

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.02.007

电子式电流互感器中的高精度数字积分器技术

李振华, 胡蔚中, 闫苏红, 程江洲, 李振兴

(三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 作为空心线圈电子式电流互感器的核心环节, 积分环节的效果决定着互感器的准确度。传统的模拟器件与理论值存在误差, 运放的漂移、电容的泄漏与损耗、时漂、温漂等问题都会影响着最后的精度, 对模拟器件的研究无法从根本上克服这些问题。与此同时, 数字积分器由于受环境温度、湿度、噪声、电磁场的干扰和影响较小, 可靠性和重复性高, 应用越来越广泛。笔者在对常用模拟积分和数字积分进行比对研究的基础上, 提出了一种基于龙贝格算法的含并行通道的数字积分器结构, 结果表明, 该数字积分器既可以降低误差, 又可以提高运算速度。

关键词: 电子式互感器; 模拟积分; 数字积分; 龙贝格算法

High Accuracy Digital Integrator Technology for Electronic Current Transformer

LI Zhenhua, HU Weizhong, YAN Suhong, CHENG Jiangzhou, LI Zhenxing

(Hubei Key Laboratory of Cascaded Hydropower Stations Operation & Control, China Three Gorges University,
Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: As the key technology of the electronic current transformer based on Rogowski coil, the accuracy of current transformers is determined by the effect of the integrator. Traditional analog devices has error with theoretical value, leakage and loss of drift operational amplifier and capacitor, time drift and temperature drift and other problems will affect the final accuracy, so the study on analog devices is unable to fundamentally overcome these problems. At the same time, digital integrator is almost not affected by ambient temperature, humidity, noise, electromagnetic interference and so on. It has high reliability and repeat-ability, and it is being applied more and more widely. Based on the comparison of commonly used analog and digital integrator, this paper proposes an improved digital integrator with parallel channel, which can reduce the error and improve the speed of computation.

Key words: electronic transformer; analog integrator; digital integrator; Romberg algorithm

0 引言

随着电力系统容量和电压等级逐渐提高, 传统的电磁式电流互感器因其体积大、重量重、动态范围窄、容易产生铁磁谐振、输出量为模拟量等缺点, 无法满足当前智能电网的要求^[1-4]。电子式电流互感器由于绝缘性能好、抗干扰能力强、不存在铁磁谐振和磁饱和、动态范围大等优点, 适应智能电网的

发展, 因此在数字化变电站中得到了广泛应用^[5-7]。

空心线圈电子式电流互感器是应用最为广泛的电子式互感器之一, 其二次侧输出电压是一次电流的微分, 要恢复与一次电流成正比例的信号就必须有相应的积分环节^[8-11]。实践证明, 空心线圈具备良好的线性度和准确度, 因此高精度积分电路的设计是确保电流互感器精度的关键。目前常用的积分技术有模拟积分器和数字积分器两种, 模拟积分器存在如下问题: ①实际应用中的模拟器件不是理想

收稿日期: 2015-10-06; 修回日期: 2015-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51507091); 湖北省自然科学基金(2015CFB219); 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室开放基金(2015KJX04)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51507091), Natural Science Foundation of Hubei Province (2015CFB219), Open Fund of Hubei Key Laboratory of Cascaded Hydropower Stations Operation & Control(2015KJX04).

器件, 运放的偏移、电容的泄漏与损耗, 其他模拟器件的时漂和温漂等因素都会对结果产生影响, 造成积分误差; ②传统模拟积分器的反馈和补偿的设计不够灵活, 会引入新的误差。相比之下, 数字积分器具有稳定、可靠性和重复性高的优点, 受环境温度、湿度、噪声、电磁场的干扰和影响较小, 得到越来越多的应用^[12-13]。

1 模拟积分器

1.1 典型模拟积分器

模拟积分器分有源和无源两种。无源积分器由于对信号的幅度有衰减, 输出阻抗较大, 在测量要求精度高的场合, 特别是工频小电流时会带来很大误差。因此对于工频电流测量, 常用有源积分器予以设计实现。

典型有源模拟积分器见图 1, 其传输函数为

$$H_1(s) = \frac{U_o(s)}{U_{in}(s)} = -\frac{R_2}{(1+R_2C_1s)R_1} \quad (1)$$

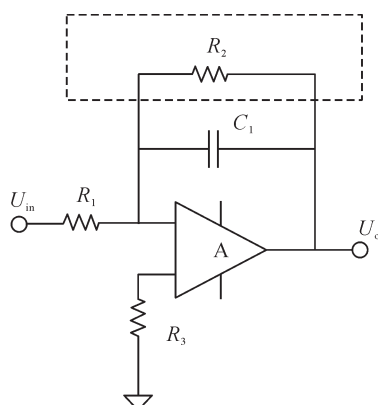


图 1 模拟积分电路

Fig. 1 Circuit diagram of analog integrator

理想模拟积分器不含图 1 虚线内的负反馈电阻 R_2 , 其传输函数为

$$H_2(s) = \frac{U_o(s)}{U_{in}(s)} = -\frac{1}{R_1 C_1 s} \quad (2)$$

理想模拟积分器中使用的运算放大器只有在线性工作区内可以正常工作, 存在饱和问题^[14]。因此在实际使用中, 在放大器的积分电容 C_1 两端并联反馈电阻 R_2 , 用以消除放大器的饱和。但是若积分器的反馈参数配置不当, 其暂态输出波形将严重失真。适当地提高积分器的反馈电阻值以及积分电容值可以改善其暂态传变特性。以上两种积分器共性的缺点为: 频率很小时, 增益很大, 因此信号中直流分量的影响较大。

