

TE SHU  
DIAN LIANG  
DE  
CE LIANG

特  
殊  
电  
量  
的  
测  
量

TE SHU  
DIAN LIANG  
DE  
CE LIANG

哈尔滨工业大学 顾洪涛 上海市宝山区质量技术监督局 钱国柱



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 特殊电量的测量

---

哈尔滨工业大学 顾洪涛

上海市宝山区质量技术监督局 钱国柱



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 简 介

全书共九章。内容有:超低频电参量的测量;小电流的测量;小电压的测量;小电阻的测量;大电流的测量;高电压的测量;高值电阻的测量;工程环保参量的测量;微弱信号的检测。

本书力图对上述测量中的测量原理、方法及测量仪器仪表作详尽介绍,以对从事特殊电量测量的技术人员提供帮助。

## 图书在版编目(CIP)数据

特殊电量的测量/顾洪涛 钱国柱编著. —  
北京:中国电力出版社,2000.6

ISBN 7-5083-0282-6

I. 特... II. ①顾...②钱... III. 电量测量  
IV. TM933

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第  
04325 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2000年6月第一版 2000年6月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 8.375印张 184千字

印数 0001—3000册 定价 15.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

# 前 言



随着科学技术的不断向前发展，电工测量在各个领域中愈显其重要，尤其是一些特殊电量的测量。本书试图就一些特殊电量的测量原理、测量方法及测量用仪器仪表进行较为详尽的介绍，以帮助有关科技人员解决一些具体问题。本书也可作为大专院校“电磁测量”专业及相关专业师生的参考书。

本书由哈尔滨工业大学顾洪涛、孙金玮和上海市宝山区质量技术监督局钱国柱共同编著。其中第一章至第四章由顾洪涛编著，第五章、第六章、第七章由钱国柱编著，第八章、第九章由孙金玮编著。全书由顾洪涛主编统审，北京电力科学研究院钱慰曾审稿。

本书在编著过程中曾得到了《电测与仪表》编辑部、杭州计量学院尤德斐教授、哈尔滨电工学院袁禄明教授等单位 and 个人的热情关心与支持，在此一并致谢。

由于本书涉及了测量学的一些新课题及新领域，加之编著者各方面水平所限，书中之误难免，恳请读者指正。

作者

1999 年 12 月

# 目 录

\*\*\*\*\*

## 前言

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 第一章 超低频电参量的测量 .....                   | 1  |
| § 1—1 概述 .....                        | 1  |
| § 1—2 超低频有效值电压的测量 .....               | 4  |
| § 1—3 超低频峰值电压的测量 .....                | 11 |
| § 1—4 超低频电压失真度的测量 .....               | 17 |
| § 1—5 SZD-2 型超低频真有效值数字<br>电压表简介 ..... | 22 |
| § 1—6 热偶型超低频有效值数字电压表简介 .....          | 27 |
| § 1—7 超低频电压校准装置 .....                 | 33 |
| § 1—8 超低频电量测量应用实例 .....               | 36 |
| 第二章 小电流的测量 .....                      | 40 |
| § 2—1 概述 .....                        | 40 |
| § 2—2 用电工仪表测量小电流 .....                | 41 |
| § 2—3 非接触型交流微安表 .....                 | 47 |
| § 2—4 $I/U$ 变换器测量微电流 .....            | 50 |
| § 2—5 零位平衡法测微小电流 .....                | 58 |
| § 2—6 微电流测量仪的校准 .....                 | 61 |
| 第三章 小电压的测量 .....                      | 65 |
| § 3—1 概述 .....                        | 65 |

