

基于 Rogowski 线圈的数字积分器实用化研究

尹明, 田志国, 周水斌

(许继电气技术中心, 河南 许昌 461000)

摘要: 积分器是基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器的关键环节。传统数字积分如梯形积分, 因不能抑制低频干扰而无法工程应用。提出将模拟积分转换为数字积分, 解决了直流饱和问题。并就工程中小信号误差大的问题, 提出了应用可编程增益放大器 (PGA), 通过切换量程提高精度的解决方法。该做法已在 TMS320F2812C 上具体实现, 在小信号时仍能达到 0.2 S 级精度。

关键词: Rogowski 线圈; 数字积分; 双线性变换; 小信号; 可编程增益放大器

Research on practicability of digital integrator based on Rogowski coil

YIN Ming, TIAN Zhi-guo, ZHOU Shui-bin

(XJ Electric Technology Center, Xuchang 461000, China)

Abstract: Integrator is the key element in an electronic current transducer based on Rogovski coil. Conventional integrator such as composed trapezoidal integral is not applicable to actual engineering project because of interference coming from low frequency signal. The paper proposes a method of translating analog integrator to digital integrator which solves DC saturation problem. In view of character that considerable measurement error is induced by small signal, programmable gain amplifier (PGA) is applied to system and high accuracy is obtained through switching scale. The method in this paper is implemented on TMS320F2812C and reached to 0.2 S class under the condition of small signal.

Key words: Rogovski coil; digital integrator; bilinear transformation; small signal; PGA

中图分类号: TM934.1 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)16-0099-04

0 引言

基于 Rogowski 线圈的电流互感器采用 Rogowski 线圈作为一次电流传感单元, 具有线性度好, 绝缘简单, 不含铁心, 无磁饱和现象, 测量带宽等优良特性而得到了广泛应用。由于 Rogowski 线圈二次输出是对一次电流的微分信号, 要恢复与一次电流等比例的信号就必须加入积分环节。

积分方法有模拟积分与数字积分方法。目前现场使用的多以惯性环节构成的模拟积分器。由于实际器件不是理想器件, 运放的漂移, 电容的泄漏与损耗等都会对积分结果产生影响^[1]。这就要求摆脱模拟积分的思路另辟蹊径。而数字积分性能稳定, 不受温度时间影响, 相位特性优良^[2]。模拟积分中模拟器件参数不同, 会引入轻微的相位响应波动, 需要进行相位校准。数字积分器的相位响应主要由算法决定, 具有一致性。因此近年来数字积分研究十分踊跃。数字积分一旦实用化, 模拟积分小信号

传输距离问题、现场调试难的问题便迎刃而解。但数字积分方法都是采用理想积分模型^[2-3], 系统特性为不收敛, 遇直流干扰将使 DSP 溢出, 这也是数字化变电站发展几年以来数字积分一直难以工程应用的主要问题。

本文从已经工程应用的模拟积分出发, 将其转换为数字方法实现, 消除了直流的影响; 同时在小信号时利用可编程增益放大器 (PGA), 从而减小了 ADC 量化误差的影响, 提高了小信号精度, 使之可以满足实际工程需要。

1 传统的数字积分算法

复化矩形、复化梯形、复化 Simpson 等方法 are 近几年研究较多的数字积分实现方法^[2-3]。罗氏线圈

还原一次电流原理为: $u(t) = M \frac{di(t)}{dt}$

$$i(t) = \frac{1}{M} \int_{t_0}^t u(x) dx + i(t_0) \quad (1)$$

则积分实质为由图 1 所示的面积求和。积分的具体实现如下所述：

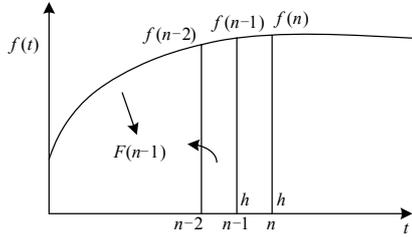


图 1 积分实现

Fig.1 Implement of integral

图 1 中： $F(n)$ 相当于一次电流， $f(n)$ 相当于电压，为罗氏线圈输出信号的采样点。第 n 点和第 $n-1$ 点之间面积可采用复化矩形、复化梯形、复化辛普森的方法近似求取。不同的求取方法，具有不同的系统函数。下面简单介绍复化梯形法原理。由图 1 得：

$$F(n) = F(n-1) + \frac{h}{2}[f(n-1) + f(n)] \quad (2)$$

$$H_T(z) = T(z+1)/2/(z-1) \quad (3)$$

定义 Ω 为模拟角频率， ω 为数字频率，他们之间的关系为 $\Omega = \omega T$ 。利用 $z = e^{j\omega}$ 和 $s = j\Omega$ 的关系代入到公式 (3) 可以得到复化梯形的数字频率响应式 (4)，其中 T 为采样间隔。

