

142

TM921
G37

自动化技术中的进给电气传动

基础·计算·设计

Von Hans Groß
(德) Jens Hamann 著
Georg Wiegärtner
熊其求 译
单立群 校



A0962880



机械工业出版社

Licensed edition of
Elektrische Vorschubantriebe in der Automatisierungstechnik
by Hans Groß, Jens Hamann, Georg Wiegärtner
1st Edition 2000

with the permission of
Publicis MCD Verlag, Erlangen, Germany

©2000 by Publicis MCD Werbeagentur GmbH, München

本书经德国 Publicis MCD 出版社授权，由机械工业出版社
正式出版，版权所有，翻印必究
图字：01 - 2001 - 0184 号

图书在版编目 (CIP) 数据

自动化技术中的进给电气传动：基础·计算·设计 (德)
格罗斯等著；熊其求译． - 北京：机械工业出版社，2002.2
ISBN 7-111-09780-7

I . 自… II . ①格… ②熊… III . 电力传动 IV . TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 000356 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑：孙流芳 版式设计：冉晓华 责任校对：张 佳
封面设计：姚毅 责任印制：付方敏
煤炭工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2002 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷
890mm×1240mm A5·11.625 印张· 340 千字
0001—4000 册
定价：25.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677 - 2527

译 者 序

自 Siemens 公司于 1981 年出版《机床用进给电气传动》一书以来的 20 年间, 传动技术领域经历了很多的变革和发展, 发生了根本性的变化。因此, Siemens 公司决定对该书进行一次全面的修订, 对扩大了的应用领域进行详细论述, 编撰出版了《自动化技术中的进给电气传动》这本专著。

本书概括地阐述了调节与传动技术的物理基础和技术基础知识, 这些是从事传动与调节技术工作的工程技术人员在实践中应知的基础理论知识, 并特别注重自动化技术中进给电气传动的计算与设计。在阐述中, 深入浅出, 物理概念清晰, 数学处理简明, 侧重于实际应用。

本书的第 1 章叙述了调节技术中的术语与概念、传递特性及其时间域描述和复变量域描述、根轨迹法、各种传递环节的连接以及各种描述方法的对比等基础知识。第 2 章介绍了进给传动用的调节回路, 包括术语和概念、调节器的结构型式、最优化规则、调节器的动态传递特性及其时间域与复变量域描述, 并以速度调节回路为例进行了建模。第 3 章阐述了进给传动中的位置调节, 内容涉及术语概念及基础、线性位置调节回路的动态传递特性、位置调节时的圆形轮廓误差、预先控制、基准量的影响、以及振动机构位置调节的极限等。第 4 章介绍了进给传动系统的稳态设计与计算, 包括各种计算方法、稳态设计及动态设计的要求和步骤、运动曲线图表等。第 5 章是技术附录, 列出了公式符号、SI 单位、换算表等内容。

限于译者的翻译水平与技术水平, 译文难免有错误之处, 恳请读者批评指正。天津电气传动设计研究所单立群同志对译文进行了校审, 在此致谢。

译者

前 言

在过去 20 年间,传动技术领域经历了很多的变革和发展,发生了根本性的变化。因此,需要对 1981 年出版的《机床用进给电气传动》一书进行一次全面修订,而且在当前这个版本中要对扩大的应用领域进行详细论述。

由于所有生产过程中的人工成本和制造成本总是在不断增加,从而使自动化技术得到了广泛的普及和推广。原来在金属加工工业中起推动作用的传动技术与控制技术的发展,已经在木材加工、玻璃与陶瓷工业、包装机械、机器人和操作装置领域,以及在加工机械设备的很多其他自动化任务中得到了应用。除了机床的进给传动之外,即使在其中还部分地要求其他的性能,约 40 年来一直对金属加工产生影响的位置调节进给电气传动仍然是定位传动和加速传动的基础。这种广阔的传动技术领域统称为运动控制 (MotionControl)。为此,在本书中概述了对设计和计算有着实际意义的调节技术基础。

