

取样技术 原理与应用

刘文生 李锦林



科学出版

73.412

855

取 样 技 术

原 理 与 应 用

刘文生 李锦林

科 学 出 版 社

1981

1108999

内 容 简 介

本书紧密结合取样技术的发展和应⤿用，比较系统地介绍了取样技术的原理、理论以及工程设计等方面的内容。全书共分四章。第一章介绍取样技术原理；第二章和第三章介绍取样显示原理和取样示波器的电路、特殊器件、使用方法以及调试与维修；第四章介绍取样技术的其他应用。

本书可作为从事电子测量、激光测量、无线电通信、毫微秒与亚毫微秒脉冲技术、微波等方面工作的研究人员，工程技术人员及大专院校有关专业的教师和学生的参考书。

取 样 技 术

原理与应用

刘文生 李锦林

责任编辑 魏玲 李立

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

*

1981年12月第一版 开本：787×1092 1/16
1981年12月第一次印刷 印张：24 插页：1
印数：0001—4,600 字数：547,000

统一书号：15031·370

本社书号：2361·15—7

定价：3.75元

前 言

取样技术是在信息论与脉冲技术的基础上发展起来的一门新技术。取样技术在近代科学技术的许多领域中,例如电子测量、无线电通信、微波、毫微秒与亚毫微秒脉冲技术、激光、遥测遥感、物理学与生物信息研究等方面都获得了不同程度的应用。

早在 1880 年,取样技术的原理在机械旋转体的研究方面曾经进行过尝试性的应用。四十年代末,取样原理曾在时分制通信方面获得应用。

1949 年香农 (E. C. Shannon) 首先发现了时域取样定理,这个属于低通型取样定理揭露了取样过程所遵循的最基本的规律。这个定理为后来的一系列取样理论,诸如带通型取样定理、频域取样定理、取样误差、随机变量以及多元变量的取样理论奠定了理论基础。

五十年代至六十年代间,作为取样技术典型应用的一种高速电子测量仪器——取样示波器首先在工程上获得了很快的发展。取样示波器所以能在六十年代里得到迅速发展,是因为:

(1) 利用取样原理制成的取样示波器具有扩展频带宽度的宝贵性质,从而能满足六十年代对半导体器件开关速度以及随之而提高的高速电路与设备的测量要求。

(2) 另一方面,六十年代半导体器件的高速发展也为取样示波器的研制提供了可靠的高速脉冲发生以及高速开关器件。例如雪崩三极管、隧道二极管、阶跃恢复二极管以及肖特基开关二极管等。

取样显示技术的发展和应用,表明了取样技术在电子测量技术方面取得的进展。取样技术更广泛的发展还表现在信息处理、微波、激光、生物等方面的应用。

目前,值得我们注目的是激光技术的发展对取样技术的影响。近年来,激光技术的发展迹象表明:光脉冲的响应可以达到零点几微微秒以下。这种高速脉冲响应要比现有的、最快的电子器件——隧道二极管的响应快两个数量级。而且,光脉冲的响应速度还有可能更高。这样高速的脉冲响应,既是当前取样技术将要克服的测量对象,也是进一步发展取样技术的潜在推动力。

当前的电子器件中最快的脉冲响应——隧道二极管的脉冲响应停留在 20ps,而阶跃恢复二极管也停留在 20ps,这种停滞很可能来自这些器件的机理。因此,取样技术的进一步发展需要我们跳出现有器件的概念,光取样的出现便是在这方面极其令人瞩目的发展倾向。

目前用二硫化碳克尔盒做光取样门,其开门时间可达 3.6 ps,取样脉冲可用到 2ps,其极化弛豫时间可达 1.8 ps。另一方面,在光学系统中,也有相应于电路中的延迟线、传输线、衰减器等元件,用于基本构成所谓光网络。这给取样技术在光学系统中的应用提供了方便的条件。无论是变换取样或者是实时取样的光取样装置都已经得到不同程度的实现。

光学变换取样的例子是,红外傅里叶光谱仪利用氦氖激光器的 0.633 μm 波长光束,对红外光谱 2.5—25 μm 波长进行光取样,使红外光谱分析在提高灵敏度和分辨力以及精