1.2 模拟积分器的改进研究

文[10]提供了一种低频增益平坦积分器, 见图

2, 该积分器的传输函数为

$$H_3(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{R_0} \frac{\alpha_1 s + R}{\alpha_1 C_1 s^2 + \alpha_2 s + 1} \quad (3)$$

式(3)中: $\alpha_2 = R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_3 C_2$; $R = R_1 + R_2$; $\alpha_1 = (R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1) C_2$ 。该积分器的幅频特性在 40~80 Hz 范围内基本是一条直线, 相位基本稳定在 90°。在 0~5 Hz 之间, 增益较以上两种积分器有较大衰减, 但是在低频段存在一个峰值频率, 放大倍数可达工频的几十倍, 因此以上 3 种积分器在低频段工作时误差均较大。

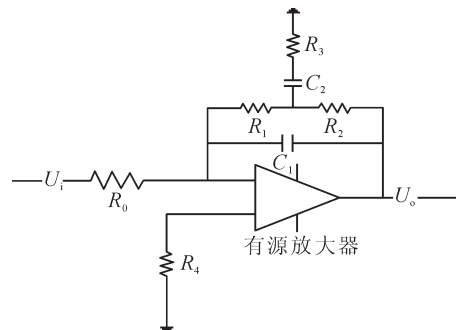


图 2 低频增益平坦积分器

Fig. 2 The low frequency gain flatness integrator

文[14]依据双线性变换法的原理, 利用式(4)实现了从 s 平面转换到 z 平面, 将式(3)转换为式(5), 从而将低频增益平坦模拟积分器转换为数字积分器的形式予以设计实现, 其中 T 为采样周期。

$$s = -\frac{2}{T} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (4)$$

$$H_4(z) = \frac{R_1 T}{R_2} \frac{1+z^{-1}}{(T-R_1 C) z^{-1} + T + 2R_1 C} \quad (5)$$

最后的设计结果为: 系统将输入信号中的直流分量影响减少为原来的四分之一, 即 0 Hz 时的幅频响应为 -12 dB, 有效降低了直流误差的影响, 对低于 20 Hz 的低频干扰信号进行了幅值上的抑制, 因此低频相移误差对测量结果影响很小。该方法的实质是用数字积分器构造模拟积分器的功能。

上述相关研究虽然对传统模拟积分器做了改进, 在测量精度和性能上都取得了一定的进展, 但总的来说只是在传递函数中引入调节系数, 无法从根本上避免模拟器件受时漂、温漂影响的问题。

2 数字积分器

数字积分算法常用的有牛顿科茨积分算法、龙贝格算法、高斯算法等。其中, 作为科茨积分算法中较简单的梯形、辛普森公式已经得到了深入研究和推广, 并在工频短时测量中取得较好的效果^[15-20]。

2.1 牛顿科茨积分算法

在电子式电流互感器中作为积分环节研究与

应用最多的是牛顿科茨积分算法,在该算法中:

一阶公式为

$$\int_a^b f(t)dt \approx \frac{h}{2} [f(a) + f(a+h)] \quad h=(b-a). \quad (6)$$

二阶公式为

$$\int_a^b f(t)dt \approx \frac{h}{3} [f(a) + 4f(\frac{a+b}{2}) + f(b)] \quad h=\frac{(b-a)}{2}. \quad (7)$$

三阶公式为

$$\int_a^b f(t)dt \approx \frac{3h}{8} [f(a) + 3f(a+h) + 3f(b-h) + f(b)] \quad h=\frac{(b-a)}{3}. \quad (8)$$

四阶公式为

$$\int_a^b f(t)dt \approx \frac{3h}{8} [f(a) + 32f(a+h) + 12f(\frac{a+b}{2}) + 32f(b-h) + 7f(b)] \quad h=\frac{(b-a)}{4}. \quad (9)$$

牛顿科茨积分算法的特点为:所用插值多项式的次数越高,相应求积公式的代数精度越高。但在实际应用中,高阶求积公式数值稳定性得不到保证。因此,为提高数值积分的精度,经常把积分区间分成若干小区间,在每个区间上使用低阶科茨公式,最后将结果累加,这种方法通常称为复化求积。

2.2 基于科茨算法的数字积分传递函数

将式(6)~(9)转换为 z 域形式,对应的传递函数如下所示:一阶公式对应梯形传递函数即式(10)、二阶公式对应辛普森传递函数即式(11)、三阶公式对应3/8Simpson传递函数即式(12)、四阶公式对应Boole传递函数即式(13)。另外,矩形传递函数为梯形的简化,所以给出矩形传递函数式(14):

$$H_T(z) = \frac{T}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}; \quad (10)$$

$$H_S(z) = \frac{T}{3} \frac{1+4z^{-1}+z^{-2}}{1-z^{-2}}; \quad (11)$$

$$H_{3/8}(z) = \frac{3T}{8} \frac{z^{-3}+3z^{-2}+3z^{-1}+1}{1-z^{-3}}; \quad (12)$$

$$H_B(z) = \frac{2T}{45} \frac{7z^{-4}+32z^{-3}+12z^{-2}+32z^{-1}+7}{1-z^{-4}}; \quad (13)$$

$$H_R(z) = T \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}}. \quad (14)$$

