

工程中的控制论

А.Г. 伊瓦赫年柯

科学出版社



7382
214

工程中的控制论

具有适应性特色的自动控制系统

A. Γ. 伊瓦赫年柯 著

欧阳景正 涂其桷 译

科学出版社

1966

DB2/10

А. Г. Ивахненко

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

Государственное издательство
технической литературы СССР
1962

內 容 簡 介

本书研究了生产过程的新型自动控制系统,这些系统的特点是能使其特性适应工作条件的連續变化,以达到最高的生产率,最高的效率,最快的动作以及其他的质量指标。这些系统的发展与工程控制論的新型自动控制学之間世是分不开的。

书中研究了一些依次序的和按統計的控制論系統的基本綫路,并且闡述了一般理論原理。作者指出,組合型鎮定系統的理论(包括不变性条件)无需作巨大的改变就可以应用于控制論极值系統。

本书对象是生产过程自动化方面的工程技术人员与科研工作者。

工 程 中 的 控 制 論

〔苏〕А. Г. 伊瓦赫年柯 著

欧阳景正 涂其桷 译

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳門内大街 137 号
北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

上海新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1966 年 5 月 第 一 版	开本: 850×1168 1/32
1966 年 5 月 第一次印刷	印张: 11 3/8
印数: 0001—3,180	字数: 299,000

統一書号: 16031·231

本社書号: 3447·15—8

定价: [科六] 1.70 元

目 录

引言	1
第一章 自动学与工程控制論	6
各种基本的控制原則	6
自动学的定义	6
一些早期的自动調節器	6
控制論問世前的自动調節	8
工程控制論——生产綜合自动化的基础	10
大型計算机的基本功能	12
人类某些定型的脑力劳动的自动化	14
能够对大量方案进行比較并且从中选定一种方案的机器	14
能够选择最优方案的机器的实际应用	15
按程序动作的机器	16
能够按照事先指定的規則(算法)或判据来挑选文字与声音 的机器	17
机器的能力能否赶上并超过人类的大脑?	18
控制論的一些基本概念	20
信息論与自动調節	22
信息量与消息的概率之間的关系	26
科特利尼科夫定理	26
随机过程的統計理論	27
随机变量理論簡述	27
概率論的一些基本定理	30
随机过程理論簡述	30
第二章 继电式控制論系統中的各种邏輯动作元件	38
一些基本的邏輯关系	38
能指出具有最大电压的电源的指示器	44
能指出具有最小电压的电源的指示器	49

1100891

能指出电压与给定值偏离最小的电源的指示器	53
电压限幅器	53
电容-三极管式记忆装置	54
第三章 自行改变整定量(调整量)的控制论式系统	57
论各种用途的控制论式系统在原理线路上的相似性	57
极值调节的任务	57
极值调节对象的例子	62
合理应用极值调节的必要条件	63
系统的无差特性与最优复合特性	64
极值调节系统的分类	64
组合型极值调节系统	80
非振荡式的反馈	81
第四章 自行改变程序或动作算法的控制论系统	85
自行改变程序问题	85
具有一个质量指标的自行改变程序系统的例子	86
具有一个质量指标的自行改变程序系统的分类	89
自行改变程序的组合系统	96
具有若干个质量指标的自行改变程序系统的例子	99
关于自行改变算法的系统	102
第五章 自行改变参数的控制论系统	111
自行改变参数问题	111
自行改变参数的系统的例子	112
自行改变参数的系统的分类	120
自行改变参数的组合系统	124
研究在随机交变输入信号作用下的随动系统的实际意义	124
第六章 自行改变非线性特性或自行改变变换算法的控制论系统	126
自行改变非线性的问题	126
自行改变非线性特性的系统的例子	127
自行改变非线性特性的系统的分类	137
自行改变非线性特性的组合系统	138
自行改变跟随规律的随动系统	141

