

[美] C. D. 麦基列姆 G. R. 库伯 著

连续信号

离散信号

与系统分析

贾毓聪 张宝俊 译

人民邮电

911
8

连续信号、离散信号与系统分析

[美] C. D. 麦基列姆 著
G. R. 库 伯

贾毓聪 张宝俊 译

人 民 教 育 出 版 社

内 容 简 介

本书深入浅出地阐述了信号与系统分析中最广泛应用的方法。全书共分八章。第一至三章是关于信号与系统的类型、描述等方面的综述。第四章是卷积。第五至七章是变换方法，包括付里叶变换、拉普拉斯变换、 z 变换和数字滤波器。第八章是系统分析的状态空间法。

本书可供高等工科院校电子类各专业的学生作为参考书，对于有关专业的研究生、教师和科技人员均有一定的参考价值。

Continuous and Discrete Signal and System Analysis

Clare D. McGillem/George R. Cooper
School of Electrical Engineering Purdue University
Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1974

2560/37

连续信号、离散信号与系统分析

[美] C. D. 麦基列姆 著
G. R. 库 伯
贾毓聪 张宝俊 译

人民教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
通县西定安印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 18.25 字数 416,000

1981年12月第1版 1983年1月第1次印刷

印数 00,001—7,000

书号 15012·0384 定价 2.00元

译 者 的 话

这是一本关于信号和线性系统分析的导论性质的美国教科书。对于实际中应用最广泛的信号和系统分析方法,包括连续和离散两个范畴的信号和系统,书中都进行了深入浅出的讨论。本书对于概念的引出和说明,以及对于各分析方法特征的阐述都比较形象直观、透彻明了,使人读过不感觉抽象,而且易于抓住其中的本质。此外,书中特别注意各种分析方法之间的相互关联,并注意引导学生对于所讨论的方法的具体应用。各章节中安排了足够的例题、练习题和习题供学生模仿和练习。所以,对于学习“信号与系统”课程的电子类专业的工科大学生来说,这是一本很好的教学参考书。对于有关专业的研究生、教师和工程技术人员也有一定的参考价值。

本书一至五章由贾毓聪译,六至八章及附录由张宝俊译。在翻译过程中,对于所发现的原书文字和公式中的错误作了改正。译稿曾经葛成岳、曾禹村、何佩琨三位同志校阅,对此,谨表谢意。

由于水平所限,译文中错误一定不少,希望读者批评指正。

1981年5月

前 言

这本书的目的是企图以适合在电工程系三、四年级讲授的方式,介绍信号与系统分析中最广泛应用的方法。虽然这些方法在性质上是属于数学的范畴,但我们在讨论中尽量采用启发式,而不去追求严密性,并且书中有许多例题来说明这些方法的重要特征。典型的大学微积分教程为学习本书提供了足够的数学基础,而这里引入的新数学工具只是由于许多新概念的逻辑推导所必需。当然,我们假定学生已经熟悉电路理论的原理,并且会写无源和有源电路的回路方程和节点方程。虽然本书是以一般系统的输入输出关系为重点,但是简单电路却为一般系统的研究提供了最好的例子,而且由于考虑到学生的基础,这样做可使系统的研究不至于过于抽象。

作者没有打算在这样一本书中给出关于系统分析的每一种特殊方法的最近进展,在这个意义上说,本书不是包罗万象的。我们的目标是在单卷的范围内讨论尽可能多的各种系统分析方法。与此同时,作者力避肤浅的论述,以免造成这样的印象,即仅向学生灌输大量的知识,而忽略了那些使他们能够运用这些知识的细节。我们特别注意详尽地讨论每一个课题,使学生在解决工程问题中用得上,同时也避免过细,致使学生抓不住其中的要点。此外,自始至终我们都提到各个课题之间的关联,即使在第一次揭示这一点时学生可能不会充分理解它,但至少可以使学生意识到所有课题是作为一个整体存在的。最后,作者反复地鼓励学生们去参看其它文献,以扩展他们的知识和提高他们理解的深度。我们相信,这本教科书对于研读本领域内研究生水平的绝大多数文献提供了足够的基础。