Siemens 公司从这项技术发展一开始,就是机械制造业的合作伙伴,并以众多的发明创造和产品,为提供适合要求的低成本传动设备做出了贡献。从事这些工作的合作者有高等院校及研究所,其中特别需要提到的是斯图加特大学的机床与加工设备控制技术研究所以。

在向高速加工领域推进和向直线电动机应用过渡时,本书所阐述的这些基础也是有效的。在这种情况下,与其他的传动系统相比,进给电气传动在很多应用场合都表现出其优越的性能。而且,它还具有进一步发展和适应不断提高的关于动态性能与成本费用要求,以及与生产率和经济性特征值匹配的潜能。

本书特别重视联系实际。对理论基础,只是按照所采用的方法而必需理解的程度进行阐述,而且始终是针对具体的实例进行编排。其目的是:向工程技术人员介绍基础知识,使他们在从事设计和零部件选择等工作中取得最佳效果。利用本书可以促进对不同专业的相互了

解，因为一种优良的进给传动系统是调节技术人员、电工技术人员和机械制造人员的一项共同任务。将其专业深造的重点放在机械制造用传动技术领域的学生，也可以对源自不同基础知识范畴的要求有一个总的了解。

在此，作者对很多同事表示感谢，感谢他们以其知识和经验对本书所做出的贡献。因而保证了对实际意义重大的重点进行阐述，并为读者提供了一个举足轻重的自动化传动技术设备供应商的了解。我们相信：在未来的 Siemens 公司的开发过程中，本书所阐述的基础会对创造新产品做出自己的贡献，从而能够在机械制造业中始终保持其领先地位。

AubertMartin
A & DMC 事业部
总裁

Siemens 公司
自动化与传动技术部
运动控制系统分部

2000 年 7 月，于德国 Erlangen

目 录

译者序

前言

绪论 1

第 1 章 调节技术基础 2

1.1 术语与概念 2

1.1.1 控制与调节 2

1.1.2 调节回路信号 3

1.1.3 采样 6

1.1.4 线性化 9

1.1.5 定标 9

1.1.6 相对值 10

1.2 传递特性 11

1.2.1 静态传递特性 11

1.2.2 动态传递特性 11

1.2.3 基本传递环节 12

1.3 时间域描述 24

1.3.1 微分方程 24

1.3.2 阶跃响应特性 32

1.4 复变量域描述 37

1.4.1 频率响应特性 37

1.4.2 伯德图 40

1.4.3 $P-T_1$ 特性和 $P-T_2$ 特性 42

1.4.4 频率响应特性测量 51

1.5 根轨迹 51

1.5.1 表示法 51

1.5.2 极点	52
1.5.3 零点	53
1.5.4 P-T ₂ 环节的根轨迹	54
1.5.5 单质量振动器和双质量振动器的根轨迹	56
1.6 各种传递环节的连接	66
1.7 描述方法的对比	70
1.8 附录	71
1.8.1 调节技术基础	71
1.8.2 电气振动器与机械振动器之间的相似性	79
第2章 进给传动用调节回路	81
2.1 术语与概念	81
2.1.1 工作原理框图	81
2.1.2 过渡函数	83
2.1.3 精度	84
2.1.4 频率响应特性	85
2.1.5 稳定性特征值	86
2.2 调节器的结构型式	88
2.2.1 进给传动用调节器	88
2.2.2 模拟 PI 调节器	90
2.2.3 数字 PI 调节器	92
2.2.4 采样调节器	94
2.2.5 参考模型 PI 调节器	100
2.3 最优化规则	102
2.3.1 复比法	102
2.3.2 对称最优法、绝对值最优法	103
2.4 动态传递特性	105
2.4.1 参考模型 PI 调节器的基准频率响应特性	105
2.4.2 常规 PI 调节器的基准频率响应特性	105
2.4.3 PI 调节器的干扰频率响应特性	106
2.4.4 调节器参数的确定	106
2.4.5 二阶和三阶标准频率响应特性	107
2.4.6 小结	110
2.5 时间域中的基准响应特性和干扰响应特性	111
2.5.1 基准响应特性	111

