

脉冲系統理论

Я.З.崔普金

科学出版社

脉冲系统理论

Я. Б. 崔普金 著

王 众 託 译

科学出版社

1962

Я. З. ЦЫПКИН
ТЕОРИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ

Физматгиз, Москва, 1958

內 容 簡 介

本书是荣获 1960 年列宁科学奖金的学术著作, 书中全面而且詳尽地阐述了由本书著者所創立并发展的脉冲系統理論。

脉冲系統是近代自动控制、远程控制、量测技术、計算技术、无綫电通訊、雷达、电视等系統与裝置的有机組成部分, 随着近代技术的飞速发展, 脉冲系統应用日益广泛, 在研究与应用脉冲系統的实践基础上建立和发展起来的脉冲系統理論, 是从統一的观点来研究各种脉冲系統的动特性和分析与綜合方法的。

本书著者所創立并发展的脉冲系統理論的特点是: 由于使用了适当的数学工具, 使得这些理論中的結論与方法与連續系統的概念与方法极为相似, 因此可把連續系統理論毫无困难地推广应用到脉冲系統上, 这些概念与方法非常容易为广大工程技术人员接受和使用。

本书按照“实践-理論-实践”这一符合人們認識过程的規律, 首先介紹了各种脉冲系統的原理、結構綫路与特点, 然后讲述基本数学分析工具及其在开环与閉环脉冲系統分析与綜合上的应用, 最后再应用这些理論来处理問題。书中具体实例緊密結合近代工程实际(包括工业国防尖端技术各方面), 理論严密完整。而計算方法非常切合工程实际应用, 书中对現代的一些发展方向、如数字计算机用于自动控制系統的問題等, 也作了詳尽分析与闡述。

本书可供从事研究、設計与使用各种脉冲系統的大科学工作者、工程技术人员、高等学校有关专业的师生(自动化、計算技术、通訊、电视、量测雷达等专业的师生)閱讀参考。

脉 冲 系 統 理 論

Я. З. 崔普金 著

王 众 託 译

*

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1962 年 9 月第 一 版

书号: 2575

1952 年 9 月第一次印刷

字数: 666,000

(京) 精: 1—6, 170

开本: 787×1092 1/18

平: 1—4, 550

印张: 32 5/9 插頁: 3

定价: 精裝本 5.20 元
平裝本 4.60 元

作者为中譯本写的序言

脉冲自动系統在自动学的发展初期就已經产生了。原始的蒸汽机調速器中的一种便是截汽式調整器，它的工作是以脉冲寬度調制为基础的。随着热工过程自动化的发展，需要把从热电偶得到的微弱功率放大到足以控制強有力的执行机构。这个問題是靠使用垂弓型調整器解决的，这种調整器使人們有可能利用繼电型放大器，并使放大器具备比例特性。应用这种不連續調整器或者說脉冲調整器，不仅可以使結構簡化，同时还証明：在一定的条件下，脉冲調整可以使調整过程比連續調整更好。这个結論更适用于含有迟滯的对象的調整系統。

近年来，随着脉冲技术、雷达和数字計算机的发展，脉冲系統又有了更大的发展。

要想最有效地使用現有脉冲自动系統，以及設計和計算新的脉冲系統，沒有理論基础是不可能的。这本貢獻給中国讀者的书，就是讲述脉冲系統的理论和研究方法的。

这本书譯成中文，使作者感到无任欣幸，这不仅是由于本书又扩大了讀者范围，而且还由于年輕的中国科学工作者的干劲、勤奋和才能（这是作者在和中国研究生接触过程中所深切感受到的），为自动調整理論中这一蓬勃成长、前途輝煌的方向的进一步推进和发展，提供了保証。

作者滿怀着頌揚的激情注視着中华人民共和国科学的迅速发展。如果这本书能在这个发展进程中略尽棉薄，并且进一步巩固中华人民共和国和苏联两国人民之間的友誼，作者将感到最大的榮幸。

И. С. 崔普金 (*Усовкин*)

1961年4月

原 序

由于脉冲技术、雷达、计算技术、自动学的蓬勃发展,使得近年来加强了脉冲系统的研究和应用,所谓脉冲系统,也就是它的工作与一系列脉冲的作用、传输与变换有关的系统。

在脉冲状态下工作的电动机与电磁机构、在传真电报与电视中使用的电路和视频放大器乃是最简单的开环脉冲系统。多路脉冲通讯系统、脉冲式遥测系统也是开环脉冲系统。

更复杂的脉冲系统——闭环脉冲系统包括不连续调整系统和脉冲随动系统。以数字计算装置作为组成元件的自动系统,也算是闭环脉冲系统。

从前面这些极简短的列举中就可以看出,脉冲系统在现代技术中应用得多么广泛。

尽管脉冲系统式样纷繁,应用的地方也是各不相同的,但是它们总还是可以从统一共同观点来加以研究,用统一的方法来加以研究。这种统一的方法考虑到了脉冲系统的特点,使我们能够用最简捷的方法,以简单的形式得到必需的、适于工程计算的结果。

