

取 样 积 分 器

——一种检测微弱信号的手段

微弱信号检测小组

(中国科学院物理研究所)

一、前 言

取样积分器是近代物理实验中测量噪声中的微弱周期、重复信号的一种有力工具。有关微弱信号检测和锁相放大器,《物理》杂志1977年第4、6期和1978年第1期已有文章论述^[1,2]。本文将在参考文献[2]的基础上进一步讨论取样积分器的原理、基本参数和典型应用。

五十年代中期, Holcomb 和 Norberg 提出取样积分器的原理^[3]。如果追溯更早,可以认为该原理是由伦敦的一位神经学家 Dawson 于五十年代初提出的,当然,他所采用的只是机械分线器和同步马达。真正成为一个完善的电子仪器还是1962年由 Lawrence 辐射实验室的 Klein 及 Barton 实现的。从此,取样积分器得到了广泛的应用,并逐步达到商品化^[4]。

在信号检测中,我们遇到的往往是一个被噪声搞得很模糊的微弱信号,这时我们希望得到这个信号的“干净的”完整波形,测量波形中某段的平均值,测定触发信号与有噪声的回波间的延迟以及这些特性的组合等。通常,我们可以设想用压缩带宽的高低通滤波器的办法来达到此目的。但是由于信号的频率范围很宽,以及噪声可以在某些频率的地方很强,所以要适当地选择滤波器的通频带,以防止信号的幅值和相位失真。因而,对于复杂信号几乎不能

采用压缩带宽的办法来提取。

取样积分器克服了上述困难。目前国外已有多种产品供应,表1为几种典型产品的性能比较。表中所列指标随着电子技术的进展不断地得到改善,例如已有门宽达100ps的商品问世^[5]。现在这类仪器正沿着提高性能指标以及和电子计算机结合构成功能更加齐全的系统的方向发展。

二、工作 原 理

我们知道,相关函数的分析方法是信号检测中的一个重要工具,而求自相关函数又是解决从噪声中提取规则信号的有效手段。取样积分器和锁相放大器一样,都是以给定的参考信号与被测信号相关来提取噪声中的信号。它们统称为信号处理系统。信号处理系统的原则框图如图1所示。由图可见,一个信号作为另一信

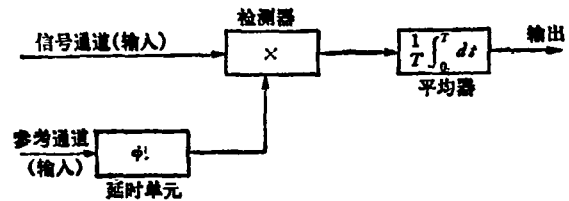


图1 信号处理系统的原则框图

号的观察门。锁相放大器是利用含有噪声的信号和与此信号同频同相的清晰的参考信号(方波)之间的相关来处理信号的,取样积分器是

表 1 取样积分器特性

型号	参数 时基 T_b	门宽 T_g	时间常数 T_c	扫描时间 T_s	灵敏度	非线性	零点飘移	频率特性	资料
415/425A (英 Brookdeal)	$1\mu s$ — $100ms$	$10ns$ — $0.5s$	$1ms$ — $100s$	$10ms$ — $1000s$	$10mV$	$<0.1\%$	$100\mu V/^\circ C$		[6]
B-KR300Z15 (西德 B-K)	$30\mu s$ — $10s$	$0.5\mu s$ — $10ms$	$10\mu s$ — $100s$	$10s$ — $200min$					[7]
BX530A (日 NF)	$5\mu s$ — $1s$	$0.2\mu s$ — $110ms$	$100\mu s$ — $100s$	$1min$ — $1000min$	$\pm 0.2V$ — $\pm 100V$	$<\pm 0.1\%$	$0.05\%/^\circ C$	D. C. $0-300kHz$ A. C. $0.16Hz$ — $300kHz$	[8]
鸟取大学(日)	$100\mu s$ — $500ms$	$1\mu s$ — $1ms$	$100\mu s$ — $300ms$	$1s$ — $1000s$	$\sim 1mV$			D. C. $0-500kHz$ A. C. $100k$ — $2MHz$	[9]
TF9870/71 (法 TA)	$1\mu s$ — $50s$	$10ns$ — $100ms$	$300ns$ — $100s$	$100ms$ — $180min$	$\pm 3mV$ — $\pm 10V^*$	$<10^{-3}FS$	$80\mu V/^\circ C$	$0-20MHz$	[10]
PAR 160 (美 PAR)	$2\mu s$ — $20s$	$10ns$ — $0.5s$	$3ns$ — $100s$	$1min$ — $1000min$	$50mV-10V$			$3kHz-50MHz$	[11]