度方面做出了先例。

在光实时取样方面的例子是, 取样周期为 8 ns 、取样间隔为 30 ps 的单次取样锁模激光脉冲测量试验装置已经试制成功。如果光取样与电子存贮电路相结合, 将光取样的结果进行存贮和显示, 即可构成实用的光取样系统。利用多次取样积累的性质, 可以从噪声的汪洋大海中取得有用信号, 在诸如核磁共振、生物信息等研究方面, 取样技术也将显示出它的奇妙作用。

和其他技术一样, 取样技术与电子计算机或微处理机的结合开辟了更为崭新的技术领域, 如自动网络分析技术。这种技术包含时域反射技术 (TDR) 与快速傅里叶变换 (FFT), 并采用电子计算机或微处理机实现时域参数的综合与高精度分析。

在通信技术中, 采用锁相原理与取样原理可大大地改善频率合成的系统特性。

可以预料, 在实现我国四个现代化的进程中, 取样技术将会起到应有的作用。

本书的第一章为取样技术原理, 在本章中将介绍取样的基本概念, 频闪效应, 步变、步进与步退的概念, 取样的分类, 主要的取样定理, 取样系统特性等。

由于取样示波器是取样技术中比较重要的仪器, 因此在第二章和第三章中主要阐述取样显示原理和取样示波器的电路、特殊器件、使用方法以及测试与维修。

第四章介绍取样技术的其他新应用。包括取样时域反射计, 取样相位计, 取样电压表, 取样平均器, 取样分频器, 取样数字系统, 光电取样技术, 取样技术在频率合成方面的应用, 取样频域自动网络分析仪与取样时域自动网络分析仪。在本章最后还介绍了光取样系统。

作者根据实际工作中的经验, 以及作者近几年来所发表的一些论文, 并参考国内外有关文献写成这本书。

在编写本书的过程中, 我们得到了许多帮助。学部委员陈芳允曾对本书的编写提纲和内容提出了意见。王联正、鲍绍宣、赵恩荣以及张新民同志审阅手稿并提出了修改意见, 哈尔滨工业大学无线电工程系章锦副教授用计算机校验了本书中的超越方程逼近解, 测量专业的孙圣和与林治安同志从教学角度提出宝贵修改意见, 张植田、杨城、陈志超、文斌、会志同志担任稿件的整理工作, 王可琴同志担任制图工作, 在此一并表示感谢!

由于作者水平有限, 谬误难免, 欢迎广大读者指正。

刘文生 李锦林

主 要 符 号 表

A	脉冲信号幅值
A_a	触发鉴别电平
$\mathcal{A}$	信噪比增益
C_j	二极管结电容
D	取样系统频率特性
D	同轴线外导体直径
d	同轴线内导体外径
	取样闭环系统反馈衰减系数
$d(-\tau)$	p 变换延迟因子
E_p	取样门偏压
$F(s)$	信号的拉氏变换
$F^*(s)$	理想取样后的散离信号的拉氏变换
$\hat{F}$	傅里叶系数
$F_p(s)$	信号 $f(t)$ 的 p 变换
$f(nT)$	取样后的离散函数
$f^*(t)$	离散函数
$f(t)$	时间信号函数
f	周频率 (Hz)
f_m	最高频率
f_i	截止频率
$\overline{f(t)}$	信号平均值
Δf	频差
g_n	第 n 个样品通过滤波器后的响应
H	取样示波器屏幕上垂直信号高度
$H(j\omega)$	网络传递函数
$h_0(i)$	开环取样系统过渡过程
$h(nT)$	闭环取样系统过渡过程
I	取样二极管伏安特性函数
I_0	二极管 PN 结起始漏电流
K_A	闭环内交流放大器放大系数
K_D	闭环内直流放大器放大系数
k	取样门取样效率
	玻耳兹曼常数和其他常数
L	取样示波器屏幕上信号在水平轴上所占长度