在处理本书所阐述的脉冲系统理论与计算方法时,作者在可能范围内尽量使它们接近线性连续系统的理论与计算方法。其所以能够如此,是由于不连续拉氏变换这种数学工具把转移函数、频率特性、时间特性等概念引用到脉冲系统上,并且使我们能够从而准确地求出过渡过程与定态过程的缘故。

连续系统与脉冲系统在计算方法上的类似之所以重要,不仅是由于连续系统的理论中的许多方法,经过适当的改变,就可以搬到脉冲系统上来,而且还由于这样可以使专业工作者在研究脉冲系统时,不脱离他所熟知和习惯的概念和印象。

本书着重研究脉冲系统的研究方法和特性。这种由作者所发展的方法是用大量的例子来加以阐述的,许多典型的问题都详尽地解出,并附有计算公式与图表。每一个问题都可以看作是具有独立意义的。

作者相信,读者熟悉了这些问题的解法之后,再解决他在实际工作中所碰到的类似问题时,将不会感到困难。

作者在写这本书的时候,部分地采用了以前所写的书“脉冲电路中的过渡过程与

稳态过程”(苏联国家动力出版社 1951 年版)中的材料,但是除了极少部分外,大都重新修訂过。

本书包括緒論和六章。

在緒論中講的是脉冲系統的簡要特性。

第一章講述各种脉冲系統和它們的作用原理与应用。还講到了它的分类,并列舉出脉冲系統理論的研究对象。

第二章講述数学工具——不連續拉氏变换,它是脉冲系統理論的基础。这里还講到把不連續拉氏变换应用于可归結为差分方程的問題的例子。

第三章和第四章講的是开环脉冲系統理論,以及应用这种由作者所發展的理論來計算各种脉冲系統,包括变参量系統在內。

第五章和第六章講述的是閉环脉冲系統。这里講了它的理論和計算方法,并且引述了許多例子。最后这两章还講到有关应用数字計算装置作为自动系統元件的問題。

为了使脉冲系統的計算更方便更輕易,在本书附录中列有数表和曲綫。

本书还附有脉冲系統理論以及邻近問題的参考文献一覽表。它包括四个部分:

1. 脉冲系統的各种綫路与应用。
 2. 不連續拉氏变换与差分方程。
 3. 开环脉冲系統。
 4. 閉环脉冲系統。
- 文献索引是用作者姓氏旁边方括号中的数碼表示的,第一位数字(黑体字)表示文献表的部分,第二位数字表示文献順序。

本书所講述的材料是供已經熟悉脉冲技术基础与自动調整理論、也就是說已經具有拉氏变换概念的讀者閱讀的。

本书 § 3.9 与 § 6.7 节曾經扼要地指出,脉冲系統理論可以作为恆参量、变参量和非綫性参量的連續系統的近似分析和綜合的基础,还可以用来解决許多数值分析問題。但是要想詳尽地講述这些极其重要而且引人注意的問題,会使本书篇幅过于巨大,因此是不可能的。作者認為,这些問題應該另用专书講述。

本书在付印与校对过程中,В. И. 古柯夫(Гукoв)、Н. А. 柯若列夫(Королев)、И. С. 莫若沙諾夫(Моросанов)、И. В. 裴什金(Пышкин)、М. М. 辛姆金(Симкин)等給了作者很大的帮助。作者在此向他們致以由衷的謝忱。

Я. З. 崔普金

莫斯科 1957 年 6 月

了这本书,教师就可以要求学生自学一部分。三十年以前,高等物理学教程未曾采用过这种技术,但是物理学振奋人心的巨大发展导致了这种革新。

经典力学和量子力学

经典力学首先单纯研究运动本身,而不涉及产生运动的原因。力学的这一分支叫做运动学,它是研究运动的几何点的性质。选定一个原点 O 和参考系 (R) ,使动点 M 的位置对应一个空间矢量 $\overrightarrow{OM}$,它是时间 t 、原点 O 以及端点 M 的函数。然后用矢量 $\overrightarrow{OM}$ 对时间的微商来确定速度矢量 $\mathbf{v}$ 和加速度矢量 $\mathbf{a}$ 。矢量 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{a}$ 以某种方式表示运动的趋势,

$$\mathbf{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}, \quad \mathbf{a} = \frac{d^2\overrightarrow{OM}}{dt^2}. \quad (1)$$