书中给出的各式各样的推导和例题包含了相当详细的步骤,因而学生可以读懂完整的过程。作为熟练掌握本书内容的一个重要环节,在绝大多数节的后面附有练习题。这些练习题是它前面刚讲过内容的直接应用,目的是在继续学习新课题之前,通过对这些内容的直接应用来巩固学习的过程。我们希望学生们把全部练习题作为本书整体内容的一部分来完成。绝大多数练习题都附有答案,而且为了给这些练习题增加另外的疑问,答案的顺序相对题目各部分来说可能被打乱了。

前三章在性质上是导论,给出了信号与系统分析问题的梗概性综述,并介绍了后面讨论中要用到的术语。这几章介绍的绝大多数概念在后续各章中还要提到,而且要在实际问题中应用。

第四章是“卷积”,这是本书主要部分讨论的开始。与以前大多数教科书相反,卷积概念是在研究变换方法以前引入的。作者觉得这样的顺序较为可取,理由如下所述。第一,卷积积分在研究线性系统中具有根本的重要性,如能通过图解方法使卷积形象化,这对解释某些变换运算会有很大帮助。第二,卷积是应用基本函数表示信号的一个极好机会,并为学生熟悉奇异函数的运用提供了很好的途径。第三,卷积容易推广到离散系统和时变系统,因此对这些领域的分析提供了简单而又直接的入门。

第五章中付里叶变换的阐述比在通常大学生教科书中看到的更为广泛。这是因为它在信号理论中有极大的重要性,以及易于理解与之相联系的物理意义的缘故。本章开始几节是关于付里叶级数的,主要是为了完整性而被包括进去的。这些内容一般在数学或先行的工程课中都有,因而把它删去并不损害讨论的连续性。第五章中关于离散付里叶变换的内容是特别重要的,这是因为它与快速付里叶变换算法有关系,这种算法实际上已变革了信号与系统分析的某些方面。

第六章展现了拉普拉斯变换的宽广领域和它在系统分析中的应用。单边和双边拉普拉斯变换皆已包括,并仔细地研究了拉普拉斯变换和付里叶变换之间的关系。在接近第六章的末尾,研究了通过复平面上的围线积分方法进行拉普拉斯反变换。这种积分方法的讨论在附录B中给出。关于有理变换中极点位置的意义的清楚概念,我们是用反演积分的形式表达出来的。

第七章采用 z 变换方法研究离散信号和系统的分析。在这里引入了离散转移函数,并对数字滤波器作了颇多介绍。这样详细讨论数字滤波器偏离了本书的基本观点,即我们要研究的是分析方法而不是设计方法。然而,这些内容所以要包括在本书内,是由于在这里简单介绍数字滤波器的时机适合,也由于在其它教科书中不大容易找到。

本书包括的内容比一个学期的教学内容多,所以必须对各题目加以选择。在所有各章中,基本内容放在前面各节,而比较专门的题目放在后面各节。一般来说,接近一章末尾的那些节可以略去而不损害讨论的连续性。典型的三小时的课程可以包括第一至第三章;第四章的前七节;第五章的5-7节至5-15节以及5-18节;和第六章的6-1节至6-11节、6-13节的部分,以及6-14、6-15节的全部。为了满足特殊的要求,也容易作出其它的选择。

作者衷心感谢在准备原稿期间从他们的同事和学生那里得到的帮助。应该特别提及G·沙里迪斯教授关于第六章和第七章内容的意见,以及L·苏曼在原稿的校对和排印中提供的大量帮助。

C. D. 麦基列姆

G. R. 库伯

目 录

前言	1
----------	---

第一章 信号与系统

1-1 引言	1
1-2 系统与系统分析	2
1-3 信号	3
1-4 系统分析与系统设计	4
参考文献	4
习题	4

第二章 系统的描述

2-1 引言	6
2-2 系统的描述	6
2-3 数学模型的形式	7
2-4 系统的分类	9
2-5 系统方程的标准形式	12
2-6 离散时间系统与差分方程	15
2-7 初始条件	17
参考文献	18
习题	18

