3000m的距离,就衰减60dB的信息,提高到允许的最低限的18dB,需要用6级电子管放大器。可是,每一级放大器的非线性畸变都很严重,不解决信息畸变问题,电话线还是无法投入运行。1927~1932年,在贝尔实验室工作的H.Black和他的同事们,用严格的线性元件做为高增益放大器的反馈回路,解决了非线性特性引起的信息畸变,但是产生了另一个问题——振荡。这一次出现的振荡和1868年瓦特调速器中出现的幌动情况不同,当增加回路的增益时,系统中出现了振荡,这是人们预料到的;可是,当增益减少到某种程度时,系统中也出现振荡,用当时已知的理论工具,很难解析这种“奇怪”的现象。于是,H.Nyquist的频率法就应运而生了,圆满地解决了这一问题。

Nyquist的频率法的重要贡献在于,它可以利用物理上能够测量的开环系统频率特性来判别闭环系统的稳定性、静态误差和过渡过程的品质指标等一系列问题。这就可以排除一些用数学方法来列写该系统的微分方程时出现的困难。因

此, 它能适用的场合远不是代数判据所能比拟的。1940年, H.W.Bode引入了半对数坐标系^[8], 使频率特性的绘制工作更加适用于工程设计; 1942年, H.Harris引入了传递函数的概念^[9], 用方框图、环节、输入和输出等信息传输的概念来描述系统的性能和关系。这样就把原来由研究反馈放大器稳定性而建立起来的频率法, 更加抽象化了, 因而也更有普遍意义了, 从而可以把对具体的物理系统, 如力学、电学、化学等系统的描述, 统一用传递函数、频率响应等抽象的概念来研究。1948~1953年间, W.R.Evans建立了根轨法^[10, 11]。本世纪40年代, 苏联Гольдфарб、英国Daniel和Tustin、德国Oppelt、法国Dutilh和美国Kochenburger均先后各自独立地把频率法扩展到非线性控制系统中去^[12~16]。60年代以后, 我们建立了非线性系统的对数研究法^[17~22]。第二次世界大战期间, 由于对雷达和炮火控制的需要, 发展了采样和脉冲控制系统, 产生了和连续系统拉普拉斯变换相对应的断续系统的拉普拉斯变换-Z变换^[23], 可以称它为脉冲系统的频率法。上述这些工作, 使频率法从线性系统扩展到非线性系统, 从连续系统扩展到断续系统、某些时滞的线性和非线性控制系统等等^[24]。1954年, 钱学森教授把工程实践中所用的许多设计原则上升为理论, 发表了《工程控制论》^[25, 26]一书。

本世纪50年代以后, 由于空间技术的发展, 对控制系统提出了更加严格的技术经济要求。例如运载装置的最小能耗控制和最速控制等问题, 前者是从经济观点提出的技术要求, 后者则是在一定的经济约束下的技术要求。面对这样一些技术问题, 用Nyquist建立的频率法, 很难解决。1956~1963年间, 苏联Л. С. Понтрягин等人建立的极大值原理^[27, 28]可用来解决上述新问题。与此同时, 美国R.Bellman应用动态

规划讨论了有约束的最优控制问题^[29-31]。1960~1964年间,美国 R.E. Kalman 建立了满足二次型性能指标的线性最优控制问题^[32-36]。这些论述都是以时域法,亦即状态空间法为基础的,使控制论更加数学化了。吸引了大批应用数学工作者从事这一领域的工作,并成功地应用于空间技术。这就促使人们急切希望把这一套完全不同于频率法的时域方法,应用到地面上的工业控制系统中来,但是碰到了较大的理论、经济和技术上的困难^[37]。因为空间运载工具的数学模型比较简单,也易于确定,控制系统的性能指标比较单一,而在工业控制系统中碰到的情况则完全不同:首先工业控制对象的数学模型很难用准确的数学模型来描述;其次,各种工业控制对象对技术性能指标的要求,很难用最小能耗或二次型性能指标这样一个单一的模式加以简单地概括;许多场合对各种各样的工业控制对象的控制系统的性能指标的提法,比空间问题要复杂得多了;第三,工业控制系统的经济效果是设计控制系统必须考虑的主要因素之一,一个耗费巨大的最优控制系统,还不如用一个次最佳或基本上能够满足技术要求,但比较低廉的控制系统来代替。因此,即使在状态空间法极盛的60年代,频率法仍然是工业控制系统工程技术人员乐于采用的一种方法。