l	扫描线有效长度 (cm)
l'	显示器件灵敏度 (cm/V)
M	雪崩晶体三极管倍增系数(莫尔系数)
m	取样点数
N	噪声电平
N_f	分频系数
n	取样密度
	取样点数
p	p 变换符号
p^{-1}	p 反变换符号
Q	电荷
q	取样频谱压缩系数
R_s	信号源内阻
R_q	取样脉冲发生器内阻
Res	留数符号
r_f	二极管正向电阻
r_e	二极管反向电阻
S	脉冲信号面积
$\bar{S}$	脉冲信号重叠面积
S_r	取样示波器垂直通道灵敏度 (mV/cm)
s	拉氏变换变量
T	信号周期
T_q	取样周期
$\bar{t}$	取样视在时间或等效时间
t_A	雪崩时间
t_a	前置时间
t_d	延迟时间
t_f	下降时间
t_g	固有延迟时间
$\bar{t}_0$	坡形失真起始时间
t_r	上升时间
$\bar{t}_r$	取样系统上升时间
t_{rr}	阶跃时间
t_s	存贮时间
t_{sd}	手动延迟时间
u_d	二极管作用电压
	慢斜坡或阶梯波电压幅度
u_k	取样门输出电压
u_{kp}	旁通信号

v	实时扫速
	电磁波速度
$\bar{v}$	等效扫速
v_z	自记录扫速
v_T	他记录扫速
ν	闭环正向放大系数
W	频谱宽度
$W_1^*(z)$	闭环正向 z 变换传递函数
$W_2^*(z)$	闭环环路 z 变换传递函数
X	随机时间样品
Y	随机样品
z	z 变换自变量
$\tilde{z}$	z 变换因子 z 的复数模
Z_i	输入电抗
	特征方程的根
Z_o	传输线波阻抗
z	z 变换符号
z^{-1}	z 反变换符号
α	晶体三极管共基极电流放大倍数
	取样间隔系数
α^*	雪崩状态共基极电流放大倍数
β^*	雪崩状态共射极电流放大倍数
ξ	常数, 斜率
ξ_0	闭环反馈系数的倒数
ξ_s	快斜坡斜率
ξ_d	慢斜坡斜率
ξ_i	记录斜坡斜率
ξ_k	闸门脉冲前沿斜率
φ	相位角
φ_n	取样系统角频带宽系数
δ	脉冲的上冲值
δ_j	晃动值
$\delta(t)$	狄拉克脉冲函数
ω_0	基准角频率
ω_n	第 n 次谐波角频率
$\Delta(t)$	取样脉冲函数
$\Delta(j\omega)$	取样脉冲频谱
$\Delta(0)$	取样脉冲零频频谱
$ \bar{\Delta} $	取样脉冲归一化绝对值

$\Delta t_{(n+1)n}$	步变
Δt_n	不等值步进
Δt	步进
Δt_n^-	步退
Δ_n	第 n 个样品
Δ_m	取样脉冲的 m 次谐波
τ	取样脉冲有效底宽
ε	误差
	取样起始位移
ε'	介电常数
$\varepsilon(n), \varepsilon_n(n), \varepsilon_m(n)$	闭环误差
ε_W	位置线性误差
ε_r	灵敏度误差
ε_v	等效扫速误差
ε_{re}	等效扫速线性误差
θ	时频系数
μ	半导体材料迁移率
	介质磁导率
η	取样系统传输效率
ν	取样系统角频带宽系数
$\Phi^*(z)$	闭环取样系统传递函数
ζ_m	m 次取样后的信噪比