第三章 信号的表示法

3-1 引言	20
3-2 信号表示的一般方法	20
3-3 信号的分类	21
3-4 采用基本信号的表示法	23
3-5 一个例子：沃尔什函数	27
3-6 付里叶级数表示法	29
3-7 其他的表示法	32
3-8 时间带宽乘积与信号维数	34
3-9 奇异函数	37
3-10 冲激函数	39
3-11 冲激函数的极限运算和导数	42

参考文献	43
习题	43

第四章 卷 积

4-1 引言	47
4-2 用冲激的连续集合表示信号	47
4-3 系统冲激响应和卷积积分	48
4-4 卷积积分的计算和说明	51
4-5 数值卷积	53
4-6 系统冲激响应的特性	56
4-7 卷积代数	58
4-8 卷积的其他性质	60
4-9 离散卷积与解卷积	61
参考文献	62
习题	62

第五章 付里叶级数与变换

5-1 引言	66
5-2 时间函数的付里叶级数表示式	67
5-3 平均值与方均根值	71
5-4 付里叶级数的对称性	74
5-5 关于付里叶级数系数的收敛与数学运算	77
5-6 基伯斯现象	78
5-7 付里叶变换	79
5-8 变换的直接计算	82
5-9 付里叶变换的基本性质	88
5-10 系统函数	91
5-11 理想滤波器	96
5-12 能谱	97
5-13 数学运算的付里叶变换	100
5-14 功率信号的付里叶变换	106
5-15 基伯斯现象	112
5-16 实际滤波器	115
5-17 抽样定理	116
5-18 离散付里叶变换	120
参考文献	134
习题	135

第六章 拉普拉斯变换

6-1 引言	143
6-2 单边拉普拉斯变换的存在	145
6-3 变换的直接计算	146
6-4 变换的定理	147
6-5 变换表	154
6-6 拉普拉斯反变换	155
6-7 部分分式展开	156
6-8 微分方程的解	162
6-9 初值定理和终值定理	164
6-10 网络分析	166
6-11 转移函数	168
6-12 对于周期波形的稳态响应	170
6-13 物理可实现性和稳定性	172
6-14 由极-零图计算频率响应	176
6-15 拉普拉斯变换和付里叶变换之间的关系	179
6-16 双边拉普拉斯变换	181
6-17 双边拉普拉斯反变换	184
6-18 复数反积分	188
参考文献	189
习题	190

第七章 z 变换和数字滤波器

7-1 引言	198
7-2 z 变换的基础	200
7-3 z 变换表	204
7-4 应用 z 变换求解差分方程	206
7-5 数字滤波器	208
7-6 递归滤波器的设计	211
7-7 数字滤波器的结构	213
7-8 双线性变换	218
7-9 非递归数字滤波器	220
7-10 数字滤波器中的量化效应	221
参考文献	226
习题	226

第八章 系统分析的状态空间法

8-1 引言	228
--------------	-----

8-2 系统的框图表示法	228
8-3 标准形式方程的框图表示法	232
8-4 标准方程的矩阵表示法	234
8-5 初步的状态空间概念	237
8-6 状态方程的时域解: 时不变系统	239
8-7 状态转移矩阵	241
8-8 冲激响应矩阵	245
8-9 状态方程的频域解法	248
8-10 网络分析中状态变量的选取	251
8-11 离散系统的状态空间法	254
参考文献	256
习题	256
附录 A 数学表	263
附录 B 围线积分	271
附录 C 矩阵	277

第一章 信号与系统

1-1 引言

这是一本关于用数学方法去研究系统与信号的书。如果人们把系统看作是为实现某种目的而互相作用的一组事物的集合,那么,显然到处都有系统。不管天然系统还是人工系统其种类多得惊人。一般来说,天然系统的特点是它们极端复杂,它们的分布范围从“简单的”原子与分子直到庞大的生态学系统,后者涉及无数的有生命的和无生命的子系统,而所有这些子系统都程度不同地相互联系着。从某种观点来看,整个宇宙可看作一个单独的庞大系统。然而,把系统推广到如此大的规模在解决工程问题时是无用的。倒不如把问题的范围缩小,即使这样会损害完整性和精确性。只有这样,才能对各种条件下的系统特性得到一个有意义的和有用的解答。