自行改变变换算法的系统	143
自行改变非线性特性和自行改变变换算法的补偿器	144
自行改进的补偿变换器	145
論“学习”系统	147
自行改变作用算法的系统的例子	149
自行改变概率特性的系统	150
計及元件耗損概率的自行改进系统和搜索給定值周期(重复)	
分量的自行改进系统	151
第七章 自行改变结构的控制論系统	153
自行改变结构的问题	153
要求自行改变结构的系统的例子	153
由大量相同元件組成的系统	159
自行改变结构系统的分类	161
按扰动控制的开环系统	162
按被調节量控制的反饋系统	165
自行改变结构的組合系统	172
第八章 控制論自动調节系统一般理論的基本問題	174
控制論自动調节系统的相似性和建立一般理論的可能性	174
組合的极值系统的无差和有差特性	180
在具有一个基本扰动作用的系统中最优复合特性的决定	186
在具有几个基本扰动作用的系统中最优复合特性的决定	187
几个复合耦合作用的总合	188
极值調节系统的誤差分量	190
組合极值系统穩定状态理論的基本原理	192
在穩态中組合系统在能量方面的优点	192
在穩态中組合系统在控制論方面的优点	193
組合系统的参数計算方法	194
按极值指标和調节作用的导数来調节的自振蕩极值系统	202
保持极值指标峰值的自振蕩极值系统	206
自振蕩型式的极值調节系统之动态方程	207
系统的搜索自振蕩的研究	212
公式的實驗驗證	216
极值特性的非线性变銳器	216

在系統的調节規律中引入极值指标的二阶导数	217
具有連續調制(搜索信号)的强迫振蕩系統	217
步进型式的强迫振蕩系統	219
在过渡的动态状态中組合系統的优点	222
改善按扰动的复合耦合来提高系統的准确度和动作速度	223
具有調制作用的极值系統的动态方程和不变性条件	224
在具有伺服馬达的鎖定系統中实现不变性条件的两个方法	228
在具有調制的系統中借助于測量复合耦合 $l(p)$ 来实现不 变条件	229
借助于直接(强的)复合耦合 $l'(p)$ 来实现不变性条件	231
用改善反饋作用的方法提高极值系統的准确度	233
借助于强化(再調)装置来改善具有恒速伺服馬达的反饋作用	235
提高准确度的两种基本方法的正交性(独立性)	238
第九章 提高系統的抗干扰性	245
選擇系統的綫路和提高抗干扰性的特殊方法	245
特性恒定的一般系統作为控制論控制的对象	245
按扰动来控制的并且特性为恒定的一般型式的系統	246
按被調节量控制并具有恒定特性的一般型式的系統	249
应用統計方法来選擇随动系統的綫路和反饋回路的参数	250
应用統計方法来選擇鎖定系統的綫路和反饋回路的参数	253
四端網絡統計特性的最簡單計算	257
具有恒定特性的一般型式的組合系統	259
借助于自行改变系統特性的控制論方法来降低随动系統的誤差	259
用分析方法决定最优复合特性	261
具有可变特性并按扰动来控制的控制論系統	265
干扰和扰动譜密度参数的測量	266
按扰动的調节方法,扰动是借助两个頻率滤波器来測量的	269
按质量指标控制的具有变化特性的控制論系統	272
关于多次应用控制論自行改变特性問題	273
具有变化特性的組合控制論系統	274
自行改变复合耦合系数并按扰动导数来調节的系統	275
客觀地揭露扰动作用和調节作用的方法	276
按扰动控制的控制論系統	281

力图降低基本調节系統和它的模型之間的差別的系統	284
按統計准則来選擇极值系統的强迫振蕩周期	284
借助于量化来降低干扰的作用	289
有干扰存在时弱信号的接收方法	291
周期信号的过滤方法	293
自相关法	296
互相关法	300
諧和干扰在具有相关器的系統上的作用与干扰輸入端的位 置、頻率 and 相位的关系	303
积累(积分)方法	305
搜索(調制)信号复杂化的方法	308
提高抗干扰性的各种方法的比較	309
为了广泛的实际应用来選擇极值調节系統	310
借助差动綫路和調节对象的模型来减低干扰的影响	311
进一步研究的問題	314
第十章 把組合調节看成是状态調节和数量調节的广义 情况	317
应该区分状态調节和数量調节的組合系統	317
状态調节器	319
数量調节器	324
状态調节器和数量調节器的性质的区别	327
組合系統	328
具有几个基本扰动的系統	334
不变性条件的四种形式	335
一些評注	342
附录	345
参考文献	352