* 加 9103 前置放大器可达 $3nV$ 。

利用一个与信号重复频率一致的参考信号，对含有噪声的信号进行采样处理的。它们都利用了相关原理给出一级统计信号。随机脉冲或周期的不相干信号，还可以通过平滑滤波器(RC 积分网络)加以平均得到二级统计信号。因为信号的提取是经过多次重复的，所以噪声的统计平均值为零，从而提取出有用信号。

对于取样积分器，如果取样脉冲和输入信号间的延迟固定，则取样脉冲检测的是与输入重复信号原点有确定延迟的某一点的瞬态幅值。如果我们逐渐移动取样点并对整个信号周期进行扫描，则可检测整个波形。这种方法称为 Boxcar 方法，所以取样积分器也称为 Boxcar 积分器¹⁾。

这种方法的实质在于：依次对波形上的每一个“点”取样和平均，当输出电压精确地达到该“点”波形的电压后，移至下一“点”再进行取样和平均……。利用改变门延迟的办法对整个波形进行扫描，从而得到整个波形的取样和平均。

取样门控制线路的原则框图如图 2 所示。用触发脉冲 (b) 产生锯齿波 (c)，锯齿波的扫描期称为时基宽度 T_b ， T_b 可以改变以达到复盖被测信号的整个波形，触发脉冲的周期 T_{rep} 不一定等于 T_b ，慢扫描发生器产生一个

变化非常慢的斜线信号 (d)，(c) 与 (d) 的信号通过比较器进行比较，可得到宽度逐渐变化的输出脉冲，以此脉冲的上升边驱动门宽控制电路 (单稳电路)，经门驱动电路，从而得到一个移动的确定宽度取样门脉冲。

一个取样积分器由两部分组成(图 4)