2.5.2 干扰响应特性	113
2.6 复变量域中的基准响应特性和干扰响应特性	115
2.6.1 基准响应特性	115
2.6.2 干扰响应特性	117
2.7 以转速调节回路为例建模	118
第3章 进给传动中的位置调节	131
3.1 术语概念、基础	131
3.1.1 结构与工作方式	131
3.1.2 位置测量	133
3.1.3 位置调节回路的特征量和性能	136
3.1.4 线性位置调节回路的建模	138
3.2 线性位置调节回路的动态传递特性	144
3.2.1 采用间接测量系统时线性位置调节回路的基准响应特性	144
3.2.2 采用直接测量系统时线性位置调节回路的基准响应特性	150
3.2.3 线性位置调节回路的干扰响应特性	156
3.3 圆形轮廓误差	168
3.3.1 原因和影响量	168
3.3.2 采用间接测量系统时, 由基准响应特性引起的偏差	169
3.3.3 采用直接测量系统时由基准响应特性引起的偏差	179
3.3.4 两个进给轴共同作用时圆形轮廓的畸变	180
3.3.5 对圆形轮廓偏差和畸变的小结	184
3.4 预先控制	192
3.5 基准量的影响作用	195
3.6 振动机构时位置调节的极限	198
3.6.1 固有频率	198
3.6.2 机构的频率响应特性	200
3.6.3 进给轴的调节技术描述	202
3.6.4 干扰最优法和阻尼最优法	205
3.6.5 采样周期的影响	217
3.7 对确定 K_V 系数的小结	219
第4章 稳态设计与计算	224
4.1 计算方法	224
4.2 稳态设计	225
4.2.1 要求	225

4.2.2 采用丝杠的进给传动	226
4.2.3 采用齿条/小齿轮的进给传动	234
4.2.4 直线电动机传动	238
4.3 动态设计的步骤	241
4.3.1 要求	241
4.3.2 概略设计	241
4.3.3 对速度和加速度的要求	242
4.3.4 实例	246
4.4 运动曲线图	254
4.4.1 冲击限制	254
4.4.2 位移行程的运动	261
4.4.3 定位时间的估算	278
4.4.4 运动质量的动能	281
4.4.5 可达到的加速度	282
4.4.6 周期性的负载循环	286
4.5 小结	293
4.5.1 进给传动系统设计的流程图	293
第5章 技术附录	302
5.1 公式符号	302
5.2 国际单位制 (SI) 单位	319
5.3 换算表	321
5.4 方程	326
5.5 电动机和变流器装置的技术数据	327
参考文献	328
术语索引	331

绪 论

为了对自动化技术中进给电气传动的特性进行评价，必须有一些调节技术的基础知识。在第1章中，对这些基础知识进行综述，它们是所选择的调节技术方法，所采用的表示方式使缺乏相应专业知识的读者也能理解和领会利用这些方法所制订出的准则。相应的文献提示可以帮助加深对知识的理解。

其余各章说明上述基础知识在转速调节回路和位置调节回路中的应用。通过大量的实践例子，对这些应用场合进行阐述和解说。介绍一些在调节装置和数控系统中应用的专业方法。研究的基础是频率响应特性（Frequenzgang），可利用伯德图（Bode – Diagramm）的形式对即使是复杂结构的特性进行符合实际的表述。伯德图可以采用测量技术建立，而且作为仿真计算的结果也是有准确判断依据的资料。通过在时间域和复变量域中进行这样的仿真，已经可以在机械的设计阶段进行一次特性评价，并可以指出其薄弱环节。这时，进给传动被描述为双质量振动器耦合连接的系统，不再便于进行全部的计算。在这种情况下，因为不能用计算的方法来确定特别准确的阻尼值，所以可以引入经验值。

最后，为在不同机械结构时进行进给电动机静态设计给出了计算过程和相应的公式。在这种场合，即使计算机仿真能够减轻研究人员的工作，工程技术人员保持对这些关系的感受力，对于理解来说，也仍然是起决定性作用的。在这一部分中，您可以找到进给传动中把机械学和电工学密切联系起来的重要公式。