|            |                              |            |
|------------|------------------------------|------------|
| § 3—2      | 0.01 $\mu$ V 高灵敏度直流放大器 ..... | 66         |
| § 3—3      | HZ2150 型直流微伏表简介 .....        | 71         |
| § 3—4      | 直流比较仪电位差计 .....              | 74         |
| § 3—5      | JZ-1 型晶体管交流指零仪 .....         | 81         |
| § 3—6      | 交流平均值、有效值数字毫伏表 .....         | 87         |
| <b>第四章</b> | <b>小电阻的测量 .....</b>          | <b>96</b>  |
| § 4—1      | 概述 .....                     | 96         |
| § 4—2      | 伏安法及“四端钮接线法” .....           | 97         |
| § 4—3      | 恒流电位降法 .....                 | 101        |
| § 4—4      | 用电位差计测小电阻 .....              | 108        |
| § 4—5      | 电桥法测量小电阻 .....               | 114        |
| § 4—6      | 脉冲电流采样法测小电阻 .....            | 122        |
| § 4—7      | 交流双回路差值法测小电阻 .....           | 127        |
| § 4—8      | 用交流来检验大电流分流器 .....           | 130        |
| <b>第五章</b> | <b>大电流的测量 .....</b>          | <b>133</b> |
| § 5—1      | 概述 .....                     | 133        |
| § 5—2      | 二次绕组串联的直流互感器工作原理 .....       | 134        |
| § 5—3      | 电磁过程与波形曲线 .....              | 139        |
| § 5—4      | 有功负载对直流互感器工作的影响 .....        | 141        |
| § 5—5      | 二次绕组串联直流互感器的误差 .....         | 145        |
| § 5—6      | 补偿式直流互感器 .....               | 152        |
| § 5—7      | 直流互感器的技术特性 .....             | 156        |
| § 5—8      | 直流互感器的校验方法 .....             | 157        |
| § 5—9      | 交流互感器的工作原理 .....             | 160        |
| § 5—10     | 提高电流互感器准确度的方法 .....          | 163        |

|            |                        |            |
|------------|------------------------|------------|
| § 5—11     | 电流互感器的技术特性 .....       | 168        |
| § 5—12     | 电流互感器的校验方法 .....       | 169        |
| § 5—13     | 脉冲大电流的测量 .....         | 171        |
| <b>第六章</b> | <b>高电压的测量 .....</b>    | <b>176</b> |
| § 6—1      | 直流高电压的测量 .....         | 176        |
| § 6—2      | 交流高压均方根值的测量 .....      | 177        |
| § 6—3      | 交流高压及冲击电压峰值的测量 .....   | 181        |
| § 6—4      | 高压测量用电阻分压器 .....       | 187        |
| § 6—5      | 电容分压器 .....            | 196        |
| <b>第七章</b> | <b>高值电阻的测量 .....</b>   | <b>202</b> |
| § 7—1      | 高阻电桥 .....             | 202        |
| § 7—2      | 高值电阻的测量方法 .....        | 206        |
| <b>第八章</b> | <b>工程环保参量的测量 .....</b> | <b>215</b> |
| § 8—1      | 概述 .....               | 215        |
| § 8—2      | 静电荷的测量方法 .....         | 215        |
| § 8—3      | 环境噪声的测量 .....          | 218        |
| § 8—4      | 接地电阻的测量 .....          | 225        |
| § 8—5      | 设备漏电流的测量 .....         | 229        |
| § 8—6      | 电缆故障点位置的判定方法 .....     | 231        |
| § 8—7      | 小结 .....               | 236        |
| <b>第九章</b> | <b>微弱信号的检测 .....</b>   | <b>237</b> |
| § 9—1      | 引言 .....               | 237        |
| § 9—2      | 噪声、低噪声设计技术 .....       | 237        |

|       |                |     |
|-------|----------------|-----|
| § 9—3 | 信号的同步相关检测..... | 248 |
| § 9—4 | 小结.....        | 260 |



# 超低频电参量的测量

## § 1-1 概 述

随着科学技术的发展,对超低频的参数测量不断地提出了新的要求。超低频一般是指  $20\text{Hz}$  以下的频段。就目前所知,被研究的对象的频率已低至  $0.00001\text{Hz}$  (周期相当于  $27.3\text{h}$ ,即一天多的时间才变化一次)。

超低频测量的主要特点是被测参量振幅变化缓慢,周期很长,如频率为  $0.001\text{Hz}$  的参量,其周期为  $16\text{min}40\text{s}$ 。因此,对这个频段的参量,如超低频信号频谱、相位、周期、失真度、振幅特性等的测量方法都有其特殊性,与一般的低频信号测量方法不完全相同,目前已形成研究超低频测量技术的专门学科。