(1) 测量单元，包括一个可调宽度的信号取样门和一个积分网络。此单元用来恢复信号幅度。

(2) 门驱动单元，包括一个逐步移动延时的门宽驱动信号——同步发生器和一个慢扫描发生器。此单元提供门扫描及延时控制。

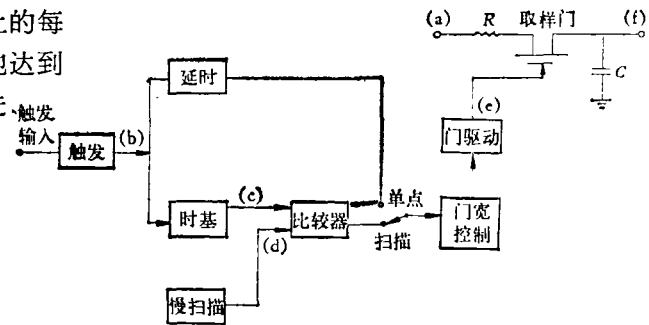


图 2 取样门控制线路原理框图

1) Boxcar 原意为有益货车，因为从示波器上见到的脉冲序列有与它相类似的外形。

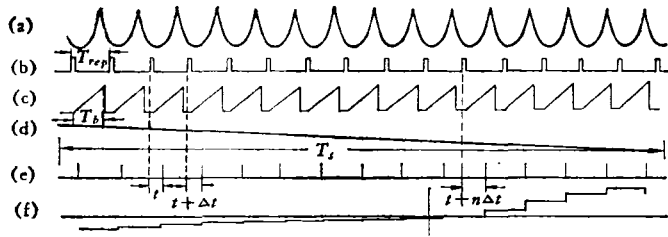


图3 波形的恢复
(a) 信号; (b) 触发; (c) 时基; (d) 慢扫描; (e) 移动的门脉冲; (f) 输出

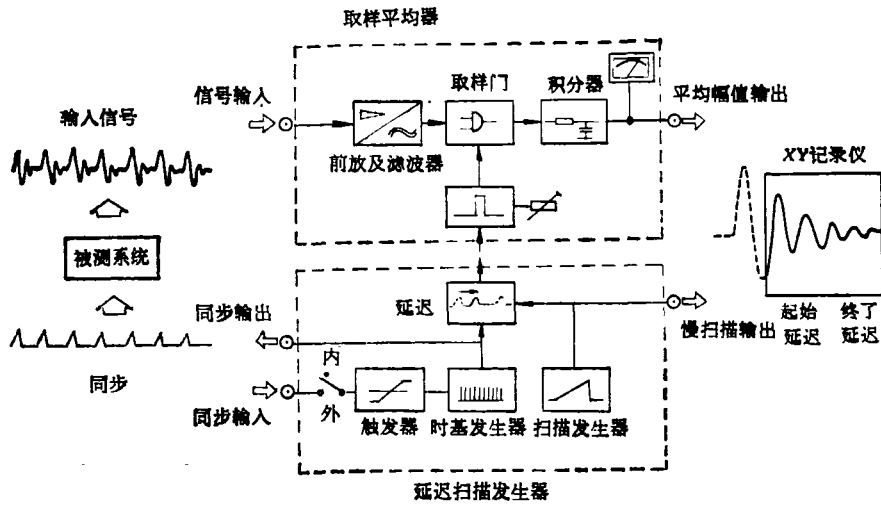


图4 取样积分器原理框图

由式(2)、(3)得

三、主要参数和它们之间的关系

1. 门宽 T_g

我们知道, 对于一个 t_1 时宽度 T_g 的取样脉冲, 如果输入端送入一个角频率为 ω 的正弦小信号, 则通过取样门的输出信号为

$$V_0(t_1) = \frac{V_i K}{C} \int_{t_1 - \frac{T_g}{2}}^{t_1 + \frac{T_g}{2}} \sin \omega t dt, \quad (1)$$

式中 V_i ——输入信号最大值; K ——门的增益, 如是线性电路 K 为常数; C ——输出端电容. 式(1)可改写为

$$V_0(t_1) = \frac{2V_i K}{\omega C} \sin \frac{\omega T_g}{2} \sin \omega t_1, \quad (2)$$

频率很低时,

$$V_0(t_1) = \frac{2V_i K}{\omega C} \times \frac{\omega T_g}{2} \sin \omega t_1. \quad (3)$$

$$\frac{V_0(t_1)_{\text{高频}}}{V_0(t_1)_{\text{低频}}} = \frac{\sin \frac{\omega T_g}{2}}{\frac{\omega T_g}{2}}. \quad (4)$$

若按幅值计算高频分量的恢复, 令其幅值比其低频幅值低 3db, 则由式(4)可导出

$$f T_g \leq 0.42, \quad (5)$$

式中 f 是频率.

式(5)表示门宽与信号高次谐波分量的关系. 为了分辨出频率为 f 的高次谐波, 门宽 T_g 必须比此谐波的特征时间小 0.42 倍. 通常, 欲正确地恢复信号波形, 门宽必须比其最高次的谐波周期窄一半, 或者说两个信号相隔 $2\Delta t$ 时用 Δt 的门宽可清楚地将这两个信号分开.

另一方面, 门宽必须足够窄, 使得在此时间间隔内信号可视为常数. 在此“常数的”信号电压上叠加有随机的噪声电压.

所以, 门宽是决定取样积分器时间分辨率的一个重要指标. 一般说, 我们可将取样单元视为一个周期的增益装置, 门开时增益为 1, 门关时增益为 0; 它的工作状态类似一个梳状滤波器, 一次近似其增益可用式(4)表示.