在计划编写的另一本书中，会按技术现状和水平论述进给传动的各种零部件。电动机、变流器和机械传递环节以其特性决定着进给传动的功率输出容量。此外，还将考虑到从很多应用场合中得到的测量结果。

第 1 章 调节技术基础

1.1 术语与概念

1.1.1 控制与调节

机械用数控系统和传动系统，是借助于信息而作用于能量流和/或材料流的。在这种情况下，一个系统就是对按照自动化任务彼此相关的设备所进行的一种适当配置。信息就包含在一个信号的物理量的数值或数值变化过程中。这些物理量被称之为**信息参数**。因此，例如一个交流电压就是一个信号，其电压、频率和相位这些物理量就是根据系统中的规定进行分析处理判读的信息参数。对于这些量，始终应当规定为由数值和单位构成的整体。

控制是在一个系统中，有一个或多个**输入量**对一个或多个**输出量**产生影响的过程。其特征是开环作用路径，即**控制链路**。

调节是在一个系统中，对**被调量 x** 连续不断地进行检测，与**基准量 w** 进行比较，并从与基准量平衡补偿的意义上对该被调量产生影响的过程。其特征是闭环作用路径，即**调节回路**。在其运行过程中，为了形成**调节差 e** ，必须实现反向作用。被调量 x 连续不断地影响着自身。

图 1.1 示出了控制与调节的工作原理框图。其中给出了最重要的术语概念^{[1.1]、[1.2]}。

注：就调节技术的公式符号而言，在下面将统一使用在德语区普遍采用的 DIN19221（1993 年 5 月版）中的常用符号。用**黑体**书写的术语概念是在 DIN19226（1994 年 2 月版）中规定，并在 1.8 节中加以解释的术语概念。

