

# 一二次电流的功率因数对互感器的影响分析

蒋大维, 顾伟

江阴市星火电子科技有限公司

**摘要:** 测量用电流互感器（一次互感器）通常是指把一次大电流变成二次小电流（按照GB/T 20840.2，一般二次电流为5A、1A），以便于能够让电能表来进行测量。而电能表里一般也会有个二次互感器，它的一次电流即是一次互感器的二次电流，通常为5A、1A，而二次电流通常为mA级的。见图1。

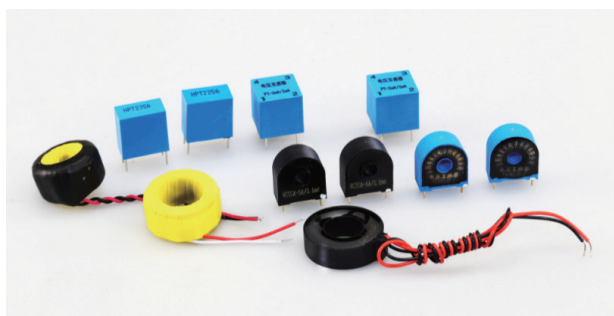


图1 仪表内使用的二次微型电流互感器或者电压互感器

GB/T 20840.2《互感器第2部分：电流互感器的技术补充要求》第5.6.201.3要求：对所有的准确级，负荷的功率因数均为0.8（滞后），当负荷小于5VA时，应采用功率因数为1.0，且最低值为1VA。

国标规定了一次互感器的二次负荷的功率因数，那么这个功率因数对互感器到底有什么样的影响？影响有多大？本文将进行探讨。

## 1 功率因数

功率因数与电路的负荷有关，纯阻性负荷，功率因数为1.0，也是最理想的状态，如果是感性和容性负荷，功率因数就会< 1.0，就存在着无用功，现在大部分电路负荷为感性负荷，功率因数< 1.0。

$$\text{功率公式：} P=U \cdot I \cdot \cos\Phi$$

式中：P：有功功率，U：电压，I：电流， $\Phi$ ：电压和电流的夹角， $\cos\Phi$ ：电压电流夹角的余弦值，即是功率因数PF。

$\Phi$ 这个夹角主要就是由于电感性或者电容性负载造成，电感性负载 $\Phi$ 就是滞后，电容性负载 $\Phi$ 就是超前，目前

大部分的电路都为电感性负载，所以我们主要讨论电感性负载，即为功率因数滞后。

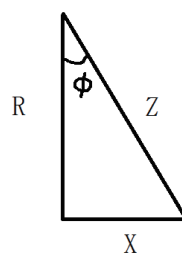


图2 阻抗三角

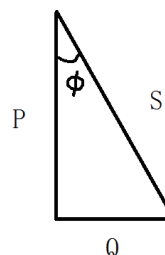


图3 功率三角

如图2：电感性阻抗三角，R：阻性负载，X：感性负载，Z：总负载。由于X的存在造成了 $\Phi$ 的夹角，如果没有 $\Phi$ 的存在，即是0，那么 $R=Z$ ， $\cos\Phi$ 就为1。

有下列公式： $R^2+X^2=Z^2$ ； $R=Z \cdot \cos\Phi$ ； $X=Z \cdot \sin\Phi$ 。

如图3：P：有功功率，Q：无功功率，S：视在功率。

有下列公式： $P^2+Q^2=S^2$ ； $P=S \cdot \cos\Phi$ ； $Q=S \cdot \sin\Phi$ 。

## 2 一次互感器的二次负荷功率因数分析

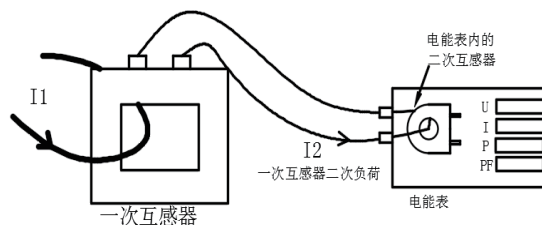


图4 一次互感器和二次互感器的标准用法

如图4，功率因数影响主要为一次电流 $I_1$ （一次回路的大电流）和二次电流 $I_2$ （一次互感器转换的二次电流）

## 2.1 国标对 12 功率因数的要求

GB/T 20840.2《互感器第 2 部分：电流互感器的技术补充要求》第 5.6.201.3 要求：对所有的准确级，负荷的功率因数均为 0.8（滞后），当负荷小于 5VA 时，应采用功率因数为 1.0，且最低值为 1VA。