目 录

主要符号表	vii
第一章 取样技术的原理	1
1-1 取样的基本概念	1
1-2 取样的频闪效应	3
1-3 取样的物理过程	4
1-4 实时取样	8
1-5 步变、步进和步退的概念	10
1-6 变换取样	12
1-7 取样函数 $\frac{\sin x}{x}$ 和狄拉克(Dirac)脉冲函数 $\delta(t)$	18
1-8 吉伯斯(Gibbs)现象	22
1-9 取样定理	24
1-10 差频取样与步进取样的关系	39
1-11 绝对值取样	41
1-12 差值取样	43
1-13 取样门的输出函数	46
1-14 取样系统的频率特性	48
1-15 取样系统的过渡特性	57
1-16 差值取样系统的过渡特性	61
1-17 变换取样的频谱压缩	71
1-18 噪声取样的性质	73
1-19 取样过程的旁通效应	75
1-20 平方律取样系统的稳态法则与瞬态法则	80
1-21 自取样系统	86
1-22 取样显示的晃动分析	91
1-23 覆盖取样和非覆盖取样	95
1-24 z 变换——研究覆盖取样的数学方法	97
1-25 p 变换——研究有限脉宽覆盖取样的数学方法	109
第二章 取样显示原理和取样示波器	116
2-1 取样示波器的发展	116
2-2 触发式取样示波器原理	119
2-3 取样门	123
2-4 取样门的结构	135
2-5 取样门二极管	147
✓2-6 雪崩晶体三极管	149

✓ 2-7	阶跃恢复二极管	158
✓ 2-8	取样脉冲发生器	161
2-9	展宽电路	169
2-10	参考电荷	175
2-11	电子开关	177
2-12	触发、分频和同步电路	181
2-13	步进系统	191
2-14	等效扫速的概念和计算公式	202
2-15	关于自记录扫描和他记录扫描	203
2-16	等效扫速的非线性	205
2-17	高频高压电路	209
2-18	末级放大器	212
2-19	幅度校准电路	216
2-20	直流稳压电源	216
2-21	用取样装置与一般示波器结合改装成取样示波器	222
2-22	内同步取样示波器	223
2-23	取样示波器的设计计算	230
第三章	取样示波器的性能测试与实际使用	234
3-1	取样示波器主要性能指标及其测试方法	234
3-2	取样示波器的选用	249
3-3	取样示波器的同步连接方法	252
3-4	一种寻找波形的简便方法	259
3-5	同轴部件的使用方法	260
3-6	关于取样密度、平滑和等效扫速的使用问题	264
3-7	用取样示波器测量半导体二极管开关时间的方法之一——脉冲法	266
3-8	用取样示波器测量半导体二极管开关时间的方法之二——正弦法	267
3-9	用取样示波器测量半导体三极管开关时间的方法	269
3-10	取样示波器的主要故障和维修方法	272
3-11	零相移脉冲发生器	278
第四章	取样技术的其他应用	282
4-1	时域反射技术	282
4-2	取样记录器	302
4-3	取样信号平均器	304
4-4	取样电压表	306
4-5	取样矢量计	311
4-6	取样分频器	314
4-7	取样数字化测量系统	318
4-8	单次取样记录仪	324
4-9	光电取样技术	326
4-10	取样技术在频率合成中的应用	329

4-11	取样技术在脉冲计量方面的应用——替续取样方法.....	336
4-12	频域自动网络分析仪.....	341
4-13	时域自动网络分析仪.....	346
4-14	光取样.....	347
附录 I	国内取样示波器技术性能一览表.....	354
附录 II	国外四种取样示波器技术性能比较表.....	355
附录 III	国外取样示波器一览表.....	358
参考文献.....		365

第一章 取样技术的原理

本章论述取样技术的原理。首先讲述取样的基本概念和物理过程;取样的频闪效应;取样方法的分类——实时取样和变换取样;以及取样技术中的许多技术名词的定义。

为了使本书在内容上具有一定的系统性,在本章中还阐述了关于取样理论中经常用到的取样函数和狄拉克脉冲函数的概念及其性质。

取样定理是取样过程中所遵循的基本规律。本章中介绍了时域取样定理、取样恢复定理、恢复定理的推广形式、恢复定理的有限脉宽形式、频域取样定理、带通取样定理、均方值取样定理以及滤波器响应均方值取样定理。这些定理是取样技术的理论核心,应用也相当广泛,因此这里都给出比较详细的证明。