引 言

控制論是研究一般控制規律的科学。其中的一个基本概念是认为生物器官与某些自动系統在控制原理上具有类似性。它們均具有一种奇特的性质，即对于內部状态及外界因素的变化能极快地反应，以求能最好地适应新的生存条件。控制論所研究的只是发生在我們世界中各种过程的一个方面，即如何产生、变换以及使用控制信号以实现各种有目的性的动作。至于能量或功率的配布、經濟价值以及尺寸大小等問題，控制論是不加探討的。

承认技术装置与生物器官在各种控制与通信过程中具有共性的控制論，对于事物的認識有着极大的价值。它使得一門科学能够采用另一門科学在控制方法上的有用知識，从而使它們互相丰富。

工程控制論，正如它的名称所指，是从控制規律的观点出发来研究一些工程系統。其中包括：1) 信息論；2) 邏輯元件理論和变换信息的計算机理論；3) 研究如何使用信息的自动調节系統理論。本书主要是討論其中的最后部分，即第3) 部分。

自从中国杰出的学者錢学森的那本关于工程控制論的著名著作^[36]（該书曾荣获中华人民共和国 1956 年度一等科学奖金）出版以来，時間已經五年了¹⁾。在此期間，工程控制論曾飞速发展，而且有了一些新的趋向。

本书不同于錢氏的书，在錢氏的书中是从名称的广义含义上討論工程控制論，而这本书却更深入地研究自动控制中称作控制論系統的理論与技术問題中一个相当狹小的部分。控制論系統不同于通常的自动化系統，当內部或外部扰动发生变化时，它能自动地自我改換不同的特性。

¹⁾ 这是作者在 1960 年本书初版时的話——譯者注。

对于计算机在建立生产过程自动化系统时所起的作用这一问题，作者提出了自己的见解，这是本书在内容上的一个特点。

对于计算技术在生产过程自动化中所起的作用要进行估价的话，得看你对如下问题采取什么样的回答，即在一个自动系统中哪一部分是主要的，并且研究起来最为复杂。如果你断言计算技术在自动化中是最重要的，那就等于是断言自动调节的主要问题是研究各种测量元件（发送器）。实际上，各种计算装置（无论是最简单的或者是复杂得象大型电子数字计算机的）只用在系统的测量部分，以产生出一个电压（或别种物理量），它正比于生产过程的一个质量总指标或一组质量指标；此外还进行计算并且与基本扰动实现一些非线性的复合联结。各个测量回路的电压之总和，进入到一些放大器与伺服马达中，伺服马达带动执行元件，执行元件对过程进行调节。如果这里的系统是闭路的，那么老实说，会发生的是些自动控制的基本问题，怎样来解决这些问题，计算机的专家们根本没有学过。在他们本行的工作实践中，既没有和协调调整规律打过交道，亦没有跟不变性条件打过交道，而这两者乃是闭路自动系统的基本规律。象生产过程自动化中所存在的那种形式的抗干扰问题，是不会引起他们的兴趣的，因为各种大型计算机都是在特殊的场所中工作的，在那里甚至连温度与电网电压都是保持恒定的。一位计算机方面的专家对于生产过程自动化方面的问题是无能为力的。因此，我们不应夸大计算技术在自动学中所起的作用。计算机在生产过程自动化方面所扮演的是一个辅助的、次要的角色。

在评价计算技术对生产过程自动化所起的作用时，许许多多的误会都是由于不正确地翻译外国名词的含义而引起的。英文“computer”和德文“rechner”在大多数情况下和我们的术语“система управления（控制系统）”或“система регулирования（调节系统）”意义相符，只在极少数的情况下才应译为“управляющая машина（控制机）”，至于应译成“вычислительная машина（计算机）”