系统可以用很多方法来研究。可以考查各组成部分和子系统的详细结构,并把由此获得的信息用来建立对系统工作(包括系统内部各部分的相互作用)的综合性描述。这个方法可以恰当地称之为微观的系统分析,这意味着在研究中考虑了系统的详细结构。许多类型的有生命子系统的生物学研究都有这种性质。通常这类分析是极其困难的,因为在这种系统的任何数学描述中都包含有几乎是无限多的变量,并且极其复杂。

最有用和最经常使用的一类系统分析方法是所谓宏观的系统分析。在这类系统分析里,用一个个子系统和部件以及它们的相互作用来表征这个系统,而不考虑它们内部工作的细节。正是这种类型的分析已经证明在解决工程问题时是很有效的,它也正是本书所要讨论的题目。

宏观系统分析要求把一个系统分解成为很多单独的部件。然后,各部件的特性要以如下方式充分详细地进行描述,即整个系统的工作可根据部件特性的适当计算来预测。这种类型分析的关键在于描述部件的特性。在系统分析中这是通过数学模型进行的,数学模型就是一组充分表征部件特性的数学关系式,使之能对此部件与别的部件间的相互作用进行计算。对于很多具有工程意义的部件来说,数学模型是部件(或子系统)对某种激励函数的响应的表示式。激励函数和系统响应一样,都是数学模型中的一个变量。尽管在实际系统中它们可以叫做位移、电压、每小时的BTU,甚至可以是像原料的价格,或者存货清单中保留的项目这样一些量,可是,在本书中把所有这些变量都归入信号的范畴。

所以要把数学模型的题目阐述得这样多,是因为在系统分析中要用到它。事实上,在系统分析中,对正在应用的模型的根据与有效性有更好的理解以避免应用中出现的重大错误,这对于分析系统的人来说是非常需要的。然而,研究好的模型这个课题本身是很复杂的,并且为了获得有用的结果,常常需要在微观范围内研究部件。这个题目最好推迟到系统分析的题目被讨论之后,以便对模型的要求能有一个较清楚的了解。

1-2 系统与系统分析

工程师对一个系统的分析,通常是确定该系统对某个输入信号或激励的响应。用这种研究确定性能规范以帮助选择部件,揭露系统的缺陷,解释不寻常的或未曾预料的性能,或者满足有关系统工作的定量数据中任何一种改变或其它需要。为了弄清楚与系统和系统分析有关的一些概念,研究一些具体例子是有益的。

汽车的点火系统是一种有代表性的小系统。它由电池和交流发电机构成的电源、点火开关、分配器与接点、点火线圈、电容器、干扰消除器、火花塞、连接线以及系统工作的一般环境所组成。通过用合适的数学模型来表示不同的部件,工程师就能够解析地研究系统在不同的外界工作条件下的特性,而且还能确定部件参数变化的影响。例如,电源的功率消耗可作为转速的函数来计算,也可确定改变线圈电感量对火花能量的影响。在许多情况下,一个最终的系统设计需要把解析方法与实验方法结合起来。解析研究为实验规划确定了合适的方向与变量范围,并且在解释结果时是非常可贵的。例如,在点火系统的情况中,对于不同材料与工作条件下的开关触点的腐蚀或许最好由实验来确定。一旦满意的工作电压和电流范围确定之后,即使系统中其他参数改变,它们仍可作为设计规范而保留下来。对于成功地解决任何一个不存在精确和完全的模型的工程问题来讲,这种使分析和实验手段结合起来的方法是很重要的。

