

# 从原理来分析罗氏线圈与电流互感器的区别以及其应用

蒋大维，顾伟

江阴市星火电子科技有限公司

**摘要：**罗氏线圈（Rogowski coil）可以说是一种新兴的“电流互感器”，由于罗氏线圈的结构组成部分主要是一个线圈，无铁芯，所以它较普通的电流互感器有着不饱和、延迟低、频率特性好，同时安全绝缘的优点。现在国家电网在推广智能电网，智能电网需要使用电子式互感器，将传统普通电流互感器（current transformer，简称CT）输出的模拟信号改成电子式互感器输出的数字信号，从而方便智能电网的数据传输，而电子式互感器主要依托的技术就是罗氏线圈技术（当然还有低功率互感器、光纤互感器等）。但是电子式互感器大发展并没有想象中的那么快，原因是什么？很显然罗氏线圈没有那么简单，目前依然无法取代传统的电流互感器。本文就是通过比较罗氏线圈和传统的电流互感器原理来分析其区别，并且根据目前的技术发展情况，找准两种互感器的发展定位。

## 1 罗氏线圈的原理（为了方便介绍，下文统一将“罗氏线圈”写做“RCT”）

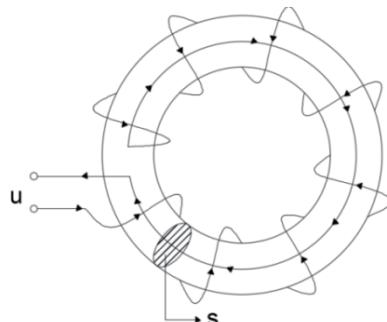


图 1 截面为环形的 RCT 工作原理图

RCT 测量电流的理论依据是法拉第电磁感应定律和安培环路定律（见图 1：RCT 工作原理），我们列出 RCT 二次电压  $u$  的公式

$$u=2\pi f \mu S n I_1 / N = 6.28 f \mu S n I_1 \quad (\text{公式 1})$$

公式 1 即是 RCT 的输出计算公式，其中， $u$  为线圈输出电压值， $\mu$  为真空磁导率： $4\pi \times 10^{-7}$ ， $S$  线圈的截面积， $n$  为单位长度下的线圈匝数（即绕线密度）， $I_1$  为一次电流值， $N$  为一次匝数。由公式 1 可见，线圈二次输出电压值  $u$  和  $f$ 、 $S$ 、 $n$ 、 $I_1$  这 4 个关键因素成正比关系。

其中频率  $f$  越高，RCT 输出的电压值越高。例如测试 60HZ 时输出的电压值是 50HZ 的 1.2 倍。线圈截面积  $S$ ：

线圈截面积越大，输出信号就越大，要取得较大的输出信号，可以采用截面较大的骨架。绕线的密度  $n$ ：绕线密度与输出成正比，单位长度绕的线越多，即绕线密度  $n$  越大输出越大，也就是说并不是 RCT 做得越长圈数越多输出信号就越大，而是单位长度绕线越多，其输出就越大。一次电流  $I_1$ ：这个就很好理解，RCT 同 CT 一样，都是线性输出，二次输出随着一次电流的增大而增大。

## 2 传统电流互感器（即带铁芯）的原理（为了方便介绍，下文统一将“传统电流互感器”写做“CT”）

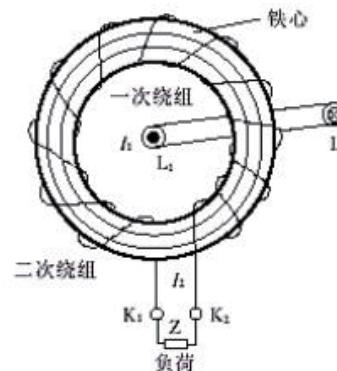


图 2 CT 的工作原理

CT 的工作原理与变压器基本相同，一次绕组的匝数

( $N_1$ ) 较少，直接串联于电源线路中，一次电流  $I_1$  通过一次绕组时，产生的交变磁通感应产生按比例减小的二次电流  $I_2$ ；二次绕组的匝数  $N_2$  较多，与仪表、继电器、变送器等电流线圈的二次负荷 (Z) 串联形成闭合回路，见图 2。CT 在工作时，它的二次侧回路始终是闭合的，因此测量仪表和保护回路串联线圈的阻抗很小，CT 的工作状态接近短路。CT 是把一次侧大电流转换成二次侧小电流来测量，二次侧不可开路。