运动学同样也分析刚体(被看成一组相互刚性联结的点)运动的性质。

经典力学还描述物质世界中物体在产生其运动的原因作用下的运动,这就不再是运动学,而是动力学了。因此,必须引入力和质量的概念,质量使人想起物质的量的概念,而力就是产生运动的原因。

但是,考虑到教学问题,经典力学提出了一种假想体,即质点或无尺寸而有质量的点。于是,提出了一个基本定律,即质量为 m 的质点在合力 $\mathbf{F}$ 作用下所获得的加速度 $\mathbf{a}$ 满足

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = m \frac{d^2\overrightarrow{OM}}{dt^2}. \quad (2)$$

因此,如果已知 $\mathbf{F}$ 、 m 和运动的初始条件,微分方程 (2) 的解就确定了质点的运动。研究这种假想体不是徒劳的,因为当

经典力学研究真实物质系统时，经常要应用到研究质点时所获得的结果。如同几何点的运动学先于几何体运动学一样，质点动力学也可作为物体动力学的前导。

物体动力学首先研究不可形变的刚体，特别是证明，这种刚体的重心 G 的运动同一个质点的运动一样，只要令这质点的质量等于刚体的质量，并把作用于刚体上的合力作用到这质点上，

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}_G = m \frac{d^2 \overrightarrow{OG}}{dt^2}. \quad (3)$$

这个基本定理叫做“重心定理”，只要把不可形变的刚体看成一个相互间刚性联结的质点系，把方程

$$\mathbf{F}_i = m_i \mathbf{a}_i \quad (4)$$

用到质点系的每一质点上，并以适当方式把它们加起来，就可以建立起“重心定理”。

依旧以方程 (4) 作为出发点，再作一次略长一些的计算，就导出角动量定理。这两个定理加上摩擦定律，就可以解决任何刚体动力学问题。有时还要确定在什么条件下运动是可能的，也就是在什么条件下一个刚体系统是平衡的，刚体静力学的目的就是回答这类问题。它的根据是下列两个命题：

- a) 外力的合力等于零；
- b) 外力的合力矩等于零，

再加上摩擦定律。

在彻底探讨刚体的性质以后，经典力学就从事流体的研究。流体被看成一组不是刚性地联在一起的粒子。把基本方程

$$\mathbf{F}_i = m_i \mathbf{a}_i$$

用于所有粒子，就导致极大量的方程。因而必须引入统计概念和平均值概念。

引入这种统计概念产生了一门重要的学科，叫做经典统

计力学。由于引入了几率概念，使叙述统计力学存在一定困难。轨迹概念至少在微观场合还是保持的，而在宏观场合建立了极重要的流体力学方程。

因此，在本世纪初，经典力学还给人一种严格学说的印象。事实上，它是处于极其严重危机的前夕。

首先是相对论扰动了我们的时间和长度概念，并且也对物体的质量的不变性提出了挑战。

其次是微观物理的发展迫使物理学家引入象测不准关系和波函数那样奇怪的概念。传统的决定论概念瓦解了。这必定会提出一些可怕的哲学和教学问题。避开哲学问题，我们可以说本书的目的正是要向工科学院的学生指出，怎样把物理现象纳入比非相对论经典力学更普遍的范畴中去。因此，将顺次地陈述非相对论量子力学、相对论经典力学和相对论量子力学。