以上各种传递函数的幅值和相位响应见图3,由图3可以得出如下结论:共同点为低频幅值响应较好,梯形、辛普森和理想积分一样拥有 -90° 的相位特性。另外,由图3可知,由于高阶科茨算法的不稳定性,Boole和3/8Simpson公式存在着极点。

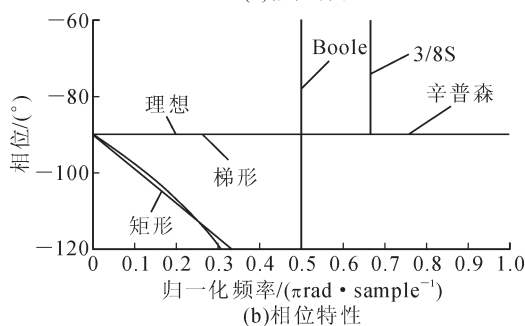
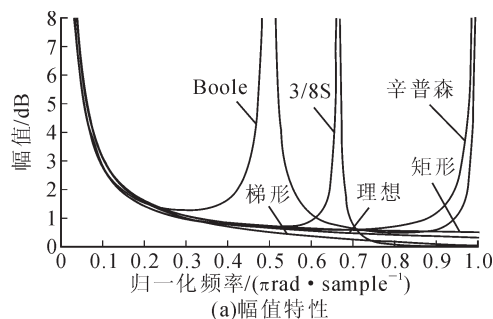


图3 不同数字积分算法的幅值和相位响应

Fig. 3 Magnitude and phase response of different digital integration algorithms

最后,由于各个传递函数幅值响应与理想积分器的误差可以互补,将其中任意两式按一定比例加权做和,可以得出一种新的传递函数。

2.2.1 矩形与梯形按权重组合

根据加权求和做出新传递函数的原理,文[15-16]提供了一种Al-Alaoui算法:将矩形公式和梯形公式按1:3的权重重新组合,并加入延时因子,得到的Al-Alaoui数字积分算法表达式为

$$H_A(z) = \frac{T}{16} z^{-0.2047} \frac{7+8z^{-1/2}+z^{-1}}{1-z^{-1}}. \quad (15)$$

针对式(15)仿真其幅值响应和相位响应,得出仿真图见图4。可知,Al-Alaoui数字积分算法非常接近理想积分的幅值响应曲线,相位特性优良,但关键问题为设计非整数的采样因子 $z^{-0.2047}$ 较为困难,实际使用中往往采用滤波器等效的方法,并不能达到设计的精度。

基于Al-Alaoui数字积分算法,文[17]提供了两种改进算法,其基本原理为将采样频率增加10倍,用以消除非整数的采样延迟,得出的数字积分器传递函数为:

$$H_{A1}(z) = \frac{5}{8} \times \frac{7z^{-2}+8z^{-7}+z^{-12}}{1-z^{-10}}; \quad (16)$$

$$H_{A2}(z) = \frac{5}{8} \times \frac{7z^{-2}+8z^{-7}+z^{-12}}{1-Kz^{-10}}. \quad (17)$$

文[17]利用这两种传递函数,结合采用PID反馈控制器、调整衰减系数等方法来改进其直流响应的方法,消除了目前数字积分器易受直流分量干扰、精度不高的问题,设计出一种满足0.2S级要求的电

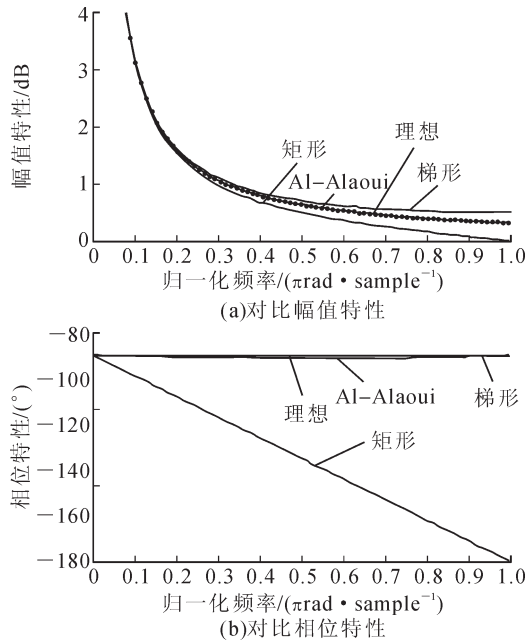


图4 Al-Alaoui、矩形、理想和梯形数字积分器幅值以及相位特性

Fig. 4 The amplitude and phase responses of the Al-Alaoui, rectangular, ideal and trapezoidal digital integrators