国标的要求是对互感器准确度测试的要求，负荷高，功率因数为 0.8，考虑到负荷高，那么对应着的二次电缆会留得很长（电表内基本上是短接，基本不存在着负荷），那么可能产生一定的感性负载，所以将功率因数定义为 0.8，负荷小于 5VA，二次电缆相对较短，基本上都是阻性负载，所以功率因数定义为 1.0。

## 2.2 功率因数 0.8 对互感器准确度的影响

互感器准确度公式：

比差公式： $f = -(I_0/I_1)\sin(\alpha+\Phi)*100, \%$ ；

角差公式： $\Delta = I_0/I_1\cos(\alpha+\Phi)*3438, '。$ （具体推导见《电流互感器原理分析（准确级）及设计举例》）

式中： $f$ ：比差， $I_0$ ：励磁电流， $\alpha$ ：铁心损耗角， $\Phi$ ：阻抗角。

功率因数  $\cos\Phi=0.8$  时，可以计算其夹角  $\Phi=36.87^\circ$ ，即是  $\Phi$  从 0 变成了 36.87。那么比差  $f$  值中  $\sin$  值变大，角差  $\Delta$  中  $\cos$  值变小。

所以当负荷功率因数变小时，准确度的变化是，比差值变大，而相差值变小。

## 3 一次互感器的一次电流功率因数分析

二次负荷的功率因数被标准规定，同时受到人为的控制，不可能变得很低，但是一次互感器的一次回路大电流情况就不一样了，一次电流的工作场所功率因数为 1.0，但也不可能功率因数非常低，在一次电流功率因数非常低的环境下（当然国家电网对于很低的功率因数要进行采取措施的）。互感器还能准确测试它的电流么，或者要怎样才能测量低功率因数下的一次电流值？

电能表的误差主要是由互感器的比差  $f$  和角差  $\Delta$  构成的。比差  $f$  是数值大小，对测量的电表来说，误差是线性的，无论是高功率因数还是低功率因数，如果它的比差是 0.2，那么测量的电表的误差也是 0.2。

那么不同功率因数下，角差的影响有多大呢？根据图 2 和图 3，我们来计算下：

功率因数 =1 时， $1'$  的互感器角差对测量的影响为  $\cos(1/60)*100=-0.000004\%$ ，基本上可以说在功率因数 =1 的情况下，测量主要取决于互感器的比差。

功率因数 =0.8L 时，夹角  $\Phi$  为  $36.87^\circ$ ，那  $1'$  的互感器角差对测量的影响为  $\cos(1/60+36.87)*100=-0.022\%$ 。

功率因数 =0.5L 时，夹角  $\Phi$  为  $60^\circ$ ，那  $1'$  的互感器角差对测量的影响为  $\cos(1/60+60)*100=-0.05\%$ 。

更低时，功率因数 =0.2L 时，夹角  $\Phi$  为  $78.46^\circ$ ，那  $1'$  的互感器角差对测量的影响为  $\cos(1/60+60)*100=-0.1425\%$ 。

由此可见，功率因数越低，角差对电能表的测量的影响就越大，可以总结如下：

功率因数 1.0 时： $F=f+\Phi$ ；

功率因数 0.8L 时： $F=f+\Phi*-0.022$ ；

功率因数 0.5L 时： $F=f+\Phi*-0.1425$ 。

## 4 来计算下在一次电流不同功率因数下，国家标准要求的准确度的最大电表的误差值

我们计算下要求准确度为 0.1，一次电流功率因数 1.0 时的最大电表的误差。

因为由于角差都是正值，那么导致最终的电表的误差都是负差，所以要计算最大电表的误差，我们比差都设成最大负公差，又由于比差是线性电表的误差，所以比差造成的最大电表的误差如表 3：

计算角差可能造成的最大电表误差，见表 4：

综合后，准确度 0.1 可能造成的最大电表误差，见表 5：

表 1：GB/T20840 互感器国家标准定义的测量用电流互感器的准确度要求，当然每个值都是  $\pm\%$  值

准确度	1%	5%	20%	100%	120%	1%	5%	20%	100%	120%
0.1	-	0.4	0.2	0.1	0.1	-	15'	8'	5'	5'
0.2	-	0.75	0.35	0.2	0.2	-	30'	15'	10'	10'
0.5	-	1.5	0.75	0.5	0.5	-	90'	45'	30'	30'
1	-	3	1.5	1	1	-	180'	90'	60'	60'
0.2s	0.75	0.35	0.2	0.2	0.2	30	15	10	10	10
0.5s	1.5	0.75	0.5	0.5	0.5	90	45	30	30	30