但是，必须补充说明，在许多情况下，非相对论经典力学依旧是相当有效的近似，学生应很好地了解为什么必须复习经典力学。因此，我们将从复习一些经典力学的结论着手。

随后，读者心目中的经典力学“偶像”就被打破了，但要注意，读者想从中取得的愉快将被由于引入有效而复杂的数学工具所带来的苦恼所抵消。（下略）

目 录

作者为中譯本写的序言	vii
原序	ix
緒論	1
第一章 脉冲系統及其应用	4
§ 1.1. 脉冲系統的概念	4
§ 1.2. 开环脉冲系統	9
§ 1.3. 閉环脉冲系統	27
第二章 不連續拉氏变换基础与差分方程	66
§ 2.1. 柵状函数与差分方程	66
§ 2.2. 不連續拉氏变换的定义	74
§ 2.3. 基本法則与定理	78
§ 2.4. 最簡單的差分方程的解法	96
§ 2.5. 任意阶綫性差分方程的解法	106
§ 2.6. 不連續拉氏反变换, 反演公式	111
§ 2.7. 不連續拉氏变换、富里哀級数与罗朗級数之間的关系	123
§ 2.8. 連續函数的象函数与相应的柵状函数之間的关系	126
§ 2.9. 随机柵状函数	138
第三章 开环脉冲系統理論基础	147
§ 3.1. 开环脉冲系統推导成最簡單形式	147
§ 3.2. 开环脉冲系統的方程式和轉移函数	155
§ 3.3. 使用几个脉冲元件的开环脉冲系統的方程式和轉移函数	173
§ 3.4. 变参量开环脉冲系統的方程式和轉移函数	181
§ 3.5. 在典型作用下开环脉冲系統中的变化过程	191
§ 3.6. 开环脉冲系統的脉冲特性和頻率特性	201
§ 3.7. 在任意的非周期与周期作用影响下开环脉冲系統中的变化过程	210
§ 3.8. 在平稳随机作用下的开环脉冲系統	217
§ 3.9. 开环脉冲系統与連續系統的比較	225

第四章 开环脉冲系統的研究与計算	231
§ 4.1. 某些机构在断續工作时的发热情况	231
§ 4.2. 峯值检波器	234
§ 4.3. 箝位电路	238
§ 4.4. 电动机轉速的脉冲控制	240
§ 4.5. 逆換流器	248
§ 4.6. 机械系統在脉冲力作用下的振动	255
§ 4.7. 寬頻帶低頻放大器	262
§ 4.8. 多路脉冲系統中的互干扰	274
§ 4.9. 同步濾波器	280
§ 4.10. 按系統的正常工工作数据求系統特性的裝置	286
§ 4.11. 使用預測的通訊系統	289
第五章 閉环脉冲系統理論	296
§ 5.1. 閉环脉冲系統推导成最簡單形式	296
§ 5.2. 閉环脉冲系統的方程式和轉移函数	301
§ 5.3. 使用几个脉冲元件的閉环脉冲系統的方程式和轉移函数	307
§ 5.4. 閉环脉冲系統的稳定性与鎮定	315
§ 5.5. 閉环脉冲系統的頻率特性和脉冲特性	349
§ 5.6. 閉环脉冲系統中的过渡历程和定态过程及其鉴定	364
§ 5.7. 在平稳随机作用下的閉环脉冲系統	385
§ 5.8. 帶外推器的閉环脉冲系統	400
§ 5.9. 閉环脉冲系統的綜合	411
§ 5.10. 閉环非綫性脉冲系統中的过程	419
第六章 閉环脉冲系統的研究与計算	433
§ 6.1. 溫度自动調整系統	433
§ 6.2. 混合物浓度自动調整系統	450
§ 6.3. 无轉矩随动系統	458
§ 6.4. 頻率自动微調系統	468
§ 6.5. 增益自动調整系統	476
§ 6.6. 自动跟踪系統	488
§ 6.7. 数字計算机用作不連續数据变换器	503
§ 6.8. 数字計算机中不連續数据的教平与預測	516

§ 6.9. 变不連續数据为連續数据的脉冲系統.....	522
附录.....	533
П. 1. 不連續拉氏变换中运算的对应关系, D 变换.....	533
П. 2. 柵状函数及其象函数.....	537
П. 3. 偏移后的柵状函数及其象函数.....	542
П. 4. 連續函数与柵状函数的象函数的运算之間的对应关系, $\mathfrak{D}$ 变换.....	545
П. 5. 圓函数(三角函数)、指数函数、双曲綫函数.....	546
П. 6. 函数 $\frac{\sin \zeta}{\zeta}$	552
П. 7. 函数 $\rho, \chi^{(+)}, \chi^{(-)}$ 及其曲綫.....	555
参考文献.....	558

§ 3 两个量的同时测量——测不准关系	146
§ 4 经典力学被看成是量子力学的近似	150
§ 5 结论	156
习题和问题	156
第六章 薛定谔方程的一般研究	159
§ 1 引言	159
§ 2 稳态问题的一般特征	160
§ 3 能量符号的物理意义	162
a) 束缚态	163
b) 非束缚态	163
§ 4 非稳态的一般特征	165
§ 5 一维运动	166
a) 自由粒子	166
b) 遇上势垒的粒子	167
c) 势阱中的粒子	175
§ 6 另一些常用形式的势阱问题	188
a) 当 $x \rightarrow \pm\infty$ 时, 函数 $V(x)$ 趋于同一极限 E_∞	188
b) 当 $x \rightarrow \pm\infty$ 时, 函数 $V(x)$ 无限增大	191
§ 7 波动性	192
a) 绪论	192
b) 量子力学与互补性	195
§ 8 实验验证	197
习题和问题	198
第七章 两粒子系统	200
§ 1 引言	200
§ 2 经典力学中的两体问题	203
§ 3 量子力学中的两体问题	205
a) 两粒子系统的波函数	205
b) 两粒子系统的薛定谔方程	207
c) 波函数 Ψ 的物理意义	209
§ 4 独立粒子系统	210