当被研究的系统是个大系统时,需要把它分解成许多子系统,其中每个子系统可分别进行分析。然后把这些子系统的合适的模型用于研究整个系统。这类系统的一个例子就是一个小的宇宙飞船的控制和通信系统,如图 1-1 方框图所示。图中的大多数方框代表了各功能子系统,并且可用系统分析方法去研究它们。子系统的设计必须符合整个系统的要求,这些要求是根据系统整体研究提出的,在系统的整体研究中只考虑分系统的外部特性。在完成这种复杂的设计中,总是使用某种型式的迭代方法。初步设计是根据以前的经验或工程判断进行的。用分析法确定由这种设计所得到的技术指标,为了改善性能或可实现性常要修正初步设计。修正后的设计要重新分析,当需要时再进一步修改之。如果技术指标没有满足,改进工作则继续下去而贯穿于设计阶段,或许延伸到生产阶段。

许多具有实际工程意义的系统不能作为一个整体来分析。有许多因素导致这种情况,其中最通常的两个因素是系统庞大复杂和对部件或子系统缺乏满意的数学模型。大城市的供电系统就是这方面的一个好例子,对这样的系统作综合分析则显得太大太复杂。这样的系统有来自各发电厂以及与其他供电系统联接的若干个输入,并且有由用户组成的大量的不同类型的输出。输出的性质随着诸如一天、一周或一年内的不同时间,天气,用户的某种设想以及输出端安装新的或者不同的设备等因素而变化。因为不可能准确地确定任意时刻的负载,通常需要依靠过去的经验并应用概率和统计的分析方法来得到一个合适的选择系统参数的准则。其他系统,例如涉及社会、经济、政治与技术问题的城市交通系统,目前所知的系统分析方法对它尤其不适用。关于处理这种系统的方法正在研究中,对于处理这类问题的系统分析者来说,今后几年或许会得到新的工具。

后面各章所讨论的系统分析方法,在系统应用的广阔范围内已证明是非常有效的。这些

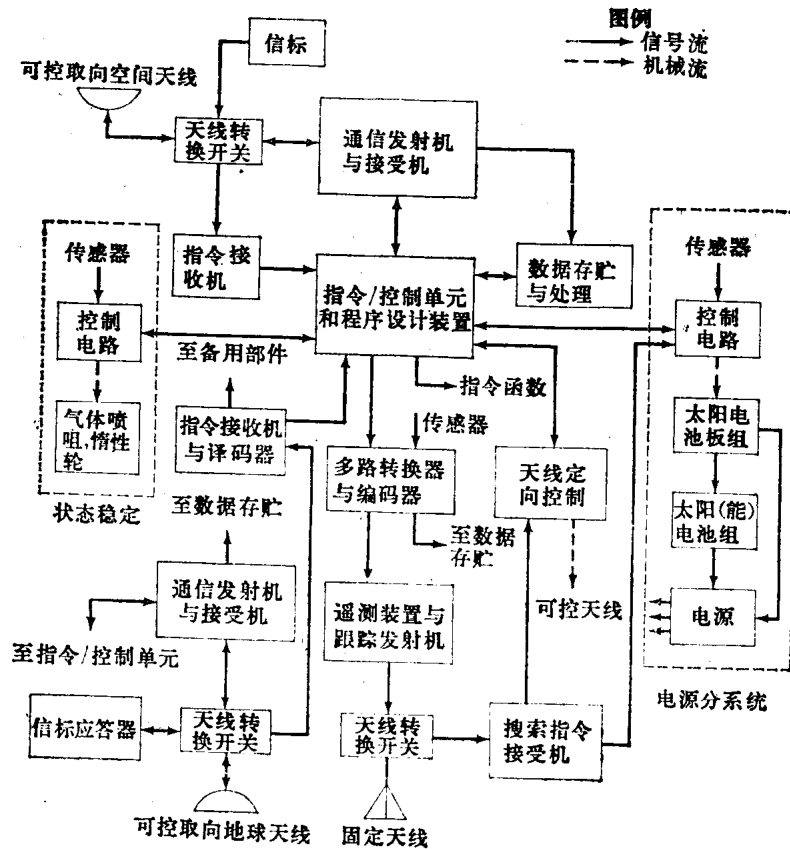


图 1-1 宇宙飞船的控制和通信系统

分析方法的直接应用，或是它们的某种修正或推广为当今绝大多数工程系统分析提供了基础。后续各章讨论的大多数系统的详细例子都是从电工程领域中抽出来的。这样做的理由在于这些例子想像起来简单，并且容易加以推广而适用于各类问题。正是通过电工程问题的研究，一些最成功的系统分析方法才发展起来。尽管这些例子最初是与电信号与系统相联系，然而这些方法最具普遍性，并且可应用于用类似的数学模型描述的任意系统。

