PCB 空心线圈电流传感器的暂态特性

张冈 王程远 陈幼平
（华中科技大学机械学院 武汉 430074）

摘要 在电流测量中，PCB 空心线圈具有很好的测量准确度和参数一致性。在模拟积分器中，T 形积分器具有很好的低频噪声抑制能力。为此，提出了一种基于 PCB 空心线圈和 T 形积分器的电子式电流传感器，建立了该传感器的传递函数模型和短路电流全偏移时的暂态特性模型。重点分析了其对电力系统暂态电流的测量性能，对影响暂态特性的参数进行了数学分析，这为传感器的动态性能优化设计提供了一种分析方法。对传感器样机进行了动模试验，和分流器的输出信号相比，两者波形吻合较好，峰值瞬时误差在±1%左右。该试验结果表明，PCB 空心线圈电流传感器具备准确反应电力系统故障电流暂态过程的能力，满足电力系统对电流测量和保护的需求。

关键词：PCB 空心线圈 T 形积分器 电子式电流传感器 暂态特性
中图分类号：TM452

Transient Behavior of PCB Air-Core Coil Current Transformer

Zhang Gang Wang Chengyuan Chen Youping
（Huazhong University of Science and Technology Wuhan 430074 China）

Abstract Printed circuit board (PCB) air-core coil has advantages of high accuracy and parameters consistency in the current measurment. T-integrator has a good suppress ability to low-frequency noise among various analog integrators. Therefore, a kind of electronic current transformer based on PCB air-core coil and T-integrator is presented, and its transfer function and transient mathematical models are deduced. The transient current measurement behaviors of this current transformer are analyzed especially. Simulation results confirm the validity of the proposed models, which can give some instructions to improve the transient behaviors of current transformer. Compared with the resistance type current sensor, the transient peak error is about ±1%, and the match extent of two output waveforms is good. The dynamic simulation experiments show that PCB air-core coil current transformer has the pleased ability to accurately respond the fault current transient process in the power system, and can meet the demand of power system for current measurement and protection.

Keywords：PCB air-core coil, T-integrator, electronic current transformer, transient behavior

国家自然科学基金（ 60204004）和湖北省自然科学基金（2005ABB007）资助项目。
收稿日期 2008-11-21 改稿日期 2009-07-28

1 引言

与传统铁心式电流互感器相比，空心线圈（rogowski coil）具有无磁饱和、频带宽、电流测量范围大、体积小等优点，是一种较为理想的电流传感元件。近十几年来，国内外研究人员一直致力于提高空心线圈在电流测量各方面的性能。在频率特性研究方面，文献 [1]论述了空心线圈分布电容的测量原理以及分布电容对线圈动态特性的影响机理，并给出了最佳阻尼电阻的计算方法。文献 [2]应用

传输线理论建立了匝数较少的空心线圈的高频数学模型，可用于辨识线圈的电磁参数。文献 [3-5]实验分析了空心线圈电流互感器的高频动态特性。文献[6-8]实验分析了基于改进积分器的空心线圈电流互感器的低频动态特性。本文将深入计算分析和试验测试新设计的基于 PCB 空心线圈和 T 形积分器的电子式电流传感器。

2 等效电路模型

PCB（Printed Circuit Board）空心线圈是一种基于计算机辅助设计和印刷电路板制作工艺的新型空心线圈，与绕线型普通空心线圈相比，具有测量准确度高、稳定性和参数一致性好、设计和加工方便等优点，适合于工业化生产与应用。由于空心线圈的输出感应电 动势与被测电流成为微分关系，因此，在进行电流测量时需要采用积分环节。在模拟积分器中，与通常采用的改进积分器（惯性环节）积分器相比，T 形积分器具有较低的低频增益，可以有效地抑制低频噪声。基于上述分析，提出了一种以 PCB 空心线圈为电流传感元件，以 T 形积分器为积分环节的电子式电流传感器。关于该传感器的详细结构设计和误差分析可参阅文献 [9]。在稳态测量上，其性能已通过武汉高压研究院的型式试验，准确度满足 0.2S 级。这里主要研究该传感器对暂态电流的测量性能。