的場合則尤屬罕見。

虽然控制論是在大型数字計算机（下象棋的机器和机器翻譯等）的經驗上产生的，但是所有这些計算机的动作原理都仍然是属于旧有的、控制論未出世前的技术，属于我們称之为普通系統的那一类系統。对于金属切削机床的数字程序控制系统，几乎全部的自动綫以及許許多多的自动化工厂，情况都是如此，因为他們都具有某种固定的动作程序（或算法¹⁾）。这完全不是低估了这些系統的作用。毫无疑问，它們完全有必要大力加以发展，而且也将会繼續得到发展。但是，目前已經十分清楚，具有恒定給定量、固定程序或算法的一般系統，对于大多数的生产过程樞紐是无法保証其实现自动化的。因此工程控制論比他們走得更远，打开了研究更为灵活更加万能、特性能够自动适应的各种自动系統的前景。生产全盘自动化的問題，只有既使用一般的控制系統，又使用本书中称之为控制論系統的那种新型控制系统，才能得到解决。

实现灵活的控制論系統的原則是多种多样的，而且随着技术的发展这种多样性也将日益增加。本书把各种系統分成为按次序（确定方式）搜索过程最优指标的系統，随机搜索过程最优指标的系統，以及随机-概率搜索过程最优指标的系統。

按次序的系統其优点是明确而且动作快捷。随机的系統其优点是通用性强，能解决許多不同的問題。随机-概率系統的“学习”能力最强，亦即最能吸收过去的工作經驗。这些机器可以用来下象棋、讀書和譯书。而且它們所依据的原理也和控制論发展初期制造的、帶有恒定算法的机器翻譯不同。比如一架机器在下象棋之前，必須先把它教会，往后它下起棋来就无需盘算許多下法，而是使用过去各局的經驗。我們有可能把一架机器教会它玩許多种不同的游戏。

各种随机-概率控制論系統，今后在結構上的发展将会是愈来愈趋一致，愈来愈是“生物性的”，并且愈来愈象动物的大脑。其中

¹⁾ 按照某一組規則进行的算术运算序列或邏輯次序序列，称之为算法（詳見后）。算法的一个簡單例子就是公式。

將不会有特殊的測量元件，也不会有計算裝置与記憶方框。当它們“誕生”之后，大概没有什么事是它們不能干的，但需要給它們以教育。

与此同时，为了完全确定的任务而建立起的各种按次序或按确定方式搜索的系統，也将得到发展。其中取得了最大成就的乃是极值系統，它能够找出某种质量指标的最大值。本书所討論的理論就是属于这一类型的控制論系統。

书中指出了能够自我改变整定量、程序、参数、非綫性特性或結構的各种控制論系統在分类上的共性，并且也指出了有可能把这种分类法推广到能够自我改变算法、統計特性或系統的作用范围之各种控制論系統。

在对各种系統进行分类以及进行类比和分析时，书中指出，采用組合控制原則的系統是最完善的按次序搜索的系統，其准确度最高而且动作最快。当一个系統作組合控制时，既要用到按扰动的控制，又要用到按被調节量的控制。

书中指出，制造一般的自动調节系統时使用的两个基本控制原則（按扰动的控制原則与按被調节量的控制原則），对于控制論系統仍然不失为两个主要的控制原則，因而提高质量（准确度，快速性）的各种基本方法，無論是对于一般的控制系統或者是对于控制論系統都是一样的。

最早的开环极值調节系統（即采用按扰动的控制原則之系統）——水力透平机輪叶轉角的調节器——是由乌克兰科学院电工研究所的 В. А. 鮑戈莫洛夫 (Богомолов) 和 В. Л. 別宁 (Бенин) 两人制成的。帶有閉环反饋的极值系統在 Г. 什特英 (Штейн) 的书 «Регулирование и выравнивание в паросиловых установках (蒸汽动力裝置之調节与平衡)» (1929 年) 中首先得到叙述。由納斯林^[2] (Naslin) 研究出来的調节器也是这一类型的早期系統之一。对于帶反饋的极值系統所进行的深入研究工作，最早是由 В. В. 卡扎开維奇 (Казакевич) (1948 年) 完成的，其后有德雷柏尔 (Draper)，李尧芝与兰宁 (Laning) (1953 年)。第一个組合型的极值系統——

維持 $\frac{\text{蒸汽}}{\text{燃料}}$ 比为最大的鍋炉調节系統——是乌克兰科学院 电工研究所在本书作者领导下实现的(1958年)。

本书指出,研究組合的控制論系統所要用到的数学工具是相当简单的,通常可以归結为对綫性微分方程的研究,其困难程度并不超过对一般的、当工作条件变化时无适应性的調节系統之研究。因此,各种控制論系統的新理論及技术是在系統地綜合和发展过去已知的、关于組合自动調节系統的理论原則和技术原則的基础上进行研究的。