由于 CT 依托于电磁感应原理，所以要有二次感应电动势，铁芯必须要有磁通，单位面积的磁通叫做磁通密度 B，也叫做磁感应强度。电流达到一定的大小，铁芯中的磁通密度达到最高，此时的 CT 就会饱和，所以磁密即是决定 CT 是否饱和的参数，根据电磁感应定律，可以列出磁密 B 与感应电势的关系。

$$B=2252 \cdot E_2 / (f \cdot S_c \cdot N_2) \quad (\text{公式 } 2)$$

其中  $E_2$  为二次感应电动势，由二次阻抗与二次电流  $I_2$  组成， $f$  为工作频率， $S_c$  为铁芯截面积， $N_2$  为二次匝数。

同时我们列出 CT 误差公式，如下：

$$\epsilon=25.3 \cdot Z_2 \cdot L_c / (S_c \cdot u \cdot N_2^2) \quad (\text{公式 } 3)$$

其中  $Z_2$  为互感器二次阻抗， $L_c$  为铁芯的磁路长度。

### 3 从多方面分析 RCT 与 CT

下面我们从输出信号、过载能力、带载能力、频率范围、误差、线性度、抗干扰能力、反应能力、安全使用 9 个方面来比较双方的优势。

#### 3.1 输出信号

CT 输出的信号为交流电流信号，如果是一次互感器，一般输出 5A/1A 的信号，如果是电表中的二次互感器，则一般输出 1mA-5mA 的交流信号。而 RCT 则输出的一个很小的电压信号，一般为 1kA 输出 0-100mV，可以用

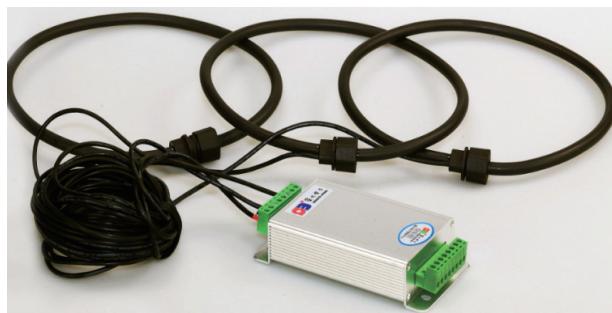


图 3 江阴市星火电子科技有限公司的三相 RCT+ 积分器

高阻抗的电压表测试，如果加上积分器，一般输出的信号为 0-10V，根据客户要求选用。（见图 3：江阴市星火电子科技有限公司的三相 RCT+ 积分器）当然现在也有客户需要 RCT 输出 1A 甚至 5A 的信号，那样必须外接一个功率放大器。

#### 3.2 过载能力

RCT 没有铁芯或者它的铁芯为空气，空气不会磁场饱和，所以 RCT 不会饱和，这也是 RCT 最大的优点。而 CT 由于存在着铁芯，一旦铁芯中磁密 B 达到最高，那么 CT 的磁导率会不断下降，最终消失，那时 CT 极有可能在失磁的情况下烧毁。（见图 9：磁导率随着磁场的增加，先不算增大再不断将至最低。）

#### 3.3 带载能力

带载能力有区别于过载能力，如果单看 CT，一般过载能力强的它的带载能力也就强，但是 RCT 和 CT 比较又是另外的情况了，上文 3.1 已经说过，RCT 基本上输出的是一个很小的电压信号，一旦加上负载，那么电压值会非常快的跌落，这也是为什么 RCT 需要高阻抗电压表测试的原因。而 CT 则不一样，CT 其实相当于初级只有一圈的变压器，它有铁芯，能够输出一定的功率，当然这也和铁芯的材质有关，比如硅钢的磁密能够达到 2T，而超微晶约为 1T，那么硅钢的带载能力基本上是超微晶的 1 倍左右。

