

数字系统设计基础

V · T · 里恩 著

FUNDAMENTALS

OF DIGITAL

SYSTEMS

DESIGN

上海科学技术出版社

51.900
231

数字系统设计基础

〔美〕 V. T. 里恩 著

苏进武 译

上海科学技术出版社

FUNDAMENTALS OF DIGITAL SYSTEMS DESIGN

V. Thomas Rhyne
Prentice-Hall, Inc., 1973

数字系统设计基础

〔美〕V.T.里恩 著

苏进武 译

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 17.5 字数 474,000

1980 年 5 月第 1 版 1980 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—11,500

书号: 13119·781 定价: 1.95 元

序

大多数专门著作所涉及的内容可以分为两大方面：即理论方面和实践方面。我们将有关有限状态机器的理论与关于触点焊接、布线指导之类的课本作一比较，就可以说明这两个方面的不同之处。我个人觉得，一个出色的工程技术人员应对理论和实际应用都有所了解，并且能在一些实际使用的系统中，将理论概念和实现手段沟通起来。

工科教师经常发现，在他们所使用的许多教科书中，理论部分占了首位。然而，近几年来，工科教学明显地偏重实践环节。教育委员会指出：“电气工程系面临的一个重要问题，是如何使学生能够将课程中所讲授的理论应用于解决实际工程问题。特别要强调一点：应把工程实践作为整个教学计划的一部分。”为了达到上述要求，本书在数字系统的设计方面，力图使课堂教学和实验室实验衔接起来。本书的目的是系统地介绍数字系统的设计方法，即，使学生能循沿一条设计程序，从对数字装置提出要求开始，一直到将各种开关器件联接起来，实现所需的功能为止。本书所选择的设计方法既是实用的，也是通用的。其中没有一种方法是过时的，而且，当新的工艺出现时，它们亦将始终用得上。

本书为了不与这个领域内正在沿用的其它教科书相脱节，而且还能配合使用，所以，所讲授的应用技术与其它书籍所介绍的理论是一致的。而且，本书也包括了基本的理论概念，从而它可作为向学生介绍数字系统设计的一本完整的教本。学生学完本书以后，可通过进一步的学习，来扩充理论基础。

本书的一大特色是为每一类设计问题至少提出一种适宜的设计方法，而不是罗列许多可供选择的处理方法。这样讲授是为了能够从介绍概念开始，一直到整个系统的设计方法为止，有机地、

协调地和合理地进行。此外,本书尽量地举一些实用的例题,并列举了一些理论性更强的参考书和参考文献,以供有兴趣的学生进一步钻研本书所介绍的基本概念。

本书前七章的内容可安排为一学期课程。这几章的每一节内容都是建立在它前面所介绍过的概念之上的。为了使电气工程的低年级和非电气工程专业的学生使用此书,也就是当学生尚未掌握电子学知识的时候就能使用它,本书中关于电子学的详细内容尽量予以削减。这本教本在得克萨斯(Texas) A&M 大学里,已经对几百个学生进行了讲授,经验证明,本教程适用于工程、数学、物理、计算机科学以及其它系从大学二年级一直到研究生水平的学生,同样还包括有实践经验的工程师。

第一章内容为引论性的,对二进制已经熟悉的学生可以略去不看。第二~四章介绍了组合电路的设计方法。第二章为布尔代数。第三章介绍用电压符号法将布尔表达式变换成能完成其逻辑关系的开关电路。这时,先将常用的门电路看作理想的模型,然后再进一步讨论和理想模型的差别,例如阈值效应、延迟和负载能力等等。本书的较早阶段安排了第三章的内容,这就可以使得实际的门电路实验尽可能早地进行。第四章讨论了组合函数表达式的最小化,用作图、列表和计算机辅助几种方法,使单端或多端输出函数最小化;还介绍了许多实际的组合电路设计例题,其中包括在组合网络中采用中规模集成电路。

第五和第六章为时序电路设计。第五章介绍了描述时序系统的常用语法(Syntax),时序运行中产生的各种问题,以及解决这些问题的各种方法,还叙述了常用的时序存储装置。第六章阐述了使用时序电路组件时的设计方法,首先介绍设计计数器所采用的转换图法,后面几节包括一般的时序电路设计方法和有关的时序电路组件(如移位寄存器、环形计数器等)。