PCB 空心线圈传感器的完整等效电路如图 1 所示。r_c、L_c、C_c 分别为线圈的内阻、自感和分布电容，M 为线圈互感 系数。则等效电路的传递函数为

$$H(s)=\frac{U_{out}(s)}{I_1(s)}=\frac{U_{out}(s)}{E_0(s)}\frac{E_0(s)}{E(s)}\frac{E(s)}{I_1(s)}$$
$$=K_0\frac{T_0s+1}{(Ts+1)^2}\frac{K_cMs}{T_c^2s^2+2\xi T_cs+1} \qquad (1)$$

式中

$$K_0=\frac{2R_f}{R},\quad T_0=\left(\frac{1}{2}R_f+R_0\right)C_0,\quad T=R_fC+\frac{1}{2}R_0C_0,$$

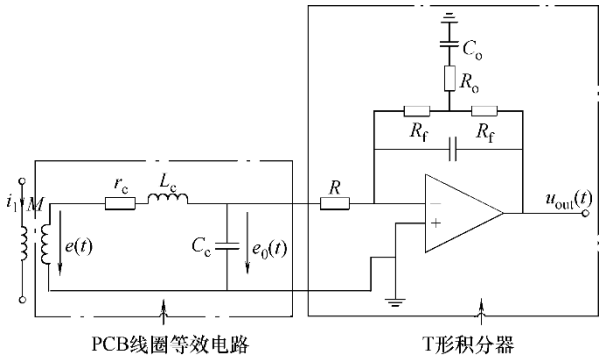


图 1 PCB 空心线圈电流传感器等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of PCB air-core coil with T-type integrator

$$K_c=\frac{R}{r_c+R},\quad T_c=\sqrt{K_cL_cC_c},\quad \xi=\frac{L_c+r_cRC_c}{2\sqrt{R(r_c+R)L_cC_c}}。$$

对于所设计的 PCB 空心线圈而言，其电气参数根据实测确定为：r_c=20Ω，L_c=50μH，C_c=850pF。则该空心线圈的 频率特性如图 2 所示。

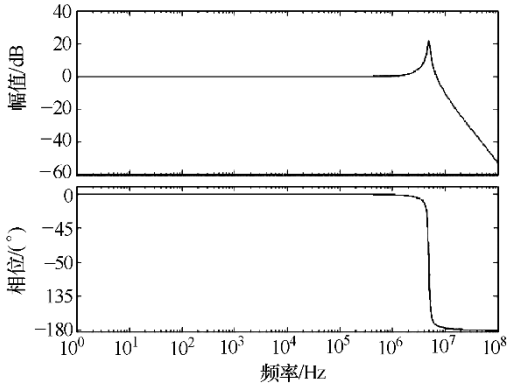


图 2 PCB 空心线圈的频率特性

Fig.2 Frequency response of PCB air-core coil

从图中可以看出，PCB 空心线圈具有较宽的通频带，从 0.1mHz～250kHz，因此能够满足大多数情况下电力系统对于电流测量和保护的要求。但在引入 T 形积分器后，由于电阻电容的存在，会对频率特性产生影响，表现为通频带的变窄。其中， 传感器的上限截止频率 与 PCB 空心线圈的固有频率有关，约为 $1/T_c$。而下限截止频率由 T 形积分器的上限截止频率确定 ，约为 $1/T$。对于工频电流测量而言，传感器上限截止频率的设定可以按通过 50 次谐波来设计，即 2.0kHz，在空心线圈电气参数确定的情况下，通过调节图 1 中电阻 R 来实现。而下限截止频率的设定则与电力系统的暂态特性有

关，下面对其进行详细分析。

3　暂态特性分析

电网类似一个 R-L 阻抗网络，其一次时间常数 $T_1=L/R$。当电力系统发生短路故障时，具有对称分量的短路电流的瞬时值近似表达式为

$$i_1(t)=\sqrt{2}I_{\mathrm{psc}}\left[\mathrm{e}^{-t/T_1}\cos\theta-\cos(\omega t+\theta)\right] \quad (2)$$