在取样系统的特性方面,本章中论述了取样系统的频率特性和过渡特性,及实现差值取样的闭环取样系统的过渡过程分析。

最后,介绍了研究覆盖型取样的两种数学方法: z 变换和 p 变换。

本章内容涉及较多的数理推导,对于不准备深究取样物理过程的读者可略去演算部份,只运用有关结论就够了。

1-1 取样的基本概念

取样(Sampling)也称抽样或采样。

取样是一种信息的处理过程。这个过程比较广泛地存在于我们日常工作和生活之中,人们经常要接触它和应用它。但是,由于人们没有系统地去认识这种过程,所以对取样这一概念比较生疏。

例如,摄影师给某人拍一张照片,应该说是对该人在某时某地的形象进行一次取样。而这张照片则是某人在某时某地的形象的“样品”,这张样品部分地反映了某人的“情况”。

又如在医院中,医生常在患者耳垂上取出一滴血液进行化验,以便帮助确定和判断患者的疾病,这也是一次取样。抽出的这滴血液称为患者血液的“样品”。这个样品部分地反映了患者血液的“情况”。

诸如此类,举不胜举。而这样的取样,我们通称为广义取样。

广义取样的目的在于通过取样来获得样品,并通过样品来了解和确定被取样的对象的情况。这些情况也称为“消息”。在信息论中“消息”抽象地统称为信息。

在取样时,样品数目取得越多,对“情况”了解得就越详细,反映的“情况”就越真实。

例如,一张照片仅仅是一个样品,它反映的某个人的形象是局部的、有限的。当电影摄影机以每秒24个画面的速度连续拍照时,就是对形象在一段时间内进行许多次取样,因此电影反映的形象要比一张照片更为逼真。

同样地对于电信号也可以取样。例如,对电参数中的电压、电荷量等进行取样。从电信号中取得的电压、电荷量称为信号的电量样品。

本书主要是研究电信号的取样过程和性质。相对于广义取样来讲，对电信号这一特定对象进行的取样称为狭义取样。因此本书下文中提到的取样皆指狭义取样。

对信号的瞬时值进行抽取的过程称为取样。从被取样信号中抽取的信号成分称为样品。样品的含义仅包括信号的瞬时值而不包含样品出现的时间意义。

从被取样的信号列中所截取的与样品有关连的那部分信号称为信号事件。简称事件。事件主要指与取样有关连的一段信号，它脱掉了周期信号的连续性而成为时间刻度上的偶然性信号。

信号样品值与抽取该样品相对应的时间所唯一确定的座标点称为信号的样点。

关于表示取样、事件、样品、样点概念的示意图表示在图 1-1 中。其中 (a) 所示的是对一个信号列的第 4 个波形取样，我们将它截取下来做为事件，(b) 所示的是放大的事件，(c) 所示的是样品，(d) 所示的是由时间值与样品值所唯一确定的样点。

电信号的取样变换过程伴随着许多宝贵的特性，例如可以提高信噪比，增加系统的频带，压缩信号的频谱等。因此，在近代无线电电子学技术中，取样技术得到越来越广泛的应用。例如在脉冲编码通信、自动控制、遥控遥测、毫微秒和亚毫微秒脉冲技术、信号分析技术以及测量技术中都大量应用取样过程。