#### 3.4 频率范围

无论 CT 还是 RCT 其自身都是一个电感器，区别是 CT 由于有铁芯的情况下电感量比较大，根据阻抗公式  $Z_L=2\pi fL$ ，其中电感量 L 越大，其阻抗就越大；频率越高，其阻抗就越大。在相同的频率下，CT 的阻抗非常的大，而 RCT 的阻抗则非常的小，所以 RCT 很容易响应较高频率的电流，从而比较真实的还原一次电流。

#### 3.5 误差



图 4 长度 25cm，参数 100mV/kA。



图 5 开合式 CT，内孔尺寸 80\*50，参数 1KA/1A。

输入电流 (A)	20	40	60	80	100	200	400	600	800	1000
100mV/KA (单位 mV)	2.5	4.2	6.1	8.0	10.0	20.2	40.2	60.2	80.2	100.4
带积分器 1V/KA (单位 V)	0.021	0.041	0.061	0.080	0.100	0.201	0.402	0.604	0.806	1.008

### 3.5.2 开合式互感器 1000A/1A 的测试数据（互感器校验仪）

输入电流 (A)	10	50	200	1000	1200
误差 (%)	-0.25	-0.047	0.032	0.086	0.09

### 3.5.3 据此画出他们的误差线性对比图

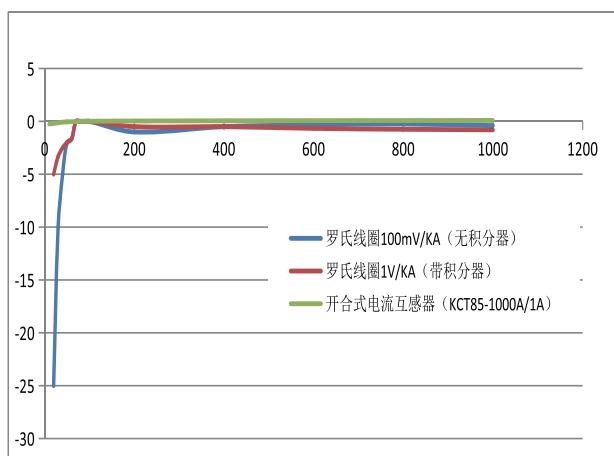


图 6 RCT 与 KCT85 的线性对比

从这张误差线形图我们可以得出以下几点结论：

- 1) RCT 在较低的电流范围误差是非常大的，如图在 100A 以下，误差达到了 25%。而 KCT85 的误差则非常小（见图 7）。
- 2) RCT 在带上积分器后，在低端的误差低于不带积分器的，因为积分器输出的信号较大，但不能说明带上积分器能够降低误差。

为了更有说服力，我们选取两款产品来比较，一款 RCT（见图 4：长度 25cm，不带参数：输入 1KA，输出 100mV），一款开合式 CT（见图 5：开合式 KCT85：参数输入 1KA，输出 1A）。

下面是使用测试设备测试出的数据对比。

### 3.5.1 RCT 不带带积分器与带积分器 20~1000A 的测试数据

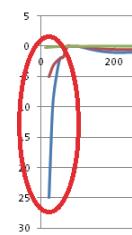


图 7 RCT 100mV/KA 不带积分器在低端的误差较大

3) 很多人都说 RCT 的线性度比 CT 要好，理论上是，但实际应用中就不一定了，因为 RCT 由于没有铁芯受到的干扰误差会更大（见图 8），具体在 3.6 线性度会再分析。



图 8 RCT 的线性度有波动而开合式 CT 线性度较平稳

### 3.6 线性度

按照公式 1，RCT 的输出  $u=6.28f\mu S n I_1$  在相同的线圈上应该是完全线性的输出，因为真空的磁导率不会改变，而 S 和 n 在同一个线圈是固定的。