第七章通过介绍各种控制方法和控制装置,以使得能完整地进行一个数字系统的设计。这一章还提及另外一些设计控制器的途径,同时也包括好几个系统设计全过程的例子。

余下的几章介绍数字系统设计人员通常较感兴趣的若干课题,这里也包括不少组合类型、时序类型及系统设计的实例。

在一门数字系统课程中,做实验是一项基本训练。本书每章末习题中的不少设计问题适宜于在实验室中进行,这种类型的习题都标有记号(*)。这些使用门电路、时序电路组件和中规模集成电路(如全加器、计数器等)的实验,在目前条件下较易办到。同时,学生通过实验,对提高掌握课程中讲授的设计技巧大有好处。

若时间与课程安排允许的话,最好在数字系统设计方面讲授两门课:其一即是本课程,介绍基本的开关理论和设计技巧;另外一门是开关理论的高级教程。如何引导学生将理论与实践结合起来是教好本书的关键。

我相信这本书应当对无论是新手或是老手的数字系统设计者,都会有所帮助。我希望确是做到了这一点。

V. T. 里恩

于 得克萨斯

目 录

序

第一章 基本概念	1	
1.0 什么是数字系统	1	
1.1 精度和分解度	2	
1.2 连续系统与数字系统	3	
1.3 数字系统的设计	4	
1.4 信息信号和数值信号	6	
1.4.1 信息信号的表示方法	1.4.2 数值信号的表示方法	
1.5 二进制制	10	
1.5.1 二进制/十进制变换	1.5.2 基本的二进制算术运算	
1.6 小结	22	
1.7 思考题	22	
1.8 参考文献	22	
1.9 习题	23	
第二章 布尔代数引论	27	
2.0 双值变量的性质	27	
2.1 “与”连接符	27	
2.2 “或”连接符	29	
2.3 “非”逻辑运算	31	
2.4 “与-或-非”逻辑组	32	
2.5 布尔代数的基本性质	32	
2.5.1 基本命题	2.5.2 基本定律	2.5.3 摩根定理
2.6 代数法简化布尔表达式	35	
2.7 其它的连接符逻辑组	36	
2.7.1 “或非”连接符	2.7.2 “与非”连接符	
2.8 组合设计: 最小项解析式	40	
2.9 最大项解析式	44	
2.10 八种标准形式	45	

2.11 小结	49
2.12 思考题	49
2.13 参考文献	50
2.14 习题	50
第三章 组合逻辑电路与电压符号法	57
3.0 引言	57
3.1 常用的门电路	57
3.2 电压真值表	58
3.3 电压符号法介绍	62
3.4 电压符号与逻辑反演	64
3.5 用“与非/或非”门作为“与”门或者“或”门	65
3.6 用电压符号法设计组合电路	68
3.7 用“与非/或非”门作为反相器	71
3.8 输入端开路与开关的正确使用	74
3.9 特殊逻辑功能的门电路	76
3.10 其它的设计考虑	80
3.10.1 门电路的并联 3.10.2 成本核算 3.10.3 延迟	
3.10.4 负载	
3.11 用中规模集成电路设计组合电路	86
3.12 小结	90
3.13 思考题	90
3.14 参考文献	91
3.15 习题	92
第四章 组合函数的最小化	99
4.0 引言	99
4.1 基本的最小化概念	99
4.2 标准形式的展开式	101
4.3 卡诺图法	104
4.3.1 卡诺图的填写 4.3.2 用卡诺图表示部分简化的函数	
4.3.3 在卡诺图上合并最小项 4.3.4 蕴涵项的选择 4.3.5	
简化的和之积形式 4.3.6 例题	
4.4 多余项: 不需考虑和不会发生的条件	128
4.5 设计例题	131
4.5.1 增量式转向检测器 4.5.2 二进制比较器 4.5.3 码-码	
变换 4.5.4 七脚显示器	

4.6 表格法最小化	146
4.6.1 最小项十进项数的分组过程	4.6.2 质蕴涵项的选择
4.6.3 和之积形式和表格法最小化	4.6.4 多余项和表格法简化
4.6.5 计算机辅助最小化	
4.7 多个函数的最小化	167
4.7.1 各种非正规方法	4.7.2 多个函数最小化的正规方法
4.7.3 一个例题: 码-码变换	
4.8 小结	187
4.9 思考题	188
4.10 参考文献	189
4.11 习题	189
第五章 时序系统引论	195
5.0 时序系统与组合系统	195
5.0.1 组合系统的定义	5.0.2 时序系统的定义
5.0.3 空间/时间的对应关系	
5.1 时序系统的描述	199
5.1.1 输入信号、输出信号及系统状态	5.1.2 状态表和状态图
5.1.3 时序系统的一般性描述	
5.2 时序系统的一些问题(及其解决办法)	210
5.2.1 时序系统运行中的一些限制	5.2.2 基本的触发器
5.2.3 脉冲模式	5.2.4 瞬变信号选通门
5.3 时钟触发器的类型	230
5.3.1 非直接耦合的 S-R 触发器	5.3.2 非直接耦合的 J-K 触发器
5.3.3 T 触发器	5.3.4 J-K 触发器的使用
5.3.5 D 触发器	5.3.6 触发器实例: RTL 和 TTL
5.4 单触发电路	236
5.5 时态图	237
5.6 脉冲模式系统的同步化	238
5.6.1 脉冲信号的同步化	5.6.2 电位信号的同步化
5.7 脉冲模式系统中的时钟信号	243
5.8 小结	244
5.9 思考题	245
5.10 参考文献	246
5.11 习题	246

