

BL6513C 设计三相四线制宽量程表

一 引言:

本应用手册介绍了如何使用上海贝岭股份有限公司(Shanghai Belling Corp.)生产的 BL6513C 电能计量芯片设计的一种高性能、低成本的三相四线制电能表, 该电能表适用于三相配电系统。

BL6513C 电能计量芯片采用当今广泛流行的 DSP 技术, 大大地提高了电能计量的精度。芯片内部包含六路 16 位的高精度 $\Sigma\Delta$ ADC (模数转换器), 理论上精度可以优于十万分之二; 它的内部还包含有一个基准电压源, 因此无需外加基准电压源, 就能为 $\Sigma\Delta$ ADC 提供高稳定性和低温度漂移的电压基准, 可以使芯片适合一些气候环境比较恶劣的地区的应用要求; 从 ADC 转换得到的数字信号由芯片内部的数字信号处理模块, 完成全部的电能计算, 并输出与被测电量的有功功率成正比的计度脉冲, 它的低频脉冲可以直接驱动机电式计度器, 高频脉冲可以用于校验和进行远程集中抄表。BL6513C 为电能计量提供了高性能、低成本的解决方案, 可以实现真正的双向防窃电功能。BL6513C 具体的性能指标请参考 BL6513C 的数据手册。

二 设计目标:

本设计采用中华人民共和国 1 级和 2 级静止式交流有功电度表的国家标准(GB/T 17215-2008)为设计依据。但是为了在更苛刻的条件下满足用户的需求, 该电能表的设计指标远远高于基本的技术指标。表(1)列出了本设计电能表的主要设计指标:

测量范围:	3000:1
测量范围内非线性误差:	<0.1%
测量范围内脉冲非均匀性:	<0.1%
感性(0.5L)误差:	<0.1%
容性(0.8C)误差:	<0.1%
电压范围:	70%---120%
工作温度:	-40°C~85°C

表(1) 本设计电能表的主要设计指标

表(1)中的误差均指百分比误差, 按照 GB/T 17215-2008 的定义百分比误差表示为:

$$\text{百分数误差} = \frac{\text{仪表记录的电能} - \text{真值电能}}{\text{真值电能}} \times 100\%$$

由于真值电能无法测定, 所以我们采用更高精度的电能计量仪器(精度为 0.05 级或者更高)的测量值来代表真值电能。

电表的每相电压都能为整表提供工作电压, 因此如果缺少三相中任何一相或者两相电压

整个电表能够正常工作。

三 设计细节：

本设计采用的电路原理图，本设计采用电流互感器加采样电阻进行电流-电压信号转换，为 BL6513C 的电流输入端提供负载电流的实时信号。采用低成本电阻分压网络衰减相电压，为 BL6513C 的电压输入端提供线路电压的实时信号；采用芯片内部提供的参考电压；采用机电式计度器记录有功电能的使用量；采用 LED 进行用电指示和光电耦合器输出实现快速电表校验，减少测试成本；本设计具有防反向用电功能。三相中任何一相的有功功率为负时，反向用电指示灯 LED 点亮。

BL6513C 提供三相功率绝对值相加和向量值相加两种选择。第 17 管脚 ADDSEL 为低电平时，三相功率为绝对值相加。当 ADDSEL 为高电平时，三相功率为代数和相加，也就是说如果其中一相功率为负时，总功率为其他两相功率和减去这一相的功率。

1. BL6513C 电能计量芯片的工作模式

SCF, S0, S1 是 BL6513C 芯片模式选择管脚，可以通过接不同的电压（+5V 或 0V）来调整芯片的工作模式，CF, F1, F2 的输出频率与 SCF, S1, S0 输入脚关系如下所示：

