

数字随动系统

戴世宗 著

科学出版社

73.8/522

社

72.8
822

数字随动系统

戴世宗 著

36562/02

科学出版社

内 容 简 介

本书从一个侧面阐明了在随动系统中引用数字计算机的两个主要问题，即如何建立数字随动系统校正环节的数学模型和实现信号的数模转换。

本书可供从事计算机控制的专业人员和高等院校中自动控制专业高年级学生参考。

数 字 随 动 系 统

戴 世 宗 著

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1976年4月第一版 开本：787×1092 1/32

1976年4月第一次印刷 印张：7 1/8

印数：0001—31,500 字数：150,000

统一书号：15031·120

本社书号：641·15—8

定价：0.65元

前 言

在伟大领袖毛主席的无产阶级革命路线指引下，文化大革命期间，遵照“抓革命，促生产”的指示，我们研究了数字计算机的某些应用问题，并取得了一些成绩。经过“由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复”，试验成功含有计算机的数字随动系统。实际上，这只是在某一研究课题中所取得的成果的一部分，而该课题的完成又是很多同志辛勤劳动的结果。

计算机的应用是多方面的，各个应用领域也各有自己的特点，但计算机本身的属性，如工作的不连续方式，计算量的数字化，极快的计算速度和极高的计算精度等，对各个具体应用领域的影响却是共同的。通过计算机在随动系统中的应用，能看到计算机控制系统的一些普遍东西。在计算机应用方面，我们的实践还很不够，这里所总结的经验还是一些片断，仅供参考。

实际问题总是带有特殊性的，但普遍性即存在于特殊性之中。作为基本反馈系统的二阶随动系统，尽管它有它的特殊性，但也包含着反馈系统中很多带普遍性的东西，而且它的分析方法也适用于其它型式的反馈系统。本书将讨论典型的二阶数字随动系统的分析与综合。第一章阐明含有计算机的控制系统的工作特点，并通过射击武器的控制系统说明数字随动系统的地位和作用。第二章主要讲 z 变换理论，以为后面的系统分析和综合作准备。

包含数字计算机的控制系统，除计算机本身外，需要解决

两个问题，第一是信号的检测与变换；第二是建立控制过程的数学模型。因为测量所得的信号常常是以模拟量表示的，而计算机并不认识这些用电压、位移、转角等模拟量表示的信号，所以必须把它们统统变成数字送入计算机。第三章的任务就是介绍数模转换的基本知识。由于数字随动系统控制的是轴角，需要随时把轴角信息馈送给计算机，故第四章专门介绍轴角变数字的一种实用方法。当把控制过程的这些已经转变成数字的信息传给计算机以后，进一步就必须解决如何处理和计算这些输入数据的问题，即解决计算机按什么规律来处理数据，按什么方程组来计算控制参量，一句话，必须建立数学模型。建立数学模型不是纯粹的数学工作，它要求设计者对控制过程、控制对象有深入的了解，有全面的调查研究，才能从具体的实际问题中抽象出正确地、客观地描述实际过程的数学方程。数学模型与控制过程直接相关，它根据计算机控制系统的任务而定。本书第五、六两章是建立数字随动系统的数学模型。第七章是一些点滴经验。这些经验无论在理论上和在实践中都是很不够的，特别在应用状态方程方面，有待进一步研究。

本书偏重于原理说明，很少涉及具体的线路，即使用到一些线路，往往也是简化图或示意图。为把问题讲清楚，基本原理和问题分析占了较大篇幅。

本书的理论部分曾请俞克曜同志审阅，工程部分由李思崑同志校阅。

由于水平有限，书中错误之处一定不少，请读者帮助指正。

目 录

前言

第一章 概述	1
1.1 计算机在控制系统中的作用	1
1.2 计算机控制系统的一些特点	4
1.3 数字随动系统的特殊问题	8
1.4 二阶数字随动系统	15
第二章 分析采样系统的理论基础	24
2.1 采样过程与采样定理	24
2.2 信号恢复	32
2.3 z 变换的定义	39
2.4 z 变换的方法	40
2.5 z 变换的基本定理	47
2.6 z 反变换	53
2.7 脉冲传递函数	57
2.8 脉冲传递函数的求法	62
2.9 s 平面到 z 平面的变换	68
2.10 稳定判据	72
第三章 数模转换	81
3.1 数字变电压	81
3.2 电压变数字	91
3.3 数字变电流	98
3.4 轴角编码	99
第四章 轴角-交流-数字转换器	106
4.1 轴角-交流-数字转换的原理	106
4.2 采样时刻的选择	109