式中　I_{psc}——额定短路电流稳态值的有效值；

θ——短路初始角。

短路电流中包含周期分量（对称分量）和非周期分量（直流分量），非周期分量的大小取决于故障发生瞬间的相位角。当θ=0 时，非周期分量最大，此时短路电流为全偏移情况，其表达式为

$$i_1(t)=\sqrt{2}I_{\mathrm{psc}}\left[\mathrm{e}^{-t/T_1}-\cos(\omega t)\right]=-I_{\mathrm{m}}\cos(\omega t)+I_{\mathrm{m}}\mathrm{e}^{-t/T_1} \quad (3)$$

式中，I_{m}为短路电流周期分量的幅值，$I_{\mathrm{m}}=\sqrt{2}I_{\mathrm{psc}}$。

对式（3）进行拉普拉斯变换，有

$$I_1(s)=I_{\mathrm{m}}\left(-\frac{s}{s^2+\omega^2}+\frac{T_1}{T_1s+1}\right) \quad (4)$$

由式（1）和式（4），可得到 PCB 空心线圈电流传感器输出电压的表达式为

$$U_{\mathrm{out}}(s)=H(s)I_1(s)=\frac{T_0s+1}{(Ts+1)^2}\frac{K_0K_{\mathrm{c}}Ms}{T_{\mathrm{c}}{}^2s^2+2\xi T_{\mathrm{c}}s+1}I_{\mathrm{m}}\left(-\frac{s}{s^2+\omega^2}+\frac{T_1}{T_1s+1}\right) \quad (5)$$

当测量工频短路电流时，因为 T_{c} = 1，所以 $T_{\mathrm{c}}{}^2s^2+2\xi T_{\mathrm{c}}s+1\approx1$，故式（5）可简化为

$$U_{\mathrm{out}}(s)=I_{\mathrm{m}}K_0K_{\mathrm{c}}M\frac{s(T_0s+1)}{(Ts+1)^2}\left(-\frac{s}{s^2+\omega^2}+\frac{T_1}{T_1s+1}\right)=P\frac{s^2(T_0s+1)}{(Ts+1)^2(s^2+\omega^2)}+Q\frac{s(T_0s+1)}{(Ts+1)^2(T_1s+1)} \quad (6)$$

式中，$P=-I_{\mathrm{m}}K_0K_{\mathrm{c}}M$，$Q=I_{\mathrm{m}}K_0K_{\mathrm{c}}MT_1$。

对式（6）作拉普拉斯反变换，有

$$u_{\mathrm{out}}(t)=A\cos(\omega t)+B\sin(\omega t)+C\mathrm{e}^{-\frac{t}{T_1}}+D\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}+Et\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}} \quad (7)$$

式中

$$A=I_{\mathrm{m}}K_0K_{\mathrm{c}}M\omega^2\frac{(T_0-T_0T^2\omega^2-2T)}{(T^2\omega^2+1)^2}$$

$$B=I_{\mathrm{m}}K_0K_{\mathrm{c}}M\omega\frac{(1+2T_0T\omega^2-T^2\omega^2)}{(T^2\omega^2+1)^2}$$

$$C=I_{\mathrm{m}}K_0K_{\mathrm{c}}M\frac{(T_0-T_1)}{(T-T_1)^2}$$

$$D=I_{\mathrm{m}}K_0K_{\mathrm{c}}M\left[\frac{T_1(T^2-2TT_0+T_1T_0)}{T^2(T-T_1)^2}-\frac{T_0+3T_0T^2\omega^2-2T^3\omega^2}{T^2(T^2\omega^2+1)^2}\right]$$

$$E=I_{\mathrm{m}}K_0K_{\mathrm{c}}M\frac{(T_0-T)}{T^3}\left(\frac{T_1}{T-T_1}+\frac{1}{T^2\omega^2+1}\right)$$