子式电流互感器。但是其问题也是显而易见的,计算量的增加计算速度的降低很难满足继保装置实时性的要求,硬件成本也大幅度增加。

2.2.2 梯形与 3/8 辛普森按权重组合

将这两种积分按照 1:9 的权重重新组合,得出新的传递函数 $H_{3\text{-segment}}(z)$ 为

$$H_{3\text{-segment}}(z) = 0.1H_{3/8}(z) + 0.9H_T(z) = \frac{3T}{80} \frac{13z^{-3} + 27z^{-2} + 27z^{-1} + 13}{1 - z^{-3}} \quad (18)$$

仿真出其绝对误差曲线见图 5。其优点在于:在高频(即 $0.5\pi \leq \omega \leq 0.65\pi$),其误差小于梯形和辛普森公式,但是极点的存在导致信号频率截止在 0.65 周期。

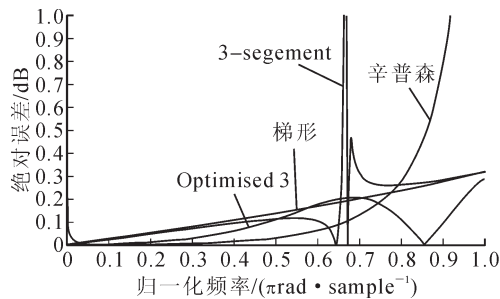


图5 梯形、辛普森、3-segment 和 Optimised 3 数字积分器幅值绝对误差

Fig. 5 Absolute magnitude errors of the trapezoidal, Simpson, 3-segment and Optimised 3 integrators

文[18]使用模拟退火(SA)算法将式(18)进行处理

以消除极点,得出新的传递函数 $H_{\text{optimised } 3}(z)$ 见式(19),根据绝对误差曲线对比可知,在经过处理后的传递函数消除了极点,成为全频带数字积分器。

$$H_{\text{optimised } 3}(z) = \frac{0.0647z^3 + 0.1617z^2 + 0.9625z + 0.8315}{z^3 - 0.2389z^2 - 0.4987z - 0.2619} \quad (19)$$

最后,文[20]在综合使用 Boole 公式和 SA 算法的基础上,所设计的传递函数为

$$H_{\text{optimised } 4}(z) = \frac{0.5678z^4 + 0.1013z^3 + 0.5629z^2 + 0.1519}{z^4 - 0.2097z^3 - 0.2106z^2 - 0.114z - 0.4636} \quad (20)$$

文[19]在牛顿科茨算法的基础上,结合最小相位数字积分器的原理,设计出一种 Ngo 传递函数为

$$H_{\text{Ngo}}(z) = \frac{T(9z^3 + 19z^2 - 5z + 1)}{24z^2(z - 1)} \quad (21)$$

为综合进行比较,将 $H_{\text{Ngo}}(z)$ 、Al-Alaoui、梯形、 $H_{\text{optimised } 4}(z)$ 传递函数的幅频特性与理想积分的绝对误差曲线以及相位特性绘出,见图 6。

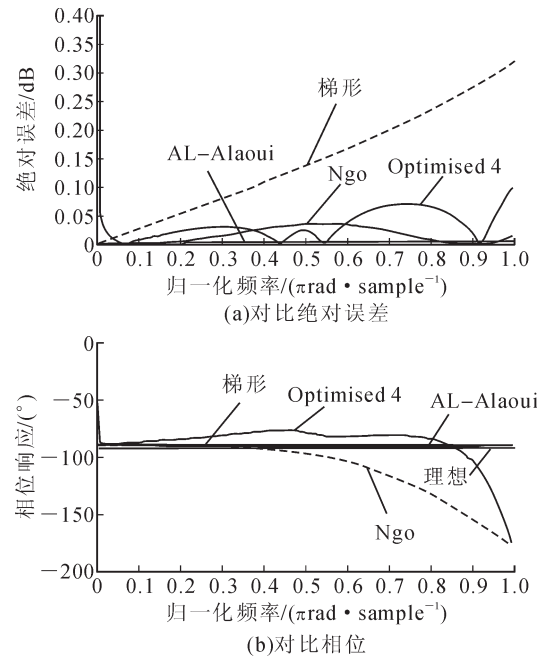


图6 改进形式的数字积分器绝对误差和相位特性

Fig. 6 Magnitude and phase response of improved digital integration algorithms

由图 6 可以得出如下结论:在不引入非整周期的延时因子的条件下, 0.37π 到 0.6π 期间 $H_{\text{optimised } 4}(z)$ 幅值响应较好,而在其余频带下, Ngo 传递函数误差较小,它们都避免了传统科茨传递函数高频响应较差的缺点。综合以上多种传递函数可知,目前已有的各种改进形式具有良好的高频幅值响应, Al-Alaoui 传递函数拥有最高的幅值精度,因此精确的设计非整数延时是提高数字积分器精度的关键。