4.3	正余弦电压的获得	111
4.4	全角变换	115
4.5	粗精组合与纠错	122
4.6	多通道控制	126
4.7	非线性解码网络	129
第五章	快速数字随动系统的分析	139
5.1	连续部分的脉冲传递函数 $G(z)$	139
5.2	数字控制器	141
5.3	具有最少拍过渡函数序列的 $\Phi(z)$	150
5.4	最少拍系统特征方程的根轨迹	154
5.5	饱和特性对采样频率的限制	159
5.6	开环放大系数对过渡过程的影响	164
第六章	无波纹快速数字随动系统的设计	169
6.1	根的位置与过渡特性的关系	170
6.2	无波纹条件对 $\Phi(z)$ 的限制	173
6.3	无波纹系统的数字控制器 $D(z)$	179
6.4	$D(z)$ 的物理意义及系数的简化计算公式	181
6.5	无波纹快速数字随动系统特征方程的根轨迹	184
6.6	采样频率的确定	188
第七章	计算机在研究数字随动系统中的应用	191
7.1	数字控制器 $D(z)$ 的程序实现	191
7.2	改善过渡过程的换接程序	196
7.3	改进系统质量的措施	200
7.4	n 阶线性有限差分方程的模拟	206
7.5	数字随动系统的实验	211
7.6	状态变量和状态方程	216
参考文献		220

第一章 概 述

1.1 计算机在控制系统中的作用

计算机种类很多,用途也各不相同,但按其工作特点及结构特点,通常可分为通用机和专用机两大类。通用机主要用来进行数值计算,能在同一架机器上解决各种计算问题。这类机器一般具有速度快、使用方便等特点,各地计算中心或计算站配备的就是这种机器。专用机是专门为解决某一课题或某一类课题而制作的计算机,规模较小,结构较简单,存贮容量较少,速度可能低些,指令系统也不复杂。专用机虽较通用机小,但其输入输出数值多是自动完成的,工业生产上配备的计算机和军事上应用的计算机多属此类,如控制机、分析机、指挥仪等。专用机的算题速度和精度也是相当高的,这点与通用机无太大区别。

在数值计算方面,计算机用来求解大量复杂的计算问题。计算机的计算速度起码在每秒几万级以上,可以说这是人工计算所无法比拟的。用人工来描述导弹空间运动的整个微分方程组,一个计算员用一台小计算器,不停的工作就需要两年的时间,而用计算机来解,只需一个小时左右就够了,且计算精度可达任意位数。在科学研究和工程设计中,由于没有计算机,为计算方便常常忽略掉很多因素,因而得不到准确的结果;若采用计算机,便可周密细致地考虑较多的因素,从而得到比较精确的方案,同时,还可进行几种方案的比较,从中找

出最佳的来。

在自动控制方面,应用计算机能大大促进生产过程自动化,提高加工精度和产品合格率,降低产品成本,缩短生产周期,如用计算机控制铣床制造涡轮叶片的复杂表面,自动控制轧钢和冶炼的生产过程等。

在军事上,计算机被用来控制导弹、火炮、鱼雷等武器的发射.当目标进入雷达作用半径以内,一被自动跟踪雷达发现就被跟踪,同时自动雷达将测得的目标的当时位置(距离、方位角和高低角)随时送入计算机,以便计算机按人们事先规定的推算方法迅速算出目标的航向、航速,引导导弹或其它射击武器去击中目标。在这里,计算机的任务是计算射击武器的发射角度。如发射的是导弹,发射后,导弹的飞行数据与目标的座标数据还要进行比较计算,以便再用控制雷达引导导弹去接近目标。这里,计算机实际上起解算装置的作用,是进行数值计算,即计算射击武器的发射角度。如果计算机只是计算射击角度,不承担别的计算任务,则采用小型专用机较为合理,也比较经济。