但是 CT 是输出精度公式  $\varepsilon=25.3 Z_2 L_c / (S_c)$

$*u*N_2^2$ ), 其中  $Z_2$ 、 $L_c$ 、 $S_c$ 、 $N_2$  在同一个线圈上是相对固定值, 其中磁导率  $u$  会随着电流的大小而变化, 从而产生精度的变化 (见图 9)。

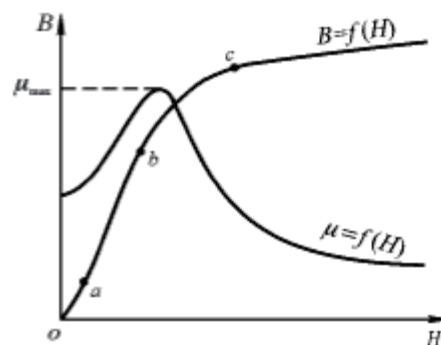


图 9 磁导率随着磁场强度变化趋势图

按理论 CT 的误差应该大于 RCT。但是 RCT 实际在测试过程中, 还会受到具体位置的影响, 其输出精度也会有较大的变化, 所以由于位置的不固定, RCT 的线性度也会产生较大影响, 这也是 RCT 的一个很大缺点 (见图 10: 测试 RCT 不同位置误差图)。

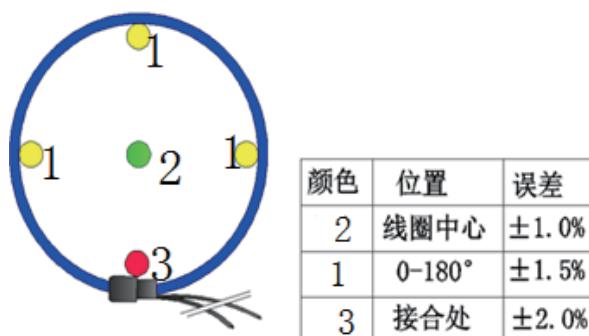


图 10 测试 RCT 不同位置误差图

现在很多厂家为了使 RCT 的输出增大, 采用了有磁性的骨架, 即是使 RCT 增加了磁导率, 这样做是非常不妥当的。首先根据图 9, 可以发现磁导率随着磁场的变化而变化的, 直到磁场饱和, 磁导率降到最低点, 那么 RCT 的输出就完全没了线性。即输出的线性趋势完全和磁导率

的趋势一样, 那样 RCT 还能使用么? 如果非要使用磁性的骨架, 那么必须是磁性骨架的磁导率恒定, 就是恒导磁, 这个是可以实现的 (现在已经有了恒导磁的超微晶, 其通过横纵磁场的处理, 是磁芯在一定的范围内磁导率变化较小), 但是恒导磁除了真空磁导率外, 所有材料只能在一个范围内恒导磁。那么使用这种材料后, RCT 的不饱和优点就丧失了。

### 3.7 抗干扰能力

RCT 没有铁芯, 极易收到信号的干扰, 特别是小电流误差非常的大, 可以见图 6, 在低端的时候受到干扰较大, 从而误差相对较大。所以 RCT 需要做适当的屏蔽来达到较好的输出。而 CT 虽然也会受到信号的干扰, 但是由于本身拥有一个极强的磁场, 相当于一个滤波器, 所以受到的干扰相对较小。

### 3.8 反应能力

反应能力是互感器的一个重要特性, 一般 CT 由于含有铁芯, 那么铁芯就会产生磁滞效应, 这样有两个危害: 一个会使互感器发热, 磁滞效应严重时甚至烧毁互感器; 另外一个是互感器的反应能力会由于磁滞效应减弱, 不能时时传达一次侧电流的信息, 这样特别是在保护用 CT 上面危害是非常大的。而这恰恰是 RCT 的一个优点, 因为它没有铁芯, 所以它没有磁滞反应, 那么它的时时反应能力非常之高, 这也是它能测试高频电流的一个重要原因。