表 2: 准确度 0.1 的比差及角差要求

准确度	1%	5%	20%	100%	120%	1%	5%	20%	100%	120%
0.1	-	0.4	0.2	0.1	0.1	-	15	8	5	5

表 3 : 比差可能造成的最大电表误差

准确度	5%	20%	100%	120%
0.1	-0.4	-0.2	-0.1	-0.1
结果 (%)	-0.4	-0.2	-0.1	-0.1

表 4 : 角差可能造成的最大电表误差

准确度	5%	20%	100%	120%
0.1	15	8	5	5
计算公式	Cos (15/60)	Cos (8/60)	Cos (5/60)	Cos(5/60)
结果 (%)	-0.00095	-0.00027	-0.00011	-0.00011

表 5 : 准确度可能造成的最大电表误差

准确度	5%	20%	100%	120%
0.1 最大电表的误差	-0.4010	-0.2003	-0.1001	-0.1001

做成曲线图如下：

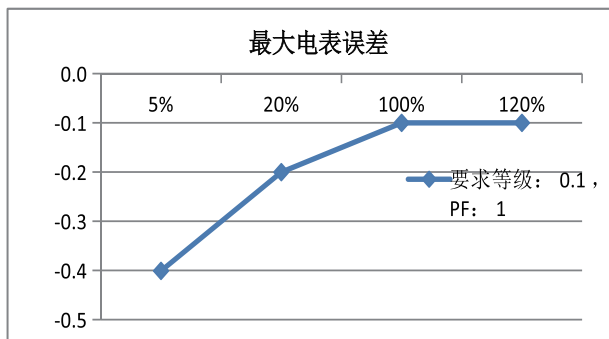


图 5 准确度 0.1 可能造成的最大电表误差

线性度电表的误差 = -0.401% - (-0.1001%) ≈ -0.3%

同理计算要求准确度为 0.1，一次电流功率因数 0.5L 时的最大电表的误差。

结果如下列表 6：

非线性电表的误差 = -1.1567% - (-0.352%) = -0.8%。

非线性电表的误差也由 -0.3 变成了 -0.8。

再计算要求准确度为 0.1，一次电流功率因数 0.2L 时的最大电表的误差。

表 6 : 我们发现由于功率因数的降低，由角差部分导致的电表的误差变大，最终导致电表的误差变大

要求等级	0.1	PF	0.5	滞后	
要求准确度	1%	5%	20%	100%	120%
比差 (%)	-	0.4	0.2	0.1	0.1
角差 (′)	-	15	8	5	5
滞后角度°	60				
总角差 (°)	-	60.2500	60.1333	60.0833	60.0833
角差产生电表的误差 (%)	-	-0.75670	-0.40334	-0.25202	-0.25202
最大电表的误差 (%)	-	-1.1567	-0.6033	-0.3520	-0.3520

表 7 : 非线性电表的误差 = -2.5385% - (-0.8126%) = -1.7259%。

每点的最大电表的误差也相较功率因数 0.5 时变大了很多

要求等级	0.1	PF	0.2	滞后	
要求准确度	1%	5%	20%	100%	120%
比差 (%)	-	0.4	0.2	0.1	0.1
角差 (′)	-	15	8	5	5
滞后角度°	78.46304097				
总角差 (°)	-	78.7130	78.5964	78.5464	78.5464
角差产生电表的误差 (%)	-	-2.13853	-1.14031	-0.71263	-0.71263
最大电表的误差 (%)	-	-2.5385	-1.3403	-0.8126	-0.8126

至此的结论：一次电流的功率因数越低，角差对电表的误差的影响越大，角差对电表的非线性度的影响越大。

## 5 如何减小低功率因数对电能表的误差影响？

### 5.1 校表补偿

例如，在额定电流下，将互感器的比差和角差调至 0 点。从而计算其比率，写入电能表，从而进行补偿，如图 6 所示：

来分别计算准确度 0.5 未经补偿和经过补偿后，PF=1.0 及 0.5L 的电表最大误差。

未经补偿，PF=1.0 时，准确度 0.5 的电表最大误差误差见下表 8：

未经补偿，PF=0.5L 时，准确度 0.5 的电表最大误差误差见下表 9：

经过补偿后，PF=1.0 时，准确度 0.5 的电表最大误差见表 10：

经过补偿后，PF=0.5L 时，准确度 0.5 的电表误差见表 11：

经补偿后，电表的额定电流（100%-120%）误差已经降到 0。计算下非线性误差，未经补偿：PF=1.0，非线性误差=-1.0%；PF=0.5，非线性误差=-4%；经过补偿：PF=1.0，非线性误差=-1.0%；PF=0.5，非线性误差=-3.2%。