由式（7）可知，电网短路故障时，PCB 空心线圈电流传感器输出电压包含五个分量，前两项为周期性分量，后三项为非周期性分量。

（1）当 $t\to\infty$时，$u_{\mathrm{out}\,(\mathrm{DC})}\to0$，表明非周期性分量是衰减分量，衰减快慢取决于一次时间常数 T_1 和积分器的上限截止频率 $\omega_{\mathrm{T}}(\omega_{\mathrm{T}}=1/T)$。

（2）PCB 空心线圈电流传感器输出能否真实反映短路电流的非周期性分量，主要取决于积分器的上限截止频率 ω_{T}。若 $T_0>T$？T_1，即积分器的上限截止频率 ω_{T}远小于非周期性分量的等效频率，系数 D、E 比 C 小很多，PCB 空心线圈电流传感器输出电压的非周期性分量主要体现在第一项，即为

$$u_{\mathrm{out(DC)}}(t)\approx C\mathrm{e}^{-\frac{t}{T_1}}=I_{\mathrm{m}}K_0K_{\mathrm{c}}M\frac{(T_0-T_1)}{(T-T_1)^2}\mathrm{e}^{-\frac{t}{T_1}} \quad (8)$$

此时，暂态短路电流的非周期性分量可以近似线性地变换到二次侧。

设电力系统一次时间常数 T_1=60ms，一次短路电流 $i_1(t)=\sqrt{2}\times1000\times\left[-\cos(100\pi t)+\mathrm{e}^{-t/0.06}\right]$。针对 T 形积分器的时间常数 T_0、T 的不同取值，PCB 空心线圈电流传感器的暂态特性仿真曲线如图 3 和图 4 所示。在图 3 中，两条曲线之所以出现较大偏差，就在于积分器电路参数设计不合理。即当 T_1=60ms，T_0=0.7958s，T=0.3183s 时，系数 C、D 和 E 分别为 $11I_{\mathrm{m}}K_0K_{\mathrm{c}}M$，$-3I_{\mathrm{m}}K_0K_{\mathrm{c}}M$ 和

$3I_mK_0K_cM$，D、E 和 C 相比不能忽略。而图 4 所示的两条曲线重合度较好，是因为积分器在采用该参数设计时，即当 T_1=60ms，T_0=3.1831s，T=1.5915s 时，系数 C、D 和 E 分别为 $1.3I_mK_0K_cM$，$-0.07I_mK_0K_cM$ 和 $0.016I_mK_0K_cM$，D、E 比 C 相比可以忽略，所以其暂态响应较好。这就为通过优化设计积分器相关参数获取好的暂态特性提供了一种分析方法，即可以按 $T_0>T>20T_1$ 来设计。