书中深入地研究了各种提高极值控制論系統的抗干扰性的方法;并且指出,各种提高通信系統的抗干扰性方法,均能直接地用来解决提高抗干扰性的問題。提高控制論系統的抗干扰性之最有前途的方法是互相关法。

因此,本书叙述了各种綫路的結構原則,以及提高单个质量指标的极值控制論系統之抗干扰性的各种方法。

作者着重在控制論認識事物的那一方面,因而,不打算对书中所述的各种系統——进行詳細研究。本书的第一部分将致力于系統的分类,并且作一些极有价值的相互比拟,以得出系統結構方面的新型原理綫路。

在如此众多的各种系統中,毫無疑問,可以找出一些在目前就十分清楚地看出无法在实际上大量采用的系統,例如有些是过于复杂,有些是从能量观点去看不合理。但是,在实际挑选原理綫路时,正是它們,帮助了我們認識到結構这些系統的可能性是怎样的。

控制論是一个新兴的科学領域,并且正处在飞速发展的阶段。不言而喻,书中列举的文献对于书內涉及的全部問題不可能是完备的。其中只不过是把作者在研究各种控制論系統时所搜集的主要材料作一个系統的整理。有些問題虽然极为重要,但若与所論的那些系統无关,书中也不予討論。

第一章

自动学与工程控制論

各种基本的控制原則

自动学的定义

不久以前还有許多书籍把自动学定义为这样一个技术领域：研究各种方法和手段，以把人的体力劳动从各种工艺过程的检测与控制中解放出来。

直到1943年(大型电子计算机出世的那年)止，对于自动学的这种定义，人們一直认为是足够满意的。当时看来，想要創造出各种自动装置，以減輕人类脑力劳动(或把脑力劳动自动化)的念头，似乎是脱离实际乃至是一种幻想。

随着自动化的发展，人們对于各种自动装置的用途以及其使用范围，在观点上也就发生了变化。

现在可以把自动学定义为这样的一个科学技术领域：它专门从事于研究各种在无人直接参予下就能动作的装置。这些装置不仅可能部分地或完全地解放人类的体力劳动，而且可以承担人类的某些脑力劳动。

一些早期的自动調节器

制造各种早期自动装置的想法很久以前就有过。这些装置的用途极不一致，其中大多数是想稳定某种量。

拉梅里 (Рамелль, 1588 年) 記載过一种用来使磨盘轉速維持恒定的自动装置。И. И. 波尔祖諾夫 (Пользунов, 1766 年) 发明过

一种調節器，能使为他发明的蒸汽机饋送蒸汽的蒸汽鍋炉保持恒定的水位。对于技术发展有重大意义的乃是瓦特 (James Watt, 1799 年) 发明的蒸汽机轉速离心調節器。

所有这些調節系統(拉梅里的, 波尔祖諾夫的以及瓦特的), 都利用了同一个动作原理——根据被調節量的偏差进行补偿的調節原則。

根据偏差来进行补偿的系統, 其一个主要特征乃是在系統中至少有一个傳送作用量的閉合环路, 其中包括如下元件: 測量元件——放大器——执行元件——調節对象。因此, 根据被調節量的偏差来进行調節的系統, 常常称为閉环自动系統或有反饋的系統。

采用扰动調節原則的自动系統出現得还要早。这些系統的研究工作是和龐錫利 (Понселе), В. Н. 奇科列夫 (Чиколев), М. О. 多利沃-多勃罗沃尔斯基 (Доливо-Добровольский), В. С. 庫列巴金 (Кулебакин) 院士等人的名字分不开的。这个原則的实质是: 为了减少負載的变化对于調節对象所产生的影响, 在系統中装有一个装置(与負載成复合联系), 它使調節作用量(燃料、蒸汽、激磁电流等)的給定值随着負載的变化而正比地改变。对于負載, 自然是采用非綫性的联系。