随着集成运算放大器的发展和PID调节器相继产生的电子最佳调节理论,在二、三阶工业控制系统中获得了广泛应用。同时,由于用传递函数的概念来描述控制系统的动态性能时,是把系统看成一个整体,即使是高阶系统也总能找到一对极点是占主导地位,而其它的极点是次要的,可以把次要的看成小参数而忽略不计。所以用频率法研究控制系统的性能,常常只要处理低阶数学模型,就可以解决工程实际问题了,这在状态空间法中就很难做到。状态空间法

是把整个控制系统分割成相对“孤立”的状态来分析,就很难比较各个“孤立”的状态各自对整个系统的影响程度,因而也很难用低阶的数学模型来逼近实际控制系统的行为。其次,它是从闭环状态来列写控制系统的 A 、 B 、 C 和 D 四个矩阵方程的,因此,控制系统开环频率特性所拥有的优点,如频宽、估计测量噪音等性能,都由于被分割而湮没了。由于这些原因,70年代以后,有一些控制论者开始撰文阐明各自的观点,其中,影响比较大的要算是Hurwitz和Shaked 两人的文章^[38]了。他们认为,状态空间法只有数学上的意义,而从控制工程观点来看,是没有实际意义的。后来,有许多控制论者从事于复苏频率法的研究工作,在单变量控制系统中,我们重新验算了早在1953年由美国的D. Graham和R. C. Lathrop给出的满足ITAE最优控制规律的微分方程的系数阵,说明了用他们的结果来设计控制系统所得到的过渡过程的品质指标,比目前流行的按电子最佳调节律所设计的系统要好些;给出可综合准则、开环ITAE最佳频率特性、开环 A 、 B 矩阵、最佳结构等新概念,并且分析了非线性效应对线性最优控制律的影响^[39~41]。在多变量控制系统中,也有许多从事于频率法的复苏工作的人,其中特别有成效的是英国H. H. Rosenbrock的多变量控制系统的频率法^[42~44]。这些工作的目的,都是把单变量控制系统中频率法所具有的优点保留在多变量控制系统中。

从指南车的应用到现在形成的控制论,其间相隔两千多年。长期的、缓慢的技术积累才形成现代控制论。尽管现代控制论已经包含了庞大的内容,但从Routh和Hurwitz的代数判据和Nyquist的频率法的建立到现在,最多仅百年左右的时间。可以预测,不管控制论今后将怎样发展,

Nyquist 开创的频率法和由Kalman等人建立的状态空间法 仍将是控制论中最基本的方法。

随着生产的发展,自动化技术已经扩伸到生物学、经济学、人口论和交通管理等社会科学领域,在这些领域中都能找到控制论应用的场所。

参 考 文 献

- [1] 万百五, 我国古代自动装置的原理分析及其成就的探讨, 自动化学报, Vol.3, No.2, 1965, 4.
- [2] 刘仙洲, 中国机械工程发明史 第一编, 科学出版社, 1962.
- [3] Г. М. 乌兰诺夫著, 胡保生译, 扰动调节, 上海科学技术出版社, 1962.
- [4] 项国波, 自动调节原理 一些基本概念的讨论, 电气传动, 1976, 4.
- [5] J.C.Maxwell, On Governors, Vol.16, pp.270~283, Proc. Roy. Soc. London, 1868.
- [6] H.Nyquist, Regeneration Theory, Vol.11, pp.126~147, Bell Syst. Tech. J., 1932.
- [7] C.P.Steinmetz, Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena, 1897.
- [8] H.W.Bode, Relations Between Attenuation and Phase in feedback Amplifier Design, Vol. 19, pp. 421~454, Bell Syst. Tech. J., 1940.
- [9] H.Harris, The Analysis and Design of Servomechanisms, QSRD Rep. No.454, 1942.
- [10] W.R.Evans, Graphical Analysis of Control Systems, Vol.67, pp.547~551, AIEE, Trans., 1948.
- [11] W.R.Evans, Control System Synthesis by Root Locus Method, Vol.69, pp.1~4, AIEE, Trans., 1950.