在下节中将介绍具有普遍意义的物理量的取样过程——频闪效应。

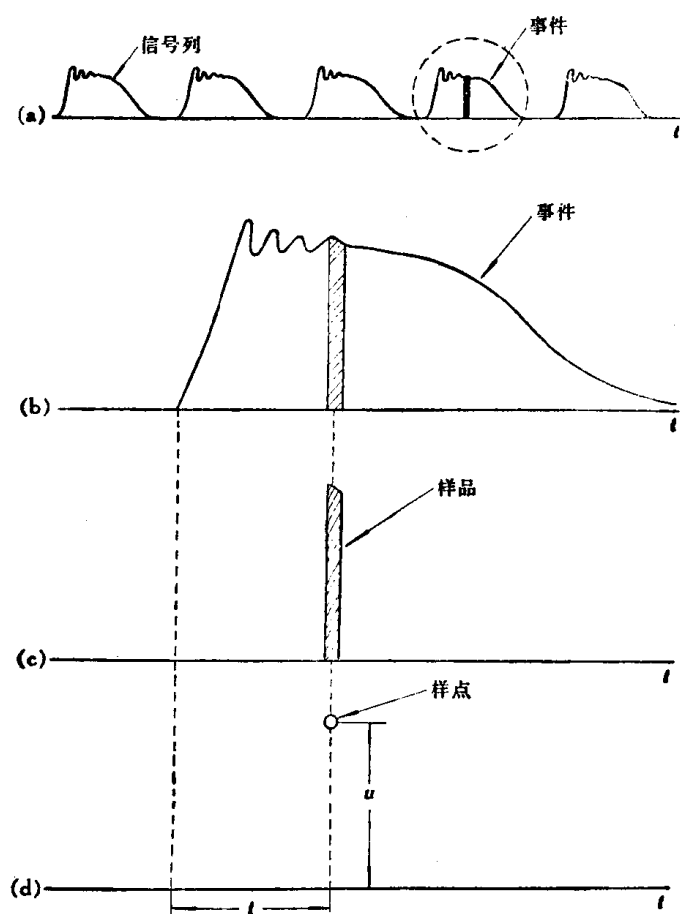


图 1-1 取样、事件、样品和样点

1-2 取样的频闪效应

什么叫频闪效应呢?下面我们列举一个日常生活中经常见到的实例来说明。

我们在炎热的盛夏,常常会在高速旋转的电扇叶片中间看到一个慢动的扇影,这个扇影有时以缓慢的速度向顺时针方向旋转,有时以缓慢的速度向逆时针方向旋转,有时又会停止不动。我们往往产生错觉,误认为这个扇影就是扇叶,实际上扇叶是以每秒约 50 周的速度旋转着,这样的转速,用人的眼睛是根本辨认不出来的。既然如此,我们所看到的缓慢转动的扇影又是什么呢?原来人的眼睛对于高速运动着的物体的识别能力是有一定限度的。我们这里把它称为:眼睛最高的识别频率或眼睛的取样频率。

眼睛的取样频率为 f_q , 扇叶的顺时针旋转频率为 f_s , 如果这两个物理量很接近,并且它们之差值 f_d 很小,则有

$$f_d = |f_s - nf_q| \quad (1-1)$$

其中 n 为正整数。

我们说这两个周期运动的物理量之间产生频闪效应。

当以下关系成立时

$$f_d = f_s - nf_q > 0 \quad (1-2)$$

则产生顺时针旋转的扇影。

当以下关系成立时

$$f_d = f_s - nf_q = 0 \quad (1-3)$$

则产生不动的扇影。

当以下关系成立时

$$f_d = f_s - nf_q < 0 \quad (1-4)$$

则产生逆时针旋转的扇影。

为什么会产生上面三种扇影变化呢?这是因为差频 f_d 随时可能受到干扰的缘故。例如电扇的转速 f_s 随时可能受到市电频率波动而产生变化,人的眼睛的取样频率 f_q 可能受着精神因素(例如兴奋、欢乐、愤怒、疲劳等)而有少量改变。因此在较短时间内观察扇叶运动时,随时随地受到某些因素的干扰而使差频 f_d 的结果为正值、零或负值。所以我们会感到扇影顺时针旋转、停止或逆时针旋转。

我们坐在电影院里观看电影,也常常会看到银幕上飞奔着的车轮的轮齿有时是正向转动,有时又好象是反向转动。这种现象与车子前进的方向相比较给人一种很不协调的感觉。实际上这也是频闪效应的结果。

车轮的旋转频率为 f_s , 而电影机的快门仅仅是每秒 24 个画面,即 f_q 为每秒 24 周,它们之间也同样会产生公式(1-2)、(1-3)、(1-4)所表示的三种情形。因此我们在银幕上观看有飞奔的车轮的镜头时,就会产生上述很不协调的感觉。我们用眼睛去观察一切比较快速度运动的物体时,都会发生类似的现象。

