

脉冲计数与数字化测量^{*}

邹书文 林天章 黄光桂

(中山大学物理学系, 广州 510275)

摘 要 数字化测量的数字编码采用脉冲的个数来表达. 模数转换的 V/F 或 V/T 变换所得的频率或时间间隔内的脉冲数, 由计数器测量获得量化值. 脉冲计数有两种计数方式和两种测量方法, 它的量化取值和量化误差遵循一定的分布规律. 脉冲计数的方式方法不同, 量化误差和数值显示的式样就不一样. 可采用各种方法减小量化误差提高测量精度.

关键词 数字化测量, 模数转换, 脉冲计数, 量化误差

分类号 TM 932

自 50 年代初第一台数字电压表问世以来, 数字化测量技术发展迅速, 数字式电测仪表正在取代各种传统的模拟式仪表. 实践证明, 数字式仪表具有测量精度高、测量速度快、读数客观等一系列优点, 是我们从事科学研究和教学的得力工具. 它之所以具有如此优良性能, 是由于它的各种变换与量化技术. 但脉冲数字编码的脉冲计数要产生量化误差, 对测量精度和仪器的正确使用有影响, 为此, 我们作了较为深入的研究.

1 数字化测量技术中的脉冲计数

由于脉冲信号抗干扰能力强, 脉冲计数方便而准确, 因而数字式仪表的数码普遍采用脉冲的个数来表达.

数字化测量的核心是模数转换. 模数转换若按量化程序和特点来分可有两大类. 用得最广的一类是, 将各种被测量先经过被测量—直流电压变换器变换为直流电压, 然后由 V/F 转换器变换成相应的周波频率 F , 由计数器获得频率的量化值, 译码显示. 或者, 变换为直流电压后由 V/T 转换器变换成相应的时间间隔 T , 然后将时间间隔转换为电脉冲数由计数器获得量化值译码显示. 有些物理量可直接变换成相应的频率或者时间间隔. 如果本身就是频率或时间间隔, 当然就更容易了. 另一类则是, 将被测量变换成直流电压与一个根据脉冲数编码的可变直流电压相比较, 在最终平衡时获得代表可变电压的编码量, 译码显示. 除上述二类外, 也出现一些较为复杂的复合类型或派生型式, 但基本构思是相似的.

我们已看到, 不论哪一类, 最后的数字编码都是通过计得的脉冲数来实现的. 但是, 两类的脉冲数达到代表模拟量的程序是不同的. 前者是将最后变换得的模拟量频率或时间间隔内脉冲数, 由计数器获得量值后就完成; 而后者, 由脉冲数得到一个相应的编码电压与

* 收稿日期: 1997-03-31 邹书文, 男, 58 岁, 副教授

被测电压相比较,达到平衡时的脉冲数就是被测量的量值,可见其先后顺序与前者相反.由计数法测量原理可知,前者对频率的测量,门控宽度即闸门时间是已知的,而对时间间隔的测定,是通过计得间隔内的已知脉冲周期的脉冲数来实现的.可见两种测量都属于门控脉冲计数.就是说,前一类的模数转换的量化机理的特点就是门控脉冲计数.显然,后一类的模数转换不具有这一特点.我们将看到,不同的量化机理,产生的量化误差也不相同.

2 脉冲计数遵循的分布规律

脉冲计数通常指的就是门控脉冲计数.具体上实现简单说就是,让一个两输入端闸门(如逻辑与门)的一输入端输入门控脉冲信号控制闸门的启闭,另一输入端输入周期性的计数脉冲信号,在闸门开启时间内通过的脉冲数由计数器计得.正如人们所知的,计得的脉冲数 N 只能是整数,是量化值.实际应用中,脉冲计数有两种方式:① 闸门与计数器分开,即闸门截取的脉冲束传输给随后的计数器计数(常见于计数法原理图的表示);② 闸门与计数器一体,即闸门截取脉冲的同时计算脉冲数(如单片 IC 通用计数器).现设门控宽度为 t ,计数信号是占空比为 θ 周期为 f 的矩形脉冲,则有 $t = N_0 f = (N_i + N_f) f$, N_0 为真值,一般不恰为整数, N_i 是它的整数部分, N_f 为尾数.

门控脉冲计数的测量方法可有两种情况.现首先讨论的一种是,闸门开启时刻截取计数脉冲的位置是随机的.不难想象,相同的闸门在不同时刻开门计得的脉冲数可能不一样.就是说, N 是随机变数.对设定的信号,按两种计数方式,经统计分析^[1]我们得到如下结论:

(1) N 服从两点分布.设 N 的两个取值为 N_1 和 N_2 ,它的出现概率为 $p(N_1)$ 和 $p(N_2)$,且令 $p = p(N_1)$,则分布参数与测试信号间关系有如下两种形式:

计数方式为分开的

$$N_1 = N_i + \text{INT}(\theta + N_f), \quad N_2 = N_1 - 1 \quad (1)$$

$$p = \theta + N_f - \text{INT}(\theta + N_f), \quad p(N_2) = 1 - p \quad (2)$$

式中引进了计算机算法语言的取整函数 $\text{INT}(x)$.

