

以VFC脉冲序列为变量的继电保护硬件 运算新方法

葛亦兵[✉]

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 数字信号处理基础理论中, 连续时间变量函数的微积分运算问题的处理, 都可转化为其相对应离散信号的差分与累加运算。目前此原理在微机型继电保护方面的应用都是基于定间隔采样值的软件运算。此文提出一种上述理论的新应用类型, 将采样及运算过程融入到A/D转换的离散、量化和编码环节, 用以简化运算量开销提高保护性能。[方法] 以VFC串行脉冲信号的即时序列和延时序列为变量, 以计数器为核心运算硬件, 配以脉冲延时等器件构建单重和多重“浮动运算窗口”实现微积分和相量加减的硬件同步运算。选择性引用成熟的软件保护算法理论, 通过区间变换演算到新方法算式并提出回路构建模式。[结果] 经讨论和演算得出下列结果, 用新方法可以构成电气量的瞬时积分值、瞬时采样值、定积分有效值, 并且用它们还可搭建相量和整套保护。[结论] 虽与软件运算基于相同的基础原理, 但其运算物理过程十分简洁, 可完成高精度同步运算, 并形成多种算子, 可构建多种原理的保护方案。

关键词: 微机保护算法; 脉冲序列; 浮动窗口; 计数器; VFC

中图分类号: TM7; TM63

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)03-0125-06

开放科学(资源服务)二维码:



A New Operation Method of Relay Protection Hardware with VFC Pulse Train as Variable

GE Yibing[✉]

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] In the basic theory of digital signal processing, the calculus operation of continuous time variable function can be transformed into the difference and accumulation operation of corresponding discrete signal. At present, the application of this principle in microcomputer type relay protection is based on the software operation of fixed interval sampling value. In this paper, A new application type of the above theory is proposed, which integrates the sampling and operation process into the discrete, quantization and coding links of A/D conversion, so as to simplify the computational overhead and improve the protection performance. [Methods] The real-time sequence and delay sequence of VFC serial pulse signal were taken as variables, the counter was taken as the core computing hardware, and the single and multiple "floating operation Windows" were constructed with pulse delay devices to realize the hardware synchronization of calculus and phasor addition and subtraction. Based on the mature theory of software protection algorithm, the new algorithm formula is obtained by interval transformation and the loop construction mode is proposed. [Result] After discussion and calculation, the following results are obtained. The new method can be used to construct the instantaneous integral value of the electrical quantity, the instantaneous sampling value and the effective value of the definite integral. [Conclusion] Although the operation is based on the same basic principle as software operation, the physical process of operation is very simple, which can complete high-precision synchronous operation, and form a variety of operators, which can construct a protection scheme of multiple principles.

Key words: microcomputer protection algorithm; pulse train; floating window; counter; VFC

模拟量和数字量之间的转换,是将模拟量离散为等幅的、不等间隔(与电压大小成比例)的脉冲序列,这个脉冲序列显然是一个串行信号,同时,也是模拟量时间函数的离散表达。它既有数字量的准确性,也有模拟量的即时性。在传统的数字技术应用中,通过计数器与定时器实现定间隔 T_s 周期采样完成AD转换功能。

继电保护性能通常以选择性、速动性、灵敏性和可靠性四个方面进行评价。同样衡量微机保护算法的优劣取决于精度与速度。速度又可由算法要求的数据窗长度和运算工作量两个方面评判。本文研究的新方法将运算与采样过程融合在数字化编码过程中,直接将VFC等幅脉冲序列及其动态延时段作为变量输入到计数器,并形成运算窗口,用计数器的即时值表征运算结果,基本不损失输入脉冲序列信号的时间精度与幅值精度。运算速度方面,可只考虑运算数据窗因素,与之相比运算过程所占用的时间几乎可以忽略,从而形成高精度的同步运算。