一般低频测量仪表的指示系统中,由于惯性阻尼特性不够大,当用于超低频电压指示时会引起不稳定的摆动。因此,超低频指针式仪表要求具有较大的惯性和较强的阻尼。超低频电压的指示系统的准确度和稳定性与测量时间是矛盾的,测量的频率越低,则要求的测量时间也就越长,通常要用牺牲测量的准确度和稳定性为代价,来提高测量速度,或者是取相反的情况。

超低频电参量的测量应用极其广泛,如振动、地震、自

动控制、噪声控制、人体功能、海洋波浪特性、机械电子系统等科学研究中，常常要测量各参量振幅特性，在大多数情况下，测量频段为  $0.01\sim 100\text{Hz}$  这一范围。超低频电压测量中，除了测量正弦波信号外，还常有非正弦信号、噪声信号、单次振动冲击信号以及慢漂移起伏的随机信号等。这类信号有时需要用统计处理的方法测量。对正弦电压的测量，根据不同的条件，也同样分为峰值、平均值和有效值等不同的测量要求。一般来说，低频电压测量的几种交、直流变换方法，如检波器、直流补偿法、热电变换器等，原则上均可以用于超低频电压的测量，但需要解决适应超低频的特殊技术问题。

为了建立超低频电量的标准，近几年来，国内外同行做了大量工作。美国国家标准局 (NBS) 于 1978 年首先研制成了 VLF 超低频电压表或校准装置，其原理是采用多结点热偶交、直流转换。同年，NBS 又研制成了带微处理器 ( $\mu\text{P}$ ) 的 VLF 电压表，将微处理器 ( $\mu\text{P}$ ) 引入了有效值电压的测量，突破了按传统测量有效值所采用的转换方法，开拓了交流量在 VLF 段测量的新道路，指出了电量测量的新方向。其基本原理是将输入信号在一个周期采样得到的值按有效值的定义进行计算，得出被测信号的真有效值。1979 年 NBS 又制造出一个交流电压表校准装置，它主要由正弦波参考基准，即交流校准器；有效值/直流变换器；直流标准、直流数字电压表组成，可对  $0.1\sim 10\text{Hz}$  的有效值电压表进行校准。

为了适应科学技术发展的需要，我国在近几年也开始了这方面的工作，并取得了一定的成效。现将近几年国内试制 VLF 电压表与 NBS 及英国的 VLF 电压表（均为数字显示）技术特性作一比较，见表 1-1。

表 1-1 几种 VLF 电压表技术特性的比较

| 名 称<br>(国别)                                 | 频率范围<br>(Hz) | 电压范围<br>(V) | 测量精度<br>(%) | 工作原理                             | 响应时间                |
|---------------------------------------------|--------------|-------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| NBS 超低频<br>电压表<br>(美国)                      | 0.1~120      | 0.002~10    | 0.1         | A/D 变换微<br>型计算机直接<br>计算          | 被测信<br>号的 2 个<br>周期 |
| NBS 超低频电<br>压表/校准装置<br>(美国)                 | 0.1~50       | 0.002~10    | 0.2         | 热偶 AC/DC<br>变换采用反馈<br>网路自动平衡     | 40s<br>(0.1Hz)      |
| 1030F 电压表<br>(英国)                           | 0.01~20k     | 0.01~100    | 0.1         | A/D 变换与<br>有源滤波网路                | 150s<br>(0.1Hz)     |
| 801 电压装置<br>(成都计量所)                         | 0.05~100     | 0.01~10     | 0.5         | rms/DC 变换<br>交、直流测量,<br>二次手动平衡   | 因手动<br>平衡, 时<br>间较长 |
| 3TW-1 型超<br>低频电压表<br>(航天部三院<br>计量站)         | 0.01~100     | 0.01~100    | 0.05~0.5    | 热偶 AC/DC<br>转换, 有源滤波<br>器滤波      | 5min                |
| SZD-2 型超<br>低频有效值<br>数字电压表<br>(哈尔滨<br>工业大学) | 0.1~120      | 0.002~10    | 0.1         | 采样计算式<br>应用微处理器<br>( $\mu$ P) 技术 | 被测信<br>号的 2 个<br>周期 |