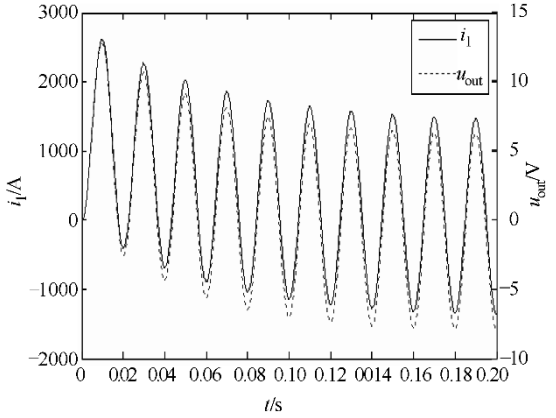


图 3 T_0=0.7958s，T=0.3183s 时暂态响应

Fig.3 Transient response with T_0=0.7958s, T=0.3183s

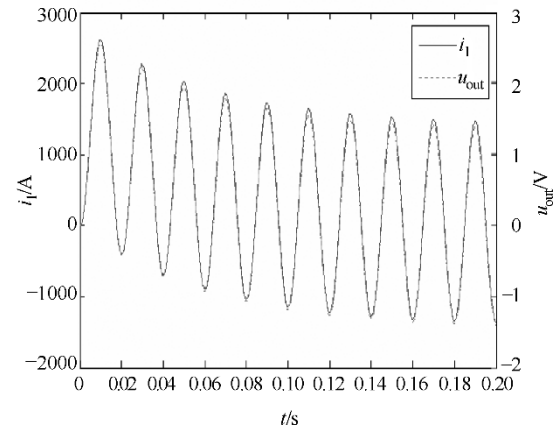


图 4 T_0=3.1831s，T=1.5915s 时暂态响应

Fig.4 Transient response with T_0=3.1831s, T=1.5915s

4 动模试验

4.1 试验装置

动模试验的目的是为了验证当 $T_0>T$？ T_1 时，PCB 空心线圈电流传感器传变暂态短路电流非周期性分量的能力，为 T 形积分器的动态性能优化提供试验数据支持。试验装置如图 5 所示。发电机、分流器和负载构成一次回路，时间常数为 125ms。为了便于比较，采用分流器、电磁式电流互感器和 PCB 空心线圈电流传感器（各传感器的变比如图所示）同时对电流进行测量。三个电流传感器 的输出信号由 ZH-2B 发变组故障录波分析装置进行录波 。考虑到分流器的纯电阻性质，其输出信号可作为准确反应被测电流的标准信号。PCB 空心线圈电流传感器中 PCB 线圈的主要技术参数见表 1，线圈为六片串联型。T 形积分器的时间常数根据仿真结果确定，为 T_0=3.1831s，T=1.5915s。

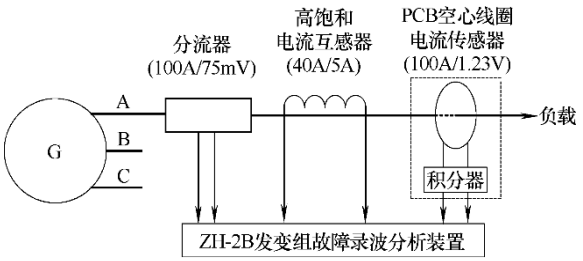


图 5 动模试验装置

Fig.5 Device of dynamic analog test

4.2 实验结果

动模试验在华中科技大学电力系统动态模拟实验室进行。图 6 为一次回路发生一次短路故障时 ZH-2B 发变组故障录波分析装置记录的波形 。图中纵坐标所示为采集到的传感器输出的最大值和最小值（未考虑电流比）。

表 1 PCB 空心线圈的主要参数

Tab.1 Parameters of PCB air-core coil

结构参数			电磁参数			
内径 a/ mm	外径 b/ mm	高度 h/ mm	自感 L_c/ μH	分布电容 C_c/ pF		内阻 r_c/ Ω
			测量值	100kHz	200kHz	
90	60	19.2	53.8	736	886	18.75

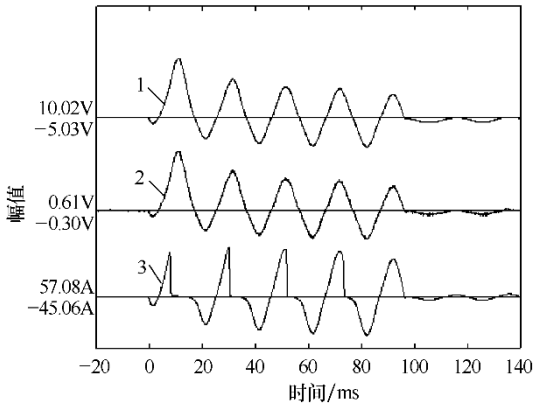


图 6 动模试验实测波形

1. PCB 空心线圈电流传感器 2. 分流器

3. 高饱和电流互感器

Fig.6 Waveforms of dynamic analog test

取 5 个时刻，即 t=10s，30s，50s，70s 和 90s 作为测量点，将传感器的输出值根据各自的变比折算成一次侧电流值，I_{res} 为分流器测得的电流值，I_{pcb} 为 PCB 空心线圈电流传感器测得的电流值。以 I_{res} 为标准值，则 PCB 空心线圈电流传感器各点的误差见表 2。