§ 5 向心相互作用	211
a) 经典力学	211
b) 量子力学	213
习题和问题	219
第八章 一些常用函数	221
§ 1 引言	221
§ 2 勒让德多项式	221
a) 勒让德多项式的定义	222
b) 勒让德多项式的正交性	223
c) 递推关系	226
d) 勒让德多项式的微分方程	227
e) 以勒让德多项式为本征函数的算符	228
§ 3 联属勒让德函数	228
a) 微分方程	229
b) 对应于微分方程的算符	230
c) 联属勒让德函数的正交性	230
§ 4 球谐函数	232
§ 5 厄密多项式	235
a) 定义	235
b) 递推关系	236
c) 厄密多项式的微分方程	236
d) 相应的算符	237
e) 广义正交关系	237
§ 6 拉盖尔多项式	239
a) 定义	239
b) 递推关系	240
c) 拉盖尔多项式的微分方程	241
d) 与拉盖尔多项式相联系的算符	241
e) 广义正交关系	241
§ 7 联属拉盖尔多项式	243
a) 定义	243
b) 联属拉盖尔多项式的微分方程	243

c) 相应的算符	244
d) 广义正交关系	244
e) 联属拉盖尔函数	246
§ 8 贝塞尔函数	250
a) $I(x)$ 函数的定义	250
b) 贝塞尔函数的定义	253
c) 贝塞尔函数的微分方程	253
d) 贝塞尔函数的图形	255
e) 递推公式	255
f) $\nu = n + \frac{1}{2}$ 的特殊情况	256
g) 贝塞尔函数的渐近形式	257
§ 9 球贝塞尔函数	258
习题和问题	260
第九章 氢原子	264
§ 1 引言	264
§ 2 束缚态方程	267
a) 关于束缚态研究的引言	267
b) 应用球坐标和分离变量	268
c) g 方程的解	270
d) f 方程的解	274
e) ψ 函数的最终形式	279
§ 3 结果的解释	280
a) 整数 n 的意义	280
b) 整数 l 和 m 的意义	282
§ 4 结果的摘要	292
a) 基态	293
b) 激发态	294
§ 5 实验证明	296
a) 跃迁几率和选择定则	300
b) 自旋的引入	300
c) 氢原子的稳定性	300
§ 6 在中心势内粒子的运动	300

习题和问题	301
第十章 谐振子	303
§ 1 经典力学中的谐振子	303
§ 2 量子力学中的谐振子	304
a) 绪论	304
b) 方程(10.13)的解	305
c) 谐振子的能级	308
§ 3 双原子分子的转动-振动谱	310
§ 4 盐酸分子	315
习题和问题	316
第十一章 量子力学与核物理	318
第一部分 氘核的结构	318
§ 1 问题的要旨	318
§ 2 结合能的计算	320
第二部分 α 放射性	323
§ 1 概论	323
§ 2 α 放射性的理论	325
a) 引言	325
b) 势能的表示式	325
c) 波函数的确定	326
d) 与实验的比较	334
习题和问题	336
附录一 曲线坐标中的劈形算符	338
附录二 带电粒子的辐射	344
1. 电荷分布和电流分布产生的推迟势	344
2. 运动电荷产生的推迟势	345
3. 电场和磁场的表示式	347
4. 非相对论粒子	351
附录三 函数按照正交函数系的展开	353
1. 引言	353
2. 两函数的平均距离	353

3. 平均收敛,完备组	355
附录四.....	357
第一个公式.....	357
a) 函数 $P_l(x)$ 和 $P_l^m(x)$ 的另一重要形式.....	357
b) 一个有用积分的计算	360
c) 勒让德多项式的母函数	360
d) 公式 (A. 4.2) 的证明	361
第二个公式.....	365
a) 球贝塞尔函数的展开	365
b) 研究一个重要的积分	366
c) 公式 (A. 4.30) 的证明.....	368
附录五 常用常数.....	370