2.2.3 提高采样频率并用滤波器等效

文[20]针对辛普森公式在四分之三个周期的精度高于梯形、矩形公式,而高频响应相对较差的情况,提供了一种辛普森传递函数的改进形式见式(22)。具体方法为将采样频率加倍,使用FIR或IIR滤波器等效法以消除延时因子,大幅度改善了数字积分器在高频段响应较差的情况。

$$H_s(z) = \frac{T}{12} \frac{-1+8z^{-1}+5z^{-2}}{1-z^{-1}} \quad (22)$$

根据文[21]中误差式,辛普森公式在0.95周期内的误差为0.3223,其改进形式的误差为0.0653,而梯形公式的误差为0.0753。虽然大幅度降低了辛普森传递函数在高频时的误差,但由误差数据对比可知,该改进形式即式(9)的相对误差和梯形公式保持在一个数量级上,对于数字积分器幅频特性的改善并不明显。另外,该改进形式的相位特性见图7,丧失了辛普森传递函数优良的相位特性,原因是引入了滤波器等效设计,需矫正相位。

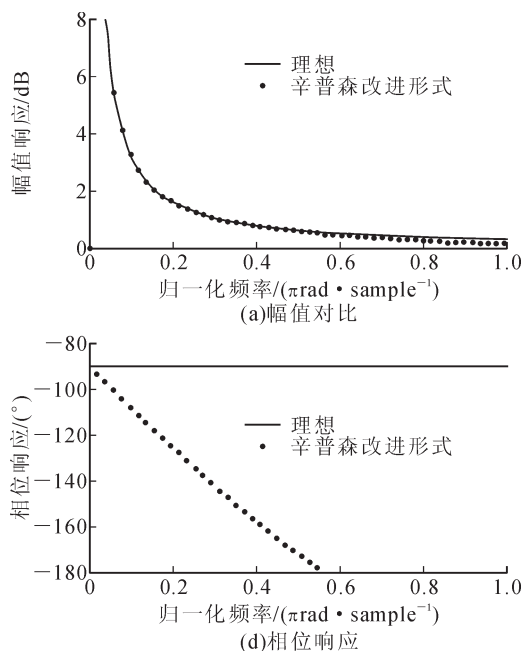


图7 辛普森改进形式幅值和相位特性

Fig. 7 Magnitude and phase response of the improved Simpson algorithms

2.3 龙贝格积分算法

龙贝格算法的原理为:使用梯形公式得到的积分近似值 $H_t^{(n)}$ 与精确值的误差大约是 $(1/3) \times [H_t^{(n)} - H_t^{(n-1)}]$,用该误差值作为对 $H_t^{(n)}$ 的一种补偿,其结果正好是辛普森公式得到的积分近似值 $H_s^{(n)}(z)$ 。对于科茨算法的高阶公式,也有类似的结论^[22]。根据该结论,归纳出龙贝格算法见式(23),其中, n 代表采样频率的倍数,取1代表采样频率加倍,取0代表采样频率不

变,取-1代表采样频率减半。龙贝格算法的基本原理见图8。

$$\begin{cases} R_{(n)(k)} = \frac{4^k R_{(n)(k-1)} - R_{(n-1)(k-1)}}{4^k - 1} \\ R_{(n)(0)} = H_t^{(n)}(z) \\ R_{(n)(1)} = H_s^{(n)}(z) \\ R_{(n)(2)} = H_{s3/8}^{(n)}(z) \end{cases} \quad \begin{matrix} (n=0,1,2,\dots; \\ k=1,2,3,\dots) \end{matrix} \quad (23)$$

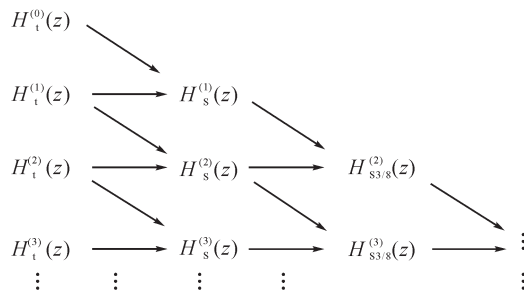


图8 龙贝格算法原理

Fig. 8 The principle of Romberg algorithm

2.4 基于龙贝格算法的数字积分器设计

根据牛顿科茨算法复化求积分的定义,得出复化矩形、复化梯形、复化辛普森公式如下。另外,为方便比较,引入误差 E_r 的对数 λ 这一数值,定义误差对数公式见式(27),其中 n 为采样频率的倍数:

$$H_r^{(n)}(z) = \frac{T}{2^n} \frac{z^{-0.5^n}}{1-z^{-0.5^n}}; \quad (24)$$

$$H_t^{(n)}(z) = \frac{T}{2^{n+1}} \frac{1+z^{-0.5^n}}{1-z^{-0.5^n}}; \quad (25)$$

$$H_s^{(n)}(z) = \frac{T}{3 \times 2^n} \frac{1+4z^{-\frac{1}{2^n}}+z^{-\frac{1}{2^{n-1}}}}{1-z^{-\frac{1}{2^{n-1}}}}; \quad (26)$$

$$\lambda = \lg E_r = \lg \int_0^{\alpha\pi} \left| H(jw) - \frac{1}{jw} \right| dw \quad \alpha=0.7 \text{ 或 } 0.95. \quad (27)$$

仿真公式(24)~(26)的幅值误差,并结合式(27)得出图9,最终由图9可以得出如下结论:

1)提高采样频率对于改善数字积分器的幅值特性有明显效果;