### 3.9 安全性

CT 一般出厂前都有一个铭牌, 上面写着“严禁二次开路”见图 11, 因为 CT 二次开路会产生高压, 严重时会损伤设备和人的生命安全, 所以互感器二次只能短路而不能开路, 当然二次侧也不能短接熔断器。但 RCT 二次侧输出是一个很小的电压值, 无需考虑后次开路。所以在安全性上, RCT 要远远高于 CT。

综上所述, 现在用表格的形式总结 RCT 和 CT 的相对区别。

类型	3.1 输出信号	3.2 带载能力	3.3 过载能力	3.4 误差	3.5 线性度	3.6 抗干扰	3.7 反应能力	3.8 频率范围	3.9 安全性
RCT	弱	弱	强	差	强	差	快	宽	高
CT	强	强	弱	强	较强	较强	慢	窄	低



图 11 互感器的二次铭牌

上接141页

保证优异的高频共模噪音抑制效果，又可以保证低损耗的传输特性。

#### 4 结论

通过前面的实验，可以得出以下结论：

采用新材料制作车载共模电感产品，电磁性能和各种可靠性能均符合要求，为生产车载高附加值产品提供了一种全新的粉料，正在为公司创造了良好的经济效益。

#### 参考文献

- [1] 陈宗淇, 王光信, 徐桂英, 等. 胶体与界面化学. 北京: 高等教育出版社, 2001. 9
- [2] 朱晏军, 周勋, 周小军, 谈敏, 等. 一种用于铁氧体

上接154页

作为设计者首先需要确认清楚产品需要满足的电磁兼容标准，不同标准需要抑制的频点可能有些差异。另材料存在一定的离散性，设计要有一定的余量，特殊要求产品如案例分析中的 75W 电动工具充电器需要灌胶防水、输出线比较长，需要余量比一般的产品要大；通常的产品余量能满足要求即可，余量过大将使产品的成本不必要上涨。总之以最经济的方案，保证批量产品卖到市场上满足需要的传导和辐射 EMI/RFI 标准。

#### 参考文献

- [1] 【英】Marty Brown 开关电源设计指南 机械工业出版社
- [2] 钟振宇、史建华 开关电源的电磁兼容性设计、测试和典型

#### 4 RCT 的发展趋势

本文分析了 RCT 与 CT 的区别，发现 RCT 目前还是无法去代替 CT 的。那么 RCT 可以应用在哪些场合呢？根据我们总结 RCT 虽然误差较大，但不饱和的优点，它可以比较完美的替代保护用 CT。当然在测量领域，RCT 高频特性好、反应迅速、又可以使用在测量比如泄漏电流、故障电流、脉冲电流、雷击电流，或者电流中的谐波。也希望在 RCT 工艺不断增强的情况下，实现电子式互感器的大规模开发、生产和应用。

粉体喷雾造粒的浆料及其制备方法 [P]. 中国专利：104387090A, 2015-03-04.

[3] 朱晏军, 周勋, 周小军, 谈敏, 等. 一种铁氧体粉体及其喷雾造粒的制备方法 [P]. 中国专利：104387046A, 2015-03-04.

[4] 严密, 彭晓领. 磁学基础与磁性材料 [M]. 杭州：浙江大学出版社，2006.

#### 作者简介

朱晏军（1974—），男，湖北武汉人，硕士，主要从事铁氧体材料的研发和工艺研究，E-mail: yanjun\_zhu@sunlordinc.com。

案例 电子工业出版社

[3] 【台湾】梁适安 交换式电源供给器之理论与务实设计 全华科技图书股份有限公司

[4] 【美】Mark I. Montrose 电磁兼容性的印制电路板设计 机械工业出版社

#### 作者简介

苏志春：深圳晶辰电子科技股份有限公司研发部 部长、江苏泰州人，发表过多篇论文和撰写过多个专利。

舒永春：无锡晶磊电子有限公司研发工程师。

邵井国：赛尔康技术（深圳）有限公司研发工程师

胡文干：深圳晶辰电子科技股份有限公司研发工程师