一个系统的函数关系可以借助于物理量的作用线和表示其作用方向的箭头规定出来。作用线、相加点和支路与矩形功能框一起，就得

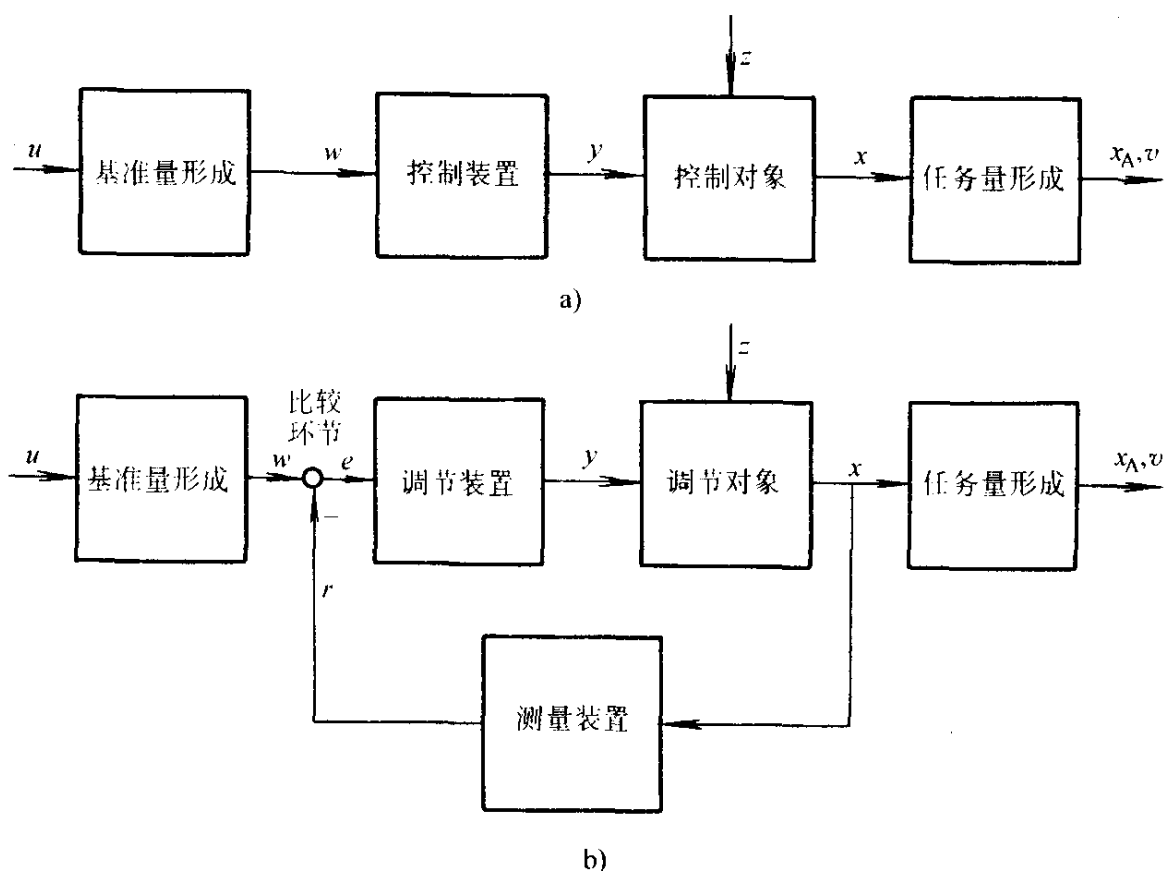


图 1.1 控制回路（图 a）与调节回路（图 b）的工作原理框图

u —输入量 v —输出量 w —基准量 y —执行量 z —干扰量

x —被调量 x_A —任务量 r —反馈量 e —调节差 ($e = w - r$)

出一个系统的工作原理框图。在功能框内规定出输出量 v 与输入量 u 的关系，这种关系就是相应传递环节的传递特性。在这种情况下，人们将其区分为静态特性和动态特性。例如，静态特性可以通过特性曲线描述出来，它可以表述出所有瞬变过程全都结束之后处于静止状态中的特性。而动态特性则表述出一个环节的时间响应特性，而且主要是对瞬变过程起决定性作用。例如，它可以通过过渡函数或微分方程规定出来。

1.1.2 调节回路信号

控制或调节所使用的信号，可以是时间连续的，也可以是时间不连续的。此外，信号还可以具有一个连续的或者离散的信息参数取值范围。可以将其区分为模拟信号、数字信号和二进制信号。

模拟信号具有一个连续的取值范围，而且可以是时间连续或不连

续的。数值的变化过程也可以是连续或不连续的。图 1.2 示出了模拟信号的各种不同实例。一个起模拟作用的传递环节或系统的特征是：通过一个模拟输出信号来再现一个模拟输入信号。在这种情况下，在两个信号之间必须不存在线性关系。模拟信号发生器的实例有：电位器、自动同步机（旋转变压器）或测速发电机。例如，晶体管或运算放大器电路就是模拟传递环节。