结论：经补偿后，各点误差都在下降，可额定电流误差值可以降到理论为 0，经过补偿后，非线性误差也略有降低。但是低端的误差依然较大。

要解决低端的误差，只有一个办法，就是降低低端的误差，由于电表可以补偿调校，所以只要解决角差的非线性度即可。

例如 0.5 级。我可以降低 5% 的角差为 30，20% 的角差为 30，如表 12：

当然，我们也可以放高高端的误差，如表 13：

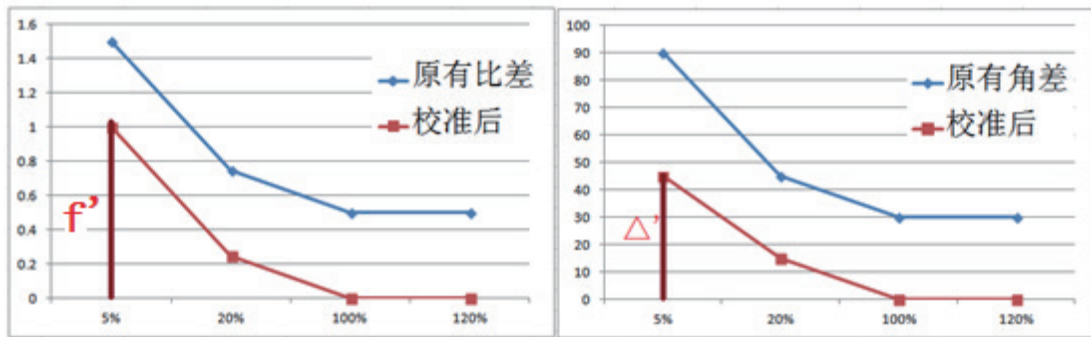


图 6 原先的误差是 0.5 级经过电表调校校准补偿后的对比折线图

表 8

要求等级	0.5	PF	0.5	滞后	
要求准确度	1%	5%	20%	100%	120%
比差 (%)	-	1.5	0.75	0.5	0.5
角差 (')	-	90	45	30	30
滞后角度°	0				
总角差 (°)	-	1.5000	0.7500	0.5000	0.5000
角差产生误差 (%)	-	-0.03427	-0.00857	-0.00381	-0.00381
电表最大误差 (%)	-	-1.5343	-0.7586	-0.5038	-0.5038

表 9

要求等级	0.5	PF	0.5	滞后	
要求准确度	1%	5%	20%	100%	120%
比差 (%)	-	1.5	0.75	0.5	0.5
角差 (')	-	90	45	30	30
滞后角度°	60				
总角差 (°)	-	61.5000	60.7500	60.5000	60.5000
角差产生误差 (%)	-	-4.56825	-2.27575	-1.51529	-1.51529
电表最大误差 (%)	-	-6.0682	-3.0258	-2.0153	-2.0153

表 10

要求等级	0.5 校准后	PF	1	滞后	
要求准确度	1%	5%	20%	100%	120%
比差 (%)	-	1	0.25	0	0
角差 (′)	-	45	15	0	0
滞后角度°	0				
总角差 (°)	-	0.7500	0.2500	0.0000	0.0000
角差产生误差 (%)	-	-0.00857	-0.00095	0.00000	0.00000
电表最大误差 (%)	-	-1.0086	-0.2510	0.0000	0.0000

表 11

要求等级	0.5 校准后	PF	0.5	滞后	
要求准确度	1%	5%	20%	100%	120%
比差 (%)	-	1	0.25	0	0
角差 (′)	-	45	15	0	0
滞后角度°	60				
总角差 (°)	-	60.7500	60.2500	60.0000	60.0000
角差产生误差 (%)	-	-2.27575	-0.75670	0.00000	0.00000
电表最大误差 (%)	-	-3.2758	-1.0067	0.0000	0.0000

表 12：角差所产生的误差经补偿后，角差所产生的非线性误差完全可以降至最低

要求等级	0.5	PF	0.5	滞后	
要求准确度	1%	5%	20%	100%	120%
比差 (%)	-	1.5	0.75	0.5	0.5
角差 (′)	-	30	30	30	30
滞后角度°	60				
总角差 (°)	-	60.5000	60.5000	60.5000	60.5000
角差产生误差 (%)	-	-1.51529	-1.51529	-1.51529	-1.51529
电表最大误差 (%)	-	-3.0153	-2.2653	-2.0153	-2.0153