输入信号，电流、电压均为 ±500mV 峰峰值，交流 50Hz						
SCF	S1	S0	F1-5	Max Freq On F1/F2 For AC input [Hz]	CF vs. F1/F2	Max Freq On CF For AC input [Hz]
1	1	1	0.566	0.45	16	7.2
1	1	0	2.264	1.8	8	14.4
1	0	0	1.132	0.9	8	7.2
1	0	1	1.132	0.9	16	14.4
0	1	1	-	-	-	29491.2
0	1	0	-	-	-	14745.6
0	0	1	4.527	3.6	16	57.6
0	0	0	4.527	3.6	8	28.8

表（2）F₁₋₅ 频率选择和最大输出频率

表中 F₁₋₅ 是常数，由主时钟分频得到，F1(或 F2)、CF 是交流输入时对应各个输出端的最高输出频率。F1（或 F2）端口的输出频率和输入电流电压的关系可以用下面公式表示：

$$Freq = \frac{13.25 \times (V_{AP} \times I_A + V_{BP} \times I_B + V_{CP} \times I_C) \times F_{1-5}}{V_{REF}^2} \quad (1)$$

BL6513C V_{REF} 的典型值为 2.5V。

2. 电表设计举例：

1. 总体方案设计

采用附图（1）的电路，对于一般的三相四线制输配电系统，结合 GB/T17215-2008 标准，设计指标可以定为：

额定电压 220V，

最大电流 $I_{max}=60A$ ，基本电流 $I_b=10A$ ，

电表常数 800imp/kwh。

计度器：100：1

注：GB/T17215-2008 标准的定义基本电流（ I_b ）是指确定直接通仪表有关特性的电流值，通常情况下， I_b 是校表电流。 I_{max} 是指在规定精度范围内电能表所能承受的最大电流。

有了设计指标，就可以对 BL6513C 的工作模式进行选择。在 I_{max} 条件下，电压和电流的相位差为零（即功率因数 $PF=1$ ）时的有功功率：

$$P=3 \times 220 \times 60A=39.6kw$$

由此可得在规定量程范围内 CF 脉冲最高频率为：

$$CF=800imp/kwh \times 39.6kw=31680imp/h=31680/3600=8.8Hz$$

在规定量程范围内 F1/F2 脉冲最高频率为：

$$F1/F2=100imp/kWh \times 39.6kW=3960imp/H=1.1Hz$$

为保证冗余，即使电压为 $120\%U_n$ ，电流为 $130\%I_{max}$ ，CF 最高频率为 $8.8 \times 1.3 \times 1.2=13.728Hz$ ，F1/F2 的脉冲频率为： $13.728/8=1.716Hz$ 。

根据表 2 的数据，可以选择 $SCF=1, S1=1, S0=0$ 。

以（ $MCF=1, SCF=1, S1=0, S0=1$ ）为例，根据前面的计算结果，根据公式（1）反推出在最大量程 F1/F2 输出条件下，对应的电压和电流输入端的电压乘积了，

$$V_{AP} \times I_A + V_{BP} \times I_B + V_{CP} \times I_C \approx 0.229$$

每相的电压电流通道乘积为 $0.229/3=0.076$ 。从保持充裕的电流输入动态范围和充分利用线性空间考虑，电流通道中的最大输入差分信号为 $\pm 660mV$ （对于正弦信号，有效值为 $467mV$ ），使用 70% 的量程范围，此时电流通道的有效电压值应为 $0.467 \times 70\% \approx 0.327V$ ，则电压通道的电压值为： $0.076/0.327 \approx 0.232V$ 。

I_{max} 为 60A，考虑采用 1000:1 的精度 0.1 级的电流互感器，选择电流通道的采样电阻为 $327mV \div 60mA \approx 5.45$ 欧姆。其中 60mA 是负载电流为 60A 时电流互感器次级对应的电流。对应的可以采用两个 2.7 欧姆的电阻组成差分输入电路。注意采样电阻应该采用精密电阻，也减少输入信号的直流偏移。

接下来验证一下启动电流是否满足要求。BL6513C 的 CF 最小输出频率是电压电流满幅输入 ($\pm 660\text{mV}$ 峰峰值) 的 0.002% 对应的输出频率。

$$f_{\text{start}} = 14.4 * (660 * 660) * 0.002\% / (500 * 500) = 0.000502\text{Hz}$$