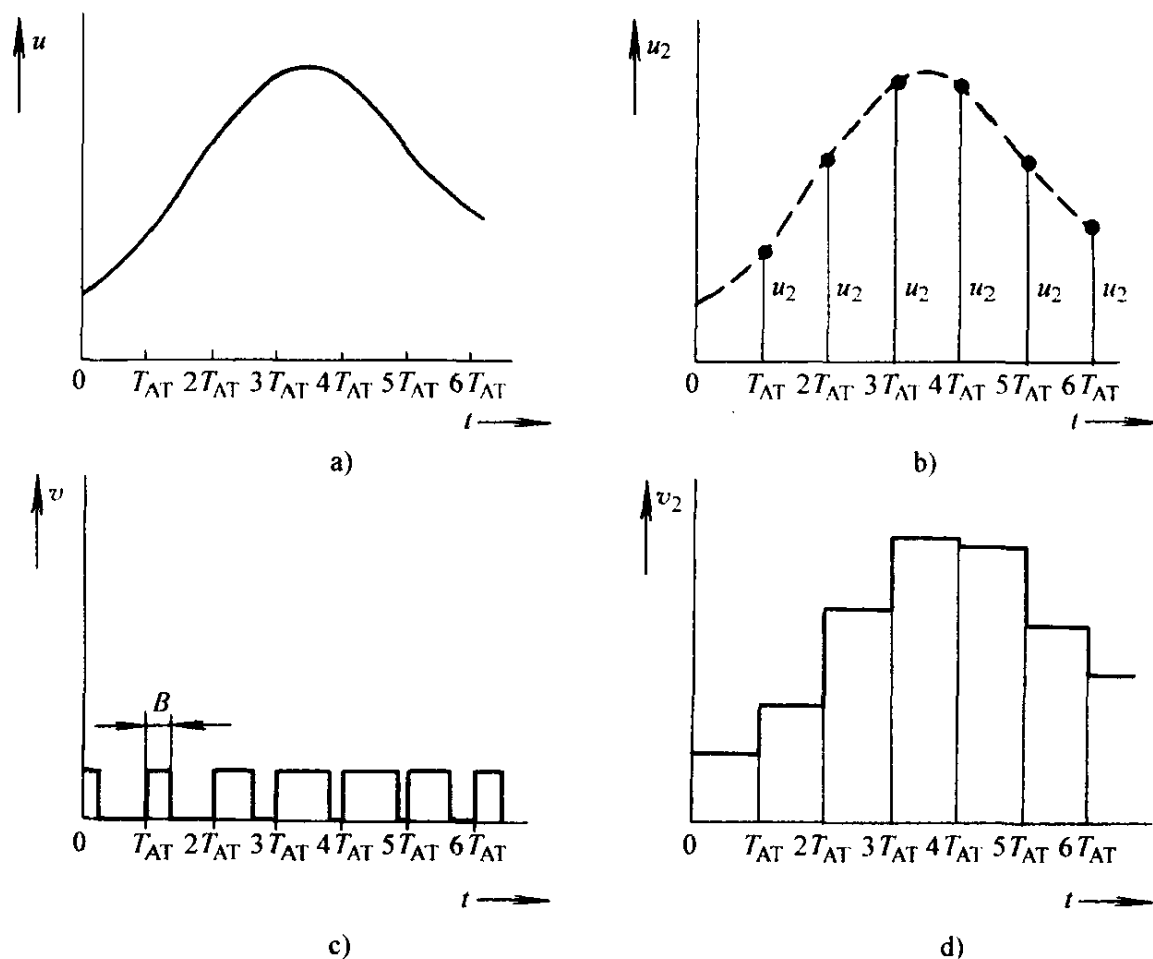


图 1.2 模拟信号的实例

- a) 变化连续和时间连续的模拟信号 u (信息参数: $u(t)$ 的值)
- b) 通过周期性采样获得的时间不连续、变化不连续模拟信号 u_2
(信息参数: $u_2(kT_{AT})$ 的值)
- c) 通过周期性采样并转换成一种脉冲宽度调制信号所获得的时间不连续、变化不连续模拟信号 v ($0 \leq B \leq T_{AT}$) (信息参数: B/T_{AT} 的值,
 T_{AT} 为前面所述的采样周期)
- d) 通过图 b 中的 u_2 的保持环节所获得的时间连续、变化不连续模拟信号 v_2 。(信息参数: $v_2(t)$ 的值)

在图 1.2b 中，只是在规定时刻对模拟量值进行读取。如图所示的采用采样周期 T_{AT} 的周期性采样是一种在数字工作系统中经常使用的方法（见 1.1.3 节中对图 1.2d 的解释）。但是，一个模拟信号也可以用脉冲宽度来表示。图 1.2c 示出了将时间离散读取信号 u_2 转换成的这样一种脉冲信号。

数字信号具有有限数量的离散取值范围，这些信号可以是时间连续的或不连续的。其数值变化过程始终是不连续的。例如，如果将一个模拟量电压转换成一个数字信号，则将信息参数（例如电压 u ）细分成若干个有限的取值范围 k ，并给每一个这样的取值范围指定一个确定的信息。例如，在图 1.3a 中，已经将变量 u 细分成了 $k = 0 \cdots 5$ 这 6 个取值范围。在这种场合， k 的数值就对应于一个电压高度。因此，在本实例中，只能是离散的电压值（如：0V，1V，2V，3V，4V，5V）被描述为数字信号。相对应的数字信息只有在信息参数 u 超出取值范围极限时才发生变化，也就是说，例如在 $k = 1$ 这个取值范围内，电压 u 可以在 0.5 ~ 1.5V 之间变化，但数字信号并不发生变化。