2. 时间常数 T_c

取样积分器采用了 RC 低通滤波器(不完全积分器). 对阶跃输入电压来说, 不完全积分器的输出电压

$$V_0 = V_i \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right]. \quad (6)$$

取样门宽连续时, 即门恒开(恒开)的情况下, 积分时间近似为 $2RC$. 实际上, 积分时间包括一个有效时间(门开)和一个无效时间(门关), RC 网络仅在有效时间内接受信号幅度的变化. 因此, 通过取样门(门宽 T_g) 的有效积分时间大于不完全积分器的积分时间, 等于

$$RC \times \frac{T_{\text{rep}}}{T_g},$$

式中 RC 是取样积分器的时间常数. RC 增大将提高信噪比, 但不能无限加大 RC 值, 否则将使信号的高次谐波分量滤除.

3. 扫描时间 T_s

T_s 时间内总共取样 n_t 次, 所以一次测量时间内的取样次数

$$n_t = \frac{T_s}{T_{\text{rep}}} = T_s \times f. \quad (7)$$

按 n_t 次取样, 取样门自延迟时间为 0 的触发信号位置开始, 向与时基 T_b 相等的位置逐渐改变延迟时间. 因此, 一次取样后门移动的时间间隔 Δt 等于

$$\Delta t = \frac{T_b}{n_t} = \frac{T_b}{T_s \times f}, \quad (8)$$

Δt 为取样点的间隔. 如每一信号点测一次, T_g 必须等于 T_b/n_t . 这样, 门脉冲将是一个紧挨一个, 最后包括全部信号, 也即门恒开(恒开)的情况. 如取样门宽不是这样, 而是比较“宽”, 则在门脉冲移动 T_g 时间段时由于步进延迟的时间为 Δt , 故取样次数 n_s 等于

$$n_s = \frac{T_g}{\Delta t} = \frac{T_g \times T_s \times f}{T_b}, \quad (9)$$

n_s 为每一取样点测量的次数. 由式(9)可计算信噪比 S/N 改善 $\sqrt{n_s}$ 时所需的 T_s 值.

为使时间分辨率达到 T_g 的水平, 不完全积分器的响应时间, 即时间常数 RC 与动作时间 $n_s T_g$ 相比必须很短. 我们选 RC 为 $n_s T_g$ 的 $\frac{1}{5}$ 得

$$RC \leq \frac{n_s T_g}{5} = \frac{T_g^2 \times T_s \times f}{5 T_b}. \quad (10)$$

由此得最小 T_s 为

$$T_{s, \text{最小}} = \frac{5 \times T_b \times RC}{T_g^2 \times f}. \quad (11)$$

慢扫描时间越长, 信号再现的正确程度就越高. 例如, 一个长度为 2ms 的信号需要进行测量. 这时选: $T_b = 3\text{ms}$, $T_g = 100\mu\text{s}$. 如果 T_{rep} 为 1s 并希望 S/N 改善为 10, 则 $n_s = 100$,

$$T_{s, \text{最小}} = \frac{5 \times 3 \times 10^{-3} \times \frac{100}{5}}{100 \times 10^{-6} \times 1} = 3 \times 10^3 \text{ s (50分)},$$

$$RC = \frac{n_s T_g}{5} = 2\text{ms}.$$

实际上, 增大 RC 可以进一步改善 S/N 值, 但要防止信号失真. 通常可通过对信号某一变量(如幅值)监视来掌握 RC 增大程度.