1 VFC电路输出信号特点

图1展示了VFC信号与对应模拟电压的关系。回路输出的最高频率 f_{\max} 、最低频率 f_{\min} 对应输入回路的最高电压瞬时值 U_{\max} 、最低电压瞬时值 U_{\min} 。显然,当 $f_{\max}-f_{\min}$ 区间值较大时,会有较高的电压幅值分辨率。频率上限 f_{\max} 受回路性能制约,下限 f_{\min} 值要兼顾序列脉冲时间间距颗粒度。电气量过零点对应回路偏置电压 $U_p = (U_{\max} + U_{\min}) / 2$ 。

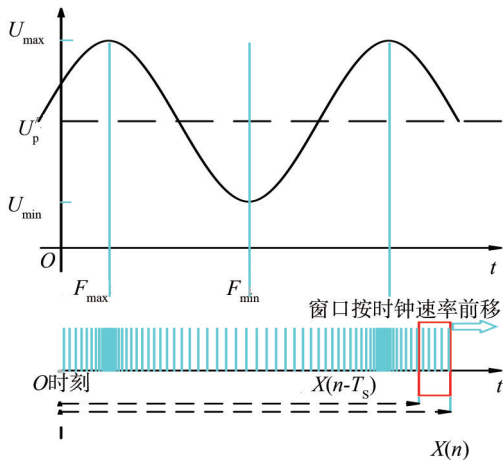


图1 电压频率与运算窗口对应关系

Fig. 1 Correspondence between voltage frequency and operation window

2 VFC信号传统的采样应用原理

目前,VFC用于AD转换的原理如下:VFC回路输出脉冲的频率远大于工频电气量频率50 Hz,在一段小的采样时间 T_s 内对脉冲方波计数,由定时器控制计数器进行定时计数,得到数字量 D 与此电压成正比,表示为下式:

$$D = \int_{\tau}^{\tau+T_s} f(\tau) d\tau \approx \int_{\tau}^{\tau+T_s} K_v \cdot U_{in}(\tau) d\tau \quad (1)$$

$$= K_v \int_{\tau}^{\tau+T_s} U_{in}(\tau) d\tau$$

式中: D 为计数器的数值; t 为计数器起始时间; $t+T_s$ 为计数器结束时间; K_v 为VFC电路转换系数; U_{in} 为VFC电路转换时刻值。

计数器输出的数值送入微机寄存器,进行后续的软件运算处理,在一个工频周期内有固定的采样点数,采样点数与工频频率的乘积就是采样率。

3 VFC脉冲序列硬件运算新方法的讨论

基本思想:VFC串行脉冲序列信号兼具数字量和模拟量的双重特性。一方面,它是离散量,它的每个脉冲间距能代表一个电压量,它还是一个可量化量,运用不同量化方法会有不同的精度与分辨率。并且能直接与数字电路接口。另一方面,它可以认为是电压值在时间轴上的脉冲密度分布表达。如图1所示,将电压幅度二维变量转变为脉冲密度的一维变量。因此利用VFC串行脉冲序列信号为变量进行运算可以按模拟量的微积分基础理论来理解。原理简单,输出量随输入量变化即时变化,且是精确可存储的并行数字量。

数学建模:新方法运用VFC串行脉冲序列信号为变量。这里 $x(n)$ 是模拟量 $x(t)$ 对应的VFC不等间隔的离散脉冲序列,在表达上与目前的数字处理运算都是基于采样值的运算式含义不同。文献[1]运用了VFC序列全计数值与输入电压的积分关系,实现了电流互感器电流模拟量的同步采样并通过了MATLAB仿真验证。计数器全计数对应模拟量全积分运算可以认为是即时运算(运算窗口宽度为0)。新方法也正是以此为基础推导出一系列微积分算法。对应于新方法运用数字信号处理基础理论“模拟函数的微分与积分运算对应离散函数的差分与累加计算”,新方法进一步运用 $x(n)$ 全序列累加值与 $x(n-T)$ 延序列累加值相减而形成“浮动窗