我国由于航天事业发展的需要, 促进了对超低频电量的精密测试和测量仪器的开发与研制。无论是飞机飞行中的参量测量, 还是卫星发射和运行中的参量测量都离不开将各种物理量变为电量的传感器, 而各种传感器是否能准确地反映被测参数, 除了传感器本身的质量外, 还存在一个如何对它进行标定的问题。本章主要对超低频测量的原理、方法及应用进行简要介绍。

## § 1-2 超低频有效值电压的测量

超低频电压有正弦波和非正弦波之分,对正弦有效值电压的测量,可采用平均值检波或峰值检波,然后按正弦波有效值进行刻度的方法。但实际情况是超低频电压波形多数为非正弦,即具有一定的失真度,对其真有效值的测量,必须采用测量结果不受失真度影响的方案。下面分别介绍几种超低频有效值电压测量方法的原理。

### 一、正交补偿法

正交补偿法原理框图见图 1-1。被测电压  $U_x$  中的一路经平方器直接加至差分放大器。另一路由移相器移相  $\pi/2$  后,再经平方器加至差分放大器。这两个通道电压均为  $U_x$ ,但相互为正交,使得被测电压  $U_x$  的交流分量在输出端互相补偿。设被测电压为  $U_x$ ,并按傅里叶级数展开,其中一路通道为

$$U(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_K \sin(K\omega t + Q_K) \quad (1-1)$$

另一路通道移相  $\pi/2$  得

$$U_{\dagger}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_K \sin\left(K\omega t + Q_K + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-2)$$

平方后

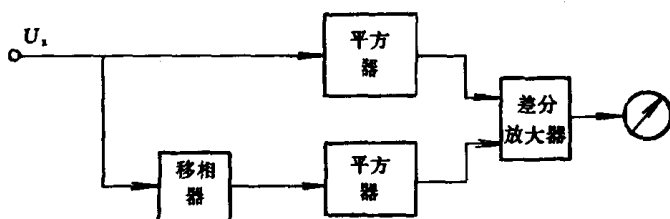


图 1-1 正交补偿法原理框图

$$\begin{aligned}
U^2(t) &= \left[ \sum_{k=1}^{\infty} C_K \sin(K\omega t + Q_K) \right]^2 \\
&= \sum_{k=1}^{\infty} C_K^2 \sin^2(K\omega t + Q_K) \\
&\quad + 2 \sum_{k \neq i}^{\infty} C_K C_i \sin(K\omega t + Q_K) \sin(i\omega t + Q_i) \\
&= \sum_{k=1}^{\infty} C_K^2 \left[ \frac{1 - \cos(2K\omega t + 2Q_K)}{2} \right] \\
&\quad + 2 \sum_{k \neq i}^{\infty} C_K C_i \sin(K\omega t + Q_K) \sin(i\omega t + Q_i) \\
&= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} C_K^2 - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \cos(2K\omega t + 2Q_K) \\
&\quad + 2 \sum_{k \neq i}^{\infty} C_K C_i \sin(K\omega t + Q_K) \sin(i\omega t + Q_i) \quad (1-3)
\end{aligned}$$

同理

$$\begin{aligned}
U_{\dagger}^2(t) &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} C_K^2 - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \cos(2K\omega t + 2Q_K + \pi) \\
&\quad + 2 \sum_{k \neq i}^{\infty} C_K C_i \sin\left(K\omega t + Q_K + \frac{\pi}{2}\right) \\
&\quad \times \sin\left(i\omega t + Q_i + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-4)
\end{aligned}$$

$U(t)$  和  $U_{\dagger}(t)$  平方后经差分放大器运算得  $U_n$  加至测量仪表。

$$\begin{aligned}
U_n &= U^2(t) + U_{\dagger}^2(t) \\
&= 2U^2 + 2 \sum_{k \neq i}^{\infty} C_K C_i \cos[(k-i)\omega t + Q_K - Q_i] \quad (1-5)
\end{aligned}$$