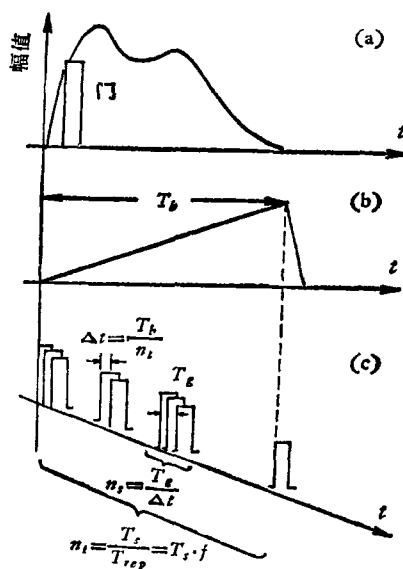


图5 扫描速度、时基与取样次数的关系
(a) 信号波形; (b) 时基; (c) 门

4. 时基 T_b

它由被测信号的宽度来决定。被测信号的宽度可先用示波器来估测,通常 T_b 选得略大于被测信号的宽度。如果仅仅对信号中某一部段感兴趣, T_b 就可以选得小一点。

扫描速度、时基与取样次数的关系如图 5 所示。

四、工作方式和限制

取样积分器的工作方式取决于取样脉冲门的工作状态,通常有四种工作方式。

1. 连续方式

这时取样门恒开,所以没有信号与参考相关改善 S/N 的问题。类似于信号通过许多一个紧挨一个的取样门脉冲来进行读出,每一点只测一次。仪器作为一个稳定放大器工作,并起低通滤波器的作用。

2. 外接门方式

这时,信号送至触发输入时取样门开。取样门宽比信号的重复周期窄得多,并且通过取样保持电路,每周取样一次后保持至下一周取样开始。这样,我们可以排除不感兴趣的各点而仅测量信号的某一点,并可通过延迟电路任意调节被测点的位置,所以这种方式是缩短测量时间的有效办法。如测量时已知信号的精确波形,就可确定感兴趣“点”的位置而进行测量。

如取样门宽和信号宽度一样大小,则其工作方式就和锁相放大器的相敏检波方式一样了。这时测出的是输入信号的平均值。

作零值检测时只要把延迟时间调到信号的零交点,即可进行精确的测量。

3. 外触发方式

这时,触发信号加至外触发输入,选定触发脉冲极性和电平后即可对时基电路进行触发。时基的锯齿波与慢斜波经比较器给出随时间移动的取样门脉冲,用这种方式可以逐点对信号进行记录和平均,从而给出完整的被恢复了的信号波形。

4. 自动方式

这时,时基发生器自动给出锯齿波,并给出触发脉冲以供实验用。

使用取样积分器恢复信号时,必需满足若干条件。首先,在 T_s 时间内信号必需是重复的,但不一定是周期的。问题是被测信号本身不一定严格的重复,常常被测样品经过 T_s 时间后性能发生了变化,例如老化以致完全坏了。这时就不宜用取样积分器,也就是说取样积分器的一大弱点是测一波形需花很长的时间,即时间效率低。其次,信号必须与触发脉冲同步,否则就丧失相关性而不能抑制噪声,达不到从噪声中提取信号的目的。再次,由电路及元器件水平所决定的动态范围、门宽及保持时间等都应满足用户需要。

五、典型应用

1. 核磁共振

第一台取样积分器就是用在核磁共振中的^[3]。取样积分器广泛用于脉冲核磁共振的测量中,以改善信噪比。

测自旋晶格弛豫时间 T_1 时利用 $90^\circ-\tau-90^\circ$ 脉冲序列,则

$$M_z = M_0\{1 - \exp(-\tau/T_1)\} \quad (12)$$

式中, M_z ——第一个 90° 脉冲后时间 τ 的核磁化强度; M_0 —— M 的热平衡值。

由式(12)知,当 $\tau = T_1$ 时, $M_z/M_0 = 0.632$ 。所以,如果 $90^\circ-\tau-90^\circ$ 脉冲序列之时间间隔比 T_1 大得多,在第一和第二个 90° 脉冲后的自由感生信号幅值分别正比于 M_0 及 M_z 。测量时可先将一信号送入通道 1, 后一信号送入通道 2; 通道 1 的信号衰减 0.632 倍后,与通道 2 之信号相比,观测信号差。改变时间 τ , 当 $\tau = T_1$ 时,此差为 0。因此, T_1 可以用数字时间间隔仪精确测量 τ 来达到^[12]。