口”算法。对应于“浮动窗口”的微积分方法，新算法运用了数学的变限积分概念及算式来体现。

运算方法：将微积分“运算区间”对应“浮动窗口”，“浮动窗口”转化为“变上限区间”，变上限区间对应不同长度的脉冲序列全累加。文献[2-3]都能从数学角度说明对连续函数的积分上限函数的上限求导等于被积函数。对应于“浮动窗口采样运算”全累加函数的差分就是采样值。文献[4]从数学理论角度对比了连续函数微积分运算性质与离散数列运算性质。运用文献[5]第一章知识，新方法符合线性时不变系统的运算原理。同时也是新方法适用于相量运算的依据。此文中的“半周积分算法”、“突变量算法”、“差动保护算法”参考了文献[6]，包括“电气相量的积分算法”也是由参考文献中的“导数算法”演变而来。

主要计算硬件：

1) 脉冲存储器—用于形成现有信号 $x(n)$ 的一个或多个延时信号 $x(n-T)$ 。

2) 计数器—运算的核心器件，输入为多个串行的脉冲序列，输出为并行数字信号。它是多端输入的增加、减法可逆脉冲计数器。

以下就新方法的实现原理及回路构建方式展开讨论。由单信号简单变量到多信号复合变量，最后列举了新方法构建双端电流差动保护的完整方案。

3.1 不定积分与变限积分运算

基本思想：VFC电路产生的等幅脉冲序列是时间变量的函数，直接完全计数等价于模拟量的积分，可用时间 t 为上限的变上限积分表达，所以也是输入量随时间同步变化的函数。

模拟量表示式为：

$$y(t) = \int_0^t x(t) dt = \int x(t) dt + C \quad (2)$$

数字量表示式为：

$$y(n) = \sum_0^n x(n) \quad (3)$$

式中： $y(t)$ 为输出电气量函数； $x(t)$ 为输入电气量函数； $x(n)$ 为VFC电气量脉冲序列； $y(n)$ 为脉冲运算输出并行数字量； n 为VFC脉冲序数。

图2给出了此运算的硬件实现方法。 $p(n)$ 表示图1中偏置电压对应的等间隔脉冲序列。

变限积分是不定积分的一个特例，是本文后续其它窗口运算区间变换后的基本构成项。对于正弦

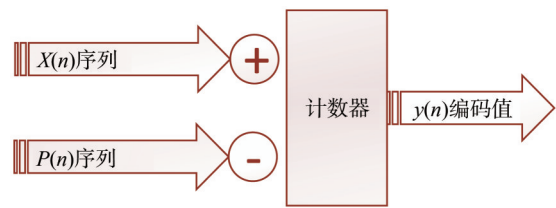


图2 变上限积分运算对应的全计数回路结构

Fig. 2 Structure of full count loop corresponding to variable upper limit integral operation

函数，它本身就能表征原函数电气量的大小，是比原函数滞后 $\pi/2$ 的函数，其瞬时幅值与原函数在时间上有互补性。计数器实现信号的全积分运算，运算精度与脉冲序列信号本身的精度一致，运算时间为计数器变位时间，是同步运算。

3.2 浮动窗口采样运算

基本思想：采样本身就是一个窗口运算，窗口通过区间变换成为两个脉冲序列的差。也可认为是全累加函数脉冲序列的差分。此处形成的是“浮动窗口”，与传统的采样方式相比采样更新率和精度都能提高几个数量级，与相比传统的采样窗口跳动不同，它是平滑移动的。图1能直观反应模拟电量、VFC脉冲序列和“浮动窗口”间的对应关系。

模拟量表示式为：

$$y(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (4)$$

数字量表示式为：

$$\begin{aligned} y(n) &= \left[\sum_{i=n-T_s}^n x(n) \right] / T_s \\ &= \left[\sum_0^n x(n) - \sum_0^{n-T_s} x(n) \right] / T_s \end{aligned} \quad (5)$$