式中  $U$  则为被测电压  $U_x$  的有效值，在数值上为  $U^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt$ 。

式 (1-5) 等号后第一项为直流分量，第二项为各次谐波的交流分量。如果被测电压中包括的高次谐波分量很小，则

指针的摆动幅度很小，因为交流分量对基波在一个周期或整数倍周期内积分的结果并不发生影响，其测量时间为被测电压的周期。

## 二、移相器加音频热偶法

设被测信号为  $u(t) = U_m \sin \omega t$ ，若用移相器将之移相  $\pi/2$ ，即将  $u(t)$  变为  $u_+(t)$ ，且

$$u_+(t) = U_m \sin(\omega t - \pi/2) = U_m \cos \omega t$$

假若用两只性能一致的热偶分别对它们进行平方变换，则其输出电动势分别为

$$E_1 = K (U_m \sin \omega t)^2$$

$$E_2 = K [U_m \sin(\omega t - \pi/2)]^2 = K (U_m \cos \omega t)^2$$

再将两个电动势相加，得

$$\begin{aligned} E_0 &= E_1 + E_2 = KU_m^2 (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t) \\ &= KU_m^2 = 2KU^2 \end{aligned}$$

所以 
$$U = \sqrt{\frac{E_0}{2K}} = K' \sqrt{E_0} \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 得出如下结论：

(1) 热电偶输出电动势之和  $E_0$  与被测信号频率无关，可用音频热偶实现超低频电压的测量。

(2) 有效值电压  $U$  与热偶输出电动势之和  $E_0$  的开方成比例， $K'$  为系数。

(3) 可用替代法用直流电压与被测信号  $U_x$  进行异时比较，从而可以得到准确的  $U_x$  的有效值。

移相器加热偶法原理线路框图见图 1-2。这种方法的原理前提是要求  $u(t)$ 、 $u_+(t)$  两通道信号移相准确为  $\pi/2$ ，幅值  $U_m$  相等。对任一频率信号实现这一前提是很困难的，因而通道移相、幅度可微调，并且测量前用峰值表与相位表观测

$u(t)$  与  $u_{\phi}(t)$  的幅值、相位准确后再进行测量。另外，这种方法虽然可用音频热偶转换，但应注意被测电压  $U_x$  的波形不应偏离正弦太多。如果失真度大，就会出现高次谐波。对于不同非正弦信号，其波峰因数往往相差很大，通道及热偶的动态范围有限，因此均会产生误差。当失真度  $K=5\%$  时，可求得其波形误差  $\delta=0.125\%$ 。

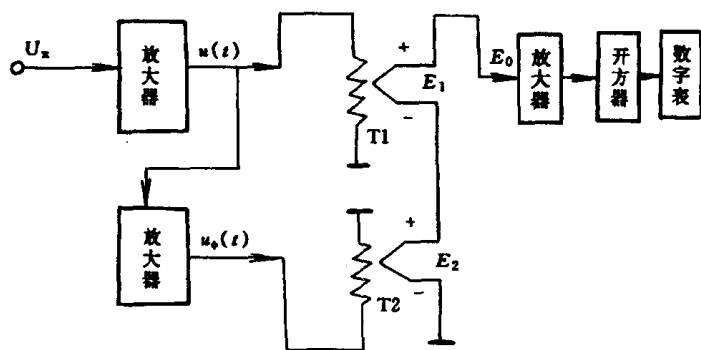


图 1-2 移相器加热偶法原理线路框图

### 三、计算式有效值电压测量法

计算式有效值电压测量法根据有效值的定义表达式，即

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \quad (1-7)$$

通过一系列模拟电路来完成各种运算，从而实现有效值电压  $U$  的测量，其原理框图见图 1-3。

由有效值电压定义

$$U^2 = \frac{1}{t} \int_0^t u^2(t) dt$$

$$tU^2 = \int_0^t u^2(t) dt$$

微分后

$$2tU \frac{dU}{dt} + U^2 = u^2(t)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{2t} \left( \frac{u^2(t)}{U} - U \right)$$