表 2　PCB 空心线圈电流传感器的暂态测量误差

Tab.2　The transient error of PCB air-core coil current transformer

	1	2	3	4	5
I_{res}/A	814.0	542.7	417.5	396.5	323.5
I_{pcb}/A	814.8	538.6	423.3	401.1	323.4
ε（%）	−0.1	+0.8	−1.4	−1.2	0.03

在国家标准 GB/T20840.8—2007 中，关于 TPE 级暂态电流互感器有如下定义：在准确限值条件下、额定一次时间常数和额定工作循环下的最大峰值瞬时误差为 10%。为了得到暂态直流分量同样的峰值瞬时误差，较大的一次时间常数要求较低的截止频率[10]。由此可以得出结论：

（1）PCB 空心线圈电流传感器和分流器输出信号波形吻合较好，峰值瞬时误差均小于 10%。表明当 PCB 空心线圈电流传感器积分器时间常数设计为 T_0=3.1831s、T=1.5915s，可以较好地反映一次时间常数为 0.125s 时电力系统故障电流的暂态过程，也能反映一次时间常数小于 0.125s 时的暂态过程。

（2）电磁式电流互感器输出信号明显失真，表明 PCB 空心线圈电流传感器比电磁式电流互感器具有更好的暂态性能。

5　结论

通过对 PCB 空心线圈电流传感器的暂态特性进行仿真分析和动摸试验验证，表明 PCB 空心线圈电流传感器具有良好的暂态特性，能真实反应被测电流的暂态过程，能满足大多数情况下电力系统对电流测量和保护的需求，并为空心线圈动态性能的参数设计提供了分析和试验依据。

参考文献

[1] 李维波，毛承雄，陆继明，等. 分布电容对 Rogowski 线圈动态特性影响研究 [J]. 电工技术学报，2004, 19(6): 12-17.
Li Weibo, Mao Chengxiong, Lu Jiming, et al. Study of the influence of the distributed capacitance on dynamic property of Rogowski coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(6): 12-17.

[2] Dubickas V, Edin H. High-frequency model of the Rogowski coil with a small number of turns[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6): 2284-2288.

[3] Karrer N, Hofer P Noser. PCB Rogowski coils for high d*i*/d*t* current measurement[C]. Proceedings of the 31th IEEE Power Electronics Specialists Annual Conference, 2001: 1296-1301.

[4] Hewson C R, Ray W F, Davis R M. Verification of rogowski current transducer's ability to measure fast switching transient[C]. Proceedings of 2006 Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006: 573-579.

[5] Ehsan A J, Richard M. High-performance low-cost Rogowski transducers and accompanying circuitry[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(3): 753-759.

[6] Ward D A, LaT J Exon. Using Rogowski coils for transient current measurement[J]. Engineering Science and Education Journal, 1993, 2(3): 105-113.

[7] Li W, Yin X G, Chen D S, et al. The study of transient performance for electronic current transformer sensor based on Rogowski coil[C]. Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference, 2006, 1: 162-165.

[8] 谢彬，尹项根，张哲，等. 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器的积分器技术 [J]. 继电器，2007, 35(3): 45-50, 86.
Xie Bin, Yin Xianggen, Zhang Zhe, et al. Technology in designing integrator of electronic current transducer based on Rogowski coil[J]. Relay, 2007, 35(3): 45-50, 86.

[9] Wang Chengyuan, Chen Youping, Zhang Gang, et al. Design of printed-circuit board Rogowski coil for highly accurate current measurement[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2007: 3801-3806.

[10] GB/T20840.8—2007. 互感器. 第 8 部分：电子式电流互感器 [S]. 2007.

作者简介:张冈　男，1971 年生，副教授，主要研究方向为传感器技术和信号处理技术。 王程远　男，1971 年生，博士，主要研究方向为传感器技术及其在电力系统的应用。