式中： T_s 为采样区间（与传统的采样周期定义不同）。

图3是“浮动窗口”采样运算回路的硬件构成示意，与图2的输入量相比，没有输入 $p(n)$ 偏置脉冲。这是因为浮动窗口的长度是常量，由于 $p(n)$ 偏置脉冲是一个等时间间隔脉冲，在时间长度为常数 T_s 的浮动窗口内部分也总是常量。窗口宽度取值与采样值更新速率无关，但与采样值精度负相关。虽然这种差分运算仍属于近似计算，且有 $T_s/2$ 长度计算窗口延时。由于取值不存在计算量增加的制约，窗口可以进一步缩小。

3.3 半周积分浮动窗口运算

基本思想：半周积分浮动窗口运算即 $T_s = \pi$

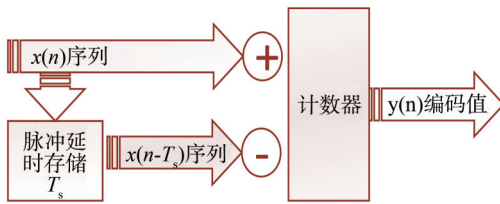


图3 微分运算对应的浮动窗口采样回路结构

Fig. 3 Differential operation corresponding to the floating window sampling loop structure

(10 ms)的取绝对值积分运算，是假定输入信号是一个正弦函数，在任意半周内，其绝对值积分（求面积）是常数。它计算的是电气量的有效值。

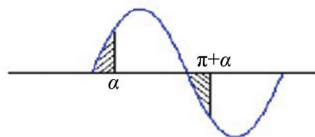
模拟量表示式为：

$$y(t) = \int_{t-\pi}^t |x(t)| dt / \pi \quad (6)$$

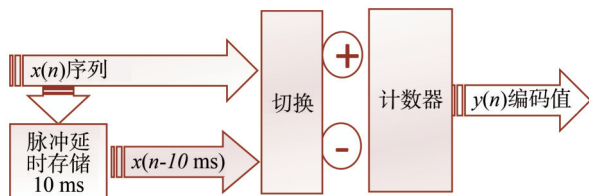
数字量表示式为：

$$y(n) = \left| \sum_{t-\pi}^t x(n) \right| / \pi = \left| \sum_0^t x(n) - \sum_0^{t-\pi} x(n) \right| / \pi \quad (7)$$

式(6)和(7)所示为绝对值运算，窗口宽度10 ms。由于是求绝对值，图4比图3采样运算比多了一个比较切换电路，通过比较脉冲信号的周期 T_n 与偏置脉冲的周期 T_p ，来切换即时信号 $X(n)$ 与延时信号 $X(n-10\text{ ms})$ 在计数器的加减法输入端位置，实现负半周变号。理论上，此方法对于正负半周对称的周期函数都能输出稳定值。又因为参与运算的是10 ms窗口内的脉冲序列全计数值，因此还能精确反映10 ms区间的有效值的瞬变过程。本方法中是融合采样与运算的一次窗口运算，因而不损失信号信息。它会存在5 ms长度计算窗口延时。



(a) 半周期积分原理波形图



(b) 回路结构图

图4 半周期积分运算对应的浮动窗口运算回路结构

Fig. 4 The structure of floating window operation loop corresponding to half-cycle integral operation

3.4 微分、差分运算与电流突变量算法

基本思想：与模拟量微分运算相对应的是数字量的差分运算，采样值是对脉冲序列的一次差分，微分运算就对脉冲序列二次差分。

模拟量表示式为：

$$y(t) = d\left(\frac{dx(t)}{dt}\right) dt = \frac{d^2x(t)}{(dt)^2} \quad (8)$$

数字量表示式为：

$$\begin{aligned} y(n) &= \left[\sum_{t-T_s}^t x(n) - \sum_{t-2T_s}^{t-T_s} x(n) \right] / T_s \\ &= \left[\sum_0^t x(n) - 2 \sum_0^{t-T_s} x(n) + \sum_0^{t-2T_s} x(n) \right] / T_s \quad (9) \end{aligned}$$