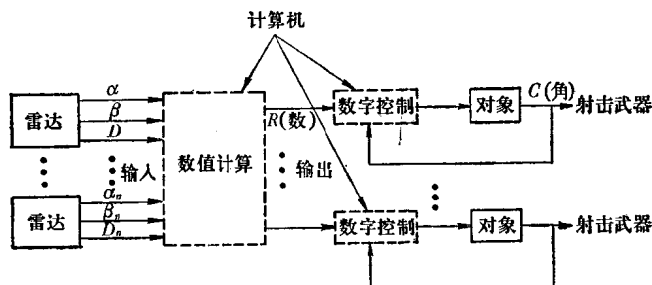


图 1.1 射击武器的控制系统

在现代化的控制系统中往往离不开计算机,但它只是组成系统的一个环节。例如在图 1.1 所示的射击武器的控制系

统中,就是由雷达、计算机、射击武器等共同组成一个小的防空体系。这里计算机只是根据雷达提供的情报,计算射击武器的发射角度 R (算得的结果以数字形式显示出来或送到输出寄存器里),它本身并不能把它计算的结果付诸实施,把大炮的发射角度 C 真正转到所需的位置上。要达到此目的,还必须通过随动系统才能实现。

从表面上看,随动系统只不过是一个数字-转角转换器。然而,实现数字-转角变换的难度较大,它与一般转换如数字-电压转换不同,不是变成容易获得的电量,而是变成有一定功率(转矩)输出的机械量。当用随动系统来完成这一变换任务时,不得不涉及到一些反馈理论。为充分利用计算机来提高随动系统的品质,采用数字随动系统是可取的。在随动系统中是把计算机当作数字校正环节使用,如图1.1虚框所示。仅从这点就可看出,计算机的应用已经超出数值计算的范围,进入自动控制的领域。可以毫不夸张地说,如果没有计算机,近代一些尖端技术的发展和现代化的控制系统,例如原子核物理的研究、导弹技术、人造卫星、宇宙飞船等等,将是难以想象的。事实是,生产和科学技术的发展促进了计算机的发展,反过来,计算机在这些领域中的应用又促进了生产和科学技术进一步发展。计算机并不是什么奇特的东西,更不是“会思维的机器”,它只是机械地执行人们的命令,或者按事先安排好的程序进行数值计算,或者按照人们事先经过深思熟虑而装入计算机的方案作逻辑判断和选择,在一大堆数据资料里清理出所需要的结果来。作为一种工具,计算机的突出优点是速度快,能在极短的时间里完成计算和逻辑判断的任务。“快”是进行实时控制的前提条件。因为“快”,故能及时发现和处理问题,在生产中及时调节被控制量,在战斗中则能不误战机,及时完成战斗任务。

关于计算机是如何完成解算任务的,即解算装置是怎样从带有噪音的雷达输入信息中提取信号(卡尔曼滤波是其中的一种方法),以及用什么样的解算方法进行外推,不是本书讨论的范围。本书是研究数字随动系统的,讨论如何将计算机算得的结果通过随动系统而付诸实现,以及如何利用计算机作为数字校正环节来提高随动系统的品质。

1.2 计算机控制系统的一些特点

计算机算题速度极快,小型题目的求解只需几十分之一秒或者更短。为充分利用计算机,常常“同时”给它很多算题。所以接在图 1.1 上计算机输入端接的雷达不是一部,而是一组,输出端带的随动系统不是一套,而是一组。这样便可同时监视和射击一批目标,而不只是其中的一个。

由于计算机的输入通道很多,需要计算的题目不只一个,因此只得逐个采样,依次计算,如图 1.2 所示。即每隔 T 秒按 0, 1, 2, 3 的次序合上输入采样开关依次将各部雷达的输入信息采样一次,计算一次。在 t_0 时合上第 0 号开关,采取 0 号雷达的信息 α 随即进行计算,并将结果 R 输出给随动系统;在 t_1 时合上 1 号采样开关,计算 1 号雷达信息 α_1 并输出结果 R_1 ;依此类推,直至 t_n 输出 R_n 为止。所有计算必须在一个采样周期 T 内结束。下一个采样信号到来时再重复上述过程。对计算机讲,每个采样周期采样和计算的数据是一组 $(R, R_1, \dots, R_n)$;对各个随动系统讲,得到的数据则是一个。但计算机工作时因采样和计算是周而复始地不断地进行着,所以随着时间的展开,每个随动系统都能周期地从计算机取得输入信号而各自行动。从外观看,一台计算机好象能同时控制很多随动系统,实际上各个随动系统的输入数据 $(R, R_1, \dots,$