在物理光学中,常用频闪效应来观察周期性运动的物体。频闪测速器就是应用这种原理构成的。

在电学测量技术中,常用频闪效应将高速度的电学量变换成为比较缓慢的电学量,以

便达到人们容易观察、测量和记录等目的。

早在 1849 年和 1880 年,就已经有人利用频闪取样原理来观察可重复的电学现象.使用简单的机械式仪器来测量电动机的电学波形,这种装置被称为光频闪观测器。

图 1-2 所示的是机械式取样装置,即光频闪器的示意图。这里,光频闪器用于测量电机的转动速度。电机转动速度很快,肉眼是不能分辨的。为了测量其转速,可以利用光频闪原理.图 1-2 中电机带动刻有一条缝隙的圆盘,光线可以由缝隙透过。电机轴上还带动一个偏轮开关,每转动一周偏轮使触点接通一次,通过触点的电流信号触发频闪器,频闪器将触发信号逐次的延迟一下(这一点完全相当于后面提及的步进过程)。圆盘转动时透过缝隙的光线相当一次取样,取样时间就是缝隙宽度所决定的时间 τ , 见图 1-3 所示。由于频闪器的作用,灯光的发生时刻与缝隙光线的出现时刻之间产生频闪效应.这样一来,在盘的背面可以看到一个旋转很慢的光轮,通过频闪器上的倍率刻度可以算出电机的转动速度,通过电机转速还可以进一步确定电流的频率。

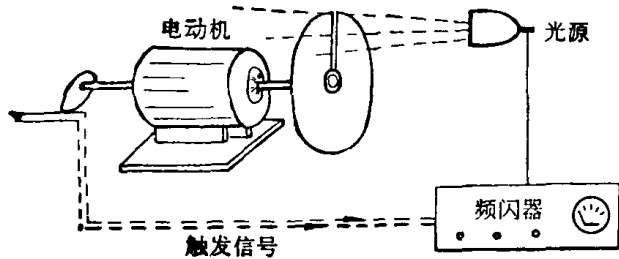


图 1-2 机械式取样装置示意图

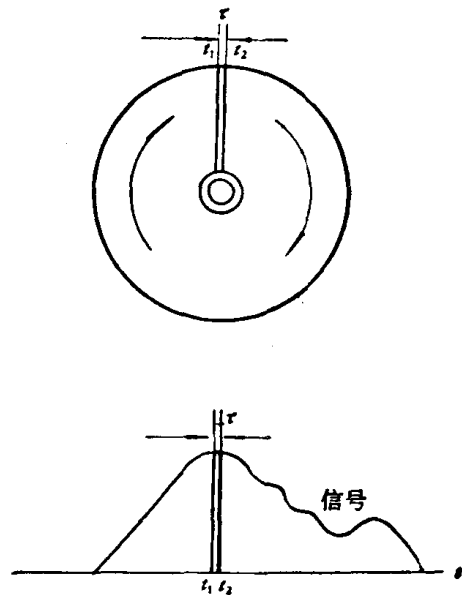


图 1-3 机械式取样装置的取样过程

1-3 取样的物理过程

样品的抽样过程可以用图 1-4 (a) 所示的开关来实现。这个开关的动臂是以 T 为周期旋转的。在 t_0 时刻开关接通,信号在 t_0 的瞬时值便通过了开关。由于开关的触点很小,开关的闭合时间很短,所以这种取样称为理想取样。图 1-4 (b) 所示的是一个梯形脉冲被理想取样情形。

图 1-5 (a) 所示的是一个触点较大的开关,当开关的动臂与静臂接触时,由于静臂具有一定的弧长,因此闭合时间就较长。这里假设接通时间为 τ , 则通过开关的是一个宽度为 τ 的信号成分,这种取样称为有限脉宽取样。

对信号抽取样品的开关装置称为取样门。

在实际取样电路中,取样门是用开关二极管来实现的。图 1-6 所示的是一种简单的取样门电路。 D 为取样门二极管, C 为积分电容。

电路的工作过程是这样的:在通常状态下,负偏压 $-E_p$ 通过电阻 R 将开关二极管 D 反向偏置,使信号不能通过取样门。当在二极管 D 的负端加上负极性的尖脉冲,且脉冲幅