1-3 信 号

为了正确地研究和分析系统，需要研究能量以什么方式通过系统进行传播。在大多数系统中，这可通过确定系统里的变量作为时间的函数如何变化来做到这一点。尽管这类变量在实际上是力、电压、功率、单位时间的容量或是无限多的其他变量中的任何一个，在本书中都把这样的变量叫做信号。这些信号用以量度系统的激励和响应，并且在描述组成完整系统的各部件与子系统之间的相互作用时，也是必不可少的。

在复杂系统中常常有许多输入和输出，输入与输出的数目不一定相同。例如，在飞机控制系统中，一根操纵杆的运动能以某种计划好的方式改变几个不同的空气动力面，以便产生最佳的结果。

信号除了在分析系统性能中的用处之外,就其自身做为从一点到另一点运载信息的手段来说也是重要的。为了传送或处理信号的目的而设计一个系统是常有的事。在这种情况下,信号本身便成为首先关心的事情,分析者的任务就在于确定某特定部件或子系统对通过系统传播的信号的影响如何。对各种工程应用而言,选择信号的问题是头等重要的,并且导致了称作信号理论这一广阔学科的发展。设计雷达或声纳信号,或者对通信系统选择适当的调制,这都是信号理论的典型应用。正是由于信号理论固有的重要性,加之它在系统研究中的作用,它在这本教科书中就处于一个突出的地位。

1-4 系统分析与系统设计

系统分析的主要问题是求某一特定系统对于一个指定输入或输入范围的响应。这样一些结果由于满足下述需要而代表了系统研究的一个重要部分:

1. 当系统实际上不存在时(例如,像在可实现性研究的情况中那样),只可能进行数学分析。
2. 系统的实验鉴定通常比分析研究更困难而且花费更多。
3. 某些时候,需要在实际实验太危险的条件下研究系统。这方面的例子如核电站以过高的裂变速率运行,以至不能保证安全;或者飞机在剧烈扰动条件下其飞行控制系统的响应。

系统分析结果除了上述指出的直接应用以外,还有同样或者也许更为重要的对于系统设计的应用。系统设计问题就是确定必需的系统特性,以便产生所要求的对某一指定输入的响应。系统设计常常借助于参数研究来完成,即对系统参数在相当大的范围内变动时各种情况来计算系统的性能。由这些分析结果可以作出判定,什么参数值能给出要求的性能。在特定的综合方法失效时,一般就可以使用这个方法。正是在这个设计领域内,系统工程师发现了某些他最有趣而又值得做的工作。为了获得成功,他必须富于创造性和智慧以及对于能为他所用的各种各样的方法具有渊博的知识。上述后一领域正是后面几章的主要内容。

参 考 文 献

下列书籍给出了系统工程的初步讨论并包含大量而有趣的例题:

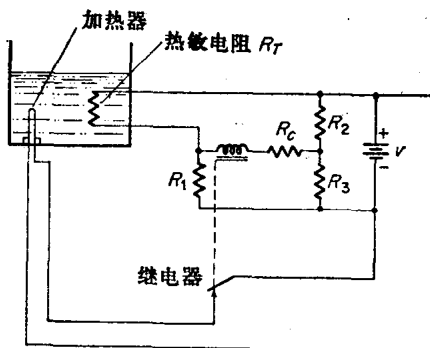
1. BEAKLEY, G. C., and H. W. LEACH, *Engineering*. New York: The Macmillan Company, 1968.
2. GIBSON, J. E., *Introduction to Engineering Design*. New York: Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1968.
3. WILSON, W. E., *Concepts of Engineering System Design*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1968.