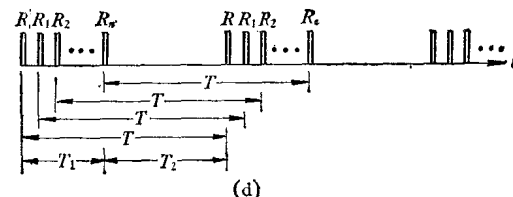
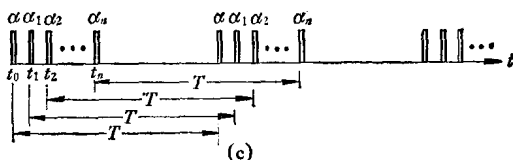
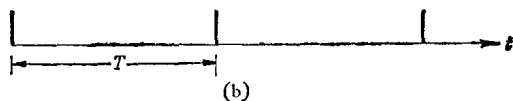
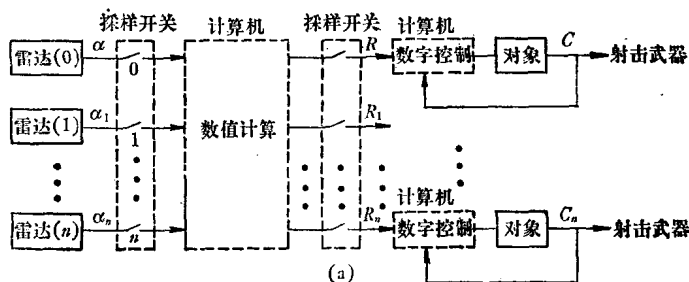


图 1.2 (a) 计算机输入输出的采样工作方式; (b) 采样信号; (c) 输入采样的时间分配; (d) 输出采样的时间分配

R_n) 在时间上是错开的, 并不重合如图 1.2 d 所示。

由上述可见, 计算机实现多路控制和多通道信息传输的关键, 在于采样工作、分时控制。因此, 采样是计算机控制系统工作的一个特点。由于计算机计算速度很高, 控制多个随动系统(计算 $R, R_1, R_2, \dots, R_n$) 所占时间仍可能不满一个采样周期, 即 $T_1 < T$, 所以在剩下的时间 T_2 里还可安排别的计算任

务。

多路控制能充分发挥计算机控制系统的威力。比如,有 n 个目标统统被雷达群捕获,每部雷达各自跟踪自己捕捉的目标.计算机采样输入各雷达送来的目标当时座标 $(\alpha, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, 并将计算结果 $(R, R_1, R_2, \dots, R_n)$ 送给相应的随动系统,这样便把全部目标置于火力的射击之下。

现以一部雷达为例,说明一下为什么雷达信息要通过计算机而不是直接传给随动系统。这句话的意思是 $R \neq \alpha$, 炮口指向与雷达天线的指向不重合,如图 1.3 所示。由图可见,雷达测得的 α 是目标的当时座标,如果把炮口对准目标的该位

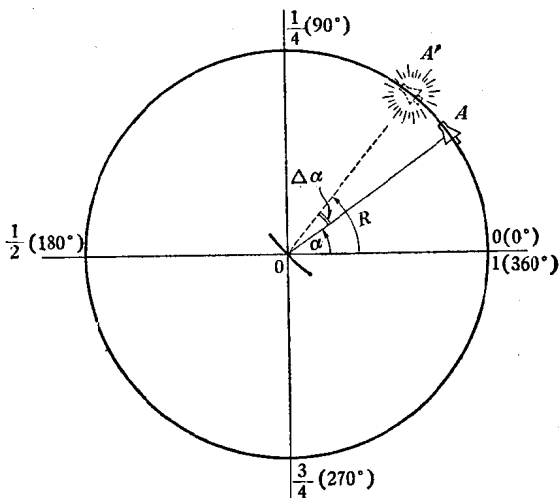


图 1.3 目标作等高度圆周飞行时方位角 α 与 R 的关系

置,显然不能命中,因为炮弹飞行需要时间,在这段时间里目标继续前进,由 A 点移到 A' 点,等炮弹到达 A 点时,目标早已离开了。所以要命中必须提前瞄准命中点 A' 。炮弹出发点 O 点与目标当时点 A 和命中点 A' 两条射线之间的夹角 $\Delta\alpha$ 叫