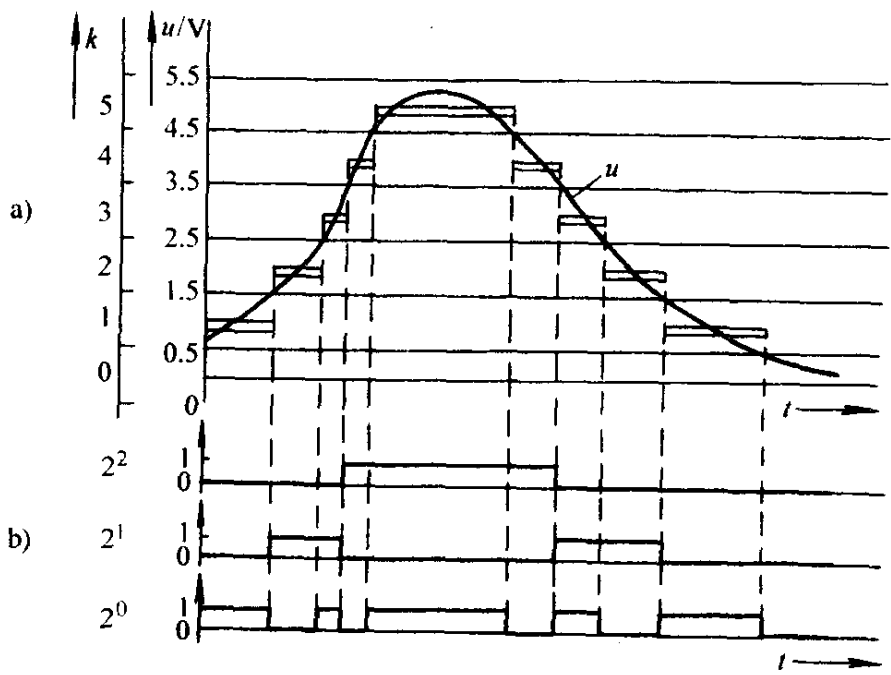


图 1.3 一个模拟信号 u (——) 以及由其形成的数字信号 (——)

随取值范围 k 的变化过程曲线。信息参数: $k(t)$ 的值

- a) 用离散的取值范围 k 来描述数字信号
- b) 用 3 位信号宽度来描述成二进制数字

只有在超出取值范围极限时数字信号的信息内容才发生变化。这种模拟-数字数换也被称之为模拟量的量化（数字转换）。

所以，数字信号可以是数字。因此，这些数字适用于在内部只用二进制状态 0 和 1 工作的数字系统中进行处理。在这种场合，通常是使用二进制数和十六进制数。图 1.3a 中所示的数字信号，在图 1.3b 中已表示为一系列二进制数字，以便应用于数字系统中。在这种情况下，原始信号 u 的每一个取值范围 k 都对应于一个二进制数。

并行迹线或路径的数量（位的数量），取决于原始模拟信号所需的分辨率。例如，用 8 位可以描述 256 个单值，其分辨率是 $1/256$ ，也就是约为 0.4%。在数字系统情况下，分辨率的限制会导致调节品质受到限制。根据输入信号的方式，通常采用一个 8、16 或 32 位的信号宽度。

可以采用并行或串行的方式来进行二进制数的传输和处理（见图 1.5 和 1.1.3 节）。在进行并行处理时，信号的每部分值都要求独立的路径，但其优点是：在每个瞬间时刻，信号的完整信息都存在。因此，并行数字信号是时间连续的。而在进行串行处理时，一个传输路径就足够所有部分值之用，但其缺点是：只有在传输周期结束之后信息才是完整的。因此，根据信号宽度（或者分辨率）以及传输速率情况，或多或少地需要时间。所以，串行数字信号是时间不连续的。