模拟量的微分运算对应数字量的差分运算，如式(8)和(9)，对相邻的两个采样值进行减法运算。两个相邻采样区间值有三个时间刻度，形成两个窗口，表达式如式(9)，电路实现如图5，延时回路需要一个大于 $2T_s$ 的脉冲序列存储器分别在 $2T_s$ 和 T_s 时间间隔输出。 T_s 延时信号的减法输入端直接在计数器的二进制“10”位输入，实现乘2计算。二次差分运算也属于近似计算，且有 T_s 长度计算窗口延时。

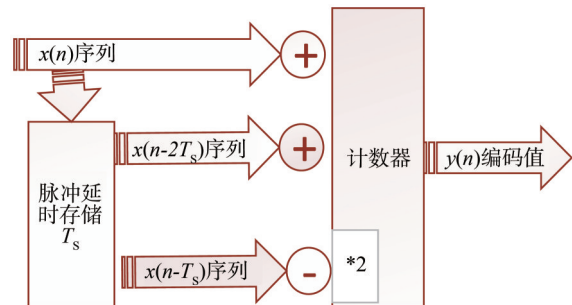


图5 二次微分运算对应的二次差分运算回路结构

Fig. 5 The structure of quadratic difference operation loop corresponding to quadratic differential operation

在微机保护的突变量算法中，选用一个或两个周期间隔窗口的减法运算如表达式：

$$\Delta i_\varphi = |i_\varphi(t) + i_\varphi(t - T)| \quad (10)$$

$$\Delta i_\varphi = |i_\varphi(t) - 2i_\varphi(t - T) + i_\varphi(t - 2T)| \quad (11)$$

式(10)和(11)中绝对值号内的部分分别与式(5)和(9)结构相同，周期为 $T=20\text{ ms}$ 替换 T_s ， $i_\varphi(t)$ 、 $i_\varphi(t-T)$ 和 $i_\varphi(t-2T)$ 是三个时刻电流值。如果直接套用图3和图5， Δi_φ 对应的是电气量“积分值”的差。如需对应“采样值”，可对计数器输出的并行数字即时值进行 T_s 差分运算，也就是说，把先差

分再加减变换成先加减再差分，可按加、减法的结合律原理来理解。此方法比构成三次窗口的脉冲量运算要简单的多，实际上也可在直接用“积分值”运算或与“采样值”一起应用，体现两个值的互补性。

3.5 电气相量的积分算法

基本思想：表征一个正弦量大小常用到瞬时值、有效值。显然有效值为计算量更为稳定，且在此硬件算法中简单高效，但它有10 ms的运算窗口。一个正弦量值的大小也可以用相量的模来表征，在这里，函数“采样值”本身做它的实部，函数的“微分”或“积分”函数值可以做它的虚部。上述的硬件运算方法中，积分比微分更为简单、精确且运算窗口短。通过实部与虚部的瞬时值，就能计算出相量的幅值与相角。形成下列基本电气量的算法。

$$I = \sqrt{\frac{i_1^2 + I(t)^2}{2}} \quad U = \sqrt{\frac{u_1^2 + U(t)^2}{2}} \quad (12)$$

$$X = \frac{U(t)i_1 - u_1 I(t)}{i_1^2 + I(t)^2} \quad R = \frac{u_1 i_1 + U(t)I(t)}{i_1^2 + I(t)^2} \quad (13)$$

小写字母表示采样值，大写字母表示积分值。式中的变量都是计数器的输出值，套用3.2和3.1部分的“采样”与“积分”算式及回路完成，运算窗口长度同采样运算。算式由专用硬件完成，是不超过二进制16位整数的并行运算，运算频率不超过MHz级别。对于多变量输入的计数器变量，在硬件运算时应在高于末位的位置触发演算，避免数据过于摆动消费运算资源。此方法实际上是复数的相量模表达方法。