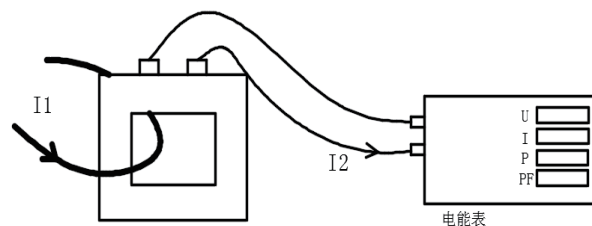
表 13：放高互感器高端的电流角差，角差所产生的误差经补偿后，角差所产生的非线性误差完全也可以降至最低

要求等级	0.5	PF	0.5	滞后	
要求准确度	1%	5%	20%	100%	120%
比差 (%)	-	1.5	0.75	0.5	0.5
角差 (′)	-	90	90	90	90
滞后角度°	60				
总角差 (°)	-	61.5000	61.5000	61.5000	61.5000
角差产生误差 (%)	-	-4.56825	-4.56825	-4.56825	-4.56825
电表最大误差 (%)	-	-6.0682	-5.3182	-5.0682	-5.0682

## 6 新型的一二次融合互感器

现在高压设备上面在讲要一二次融合，其实低压互感器也可以一二次融合，见图 7。

把一次互感器和二次互感器融合成一个互感器，这个互感器输入的是一次设备总电流，二次输出为电表可以直接使用的 mA 级电流或者 mV 级电压。这样做的好处是：(1) 可以减小互感器体积以及成本；(2) 传统一次互感器的二次高压是个问题，危及人身及二次设备安全，但一二次融



I2由5A（或者1A）变成了小信号二次信号，mA级的电流或者mV级的电压，不经过二次互感器。直接给电表传输信号。

图 7 一二次互感器工作示意图

合互感器不再有二次高压的危险，同时体积非常小，价格也相对较低。如江阴市星火电子科技有限公司生产的各类改造型项目用的电流互感器产品，如罗氏线圈系列、SCT系列，都是一二次融合的典型产品。

如图8，罗氏线圈由于其独特的结构，无二次高压，同时一次电流再大也不会产生饱和问题，但缺点也很明显，准确度明显不够，故常使用在保护设备上。

而SCT系列的产品，如图9，特点非常明显，它使用的是叠片式铁心，叠片式铁心相较于卷绕铁心的特点见图10。

卷绕铁心的导磁率很高，所以卷绕铁心做成的互感器角差很小，准确度下每点（1%、5%、20%、100%、



图8 一二次融合产品：罗氏线圈及积分器



图9 一二次融合产品，SCT系列开合式电流互感器

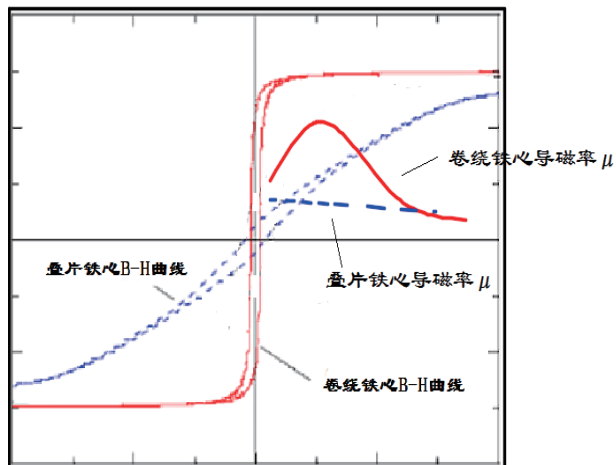


图10 同种铁心材质下卷绕铁心和叠片铁心特点比较

120%) 的误差很小，但卷绕铁心的导磁率不是线性，所以导致做成的互感器的非线性误差非常的大，特别是开合式电流互感器。导致最终电表的非线性误差较大，不利于最终校表。而这个恰恰是叠片式铁心的优点，叠片式铁心的磁导率相对较低，每点的角差相对较大，但是叠片铁心的线性度较好，这样，电表的非线性度误差就非常的小，非常利于校表。

现在有很多地区都是采用叠片式铁心来做互感器，特别是更不利于控制准确度的开合式互感器，目前美国的低压设备改造在大量使用SCT系列的互感器，其铁心根据要求可以采用坡莫合金或者硅钢铁心。

所以说，根据现在的电表调校技术对于互感器来说，最重要的不是互感器的准确度有多高，而是互感器的非线性误差要足够好。