2)随着采样频率提高,相对误差下降速度为辛普森大于梯形,梯形大于矩形。

由于模数转换器分辨率的限制,实际工作中的电子式电流互感器的采样频率不可能无限制的提高,另外,综合采样点数和计算速度的要求,以及性价比,仅从提高采样频率来改善数字积分器并不可取。

文[22]利用龙贝格算法,结合提高采样频率降低误差的结论,得出,随着科茨算法中传递函数阶数的提高,提高采样频率的改善效果越明显的结论。将复合梯形公式做线性组合,得到复合辛普森

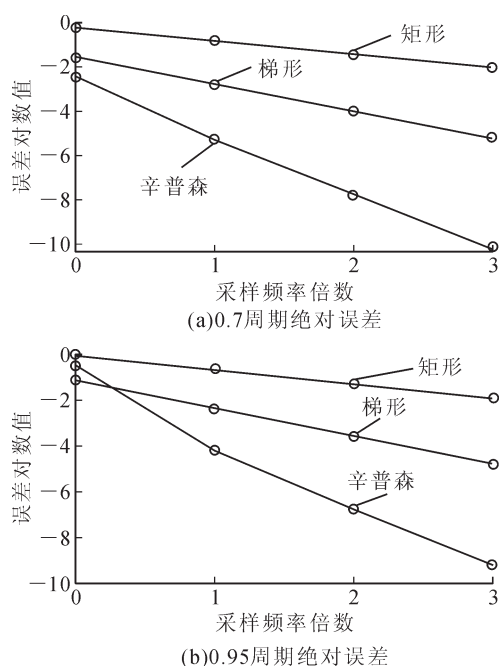


图9 复化矩形、梯形、辛普森公式误差

Fig. 9 The rectangular, trapezoidal and Simpson integrators error

传递函数,将辛普森再次线性组合,得到三阶公式,依次类推,依据误差式(27),得出使用龙贝格算法构造的新传递函数误差的对数均呈线性规律减少,从而可根据最低可接受误差的数量级选择构造一个新传递函数。至于产生非整数的采样延迟,则使用传统的级联滤波器的方式予以构造,具体的传递函数可以在DSP或FPGA中予以设计实现。使用该方法的缺点在于:即使用最简单的梯形公式在二分前后做线性组合,连续3次组合后得出的传递函数形式也极为复杂,导致需要的采样点数迅速增加,计算速度降低。同样,其设计形式也较为复杂。

文中利用龙贝格算法作为外推算法不用增加计算量即可提高精度的优点,提出一种拆分方法,反向分解了传递函数。将精度高但设计复杂的传递函数逆向分解为2个或3个以上的传递函数,形式见式(28),由图9可以观察到在 0.95π 内,该传递函数的误差为 10^{-4} 左右,精度较高,同时式(28)的形式也比较简单,易于设计,相位在整个频带均为 -90° 的直线,不用考虑相位特性的误差。

$$H_s^{(0)}(z) = \frac{T}{6} \frac{1+4z^{-0.5}+z^{-1}}{1-z^{-1}} = \frac{4}{3} \left(\frac{T}{4} \frac{1+z^{-0.5}}{1-z^{-0.5}} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{T}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \right); \quad (28)$$

$$H_t^{(0)}(z) = \frac{T}{4} \frac{1+z^{-0.5}}{1-z^{-0.5}}; \quad (29)$$

$$H_r^{(0)}(z) = \frac{T}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}. \quad (30)$$

由于计算机计算积分值采用区间逐次分半的方式进行计算,前一次分割得到的函数积分值在积分区间分半后还可以继续使用,因此选择双微处理器同步工作,每个微处理器中设计实现一条简单的传递函数,既可以保证计算精度的提高,同时又能做到设计难度、消耗时间的降低,采样点也可重复利用。笔者基于龙贝格算法,针对性地设计了一种双通道数字积分器结构,具有精度高、设计简单,该结构将在第4节中做具体介绍。

3 数字积分器的结构设计

3.1 数字积分器的结构

数字积分器的实现形式有多种形式,文[21]介绍了当前比较通用的3种结构。第1种为数据卡结合PC机,将空心线圈输出的电压信号经过适当放大后,送给数据采集系统采集,在PC机中进行积分运算。第2种是A/D(模数)转换器和单片机结合实现,A/D转换器将模拟信号转换为数字信号,在单片机中实现积分运算,相对于第1种方案硬件成本低,实时性高。缺点为当信号频率出现变化,获取 N 个采样点的时间与真实的信号周期不同,也会引起误差^[23-24]。第2种方案为当前主流数字积分器的结构框架,即A/D转换器结合微处理器实现,具体结构见图10。

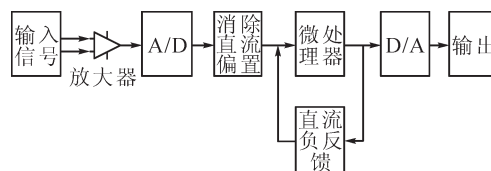


图10 常规数字积分器结构图

Fig. 10 The conventional structure diagram of digital integrator

文[1]在使用图10所示的数字积分器结构基础上,添加了前置电路进行信号调理和高通滤波,ADC采用16位模数转换器ADS8320,DSP采用TMS320LF2407A,DAC采用12位数模转换器TLV5616等,试制了采样频率为40 kHz的电流互感器样机,取得了相当高的精度。