- [12] Л.С.Гольдфарб, О нелинейности регулируемых систем, Бюлл. Взи. No. 3, 1941.
- [13] A. Tustin, The Effects of Backlash and of Speed Dependent Friction on the Stability of Closed Cycle Control Systems, Vol. 94, pp. 143~151, J. IEE, Part II, 1947.
- [14] J. Dutilh, Theorie des Servomechanisms a Relais, pp. 438~445, Onde Elec., 1950.
- [15] W. Oppelt, Locus Curve Method for Regulators with Friction, Vol. 90, pp. 179~183, Z. Deut. Ingr., Berlin.
- [16] R. J. Kochenburger, A Frequency Response Method for Analysing and Synthesising Contactor Servomechanisms, Vol. 69, pp. 270~283, AIEE, Trans., 1950.
- [17] 项国波, 非线性自动调整系统自振荡的对数研究法, 福州大学学报 总第三期, 1962.
- [18] 项国波, 非线性自动调整系统近于正弦自振荡过渡过程的对数分析法, 福州大学学报 总第六期, 1964.
- [19] 项国波, 非线性自动控制系统若干问题的对数分析法, 自动化学报 第三卷, 第三期, 科学出版社, 1965.
- [20] 项国波, 非线性自动控制系统中的谐波线性化原理, 信息与控制 Vol. 9, No. 1, 中国科学院沈阳自动化研究所, 1980.
- [21] 项国波, 具有 n 个非线性特性自动调整系统自振荡的对数分析法, 信息与控制 Vol. 9, No. 3, 中国科学院沈阳自动化研究所, 1980.
- [22] 项国波, 两台发电机组并联运行稳定性的对数特性研究法, 中国科学, 1981, 7. 英文版, Vol. XXIV, No. 11, 1981.
- [23] Я. З. Цыпкин, Теория импульсных систем, физматгиз, 1958.
- [24] Alistair G. J. Mac Farlane, Frequency-Response Methods in Control Systems, IEEE, Press, 1979.
- [25] 钱学森, 工程控制论, 科学出版社, 1958.

- [26] 钱学森、宋健, 工程控制论 修订版, 科学出版社, 1980.
- [27] V. Boltyanskii, R. Gromkrelidze and L. S. Pontryagin, On the Theory of Optimal Processes, Rep. Acad. Sci. USSR, Vol. 110, №1, pp. 7~10, Trans. in Selected Papers on Mathematical Trends in Control Theory, R. Bellman and K. Kalaba, Eds, New York, Dover, 1964.
- [28] L. S. Pontryagin, V. G. Boltyanskii, R. V. Gamkrelidze and Y. F. Mischensko, The Mathematical Theory of Optimal Processes, New York Interscience, 1963.
- [29] R. Bellman, The Theory of Dynamic Programming, Vol. 60, pp. 503~516, Bull. Amer. Math. Soc., 1954.
- [30] R. Bellman, On the Application of the Theory of Dynamic Programming to the Study of Control Processes, in Proceedings of the Symposium on Nonlinear Circuit Analysis, pp. 199~213, New York Polytechnic Inst. of Brooklyn Press, 1956.
- [31] R. Bellman, Dynamic Programming, Princeton NJ, Princeton Univ. Press, 1957.
- [32] R. Bellman, Adaptive Control Processes, A Guided Tour, Princeton, NJ, Princeton Univ. Press, 1961.
- [33] R. E. Kalman, Contribution to the Theory of Optimal Control, Vol. 5, pp. 102~119, Bol. Soc. Math. Mexicana, 1960.
- [34] R. E. Kalman, On the General Theory of Control Systems, in Proceedings of the First IFAC Congress in Moscow, Vol. 1, pp. 481~492, London, Butter Worth, 1960.
- [35] R. E. Kalman, The Theory of Optimal Control and the Calculus of Variations, in Mathematical Optimization Techniques, CA, Univ. of California Press, 1963.
- [36] R. E. Kalman, When is a Linear Control System Optimal? J. Basic Eng. Ser. D, Vol. 86, pp. 51~60, 1964.