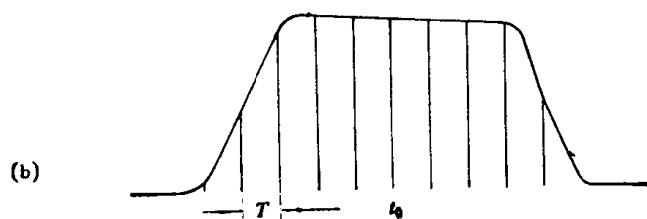
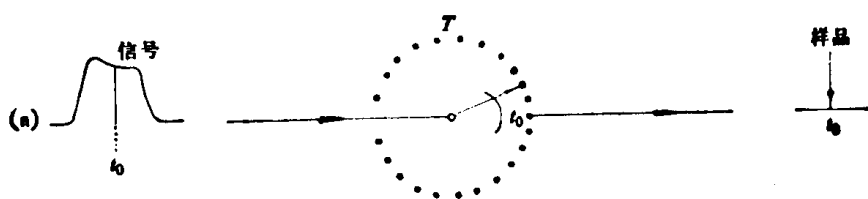


图 1-4 理想取样

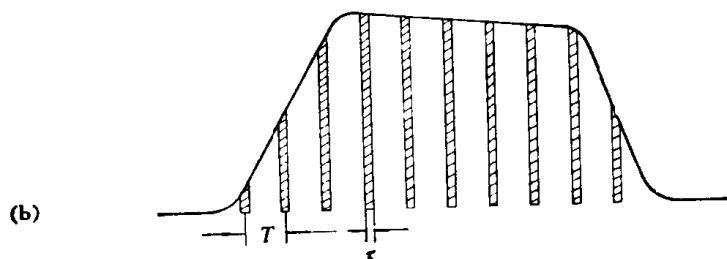
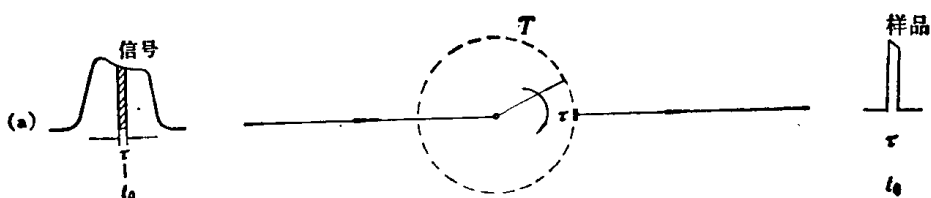


图 1-5 有限脉宽取样

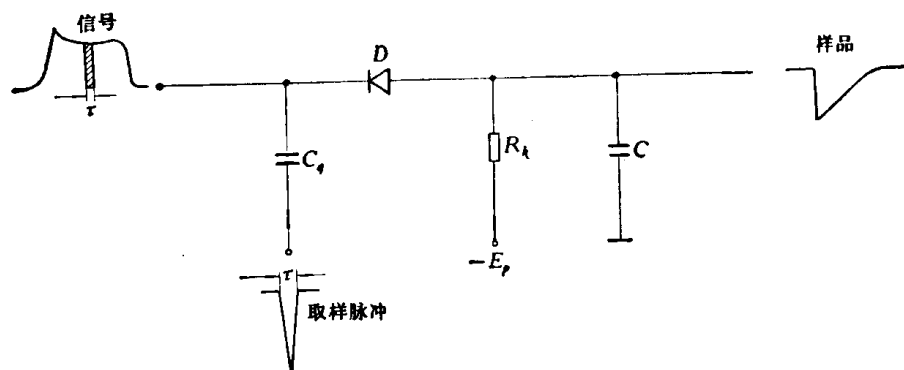


图 1-6 简单的取样门电路

值超过负偏压 $-E_p$ 时,则二极管导通。由于取样脉冲具有一定的宽度 τ ,因此二极管导通时间就等于取样脉冲的宽度。在有效开门时间 τ 内,信号的相应成分也通过二极管。这个过程正如图 1-7 (a) 所示。图 1-7 (a) 是被取样信号 u_i , (b) 是取样脉冲 $\Delta(t)$ 加到二极