3.2 基于龙贝格算法的数字积分器的结构

针对龙贝格式(28),文中设计双通道数字积分器结构见图11。空心线圈输出的模拟量微分信号首先通过有源放大器放大,经过高通滤波部分消除直流分量干扰,然后进入并行通道处理结构中。并行通道处理结构包含两个通道,设定主通道中的模数转换器采样频率为 f ,则误差补偿通道中的模数转换器采样频率为 $0.5f$,即误差补偿通道中的采样频率降低为主通道中的一半。信号经过模数转换器转

换后进入积分环节中进行数字积分处理,积分环节的传递函数可依据式(28)设计为两个复化梯形传递函数式(29)和式(30),数字积分单元和比例环节以微处理器作为硬件实现平台,数字积分单元的输出结果经过比例环节调整,进入加法器中相加后输出最后积分结果,提供给后续设备使用。对于龙贝格算法的后续高阶传递函数只需要改变相应的比例环节系数并设计积分传递函数即可,因此该结构是通

用的。

利用误差式(31),给出复化矩形、梯形、辛普森传递函数误差数据表。表1中第2行数据为传统数字积分器的误差结果,第3行为添加误差补偿通道后的结果。数据显示,构建误差补偿通道后,可有效降低误差。

$$E_r = \int_0^{\alpha\pi} \left| H(jw) - \frac{1}{jw} \right|^2 dw \quad \alpha=0.7, 0.95. \quad (31)$$

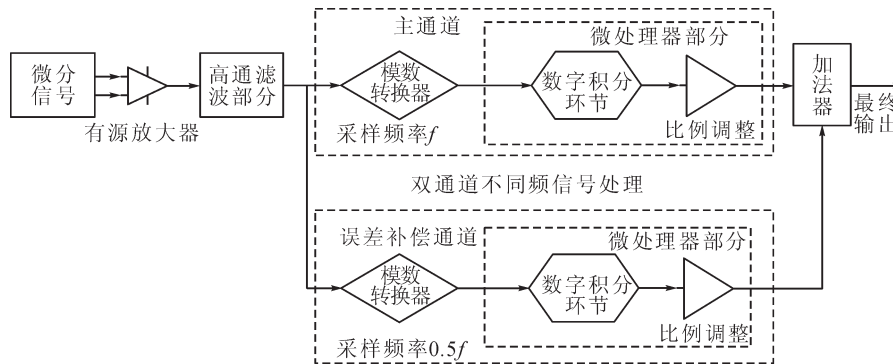


图 11 双通道数字积分器

Fig. 11 The digital integrator of double channel

表1 误差数据表

Table 1 The error data table

n	复化矩形公式 $R_{(n)(0)}$		复化梯形公式 $R_{(n)(1)}$		复化辛普森公式 $R_{(n)(2)}$	
	$\alpha=0.70$	$\alpha=0.95$	$\alpha=0.70$	$\alpha=0.95$	$\alpha=0.70$	$\alpha=0.95$
0	0.577 10	0.821 50	0.027 30	0.075 40	0.003 50	0.322 23
1	0.139 02	0.190 56	$1.576\ 90 \times 10^{-3}$	$4.026\ 60 \times 10^{-3}$	$5.425\ 40 \times 10^{-6}$	$5.738\ 90 \times 10^{-5}$

目前的数字积分器存在着结构单一的问题,单处理器中需要设计复杂的传递函数才可以满足精度要求,这也相当于增加了计算量,无法满足一些继保装置实时性的要求。文中所设计的双通道数字积分器具有设计简单、精度高的特点,同时积分环节程序的设计也可以降低,可以提高计算速度降低计算时间。

4 结语

由于模拟器件与理想器件存在一定差距,而采用数字算法的数字积分器因为受外界影响小,可靠性和重复性高,因而得到逐渐推广。但是国内目前对于数字积分器的研究局限在矩形、梯形、辛普森传递函数上,这些传递函数存在的共同缺点为高频响应较差,优点为设计简单,易于应用,相位特性较好。文中在深入研究了传统梯形、辛普森传递函数的基础上,综合介绍了多种具有良好响应的数字积分传递函数,并在原有的数字积分器结构上,设计出一种可以大幅度降低误差和计算时间的并行通道数字积分器,提高了数字积分器的精度。

参考文献:

- [1] 张可畏,王宁,段雄英,等.用于电子式电流互感器的数字积分器[J]. 中国电机工程学报,2004,24(12):104-107.
ZHANG Kewei, WANG Ning, DUAN Xiongying, et al. A digital integrator for electronic current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 104-107.
- [2] 高迎霞,毕卫红,刘丰,等.基于 Rogowski 线圈的电流互感器信号处理中积分算法的研究[J]. 电测与仪表, 2006(11):1-5.
GAO Yingxia, BI Weihong, LIU Feng, et al. Study on the integral algorithm of signal processing of current transformer based on Rogowski coil[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006(11): 1-5.
- [3] 钱国超,邹德旭,马仪,等.倒立电流互感器典型缺陷及制造关键工艺分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(2):73-77.
QIAN Guochao, ZOU Dexu, MA Yi, et al. Typical defects and key manufacture technology of the inverted minimum oil current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2): 73-77.