采用扰动調節原則的系統, 是在开环情况下工作的(如果不考虑負載性质的影响), 也就是說沒有反饋。

利用負載电流的电机复激系統, 乃是采用扰动調節原則方面最有代表性的例子。

在这里, 我們不想对上述两种調節原則进行比較, 只提醒大家, 有反饋的系統用的仪表要复杂一些, 而且还会引起自振蕩(不稳定)。

无反饋的开环系統不够稳定, 又是非綫性的, 而且还有許多其他缺点。特別是它只是根据基本扰动来实现复合关系以解决調節的問題。

組合的調節系統最为完善^[16], 其中同时体现了按被調節量的

偏差来进行控制的原则以及按扰动进行控制的原则。近年来,自动系统越来越多的趋向于组合调节系统。

许多作者[其中有罗伯特·维纳 (Robert Wiener)]看到所有的自动调节系统都要使用控制信号,于是就把它们全都归为控制论系统。我们认为,把一类更特殊的系统称为控制论系统将更加合适。

现在已经十分清楚,我们完全有可能区分控制论出世之前的自动调节系统和1943年以后出现的控制论系统。对这两类系统进行研究以后可以看出,从控制原则上来说控制论的出世并没有带来什么新东西。无论是旧有的系统或者是最新的控制论系统,所用的都是上面说过的两种基本控制原则。在各种控制论系统中,我们也会发现有被调节量的反馈(或其他内部坐标的反馈),或者与基本扰动成开路的复合联结。工程控制论中的组合控制原则对于控制论出世以前的各种调节系统之发展也同样有过帮助。这就是本书的基本观点之一。

自然会提出这样的问题:如果一般的调节系统与控制论的自动调节系统在结构原则上完全一致,那么,他们的差异是什么呢?

他们的差异主要是所解决的调节任务不同,而且实现反馈的方法也不一样。

这样的系统可以称之为控制论的自动调节系统:解决新型的、比之古典的稳定问题和程序及随动调节问题更为复杂的任务。在控制论系统中的反馈广泛使用逻辑运算元件,并且经常是在连续搜索的状态(振荡)下工作。在控制论系统中,各种控制、产生、变换、发送及接收控制信号的问题占主要的地位。其他问题(例如傳送能量的问题)均属次要。因而,控制论又被称为关于一般控制规律的科学。

下面让我们更加详细地研究各种调节的问题。

控制论問世前的自动调节

自从发明了第一台调节器之后,自动调节的理论和技术曾经

朝着两个方向发展：扩大調節器的使用領域以及提高各种調節問題的准确度。

我們列举一些基本的調節問題。

上述的拉梅里，波尔祖諾夫以及瓦特的調節器是一种最重要而且最通用的調節系統，解决如何将調節量鎖定在一个恒值上的問題。在百余年前，人們就解决了弧光灯电极距离的保持問題，温度稳定問題，直流机电电压的稳定問題，交流机电电压与頻率的稳定問題等等。

除了鎖定問題之外，将時間函数或航程函数的被調節量按程序来改变的問題，以及随动系統的問題^[10]，也已經为大家所熟知。这些調節問題在自动操舵系統、自动飞行系統、自动雷达装置、閘門和軋鋼机的控制系統、以及其他一些系統中得到了解决。

控制論問世以前的自动調節之特征在于：所有由系統解决的問題都不外乎是上述三种調節問題。因而可以得出結論：过去的自动調節是为了解决个别机組和机器——工艺过程的組件的自动化問題。

显然，比如在一个热电站內装上所有的鎖定調節器、随动系統以及程序系統，这个电站仍然不能免除操作人員的照料，象俗語說的“鎖上大門”。在联結許多电站的电力系統中，这就尤其不能如此了。其原因是，在一个电站或在一个工厂中有許多需要作邏輯运算的环节，光解决上述三种調節問題仍旧不能滿足要求。

在电力系統中需要調度員，調度員是人，他管理着电力系統。協調各个自动化作业区的工作，選擇最优的調整量（各个調節器的整定量），根据数目极多的数据和工作經驗来选定它們的接通程序，以及其他許多决定邏輯先后的重要問題，仍然还需要人来执行，这就是企业或系統中的調度員。

上述三类問題（鎖定、程序調節和随动調節）無論解决得如何的尽善尽美，如果想把各个自动化生产作业綫联成一个統一的自动化总体，那还是不够的。