第六章 时序系统的设计	253
6.0 引言	253
6.1 计数器	255
6.1.1 计数时序的描述 6.1.2 转换图的画法 6.1.3 转换 图的几种差错 6.1.4 几个例题	
6.2 计数器设计	266
6.2.1 激励表 6.2.2 同步激励图法: 非直接的方法 6.2.3 同步激励图法: 直接的方法 6.2.4 控制函数式的和之积形式	
6.2.5 异步转换图法 6.2.6 转换图法和表格最小化法 6.2.7 多余状态下的工作特性 6.2.8 输出信号的产生 6.2.9 计数速率的估计	
6.3 多模式计数器的设计与米兰型输出信号	304
6.4 时序系统的一般设计	310
6.4.1 状态减缩 6.4.2 状态安排	
6.5 寄存器及其有关的时序器件	330
6.5.1 寄存器的数据输入 6.5.2 移位寄存器 6.5.3 环形计 数器 6.5.4 移位寄存器式计数器	
6.6 使用时序型中规模集成电路器件进行设计	346
6.7 小结	346
6.8 思考题	347
6.9 参考文献	347
6.10 习题	349
第七章 数字系统的整体设计	359
7.0 引言	359
7.1 控制器的技术说明	361
7.2 控制器的设计	366
7.2.1 环形计数型控制器 7.2.2 状态计数型控制器的设计	
7.2.3 微程序控制器	
7.3 系统的整体设计: 例题	387
7.4 系统设计方法总结	400
7.5 小结	401
7.6 思考题	402
7.7 参考文献	402
7.8 习题	402

第八章 二进制算术运算	405
8.0 引言	405
8.1 二进制加法	405
8.1.1 并行加法 8.1.2 二进制累加器 8.1.3 溢出 8.1.4 时标的一些考虑 8.1.5 超前进位 8.1.6 串行加法	
8.2 二进制减法	418
8.3 带有符号位二进数的算术运算	420
8.4 符号和补码的算术运算	422
8.4.1 符号和2的补码 8.4.2 符号和1的补码 8.4.3 各种 表示形式之间的变换	
8.5 小结	437
8.6 思考题	437
8.7 参考文献	438
8.8 习题	438
第九章 十进制算术运算	443
9.0 引言	443
9.1 十翻二变换	444
9.2 二翻十变换	455
9.3 十进制算术运算	462
9.3.1 8421 码加法 9.3.2 余3 码加法 9.3.3 十进制减法	
9.4 小结	478
9.5 思考题	479
9.6 参考文献	479
9.7 习题	480
第十章 编码及其性质	487
10.0 引言	487
10.1 各种二-十进制(BCD)编码	487
10.2 有权码	490
10.3 字母的各种编码	494
10.4 单位间距码	497
10.4.1 葛莱码 10.4.2 单位间距的 BCD 编码	
10.5 检错和校正	507
10.5.1 错误检测 10.5.2 错误校正	
10.6 小结	512

10.7 思考题	513
10.8 参考文献	514
10.9 习题	514
第十一章 模/数转换	519
11.0 引言	519
11.1 数-模转换	520
11.2 模-数转换	526
11.2.1 斜坡式模-数转换器	526
11.2.2 追随式模-数转换器	526
11.2.3 逐位近似式模-数转换器	526
11.3 小结	534
11.4 思考题	535
11.5 参考文献	535
11.6 习题	536
附录 子程序 MINTE(N, C)	537

第一章 基本概念

1.0 什么是数字系统

因为本书准备向读者介绍设计数字系统的近代方法，所以，在开始时，提出本节标题那样的问题是很自然的。要回答这个问题，必须先明确这里所用的数字这个术语的含义。我们生活的这个世界上，所包含的物理变量，大部分属于连续变量，如时间、温度、距离和重量等等。但是，在会话、数据处理、观察量的记录以及大多数其它的人类活动中，并不能使用这些连续变量的准确值，而必须用一些数字量近似地来代表它们的实际值。例如，测得的室内温度为 72°F ，而实际的室温可能为 72°F 至 73°F 之间的某一值。