习 题

- 1-1 列举汽车点火系统中的主要部件,说明每个部件的输入和输出部分及其用途。
- 1-2 叙述图 1-1 中所有机械信号的性质和用途。每一种情况下所涉及的机械量是什么?
- 1-3 分析是系统设计中不可缺少的部分。作为设计中如何运用分析的例子,可以研究下述温度控制器这个实例。热敏电阻器浸在一个待加热到事先指定的温度的液体中,而且根据热敏电阻所测定的温度接入或切断加热元件以保持这个温度。一种完成这种任务的电路如图所示。图中电路实质上是一个惠斯登电桥,电桥的不

平衡电流流过继电器，此继电器是启动加热元件的。为了分析的目的，假设在 300°K 时热敏电阻器的标称值是 $100\ \Omega$ 而且有一个 $0.1\ \Omega/^{\circ}\text{K}$ 的正温度系数。设 R_1 和 R_3 每一个都是 $100\ \Omega$ ，并设继电器线圈电阻是 $20\ \Omega$ 。继电器的释放电流是 $1\ \text{mA}$ ，而吸附电流可在 1.2 至 $2.0\ \text{mA}$ 范围内调整。电源 v 可取为 $24\ \text{V}$ 。

a. 写出继电器线圈电流作为 R_T 和 R_2 函数的一般表示式。这代表了这个问题的初步分析。(提示：用节点分析。)



- 选择 R_2 的值，当温度达到 350°K 时断开加热器。
- 当温度降到 340°K 以下时，继电器必须调到多大数值的吸附电流才能使加热器接入？
- 若 R_2 是可调整的，画出 R_2 电阻值对加热器断开温度的曲线（坐标轴带刻度）。限定考虑的温度范围是 300 到 400°K 。
- 当温度置于 d 项的温度范围内，画出加热器“接入”和“断开”之间的温差曲线。
- 改变继电器线圈电阻，或改变电压 v ，或把电阻 R_T 、 R_4 、 R_1 、 R_2 和 R_3 减少到原值一半时，定性解释对整个系统性能的影响是什么？

第二章 系统的描述

2-1 引言

本章介绍系统的数学模型的概念,指出系统模型的某些限制,并解释用来描述系统的术语。所考察的例子主要是电系统方面的,但是这些概念、术语和方法同样适用于其他类型的系统。

2-2 系统的描述

描述一个系统最广泛使用的方法是通过指定系统变量之间的关系来表示。这种描述可以采用图形、列表、微分方程、差分方程或者它们的不同组合。下列各章所研究的方法几乎都是当系统以常系数线性微分方程或常系数线性差分方程表示时,可以使用的各种解析方法。这样的描述包括了为数很大的一类系统,而且还常常可以在分析不属于此类的系统时用作近似表示。

系统工程师,事实上几乎所有工程师常常面临的一个重要问题是:指定系统的合适模型是什么?该模型能对系统提供多好的表达式?实际上这是一个在很多情况下很难回答的问题,它往往需要根据工程师的判断和经验来决定。这个问题在使用标准化部件时能够大大地简化,例如,在电路设计中就是这样。在这种情况下数学模型通常是由部件生产者通过模型参数的技术条件而提供的。

作为部件技术条件的例子,考虑一个电容器。最少的一种技术条件只给出电容量和容差,以及电容器可以安全工作的最高电压。这样一个部件由图 2-1 (a) 表示。在需要更准确地计算其特性时,或者当电容器用在较高的频率时,就需要使用更准确的模型,如图 2-1 (b) 所给出的那样。在这个模型里用与上述模型并联的一个电阻 R_1 来考虑漏电阻和介质损耗。如果电容器用在更高的频率时,引线电感和引线损耗的作用可能变得不可忽略,那么模型就应当改变以把这些影响考虑在内。考虑了与引线有关的电感和电阻的一种描述如图 2-1 (c) 所示,这里在前面的模型上加入了一个电感 L 和电阻 R_2 。在其他的应用中可能需要使用更复杂的模型,假若电容或损