$$H_T(e^{j\omega}) = \frac{T(e^{j\omega} + 1)}{2(e^{j\omega} - 1)} \quad (4)$$

其频响曲线如图 2 所示。

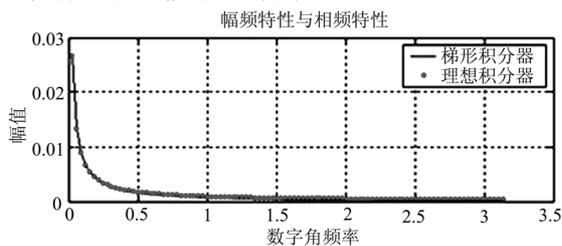


图 2 复化梯形频响特性

Fig.2 Frequency response of composed trapezium

由图 2 可知，复化梯形频响特性与理想积分器符合的很好，同时由系统函数可知，系统是不收敛的。由于以上数字积分采取原型为理想积分，低频增益很大。笔者做了大量仿真，发现以上常用的数字积分算法仿真结果精度很高，但实际系统中由于输入噪声等原因，数字积分难以达到高精度，特别是输入有零漂时，根据数字积分器的幅频特性，DSP 很快就溢出了。这也是数字积分难以工程应用的主要原因。

2 数字积分算法的实用化研究

图 3 是已成功应用于 10 kV 变电站系统的的模拟积分器模型。

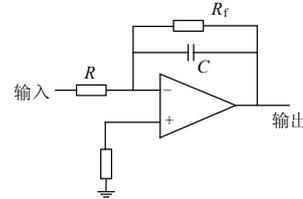


图 3 工程用模拟积分

Fig.3 Integral circuit in engineering project

其频响函数为：

$$H(s) = -\frac{R_f}{R} \frac{1}{1 + R_f C s} \quad (5)$$

由公式 (5) 可知，这实质是一阶低通滤波器。我们要做的工作是将其转换为数字滤波，这样可以避免模拟器件非理想化的缺陷，并给生产调试等带来方便。

令 $H_1(s) = \frac{\alpha}{\alpha + s}$ ，其中： $\alpha = \frac{1}{R_f C}$ ，则公式

(5) 化为 $H(s) = -\frac{R_f}{R} H_1(s)$ 。下面只需研究

$H_1(s)$ 的数字化实现。利用模拟滤波器理论设计数字滤波器，主要有脉冲响应不变法和双线性变换法。

2.1 脉冲响应不变法

脉冲响应不变法是从滤波器的脉冲响应出发，使数字滤波器的单位脉冲响应序列 $h(n)$ 模仿模拟滤波器的冲击响应 $h_a(t)$ ，使 $h(n)$ 正好等于 $h_a(t)$ 的采样值，即： $h(n) = h_a(t)$ 。 T_s 为采样周期。下面具体推导利用脉冲响应不变法对公式 (5) 实现数字化。

$$\frac{1}{s + \alpha} \leftrightarrow e^{-\alpha t} U(t) \quad (4')$$

$$H_1(s) = \frac{\alpha}{s + \alpha} \leftrightarrow h_1(t) = \alpha e^{-\alpha t} U(t)$$

而 $h(n) = h(t)|_{t=nT}$ 则有

$$H_1(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_1(n) z^{-n} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha e^{-\alpha T_s n} U(nT_s) z^{-n} = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha e^{-\alpha T_s n} z^{-n} = \frac{\alpha}{1 - e^{-\alpha T_s} z^{-1}} \quad (6)$$

其对应的时域表达为：

$$y(n) - e^{-\alpha T_s} y(n-1) = \alpha x(n)$$

则系统的幅频和相频特性如图 4 所示。由图 4 看出, 相频特性与原模型并不吻合, 故寻求其他方案。

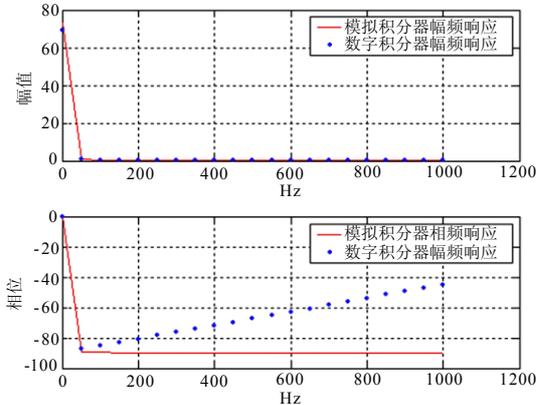


图 4 频响特性—脉冲响应不变法

Fig.4 Frequency response – impulse response method

2.2 双线性变换

双线性变换也是一种常用的模拟滤波器转换为数字滤波器的方法。它采用非线性频率压缩的方法, 将整个频率轴上的频率范围压缩到 $\pm\pi/T$ 之间, 再用 $z = e^{sT}$ 转换到 z 平面上。具体方法是: 令 $s = \frac{2}{T_s} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$, 将其代入到 $H(s)$ 中有