启动电流由下式：

$$\frac{3 * 220\text{V} * I_{\text{START}}}{1000} * \frac{800\text{imp} / \text{KWHr}}{3600\text{sec} / \text{Hr}} = 0.000502\text{Hz}$$

得到 $I_{\text{START}} = 3.4\text{mA}$

GB17215-1988 规定启动电流为 $0.004I_b = 0.004 * 10 = 40\text{mA} > 3.4\text{mA}$ ，满足条件。

2. 电流通道的设计

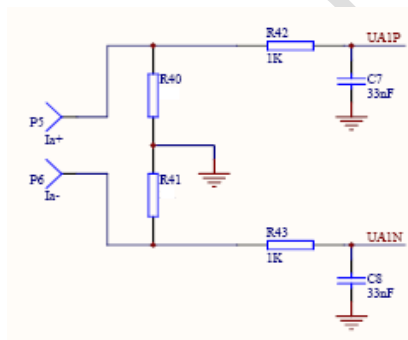
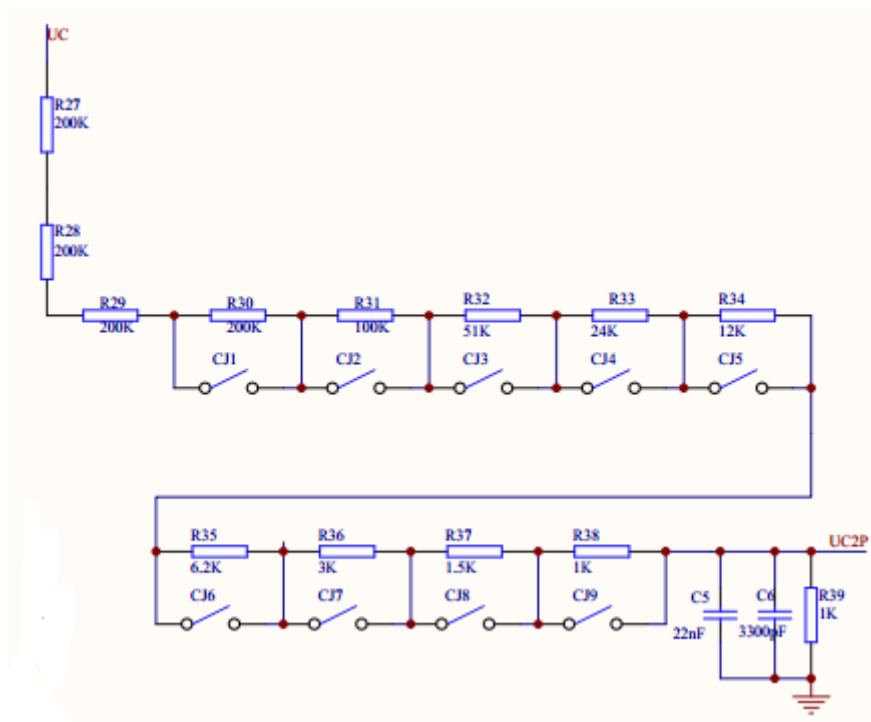


图 (1) 电流通道线路图

在图 (1) 所示的电路中，J17 是电流互感器的次级输出，通过电流互感器隔离各相电压，将大电流信号转化为小电流信号，经过采样电阻 (R53, R54)，实现电流-电压变换。采样电阻的阻值由设计时决定。

低通抗混叠滤波器的阻容取值分别为 1K 和 33nF。由于抗混叠滤波器的相位响应对电阻电容的阻值和容值偏差反应灵敏，建议采用高精度的电阻和电容，以确保批量生产时电表感性误差接近为零。