3.6 本文提出的差动保护算法

基本思想：差动保护原理简单，动作可靠，广泛地应用于电力网络各个环节。无论是动作元件还是制动元件大多是电流量的加减运算，并且动作量与制动量形成相似的运算结构，可以在不等式两端对应简化运算。因此本文提出的基于脉冲序列计数器输入运算在差动保护原理中更能体现其优越性。

传统差动保护动作判据：

$$|I_m + I_n| > k_b |I_m - I_n| \quad (14)$$

此式中电流向量和、差的模分置于不等式的两端，式中的m和n分别表示被保护区的两侧，无论是不等式右端的动作量，还是左端的制动量，可以把保护区域两侧的和、差运算融入到脉冲序列算

法当中。存在下列两种情况：

第一种方法用半周期浮动窗口积分法。可用将式(7)式代入式(14)，用瞬时值绝对值的半周积分表达向量的模。两侧和、差与积分运算均在计数器环节完成。参照图4以动作量和制动量分别对应构成两个计数器回路，每个回路分别输入两侧的瞬时脉冲序列和它们的延时10 ms脉冲序列。两个回路的输出值经制动系数折算后直接进行比较。绝对值变号条件是：动作量部分 $T_m + T_m < 2T_p$ ，制动量部分 $T_m - T_m < 0$ 。

第二种方法用复数的相量模的积分法时，将式(12)代入不等式(14)转化为下列不等式：

$$\sqrt{i_{m+n}^2 + I_{m+n}^2} > k_b \sqrt{i_{m-n}^2 + I_{m-n}^2} \quad (15)$$

同(12)式，小写字母表达采样值，大写字母表达积分值，构成不等式的四个电流“和、差”复合值对应四个计数器回路。“采样”与“积分”运算参照图3与图2构成脉冲序列运算组。如本节第一种算法，回路输入量需输入两侧的对应脉冲序列。式(15)的均方根算式可对称消除不等式两侧的开方号，计数器输出的并行数字量只需专用硬件进行平方和运算。

3.7 需说明的几点问题

新方法传统的算法基于相同的基础原理，但在思考方法上存在较大差异，目前能直接对照应用的系统性参考文献不多，本文的叙述也是综合了各方面知识的创新性表达，需要大体说明。当然是否恰当合理在诸多方面需进一步探讨。

1) 文中将VFC串行脉冲序列视为等面积微元的数字量，有数字量与模拟量的双重属性。而在微积分的基本定义过程中极限和微分也是用离散的概念解析连续函数，它们之间有天然的对对应性。

2) 文中将VFC串行脉冲序列整体看成变量，通过即时序列与延时序列间运算形成计算窗口，将脉冲序列与微积分及采样运算统一起来。

3) 文中通过变限积分的形式将变限区间与运算窗口及串行脉冲序列长度联系在一起。

4) 应用于微机保护的VFC脉冲回路工作频率可达MHz级别，与电气工频10倍频频率500 Hz相比也远高于奈奎斯特定理要求的几个数量级，是超高冗余采样，用本方法运算速度和精度存在数量级的提高空间。而与GHz级辅助并行数据运算的时

钟频率(参考目前的DSP及FGFA等器件)相比又能低几个数量级。因此新方法的辅助并行运算的时间花费与运算窗口比几乎可以忽略。

4 结论

本文提出的VFC脉冲序列硬件运算能够实现最大限度的时间相关性解耦。将数字运算向模拟传变过程端推进,将采样与运算过程融合。算法原理及回路构成简单高效。VFC脉冲序列硬件运算是对脉冲序列的全计数运算,有效控制了信息量损失,运算窗口移动平滑、同步且精度高。与传统的基于定间隔采样值保护算法相比,在速度与精度及可靠性能方面都有几个数量级的实质提高。同时消除了软件运算时间的不确定性,很大程度的解决了微机保护精度与速度间的矛盾;VFC脉冲序列硬件积分运算的“半周期绝对值积分”的电气量有效值运算十分简洁高效。而用积分法表达相量的算法运算窗口极短。VFC脉冲序列信号的硬件运算理论上对信号本身的畸变、函数的类型均有较大兼容,不存在函数拟合运算,理论上无须进行专用数字滤波。且可以构建多种微机保护的算子与算法,完全具备构成硬件高速运算的多种整体解决办法。