$$H(z) = H(s) \Big|_{s = \frac{2}{T_s} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} = -\frac{R_f}{R} \frac{\alpha_1(1+z^{-1})}{1+\alpha_2 z^{-1}} \quad (7)$$

$$\text{其中: } \alpha_1 = \frac{\alpha T_s}{\alpha T_s + 2}; \quad \alpha_2 = \frac{\alpha T_s - 2}{\alpha T_s + 2}.$$

由公式 (7) 得系统的幅频和相频特性如图 5 所示。

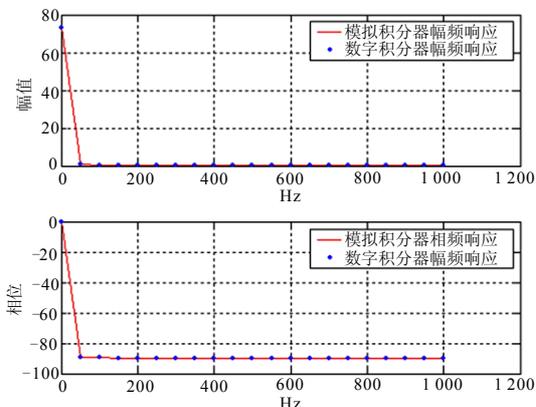


图 5 频响特性—双线性变换法

Fig.5 Frequency response – bilinear transformation method

2.3 离散域表达

因为双线性变换的频响特性与原模型吻合的最好, 最终选用双线性变换法。

$$\text{取 } \alpha_3 = -\frac{R_f}{R} \alpha_1, \text{ 则离散域表达为:}$$

$$y(n) + \alpha_2 y(n-1) = \alpha_3 x(n) + \alpha_3 x(n-1) \quad (8)$$

3 小信号解决方案

小信号传输由于受干扰较大, 加上积分算法本身的误差, 使罗氏线圈小信号输出时积分器误差较大^[5]。这是除了低频干扰导致积分器溢出, 数字积分难以工程应用的另一个原因。

3.1 可编程增益放大器 (PGA)

可编程增益放大器 (PGA) 是通用的数据采集输入放大器, 是利用几个控制引脚进行数字式调整, 以提供了数字控制增益来改善精度, 扩展动态范围。许多此类器件都具有 ± 40 V 的过压保护, 甚至具有掉电保护。单输入类型的放大器可实现与多种不同的传感器或信号的连接。在处理器控制时, 可变的增益大大地扩展了系统的动态范围。

PGA 系列放大器都兼容 TTL 或 CMOS 电平的输入, 从而更易于与微控制器相连接。输入可通过激光微调实现低失调电压及低漂移, 从而无需使用外部组件。PGA205 提供了 1、2、4、8 V/V 的二进位步进增益, 并通过 CMOS 或 TTL 兼容输出端进行选择。低输入偏置电流、FET 输入极确保了多路复用器的串行电阻不引入误差。极短的稳定的时间 (3.5 μ s, 误差 0.01%) 可允许快速检测所有通道。PGA205 拥有精密的双极型输入级, 特别适用于低电平信号。PGA205 可设定增益级为 1、2、4 或 8。

3.2 系统实现及试验结果

10 kV 变电站系统过程层电流传感部分如图 6 所示。其中罗氏线圈兼用于保护和测量, 差分回路可消除共模干扰。

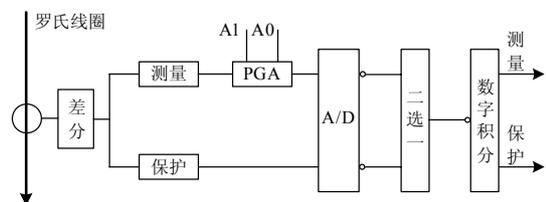


图 6 系统实现

Fig.6 Design of system

CPU 上电初始化取测量通道作为数字积分的输入, 即取测量作为采样点。A1A0 为 00, 即增益为 1。在一次额定电流时, 保护输出 200 mV, 测量

输出 2 V。同时判当前有效值, 若小于 $1.9I_n$, 则仍取测量通道为当前采样点, 即不改变当前状态。额定数字积分的测量输出 11 585。因保护测量有个确定比例, 则经过运算得到保护输出 463。若判当前有效值小于 $0.22 I_n$, 这时修改增益 $A1A0=11$, 即增益为 8。这样采样后将采样点再除以增益, 减小了 ADC 的量化误差, 使在 $20\% I_n$ 时误差为 0.2%, $1\% I_n$ 时误差为 0.75%。通过这样的办法明显提高了小信号的输出精度。同时判断当前采样点以及有效值, 若采样点相对前一周期明显异常且有效值大于 $1.9 I_n$, 则说明可能有系统故障, 测量通道将饱和溢出而不可用, DSP 取保护通道的采样作为当前采样点。