二进制信号也属于数字信号，它是一种使用 0 和 1 这两个取值范围作为信息参数的信号。在开关系统中使用二进制信号。

1.1.3 采样

数字信号处理、控制和调节系统是采用单个定时脉冲工作的。如果这些定时脉冲是等间隔的，则这些系统就同样也可以理解为是一种数学研究的连续工作系统^[1.3]。这些所谓的采样系统的特征是至少有一个采样-保持过程。图 1.4 示出了在模拟及数字信号分析处理判读时进行采样的原理。在图 1.2b 中已经示出了一个模拟输入量的采样。为了确定各个采样瞬间时刻之间的时间离散采样信号 u_2 ，在采样器的后面连接有一个存储环节。这个存储环节在采样周期内给输出端赋予在该采样周期开始时所采样变量的值，以便形成如图 1.2d 所示的

采样信号 v_2 。图 1.4a 示出了一个模拟输入信号时所使用的采样器和存储器。

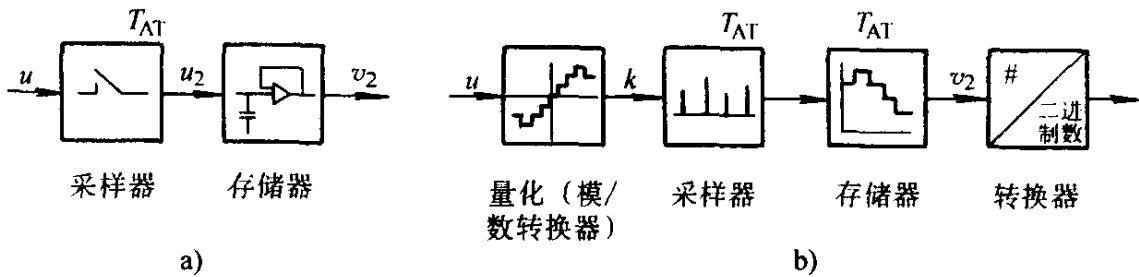


图 1.4 利用采样器和存储器采样的原理

a) 模拟输入信号的采样 b) 带有采样功能的模/数转换

图 1.4b 示出了对一个数字信号进行处理时所使用的采样器和存储器。例如，如果在 T_{AT} 、 $2T_{AT}$ 、 $3T_{AT}$ 、 $4T_{AT}$ ……各时刻，对图 1.3a 中所包含的数字信号进行采样，我们就得到了数字信号 v_2 。在图 1.5a 中，示出了这一信号转换。利用后面连接的一个转换器将所获得的信号 v_2 转换成一个二进制数（见图 1.5b）。如果对这一串二进制位与图 1.3b 中所示的进行比较，就可以清楚地看到：即使两种信号都是源出于相同的模拟信号，采样信号所包含的信息也要比数字信号所包含的信息少。采样周期的大小会对所出现的畸变产生影响。

如果不进行并行信号描述，而是进行串行信号描述或处理，则从图 1.5c 中，便可清楚地看到：要完整地传输一个二进制数就需要一定的时间。这一传输周期 $n\Delta t$ 最好是已作为整数倍数包含在采样周期 T_{AT} 中（ n 是并行信号路径的数量，也就是等于二进制数的位数。在本实例中，选择了传输周期等于采样周期）。

在图 1.5a 中，用虚线标明的曲线再现出了一个与采样信号等效的连续平均值信号。在进行信号分析处理判读时，只提供这种信息。如果对其与原始模拟信号 u 的信息内容（细实线）进行比较，就会清楚地看到一个时间移位和一个幅值偏差：

▷ 采样-保持环节引起一个平均为 $1/2$ 采样时间的延时和一个平均为 $1/2$ 分辨率的幅值偏差 $\Delta v^{[1.4]}$ 。

如果在数字控制和调节时使用采样系统，那就必须考虑到所产生的幅值偏差和延时。为了得到可与模拟调节相比拟的结果，采样周期