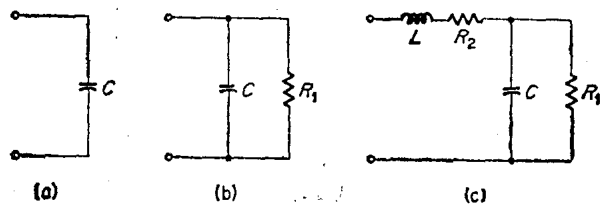


图 2-1 电容器的三种模型

耗随温度而变化或者在高频时由于辐射而产生的损耗需要考虑时就属于这种情况。

在每一种情况下一个部件或系统的数学模型都是一种逼近。可以是良好的逼近或差的逼近,在一个特定的系统中逼近的程度对分析的精确度和正确性有或大或小的影响,影响的大小取决

于部件与系统其他部分相互作用的方式。工程师必须决定需要的精确度,并且选择合适的数学模型满足这些要求。为此,工程师必须知道用一个特定的模型进行分析时其结果的可信程度,而且他还必须了解在试图获得更精确模型的过程中可能遇到的困难。

具体部件数学模型的改进是很困难的,但一般认为这是个很吸引人的工作。在很多情况下,求出部件的正确模型比对包含该部件的系统进行分析更为困难。模型制作者必须熟悉用于研究系统性能的各类解析方法,他才能成功地找出一个好的模型。所以下面不再考虑模型发展的研究。相反,最经常使用的模型的数学形式均已假定,而比较详细地研究系统分析方法。讨论中主要是以电系统为基础,其中使用了一般公认的部件模型。在特定的情况下如何精确选择最合适的模型将不予以考虑,尽管这是工程师的主要职责,也是工程分析和应用数学的基本区别之一。

练习 2-2.1

仿照图 2-1,画出电感的四个模型图。这四个模型分别适用于超低频,中频,高频和超高频。线圈的电阻和电容的影响在需要考虑时应该包括在内,为了简化,假设这是一个空芯电感。

2-3 数学模型的形式

数学模型的讨论从具有单一输入和单一输出的系统开始。然后把这种简单情况下使用的概念推广到具有多输入和多输出的更一般的系统,以及按离散的而不是连续的时间变量工作的系统。

一般来说,描述系统的方便办法是藉助于框图,如图 2-2 所示。输入信号 $x(t)$ 和输出信号 $y(t)$ 用箭头表示,而系统本身用方框或盒子来表示。当有几个部件互连时,就有几个方框和若干根线连接各个方框。这样的框图如图 2-3 所示。各子系统或部件采用标有符号 T_1 、 T_2 和 T_3 的

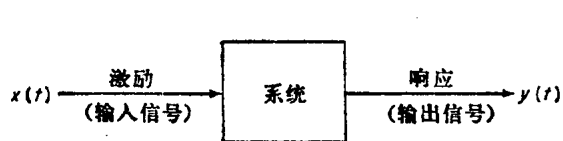


图 2-2 系统的框图

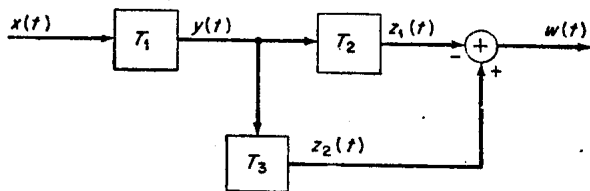


图 2-3 具有几个方框的系统

的各个方框来表示。把每一个方框看作是将其输入端的信号变换成输出端的信号常常是方便的。这在数学上可由运算符号表示为

$$y(t) = T_1\{x(t)\}$$

类似的表示式也可对于 $z(t)$ 和 $w(t)$ 给出。运算 $T\{\cdot\}$ 的性质取决于所包含的部件或子系统的特性,它可以是从一个函数到另一个函数的简单折算,也可以是复杂的非线性映射。通常,结果是一个方框的变换 $T\{\cdot\}$ 与连接到其输入端和输出端的对象有关。在系统的数学模型中,负载的这种影响采取必须满足的联立方程式的形式。几个理想电部件的输入输出变换由表 2-1 给出。用表 2-1 给出的部件模型和基尔霍夫定律就可能写出描述网络或系统特性的方程组。作为一个