测量过程通常就叫做变量的数字化过程，其中包括精度、分解度和测量时刻三个方面的内容。也就是说，在某一指定的时刻，用表示变量大小的数字量来代替原始的连续变量。当原始变量转换成数字形式以后，就可以进行处理或者存储，而不会进一步降低精度或分解度。

于是，可以这样来回答原来的问题。所谓数字系统，即处理数字(或数值)形式信息的系统，它不能直接对连续变量进行处理。在连续变量与它们的数字化表示形式之间进行变换的系统也算作数字系统。

我们对这种连续变量到数字量的变换过程并不陌生。举例来说，当驾驶员被问到：“现在你开得多快”时，他看看测速计（一种连续的测量仪表）并答道：“每小时六十公里。”（数字形式的反应）。他很可能没讲对准确的速度，但为了讲出车速，他必须将测速计的连续的指示值变换成相应的数值。

1.1 精度和分解度

上述驾驶员所回答的车速的准确性与两个因数有关:测速计表示车速的基本精度和驾驶员读表时的分解能力。精度就是测量过程的品质。提高精度通常需改进测量方法或测量仪器,用钢皮尺测量滚珠轴承的直径的精度,显然不及用千分卡测量所能得到的精度。在许多科学和工程应用中,测量过程的精度是人们最关心的问题。

所谓连续量/数字量变换过程的分解度,就是指测量时所能得到的有效数值之间的最小间隔。这个最小的间隔,常称作分解单位,它限制了变换的精度。大小在有效数值之间的连续量(即间隔内的连续量),只能取比它的实际值大一些或者小一些的近似数字量。一般地说,当测量误差的范围为一个分解单位时,用数字量表示连续量的精度不会超过实际值加上或减去半个分解单位。

将有效数值之间的间隔进一步细分时,可以提高测量的精度。但是,分解度提高了,相应要求变换过程中产生更多的数字信息。例如,测出金属棒的长度为12英寸,这表明它的实际长度在11.5至12.5英寸之间。当测得的更精确的结果为12.00英寸时,则表明棒的实际长度在11.995至12.005英寸之间。

正如精度不可能超出分解单位所限定的极值那样,超出测量时所能达到的基本精度,而过高地提高分解能力也是没有意义的。有些人使用计算尺做乘法运算时,所得到的运算结果居然有五位或六位之多,这种过份的分解度实际上是没有意义的,因为计算尺的有效位一般只有三位。

由上所述,可知连续量/数字量变换过程中的精度和分解度应该是相互匹配的,因此两者之中任意一个的提高通常都会使系统的成本或复杂性增大(或者两者都增大)。分解度提高了,相应地使得组成数字量的数值信息数也需增多,从而加重了系统存储数据和处理信息的任务。所以,要根据实际应用的要求来确定分解度和精度的指标。

1.2 连续系统与数字系统

然而,并不是所有的系统都属于数字系统。许多计算机和控制系统可以用来处理连续变化的信息。水银温度计、计算尺和电子模拟计算机就是以连续模式工作的装置。将水银温度计和许多广告牌上经常使用的数字式温度测量系统作一比较,就可以说明连续系统和数字系统之间的差别。温度计是连续式的计量装置,水银柱升高的高度与水银泡的温度相对应,温度的细微变化都会引起水银柱高度的变化。

可是,数字式测温系统则只能按一定间隔地、尽可能接近实际值地将温度变换成数值,并进行显示。温度的微小变化并不一定都能表示出来,它必须相当大,足以使表示温度的数值发生变化时,才会反映出来。否则,显示的值始终保持原来的数值,好象一只已经停了的钟那样(然而一只停了的钟一天中却还有二个时刻,指针的位置是正确的!)。数字式测温系统也很少能反映真正的温度,但是,在1度的分解范围内,则仍总是正确的。

由于多种原因,数字系统的应用日趋广泛。首先,将分解单位进一步细分,就可以使数字系统的精度比连续系统高得多;同时,还使系统工作的可重现性(repeatability)提高,这一点在计算技术和数控机床的应用中很重要;还有,数据可以可靠地存储与传输。举例来说,使用数字系统测量电压并作出记录,与将此电压存储在电容器的两块极板上,这二者之间的差别,显然,环境和时间对数字系统所记录的电压值影响极小,而对电容上存储的电位影响较大。此外,数字信息可以用各种新的方法编码,从而,能有效地、无差错地进行数据处理。而且,以数字模式进行工作的电子装置,即使采用参数偏差较大的廉价电子元件,也能可靠地、无差错地运行。由于这些和其它一些方面的原因,数字系统在先前使用连续系统的领域和一些新的领域内得到了广泛的应用。