这样, 经过通道切换, 减少了 AD 量化误差和积分算法本身带来的误差。使数字积分器在小信号时精度仍然达到按《IEC60044-8》要求的测量达到 0.2 S 精度, 保护达到 5P30 级。表 1 是加量 1 min 后不积分与数字积分后的数据统计。统计数据经调系数和相位后可达到 0.2S 精度。

表 1 试验结果

Tab.1 Result of test

有效值	最大有效值	最小有效值	有效值偏差	相位
463.72	464.00	463.55	0.48	$0^{\circ}0'0''$
450.28	450.61	450.61	0.44	$-90^{\circ}46'0''$

4 结语

本文比较了传统数字积分如复化梯形与本文算法的异同, 论述了本文方案可以在低频干扰仍能正常工作, 能实际应用的特性。并就小信号误差较大的问题, 做了重点说明。通过切换量程的方法, 降低了 AD 的量化误差以及积分算法本身的误差, 本文做法已在 TMS320F2812C 上具体实现, 采样率 160 点, 使小信号仍能达到 0.2 S 级精度。目前数字化变电站正蓬勃发展中, 数字积分实用化对提高促进这种发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 王玉田, 完保娟, 孙海燕, 等. 电子式电流互感器的积分器技术[J]. 电力电子技术, 2009, 43 (2): 76-79. WANG Yu-tian, WAN Bao-juan, SUN Hai-yan, et al. Technology in designing integrator of electronic current transducer [J]. Power Electronics, 2009, 43 (2): 76-79.
- [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器算法的研究[J]. 电测与仪表, 2006, 43 (491): 1-5. GAO Ying-xia, BI Wei-hong, LIU Feng, et al. The research of the integral arithmetic in signal processing for Rogowski current transducer [J]. Electrical Measurement & Measurement, 2006, 43 (491): 1-5.
- [3] 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 Ke-wei, WANG Ning, DUAN Xiong-ying, et al. A digital integrator for electronic current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (12): 104-107.
- [4] 丁玉美, 高西全. 数字信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版, 2003.
- [5] 廖京生, 郭晓华, 朱明均, 等. 用于小电流测量的 Rogowski 线圈电流互感器[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (2): 56-58. LIAO Jing-sheng, GUO Xiao-hua, ZHU Ming-jun, et al. Rogowski coil current transducer for low amplitude current measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (2): 56-58.
- [6] 李红斌, 冯凯, 陈金玲. Rogowski 线圈电流互感器的全数字化设计[J]. 高压电器, 2006, 42 (6): 450-454. LI Hong-bin, FENG Kai, CHEN Jin-ling. All digital design of Rogowski coil current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42 (6): 450-454.
- [7] 邱志刚, 贾春荣, 郑绳植. 用于小电流测量的高精度 Rogowski 线圈的研究与设计[J]. 电气应用, 2005, 4 (5): 2-65. QI Zhi-gang, JIA Chun-rong, ZHENG Sheng-xuan. Research and design of high precise Rogowski coil used to measure small current[J]. Electrotechnical Journal, 2005, 4 (5): 2-65.
- [8] 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, 32 (8): 88-91. LI Wei, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. New voltage-to-frequency conversion method for electronic current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (8): 88-91.
- [9] 陈鹏, 陆俭国, 杨彦杰, 等. 基于 Rogowski 线圈和数字信号处理的交流电流测量[J]. 继电器, 2005, 33 (18): 23-26. CHEN Peng, LU Jian-guo, YANG Yan-jie, et al. AC current measurement based on Rogowski coil and digital signal processing[J]. Relay, 2005, 33 (18): 23-26.

收稿日期: 2009-09-16

作者简介:

尹明 (1976-), 男, 工程师, 硕士, 从事数字化变电站研究及过程层设备研发工作; E-mail: yinming@xjgc.com

田志国 (1972-), 男, 高级工程师, 硕士, 从事数字化变电站研究及过程层设备研发工作;

周水斌 (1975-), 男, 工程师, 硕士, 从事数字化变电站研究及过程层设备研发工作。