3. 电压通道的设计



图（2）电阻分压网络线路图

图（2）是典型的电压通道的信号接入方式，通过电阻分压网络将 220V 的交流电压衰减到所需要的电压，该结构的优点是成本低，校验方便，连线简单，缺点是不能有效地抑制共模噪声干扰。如果采用和电流通道相似的差模输入法，可以更有效地消除由 PCB 布线和相线引入的噪声干扰，但是差模输入需要使用电压互感器，导致成本增加。本设计采用电阻分压网络方法。第一次开发时，可以适当对 C7 的容值做适当调整，以保证电压电流两个通道的相位匹配，降低感性负载情况下的测量误差。

在前面的计算中，电压通道需要将 220V 的线电压衰减到 232mV。但是由于芯片工艺容差，不同芯片之间的增益存在一些差别。为了容许这些不确定因素的存在，输入到通道 2 的电压应当允许在 $\pm 15\%$ 的范围内连续可调，即电压的绝对值的可调范围为：197.2mV 到 267mV。其中阻值固定部分的大小为： $(220V/135mV) \times 1K=823K$ ，可调部分的大小为 $1116K-823K \approx 292K$ 。

采用二进制权重电阻链，如果电表精度等级要达到一级表的标准，那么电阻分压网络的最小可调电阻所占的比重必须小于 1%，需要的电阻个数 n 需要满足下面的等式： $2^n=(1/1\%+1)$ ，所以 $n=7.67-1=6.67 \approx 7$ 。应用中的调节精度达到了 0.2%，所需要的电阻个数为 $n=9$ 。电阻网络中的最小电阻为：

$$R = \frac{\text{电阻分压网络可调部分的阻值}}{2^n - 1} = 292K / (512 - 1) \approx 0.57K\Omega$$

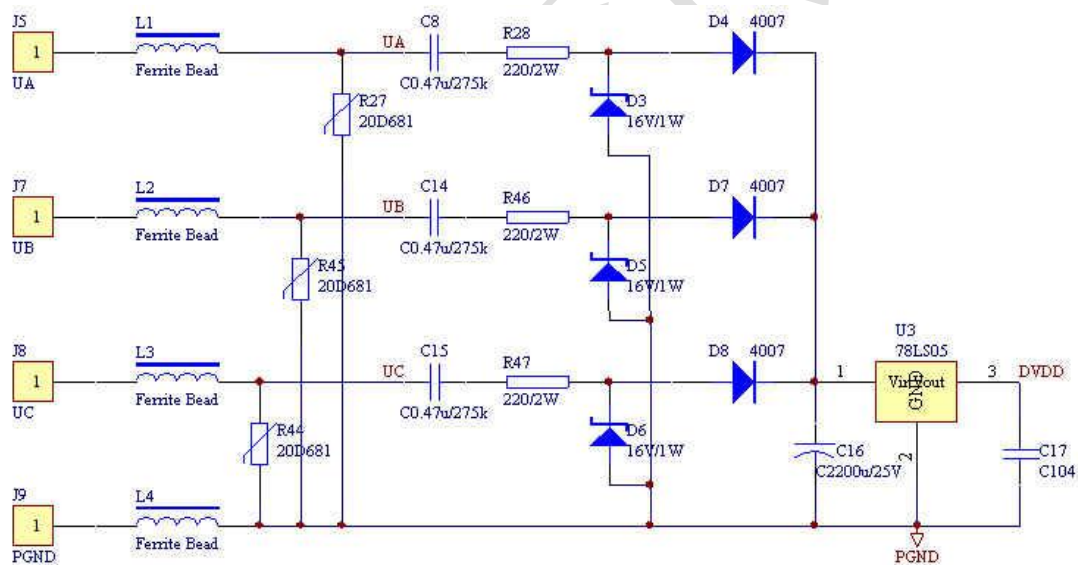
其它电阻的大小依次是最小阻值的二进制权重。

按照前述方法设计的电阻链,可以九位分辨率从 197.2mV 到 267mV 的范围内连续可调,校验时可以采用逐次逼近的方法进行精确校验,依次接通跳线 J1,J2,J3...,如果接通某一跳线使校验误差为正数值,则应当将这一跳线断开,再接通它下一个跳线,如此反复直到电表精度满足要求。