提前角。计算机计算的就是它。在这种情况下，提前角实际上有两个，除方位提前角外，还有高低提前角，即控制一门大炮需要方位与高低两套随动系统。我们这里讨论的只是其中的一路。

计算 $\Delta\alpha$ ，需要知道目标的航速、航向。因此，计算机须经对雷达若干次采样以后，积累了一定的资料，才能较准确地算出提前角 $\Delta\alpha$ 。所以，雷达刚捕捉到目标尚未判明目标航向、航速时，计算机还不能向随动系统提供数据，还要观察一段很短的时间才有数据输出。准确计算 $\Delta\alpha$ ，除需要判明目标情况外，还要知道自己的情况。知己知彼方能百战不殆。自己情况包括：飞弹（炮弹或导弹）初速度、风速、风向、空气密度等等。这些都要事前编成表装进计算机，有的则要临时装定。由于计算机的精度是很高的，所以 $\Delta\alpha$ 的计算精度主要不取决于计算机，而取决于向计算机提供情报的准确度，即取决于雷达精度。计算机的字长（二进制位数）只要比雷达精度高些就可以了。

随动系统的精度应与整个计算机控制系统相匹配，至少应作到与雷达精度相当或者更高些，使精度不要损失在随动系统上。数字随动系统要直接或间接带大炮的。如果它输出的角度 C 不能准确地复现数字量 R ，那么计算所得的 R 的精度再高也是没有意义的。随动系统的精度包括静态精度和动态精度。在对付高速目标的情况下，保证动态精度尤为重要。这个问题第六章要专门讨论。

现在来看看图 1.1 所示计算机控制系统的末级——随动系统的工作。在目标作圆周等速飞行的假设下，提前角 $\Delta\alpha$ 为一常量。象雷达天线那样，大炮跟着目标等速旋转，方位角 R 随时间线性增加。由图 1.4 不难看出， R 和 C 是穿过 0 点的一条直线。它随着飞行圈数的增加，大炮旋转的累计角度愈来愈大，第一圈完后为 360° ，第二圈 720° ，如此类推，一直伸向

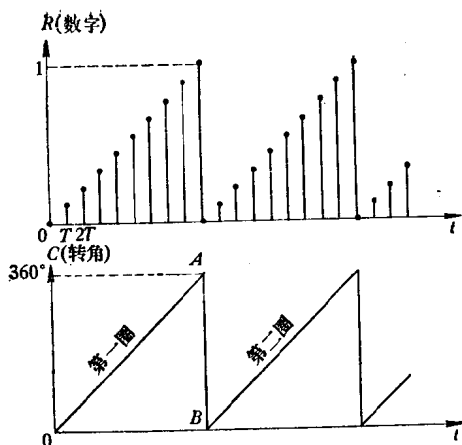


图 1.4 目标作图 1.3 所示等速圆周飞行时随动系统的输入 R 与输出 C 的变化规律

无限远。实际上,用 360° 表示一个圆周已足够了。 360° 实际就是 0° ; 361° 就是 1° 。图上 A 点和 B 点实际上是一个点,角度是连续的,没有跳跃。数字 R 的物理意义是人赋予的,其物理量的大小(比例尺)是人规定的。现约定, R 为 1 时代表一个圆周,即 $R=1$ 的意思是随动系统的输出轴应转到 360° 的位置上, $R=1/2$ 则转到 180° 的位置上,依此类推。因此,数字随动系统的任务是把抽象的、在时间上不连续的、用数字表示的量 R , 变成具体的、在时间上连续的、有一定功率输出的转角 C 。

1.3 数字随动系统的特殊问题

数字随动系统的随动作用,表现为输出转角 C 随输入数字 R 而动,如图 1.4 所示。既然模拟量(转角)随数字量而动,中间就肯定有数模转换。图 1.5 示出了 D/A (数 $\rightarrow$ 模)和