一体方式的

$$N_1 = N_i + 1, \quad N_2 = N_1 - 1 = N_i \quad (3)$$

$$p = N_f, \quad p(N_2) = 1 - p = 1 - N_f \quad (4)$$

(2) 与 N 相应的量化误差 ΔN 也是随机变数,同样服从两点分布.设 ΔN 的两个取值为 ΔN_1 和 ΔN_2 ,对应上述两种计数方式分别有

$$\Delta N_1 = N_1 - N_0 = 1 - N_f + \text{INT}(\theta + N_f), \quad \Delta N_2 = N_2 - N_0 = \Delta N_1 - 1 \quad (5)$$

$$\text{和} \quad \Delta N_1 = N_1 - N_0 = 1 - N_f, \quad \Delta N_2 = N_2 - N_0 = -N_f \quad (6)$$

其出现概率与相应 N 的取值概率相同.

若考虑 θ 和 N_f 的各种可能取值可得出:① 当 $\theta + N_f \geq 1$ 时, N 的取值分开的比一体的分别多 1;② 相应两种计数方式的量化误差的取值范围分别有

$$-1 < \Delta N < 2 \quad (7)$$

$$\text{和} \quad -1 < \Delta N < 1 \quad (8)$$

分开方式的为不对称分布,而一体的则对称.

门控脉冲计数测量方法的第二种情况是,门控信号与计数信号间位置关系不是随机的而是固定的,即开门时刻落在计数脉冲上的位置是固定的不变的(如由计数信号脉冲沿触发

闸门同步打开),显然,脉冲计数 N 将是固定数,取值唯一,或是 N_1 或是 N_2 . ΔN 相应为 ΔN_1 或 ΔN_2 . 误差的取值范围对分开方式分别为

$$0 < \Delta N_1 < 2 \text{ 和 } -1 < \Delta N_2 < 1 \quad (9)$$

对一体方式分别为

$$0 < \Delta N_1 < 1 \text{ 和 } -1 < \Delta N_2 < 0 \quad (10)$$

比较可见,两种计数方式有如此差别,是由于分开方式的与 θ 有关,而一体的则无关. 当 $\theta \rightarrow 0$ 时,前者趋于后者. 经分析还可知,产生量化误差的根本原因是由于门控宽度不为计数脉冲周期的整数倍 ($N_f \neq 0$); 且一体方式的误差较小,分布也较窄.

3 脉冲计数的数字化测量应用

为了更具体理解和应用上述的理论结果,现以随机测量为例先作实验验证. 实验时使用相同的门控信号(闸门时间同为 t)和相同的计数信号(同样的占空比 θ 和脉冲周期 f),用两种计数方式同时进行脉冲计数的测量(实验装置见本室的实验讲义). 现将几组测量数据以及分别相应一体方式的取值 N_1 、 N_2 和分开方式的取值 N'_1 、 N'_2 计得的量化误差 ΔN_1 、 ΔN_2 和 $\Delta N'_1$ 、 $\Delta N'_2$ 列示于表 1. 由表可见,取值的测量值与理论值(根据前述式子易心算得,未列出)一致;而且当 $\theta + N_f \geq 1$ 时,分开方式的取值确有分别多 1,误差也特别大.

表 1 两种计数方式的取值和误差

t/s	$\tau/\mu s$	θ	N_0	N_1	ΔN_1	N_2	ΔN_2	N'_1	$\Delta N'_1$	N'_2	$\Delta N'_2$
1	949.22	0.7589	1053.50	1054	0.50	1053	-0.50	1055	1.50	1054	0.50
0.1	141.84	0.5000	705.02	706	0.98	705	-0.02	706	0.98	705	-0.02
0.1	115.00	0.5000	869.75	870	0.25	869	-0.75	871	1.25	870	0.25
0.1	505.56	0.1100	197.80	198	0.20	197	-0.80	198	0.20	197	-0.80
0.01	54.148	0.8942	184.68	185	0.32	184	-0.68	186	1.32	185	0.32

经理论到实验的证实,可以得出结论:一体计数方式要比分开方式优越. 因而现普遍使用的是一体方式的计数器. 我们见到的各种数字式仪表的模数转换器也是如此. 现就参照这种计数方式的理论结果讨论分析一些问题.

3.1 量化误差与测量精度

数字化测量的误差来源是多方面的,而从实际情况看,量化误差是其中重要一项,因而对测量精度影响较大,且又视不同的转换类型和测量方法而异. 就第一类转换而言,在各类物理量测量中量化误差的具体取值有:

(1) 交流电信号或电脉冲信号的频率、周期、两脉冲间的时间间隔,以及最终要经 V/f 转换器变换的被测量电压、电流、功率等的测量,通常是随机的,因而这类测量的脉冲计数量化误差为 $-1 < \Delta N < 1$. 也就是说这些测量的数字输出有 ± 1 LSB(最低有效位)的量化误差. 有的被测量不由单一量化量决定,则要综合考虑各量的误差影响,如两同频率信号的相位差测量,就要同时测出代表相位的时间间隔和信号周期的脉冲数.