2. 荧光

通过对荧光材料的发光强度变化的研究,可以了解诸如结构、成份和能级等基本物理问题,以及确定发光现象与激发过程的联系等等,

所以近年来对荧光过程的研究引起了人们很大的兴趣。但是，由于光电接收器和电子线路的噪声及光子噪声，往往比所欲测量的信号大得多，因此必须采用信号平均的办法来进行测量。图6是一个典型的荧光光谱仪。可调谐的染料

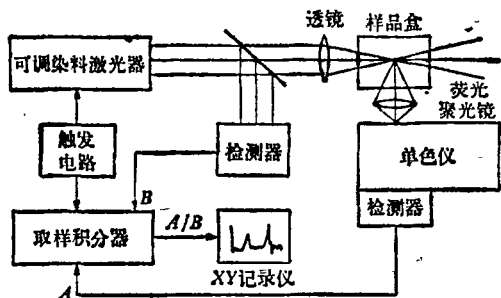


图6 典型的荧光光谱仪

激光器的输出聚焦在样品盒上，荧光聚焦后由单色仪进行分析。图中所用的取样积分器是双通道的。通道A用来监视荧光信号，通道B用来监视可调染料激光器的输出。通过A/B处理，以变化很大的激光器输出归一荧光衰落曲线，从而得到很“干净的”结果。

如以一已知速度对单色仪或激光器输出进行扫描，用门扫描的方式来监视荧光光谱，这样就可以得到样品“干净的”荧光光谱。

利用取样积分器研究毫微秒荧光光谱是当前最有效的方法之一。

3. 超声

脉冲超声和超声探伤是广泛用来研究材料特性的一种方法。

脉冲超声通过对声波在材料中传输的衰减特性的研究，可得到材料中应力和应变关系的弹性常数。图7表示一个被测样品夹在一已知特性的缓冲块(如Al)内，一个发送压电晶体安

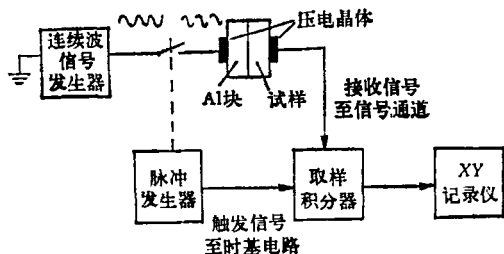


图7 利用脉冲超声对材料的测量

在这个夹心饼的一端，另一接收晶体安在另一端。以一300Hz的连续波脉冲加至夹心饼上，并由接收器检测。通常，被检测的信号很弱，并混有随机噪声，所以必须采用取样积分器。

在航天技术中必须研究材料的强度和焊接裂纹等问题。图8是一个超声焊接检验装置。它利用取样积分器和脉冲迴波技术进行非破坏测试和检查。在有噪声的情况下可以有效地检测超声裂纹信号。

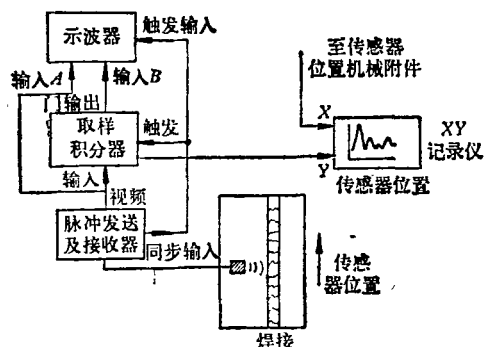


图8 超声焊接质量检查

4. 激光

取样积分器有效地应用于激光器件和激光光谱的研究。图9是一个研究激光器的典型实验装置。全部典型测量，包括输出脉冲形状、脉冲宽度和作为阴极电压与氮气气压函数的放电时间、作为阳极电压与氮气气压函数的脉冲输出能量以及脉冲重复频率等参数，都可用取样积分器进行。在图示的实验装置中，用一个光电二极管与取样积分器相连；此二极管的开关速度要比欲测脉冲快。触发电路用来驱动氮激