$$U = \int_0^t \frac{u^2(t)}{2tU} dt - \int_0^t \frac{U}{2t} dt \quad (1-8)$$

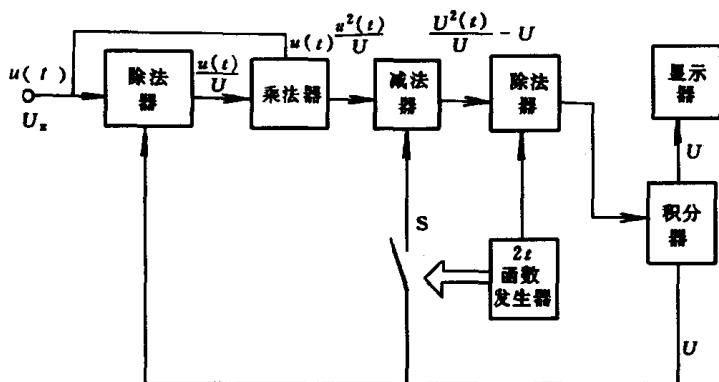


图 1-3 计算式有效值电压测量法原理框图

被测信号  $u(t)$  输入至除法器, 在时间  $0 \sim t$  之间采用实时平均方式, 与输出反馈电压相除得  $u(t)/U$ , 经由乘法器与输入电压  $u(t)$  相乘得  $u^2(t)/U$ 。终端电压  $U$  通过开关  $S$  反馈回到减法器, 得到输出为  $[u^2(t)/U] - U$ , 送入除法器除以  $2t$ , 即由函数发生器产生随时间线性增长并且与时间  $2t$  成比例的函数连续地除以减法器输出, 则得到输出为  $\frac{1}{2t} \left\{ \frac{u^2(t)}{U} - U \right\}$ 。此函数通过积分器即得到

$$U = \frac{1}{2t} \int_0^t \left( \frac{u^2(t)}{U} - U \right) dt \quad (1-9)$$

最后, 积分器输出的有效值由数字显示器显示被测电压有效值。

#### 四、微处理器采样控制法

应用微处理器控制方法对被测信号进行快速取样，通过模数转换，将被测的模拟信号转为离散的数字量，然后由计算机按有效值定义进行计算，求得被测信号电压有效值。

设原信号函数为  $u(t)$ ，通过傅里叶变换的运算可得

$$u(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u(k\Delta t) \frac{\sin \Omega_c(t - \Delta t K)}{\Omega_c(t - K\Delta t)} \quad (1-10)$$

式 (1-10) 中包含两个因子，第一个因子  $u(k\Delta t)$  是原函数  $u(t)$  的一系列离散值，取样点的间隔密度为  $\Delta t$ ；第二个因子是  $\sin \Omega_c(t - K\Delta t) / \Omega_c(t - K\Delta t)$ ，它与原函数无关，是单位脉冲通过理想的低通滤波器的输出波形。因此，原信号  $u(t)$  可以用一系列离散值  $u(K\Delta t)$  近似表示。显然，离散值的取样密度与要求的测量准确度有关。由数学推导可以证明，取样频率  $f_s$  必须大于信号频率的 2 倍才能满足一定的测量准确度要求。

近年来，由于微处理机的迅速发展，其功能日益齐全而价格大幅度下降，因而  $\mu P$ （微处理器）被日益广泛地应用于测量仪器仪表领域。美国国家标准局 (NBS) 首先将  $\mu P$  用于超低频有效值电压测量中，其装置的原理方框图见图 1-4。

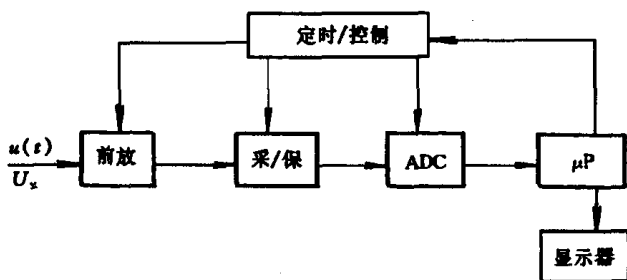


图 1-4 采样控制装置原理框图