电路设计时,将电阻网络的电阻旁边并联一个焊盘制作的跳线开关。校验时根据不同的误差,短接相应权重电阻边上的焊盘开关。将电阻的两端的空焊盘用焊锡短接实现跳线,这种方法简单,同时可靠性和稳定性都能满足要求。

4. 电源设计

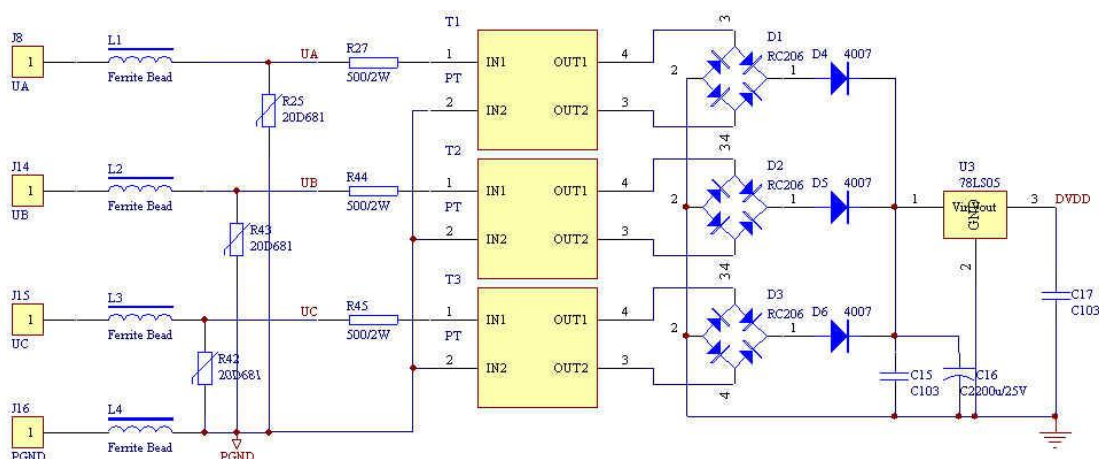
BL6513C 的工作电压是 5V,可以采用两种电源方案:变压器降压方案和阻容降压方案。图(3)给出了阻容降压方案的电路图,这个方法和单相电子式电表的阻容降压方案结构相似,注意的是 D3、D5、D6 采用的是 16V/1W 的稳压管,以保证在 70%电压时能提供足够的 5V 芯片工作电压。三相直流电压分别通过三个并联的二极管 D4、D7 和 D8 合成 15V 左右的直流电压。这个直流电压通过 78LS05 降压,产生提供计量芯片工作的电压 5V。



图(3) 阻容降压式电源方案

经过实验证明,这种电源方案能够保证单相电压 70%Un (154V) 供电时,电表正常工作。

图(4)给出了变压器降压式电源方案。



图（4）变压器降压式电源方案

变压器方案中 R27, R44 和 R45 的电阻起保护变压器作用。

5. PCB 设计

在电子电度表中，220V 的高电压和 mV 数量级的小信号共集于一块印刷电路板上，所以，该表的印刷电路板的设计、质量、焊接和装配都是产品性能优劣的关键。

印刷电路板应具有良好的绝缘——印刷电路板的绝缘电阻应大于 $10^{11}\Omega$ ，用 1000M Ω 的兆欧表测量印刷电路板上任何两不相连的点（线），表指针不能有明显的摆动。