文中提出的算法,目前相关领域内还很少有这方面的研究,如能实现必然在高速运算领域有广阔的应用空间,也会打开数字硬件构成新的思考方向。同时,由于回路极简,利用VFC正负极信号的互补性构建类似差分运算回路的复合运算电路,还能进一步提高回路的精度与速度。如果将定长度运算窗口扩展到变量可控长度窗口,还存在多类型变量的复合运算空间。当然,以上的一系列方法只是基于相关理论的定性推论,还欠缺进一步严密数学推导和实验结果验证。此文提出的方法目前尚无实际的硬件实验支持,在实际应用中还可能存在许多方面的待解难题。

参考文献:

- [1] 李伟,尹项根,张哲,等.用于电子式电流互感器的压频变换积分新方法[J].电力系统自动化,2008(8):88-92.
LI W, YIN X G, ZHANG Z, et al. A new integrated method of voltage frequency conversion for electronic current transformers [J]. Power System Automation, 2008(8): 88-92.
- [2] 王远民,田卫章,梁俊奇.变限积分函数的性质[J].商丘职业技术学院学报,2010(2):11-12.

WANG Y M, TIAN W Z, LIANG J Q. Properties of variable-limit integral function [J]. Journal of Shangqiu polytechnic, 2010(2):11-12.

- [3] 吕纪荣,王士虎.关于变限积分函数求导问题的研究与应用[J].数学学习与研究:教研版,2015(19):134-135+137.
LU J R, WANG S H. Research and application of derivative of variable limit integral function [J]. Mathematics Learning and Research: Teaching and Research Edition, 2015 (19): 134-135+137.
- [4] 吴楠.求和 Σ 与积分 \int 的若干性质比较研究[J].教育教学论坛,2014,6(23):118-119.
WU N. A comparative study on some properties of summation Σ and integral \int [J]. Education and Teaching Forum, 2014, 6 (23):118-119.
- [5] 朱冰莲,方敏.数字信号处理[M].北京:电子工业出版社,2014:8-29.
- [6] 邵能灵,胡炎.微机保护技术及其工程应用[M].北京:中国电力出版社,2010:22-24.
- [7] 武义泉,杨书生,钟宜生.同步和异步电荷平衡式电压频率变换器误差分析[J].测控技术,2008(5):37-40.
WU Y Q, YANG S, ZHONG Y S. Error analyses of asynchronous and synchronous voltage to frequency converters [J]. Measurement and Control Technology, 2008(5): 37-40.
- [8] 李芙蓉,陈翔,葛荣尚.基于Rogowski线圈和压频变换的电流测量方法[J].清华大学学报:自然科学版,2000(3):29-32.
LI F Y, CHEN X, GE R S. Current measurement method based on Rogowski coil and voltage frequency transform [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2000 (3): 29-32.
- [9] 庞浩,王赞基.一种基于压频变换和光电隔离的模数转换方法及系统:北京,CN1710622[P].2005-12-21.
PANG H, WANG Z J. An analog-to-digital conversion method and system based on voltage frequency conversion and photoelectric isolation: Beijing, CN1710622 [P]. 2005-12-21.
- [10] 邓军勇,蒋林,曾泽沧.G比特级通用可逆计数器的CMOS电路设计[J].西安邮电学院学报,2008(5):8-12.
DENG J Y, JIANG L, ZENG Z C. CMOS circuit design of G bit-class universal reversible counter [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2008(5): 8-12.

作者简介:



葛亦兵

葛亦兵(通信作者)

1966-,男,山西太原人,工程师,无线电技术专业学士,从事电力系统变电站二次设计(e-mail)geyibing@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)