A/D (模 $\rightarrow$ 数)转换在系统中所处的位置。

数字随动系统,象普通连续随动系统一样,是闭合的反馈系统,只不过通过计算机闭合而已。输出 C 反馈到计算机与输入 R 相比较。数字计算机里进行的是抽象的数的运算,因而一切模拟量(包括转角)要先转换成数字,进行数字编码之后才能进入计算机。所以输出转角须通过位于反馈通道上的 A/D 转换器,转换成数字,再与 R 数字相减才得原始误差,即

$$E_1(nT) = R(nT) - C(nT). \quad (1.1)$$

所得原始误差 E_1 和经加工处理后的误差 E_2 , 都是数字量。这个 E_2 在送给连续部分 G_c 以前,又必须转换成模拟量(通常为电压或电流),用以控制连续部分的执行元件如电机或液压

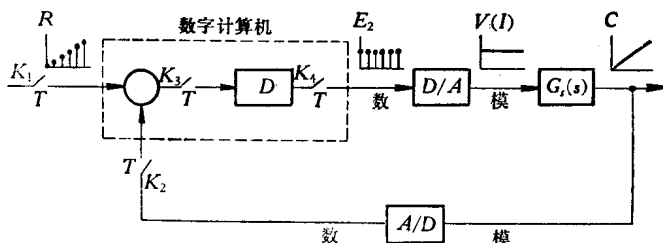


图 1.5 转换器在数字随动系统中的位置

马达。它经过执行元件的再一次转换,才把电量最后转变成机械输出量。所以从计算机出口处 E_2 开始,到系统的最后输出 C 之间,有两次转换:第一次是信息形式的转换,把数字量变成电量;第二次是能量形式的转换,由电能变成机械能。随动系统所以要作成闭环反馈系统,就是因为电机等功率元件是不精密的,故须用反馈把它包围起来,使其输出精度等于或接近于反馈通道上的测量元件(A/D 转换器)。

图 1.5 中 D/A 转换器和 A/D 转换器的具体电路和方

案分别在第三章和第四章里讨论。

1. A/D 转换与数字随动系统的精度

进行数模转换需要规定一个比例尺,以便确定最低位数字所代表的物理量。比如,用 15 位二进制寄存器表示一个圆周即 360° 的大小时,寄存器的各位所代表的角度如图 1.6 所

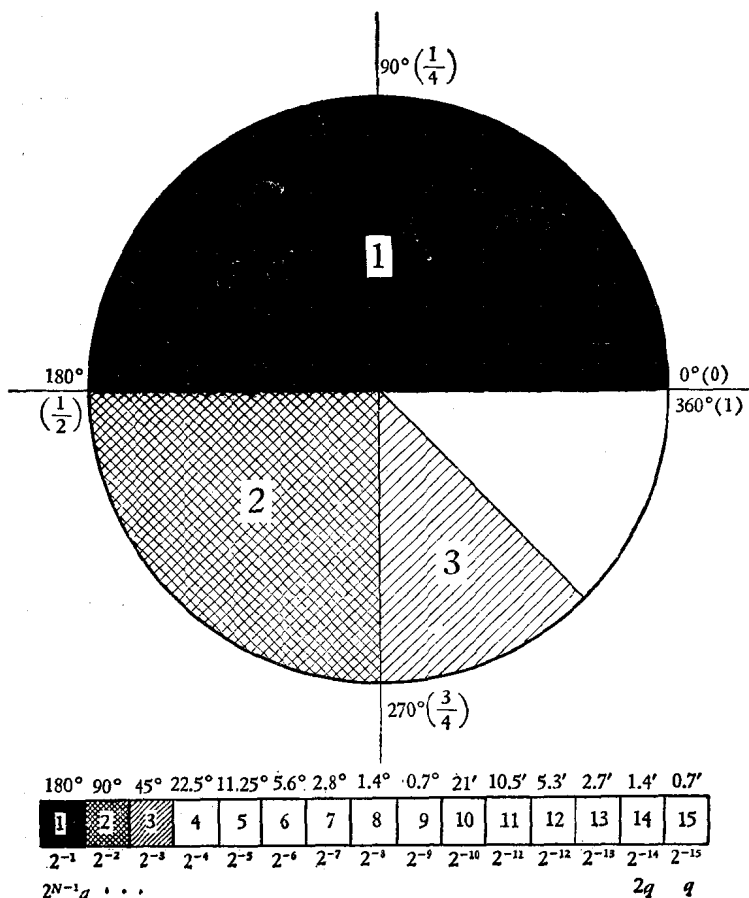


图 1.6 数字与角度的关系