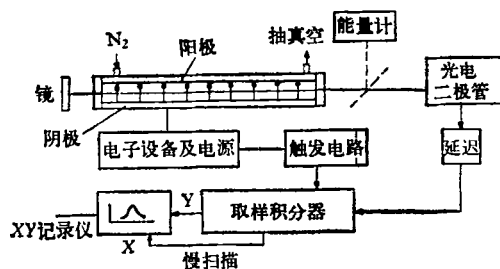


图9 激光器研究的设备

光器和触发取样积分器。在测量脉冲形状时采用门扫描工作方式，其结果如图10所示。

5. 生物物理

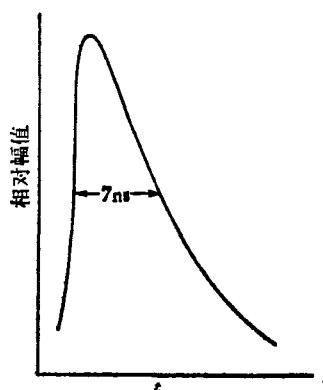


图 10 用门扫描方式得到的脉冲波形

在研究大脑皮层反应的实验中也可以用到取样积分器,这时加一个刺激(听觉、视觉或触觉的刺激)于被试者,引起唤起(Evoked)响应^[13],通过头皮电极取出信号。因为唤起响应是混在其它脑电信号中的,所以通过取样积分器与刺激信号同步,可以作出与非相干信号无关的脑电延迟曲线。由于生理信号的重复性往往不够理想,所以还可以用连续磁带记录,然后闭环再现得到满意的结果。

关于连续磁带加取样积分器提取信号的详细分析,请参考文献[14]。

当然,取样积分器的应用远不止上面讲到

的这些。它在瞬态 Hall 效应、气体放电等离子体振荡、非线性光学、X 射线衍射、超导体中磁场渗透、声子弛豫时间、以致发动机点火燃烧分析等许多方面,都得到了应用。在文献[2]中列举了数十种用途。随着科学技术的发展和我们对取样积分器掌握程度的深入,取样积分器将更广泛地应用于各个领域。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院物理研究所微弱信号检测小组, 江西省庐山电子仪器厂,《物理》, 6-4(1977), 206.
- [2] 中国科学院物理研究所微弱信号检测小组,《物理》, 6-6(1977), 335;7-1(1978), 45.
- [3] D. F. Holcomb and R. E. Norberg, *Phys. Rev.*, 98(1955), 1074.
- [4] Thomas Coor *Industrial research*, 14-5(1972), 52-56.
- [5] PAR, *Signal averagers*, (1977).
- [6] Brookdeal 公司有关产品说明书及样本.
- [7] BRUKER, B-KR300Z15 取样积分器说明书.
- [8] 熊野辉雄, 电子科学, 22-4 (1972), 113-117.
- [9] 田中省作、小林洋志, 电子展望, 9 (1975), 73-85; 11(1975), 78-83.
- [10] TA, *Instrumentation* (1975).
- [11] PAR, *Condensed catalog* (1976/77).
- [12] L. Niemelä, *J. Physics E*, 5-6(1972), 526-528.
- [13] J. F. Harris et al. *Science*, 172(1971), 1252-1253.
- [14] G. Palmer et al., *J. Physics E*, 9(1976), 783-786.

基本物理常数的精密测量

——它在物理学和计量学中的意义

沈 乃 激

(中国计量科学研究院)

基本物理常数是物理学的一些普适常数,据不完全统计,约有三十几个,它们之间有着深刻的联系。选择独立的五个常数,可以表示所有其他基本常数或组合量。这五个常数是:电子电荷 e , 电子静止质量 m_e , 普朗克常数 h , 真空中光速 c 和阿伏伽德罗数 N_A 。因为质量、电荷和作用是量子化的,其相应的常数为 m_e 、 e 和 h 。质量和能量相联系的常数是 c , 通过 h 从能量过渡到频率(时间)和长度单位。阿伏

伽德罗数 N_A 是联系宏观量与微观量的常数。通过 m_e , e , h 和 c 可以描述在量子电动力学范围内的微观物理学,加上 N_A 又与宏观电动力学建立了对应的关系。因此,这些独立常数相当于物理学中的单位。

一、基本物理常数的重要性

基本物理常数的发现和测量,在物理学的