图1-0为数字系统的一般形式。系统的输入信号可以是连续变化的信号与数字形式的信号。在电子数字系统中,连续变化的

信号必须通过信号转换器转换成适当的电压或电流信号。如热电偶、应变仪和光电管就是典型的信号转换器,从这些转换器输出的连续信号就是原始信号的模拟信号,然后,再由所谓的模-数转换器(Analog-to-Digital Converter, 简记为 ADC) 转换成数字信号。

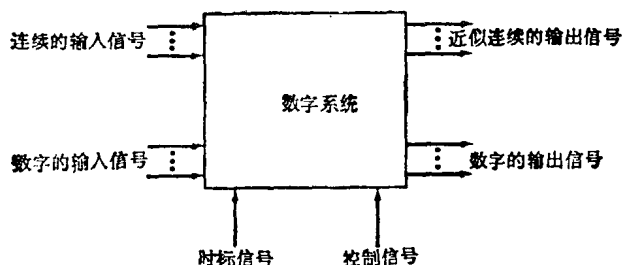


图 1-0 数字系统的一般形式

直接输入数字信号时,就不需要这些变换。如从现金记录器或从键板输入的信号和从穿孔卡片读出的数据就是这类输入信号。有些信号转换器能直接地将输入信号变换成数字形式的输出信号,例如,涡轮流量计每转一周就发出一个电脉冲信号,这样,用一个计数器累计产生的脉冲数,就可得到总流量或流率的数据资料。诚然,数字系统内部的所有信号则必须都是数字信号。

直接的数字输入信号和模-数转换器产生的数字信号,经过系统的加工,就可以得到所需的输出信号。输出信号可以是数字信号,如记分牌和行打字机等。在需要时,也可以用数-模转换器(Digital-to-Analog Converter, 简记为 DAC),再将数字输出信号变换成大致连续的模拟信号。模-数转换器和数-模转换器的设计在第十一章中将会讲到。

1.3 数字系统的设计

数字系统的设计可以分为三个方面:器件设计,功能部件设计和系统设计。器件设计的内容主要是为数字系统设计能完成简单

逻辑功能的电子器件。这些器件有着通用的名称(门, 触发器等), 它们的设计和使用与电子学的其它分支和电路分析有所不同, 设计的着眼点是制成廉价的可靠的数字器件。各个厂商都有许多种类的数字器件供选用, 这方面的内容, 本书只作粗略的介绍。对数字电子学有特别兴趣的读者可以参考文献[3], [4]和[6]。

功能部件设计就是将数字器件组装成具有某种工作功能的子系统, 如计数器和全加器等。随后, 按照适当的时标、控制和接口要求, 将这些功能部件组合成能完成所需工作的总系统, 后面这个任务也就是系统设计。交通信号控制器、数控机床和计算机都是典型的数字系统。本书主要讨论功能部件设计和系统设计两个方面。从第二章至第六章论述功能部件的设计方法, 第七章论述系统设计, 其余章节有选择地讨论了数字系统的一些工艺性内容。下面通过一个例子说明设计数字系统的这几个方面。

[例 1-0] 测量转速的数字系统。

为了尽可能正确地测出转轴每分钟的转数, 采用图 E1-0 所示的数字系统。在转轴上涂上一圈黑带, 并留出一块白色标记。当白色标记出现时, 光电管能感受到输入的光信号, 并产生脉冲电信号, 这样, 每转一周, 就产生一个脉冲信号。用计数器累计所产生的脉冲数, 并且使计数器每分钟作一次清零, 这样就可以记下每分钟的转数。在每次周期性清零的前一时刻, 将计数器记下的数值

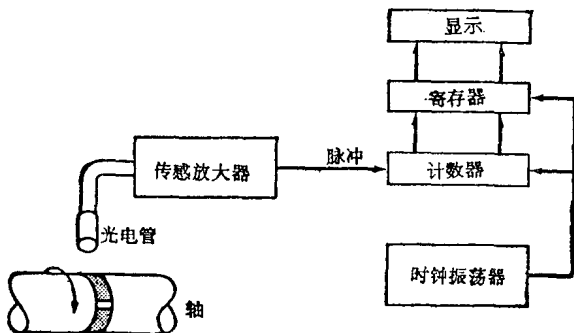


图 E1-0