1) 印刷电路板走线要科学

a. 220V 的高电压走线要尽量短，尽量远离小信号的走线；高压走线要注意爬电距离，220V 在 4mm 以上；

b. 模拟输入部分如电流通道的的信号线要尽量的短，同相的电流通道信号线互相靠近、平行走线。与测量信号无关的信号线应该尽量远离电流通道信号线；

c. 差分信号走线及相关的元件排列尽量平衡对称，以减少线间干扰；

d. 模拟部分的器件排列和走线尽量与数字部分分隔开来，以防止信号回路之间的相互串扰；

e. 印刷电路板尽量单面走线，另一面敷地铜箔既作电磁屏蔽用，又作地线用，注意保持地的完整，以降低地线导通电阻，减少干扰信号。

f. 旁路/滤波电容尽量靠近有源器件的电源输入脚，以达到最佳的旁路和滤波效果；

g. 晶振及相应的补偿电容尽量靠近芯片的 CLKIN、CLKOUT 脚，并且外壳接地，以保证晶体振荡的稳定；

h. 基准电压 Vref 的稳定对芯片的测量精度影响比较大，其外接的滤波电容尽量靠近芯片；

i. PCB 走线尽量使用 45°折线；

2) 印刷电路板焊接完成后，必须进行清洗，以清除残留的腐蚀性化学物质，（即使使用免清洗助焊剂也不能例外），并做防潮处理，否则电度表的稳定度可能会受到影响。

3) 分压网络中电阻参数要求:BL6513C 电子电度表的电阻分压网络的分压系数一定要稳定，否则会引起电度表精度的不稳定。要保证一级表的精度，建议使用精度优于 1%、温度系数小于 100ppm/°C 的电阻。

- 4) 电解电容器: 电解电容器的寿命直接影响到电能表的工作寿命。建议使用长寿命低温度系数的电解电容器。

附录：

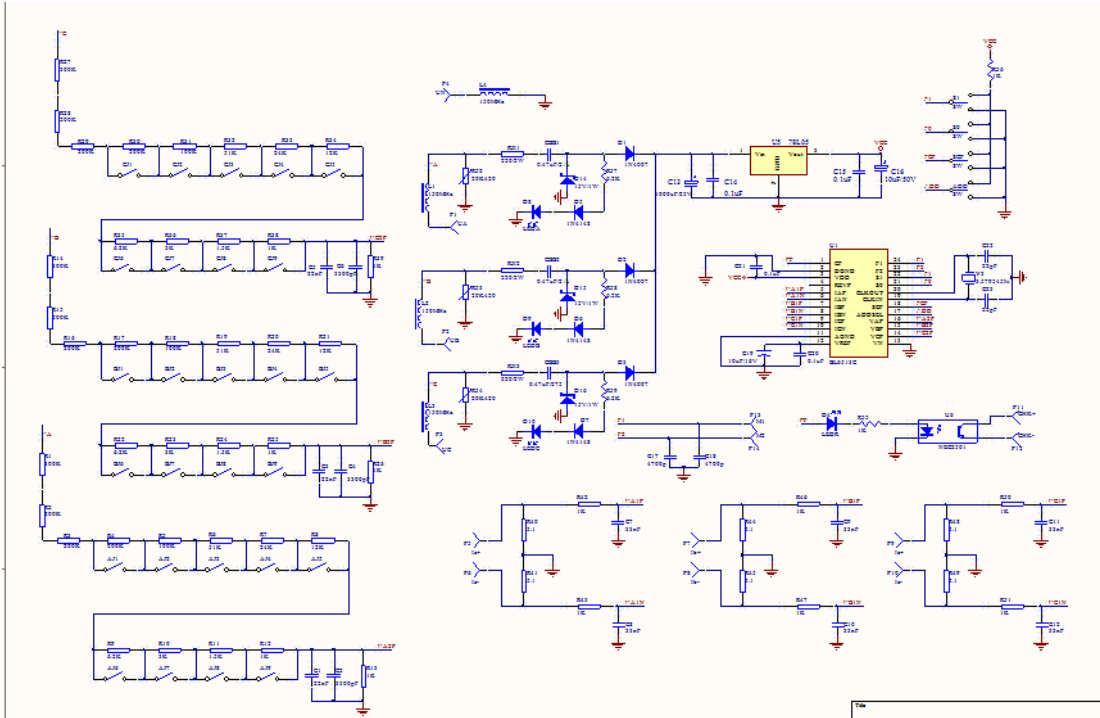


图 (1) BL6513C 简单三相四线制原理图