(2) 对某些时间间隔 T 以及最终要经 V/T 转换器变换的被测量的测量,其中 T 包含的脉冲数的测定通常采用固定的方法. 现用得最多的双积分型 V/T 转换器^[2],对定压积分时

间 T_2 的脉冲数的固定测量, 是通过严格的时序控制来保证每次起始计数的位置相同而实现的. 因而, 这类测量的量化误差应为 $-1 < \Delta N < 0$. 如在 T_2 的截止时间后计数器执行加 1 操作, 则为 $0 < \Delta N < 1$. 不同的测量仪器只能是其中之一. 常见的直流电压和建立在双积分转换基础上的对直流电流、交流电压、电流等电量以及对电阻、电容、电感等电路参数的测量, 就属于这一类.

有些量似乎应按随机方法测量, 但实际上采用的是固定测量法, 或者反过来. 这要视具体技术条件和要求而定. 但不管怎样, 测量方法一定, 相应的量化误差随之而定.

由以上可见, 量化误差不但是总误差中的重要项, 且因其显然不随实际计得脉冲数多少 (数值显示多大) 而变因而也是固定项. 对低频或偏离满量程较远的测量, 影响尤大. 但我们可以根据脉冲计数的内在关系找到减小其影响的相应办法. 由量化误差的分布可知, 其最大值为 ± 1 , 这就是通常说的“ ± 1 误差”. 假设计得的脉冲数为 N , 则相对误差为 $\pm 1/N$. 可见, 增大 N 可减小相对误差. 在实际应用中也正是这样做的. 如测量频率, 可通过倍增闸门时间的多周期测量法增大 N 从而达到提高测频的精度; 测量时间间隔 (周期、积分式转换器的积分时间等), 可通过提高时钟脉冲的频率来增大 N 从而提高测量的分辨力, 如双积分型数字电压表的定时积分的脉冲数, 3(%) 位的通常是几千个, 而基本结构相同的 4(%) 位表则为几万个. 对频率的等精度测量则是双重利用的结果: 在采用同步门办法使门控宽度始终为待测信号周期整数倍实现无量化误差测量的同时, 又利用提高内部时钟信号频率增大开门时间测得的脉冲数从而提高门宽的测量精度. 作者亦曾为此提出过一些新方法^[1].

至于模数转换的第二类, 显然, 这里的脉冲计数仅仅用于数字编码, 并不产生量化误差. 量化误差产生于编码电压与被测电压比较上的所谓“量化不定性”, 其值为测量的数字输出的 $\pm (\%) \text{LSB}^{[3]}$.

3.2 连续测量的数值显示和读取

脉冲计数的测量方法不同, 不但影响到测量数值的内含 (误差的分布和大小), 还影响到它的外表——显示式样 (是否稳定显示一个值). 用数字式仪表测量, 通常工作在连续测量 (按一定时间间隔测量一次, 循环不断; 亦可由人工操作专设按键来实现) 的方式. 在如此测量过程中, 脉冲计数的随机测量分布规律就会得到体现, 因而, 用数字频率计测量频率、周期等的时候, 频率计按两点分布交替显示两个值; 而测量直流电压或其他通过变换技术变换为直流电压的被测量, 只要被测量稳定, 显示值将是始终如一的定值 (除非积分器的定压积分截止时间落在脉冲触发计数的边缘上). 这是两种不同的显示式样. 正是由于如此, 我们就可根据脉冲计数的取值概率分布决定两个显示值应选读哪一个. 根据式 (4) 和 (6), 读取出现频数较多的那一个误差较小.

通过分析, 掌握脉冲计数的有关规律和它在数字化测量中所起的作用, 不但有利于仪表制造技术的提高, 亦有利于使用者了解仪器的工作原理, 克服面临不断增加新的数字式仪表带来的生疏与不便. 从实践中体会到, 正确使用这些仪器, 科学获得和处理测量数据, 对科研教学工作是很重要的.

参 考 文 献

- 1 邹书文. 脉冲计数量化误差的研究与应用探讨. 电子科学学刊, 1990, 12 (5): 547- 551
- 2 郭戎生, 古天祥, 陆玉新, 等. 电子仪器原理. 北京: 国防工业出版社, 1987. 188- 192
- 3 G B 克莱顿. 数据转换器. 王春元译. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1985. 6- 7

Pulse-Counting and Digital Measure

Zou Shuwen^{*} *Lin Tianzhang* *Huang Guanggui*

Abstract The digital code of digital measure adopts the numbers of pulse to express. The quantized value of frequency from the V/F and the quantized value of pulse numbers in the interval of time from the V/T are acquired by the counter measure in analogy-digital conversion. There are two kinds of count mode and two kinds of measure method to count pulse numbers which quantized values and quantized errors follow a definite distributive law. The count mode and measure method of pulse-counting are different from another, and the quantized error or the mode of value display are also different. There are varieties of method to decrease the quantized error and to increase the measurable accuracy.

Keywords digital measure, analogy-digital conversion, pulse-counting, quantized error

^{*} Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275