- [4] 袁洪亮. 油纸绝缘电流互感器用粘接剂研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(6): 72-76.
YUAN Hongliang. Study on the adhesives for oil-impregnated paper insulation current transformers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(6): 72-76.
- [5] 张卫东, 崔翔. 光纤瞬态磁场传感器的研究及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 89-93.
ZHANG Weidong, CUI Xiang. Research on optical fiber transient magnetic field sensor and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 89-93.
- [6] 陈晓明, 王晓琪, 郭克勤, 等. 互感器二次负荷调查统计与分析[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 63-68.
CHEN Xiaoming, WANG Xiaoqi, GUO Keqin, et al. Statistics and analysis of secondary load in instrument transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 63-68.
- [7] 段梅梅, 李振华, 李红斌, 等. 电阻分压型电子式电压互感器误差分析及对电能计量的影响研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(2): 59-63.
DUAN Meimei, LI Zhenhua, LI Hongbin, et al. Error analysis of resistance dividing type electronic voltage transformer and its impact on electric power measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(2): 59-63.
- [8] 朱超, 蒋煜, 梅军, 等. Rogowski 线圈中积分环节的研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 64-67.
ZHU Chao, JIANG Yu, MEI Jun, et al. Study on the integration of the Rogowski coil in[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 64-67.
- [9] 贾少磊. 基于拟积分算法的发电机局部放电在线监测技术的研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 81-86.
JIA Shaolei. On-line generator partial discharge monitoring technology based on quasi-integration[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 81-86.
- [10] AL-ALAOUI M A. A novel approach to designing a non-inverting integrator with built-in low frequency stability, high frequency compensation, and high Q[J]. IEEE Transactions: Instrumentation and Measurement, 1989, 38(6): 16-21.
- [11] 贾立敬, 张健文, 王传林, 等. 基于 DGA 的差分进化支持向量机电力变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 13-18.
JIA Lijing, ZHANG Jianwen, WANG Chuanlin, et al. Fault diagnosis of power transformer based on DGA of algorithm for SVM[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 13-18.
- [12] 高文, 施胜丹, 王小红, 等. 高压大功率双串联谐振多级电压式 DC-DC 变换器的研究[J]. 高压电器, 2014, 50(3): 50-57.
GAO Wen, SHI Shengdan, WANG Xiaohong, et al. Research on a kind of multi-level voltage DC-DC converter for high voltage and high power using dual series resonant net[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 50-57.
- [13] GUPTA M, JAIN M, JAIN N. A new fractional order recursive digital integrator using continued fraction expansion[J]. Power Electronics (IICPE), 2011(1): 28-30.
- [14] 谢完成, 戴瑜兴. 罗氏线圈电子式电流互感器的积分技术研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(5): 10-13.
XIE Wancheng, DAI Yuxing. Study on integration technology of electric Rogowski coil electronic current transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(5): 10-13.
- [15] AL-ALAOUI M A. Linear phase low-pass IIR digital differentiators[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(2): 697-706.
- [16] VERICA R. An alternative derivation of the Al-Alaoui operator[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2008(15): 881-882.
- [17] 宋涛. Rogowski 线圈电流互感器中的高精度数字积分器技术研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 237-244.
SONG Tao. High precision digital integrator technology research in Rogowski coil current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 237-244.
- [18] AL-ALAOUI M A. Novel class of digital integrators and differentiators[J]. Institution of Engineering and Technology, 1993, 29(11): 971-973.
- [19] NGO Q N. A new approach for the design of wideband digital integrator and differentiator[J]. IEEE Trans. Circuits Syst., 2006, 53(9): 936-940.
- [20] TSENG C C. Digital integrator design using Simpson rule and fractional delay filter[J]. IEEE Proceeding of Vision, Image and Signal Processing, 2006, 153(1): 79-86.
- [21] KUMAR B, CHOUDHURY D R, KUMAR A. On the design of linear phase FIR integrators for midband frequencies[J]. IEEE Trans. Signal Process., 1996, 44(10): 2391-2395.
- [22] TSENG C C. Digital integrator design using recursive Romberg integration rule and fractional sample delay[J]. IEEE Circuits and Systems, 2007, 153(1): 27-30.
- [23] 张明明, 张艳, 李红斌, 等. Rogowski 电流互感器的积分器技术[J]. 高电压技术, 2004, 30(9): 13-16.
ZHANG Mingming, ZHANG Yan, LI Hongbin, et al. Technology integrator in Rogowski current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(9): 13-16.
- [24] 林瑞聪, 缪希仁, 郭谋发, 等. 电抗器潜伏性故障特征及其耦合量分析综述[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 150-155.
LIN Ruicong, MIAO Xiren, GUO Moufa, et al. Analysis and review on reactor latent fault characteristics and its coupling parameter[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 150-155.

李振华(1986—), 男, 博士, 从事电子式互感器及其状态监测、电磁兼容方面的研究。

胡蔚中(1991—), 男, 硕士研究生, 从事电子式互感器关键技术研究。

闫苏红(1990—), 女, 硕士研究生, 从事互感器校验技术研究。