第10卷 无锡轻工业学院学报 Vol. 10
第3期 JOURNAL OF THE WUXI INSTITUTE OF LIGHT INDUSTRY 1991 No. 3

微小绝对压力测量方法的实验研究

陆纪功 徐 玲

(自动化系)

摘要 本文介绍了利用化学纯液体的饱和蒸汽压与其温度之间的对应关系来测量微小绝对压力的一种方法及其试验结果。

关键词 绝对压力；饱和蒸汽压；温度；热电阻；加热电流；传热

目前，国产最小量程的绝对压力变送器，在诸如高分子化合物高真空蒸馏等一些生产或试验场合，仍感量程过宽。要想进一步缩小，技术上尚存在一些困难。而目前普遍采用的U型管液柱式绝对压力计，却难以实现信号远传、报警等。且仅数毫米高的水银柱读数亦甚为不便。因此，有待进一步开发(1—10)×133Pa范围内的微小绝对压力的测量仪表。作者从一个新的角度，就此问题进行了实验研究，并取得了较为满意的结果。

1 绝对压力—电阻转换器的结构与工作原理

绝对压力—电阻转换器的原理结构如图1所示。

在一用橡皮塞5密封并与测压空间相通的圆柱形容器1内，装有适量的工作介质(某种化学纯液体)4。纱布条3一端浸入工作介质中，另一端包在微型铜热电阻2的保护套管外侧，以便在其上形成一层很薄的液膜并始终保持湿润。

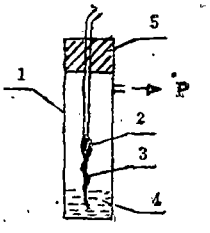


图1 绝对压力-电阻转换器示意图

众所周知，化学纯液体的饱和蒸汽压力P与其温度 t_0 之间存在一一对应的关系。且大多服从安托因方程[1]，即

$$\log P = A - \frac{B}{t_0 + c} \qquad (1)$$

式(1)中，A、B、C均为常数，其值决定于物质的性质、温度范围和压力的单位。

当通过二次仪表供给热电阻某一恒定电流的时候，热电阻发热，温度上升，并通过保护套管等向外侧液膜传热，使其温度升高，蒸汽压也随之升高。当达到与待测绝对压力 P相等时，该介质沸腾，并保持其在该压力下的沸点t_0不变。此时，热电阻的发热量、传热量与工作介质蒸发所带走的汽化潜热相等，即达到了热平衡，热电阻阻值也趋于某稳定值；如果此时系统压力下降，即低于介质原沸点温度下的饱和蒸汽压，则工作介质必然急骤汽化，带走较多的热量，导致液膜温度下降。当其降到与系统压力相对应的饱和温度时，液膜温度维持不变，又重新达到上述热平衡状态。热电阻阻值稳定在一个新的较低数值上。如此实现了压力—电阻的转换。显然，这里的热电阻，集发热元件和测量元件于一身。

由于热电阻本身和转换器结构上的缘故，其传热方式和过程十分复杂。为了简化并定性

本文1990年11月7日收到

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地说明问题，假定热量以对流和传导两种方式传递，且对于某一确定结构的转换器，其总传热系数K近似为常数。如果传热面积为S，热电阻丝和液膜温度分别为t和t_0，则其传热速率q为：

$$q = KS(t - t_0)^{[2]} \tag{2}$$

当达到热平衡时，传热速率与热电阻发热功率相等。即

$$q = I^2 \cdot R_t \tag{3}$$

I——通过热电阻的电流

R_t——热电阻的阻值

实验中所用的铜热电阻，其阻值与电阻丝温度t之间的关系为

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \tag{4}$$

R_0——热电阻在0℃时的阻值

α——铜电阻的电阻温度系数

联立求解(2)、(3)、(4)式，并经整理后得到

$$R_t = \frac{R_0 + \alpha t_0}{1 - (\alpha/KS)I^2} \tag{5}$$

由于R_0、α、K、S、I均为常数，所以热电阻阻值R_t与工作介质的饱和温度t_0一一对应。而根据(1)式可知，平衡时，介质之饱和蒸汽压即系统压力P又与t_0一一对应。那么，R_t与P之间也必然存在确定的对应关系。这就是实现绝对压力—电阻转换的理论依据。

需要说明的是，影响总传热系数K的因素十分复杂，随介质参数及沸腾状态等而略有改变，而且精确的理论计算又几乎不可能，所以，实际的$R_t - P$关系只有通过实验来确定。

2 试验装置与方法

试验装置如图2所示。

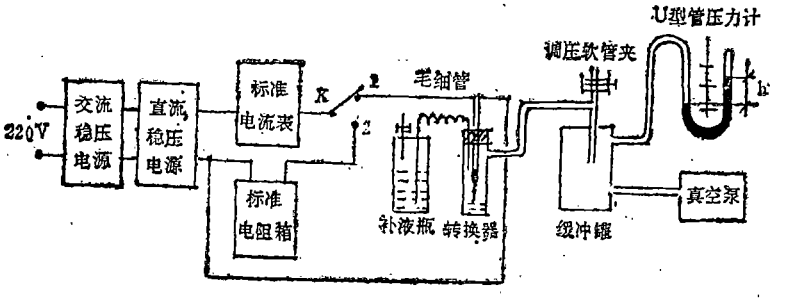


图2 试验装置

试验方法如下：

单刀双掷开关K打到“1”，接通电源，启动真空泵，用调压软管夹调整系统压力至某稳定值。开始时，由于转换器热电阻阻值R_t改变，标准电流表指示随之变化。通过不断调整直流稳压电源输出电压，直至电流表指针指示在某一试验值I_1并维持数分钟不变。此时说明转换器已达到热平衡状态，即可在U型管水银压力计上读取系统绝对压力P。然后将K换向

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

“2”，调整标准电阻箱，使电流表示值$I_2 = I_1$。则电阻箱之读数$R_x = R_t$。

由上述实验步骤可见，当K由“1”换向“2”并调整好R_x这段时间，以假定直流输出电压恒定不便为前提。由于用了交、直流两级稳压，其操作时间很短，可以认为这一假定是正确的。多次实验比较也说明了这一点。

由于没有用以测量(1—10)×133Pa绝对压力的标准表，本试验只能用U型管水银绝对压力计。经统一读数标准，并借助放大镜等工具多次仔细读数而最终确定系统压力。由于应用了缓冲罐，一经调定，系统压力十分稳定，所以虽然存在一定误差，但估计不致太大。

为了方便补充工作介质蒸发的消耗，用毛细管(本试验用单芯细导线抽出芯线后代用)将补液瓶与转换器连接起来，借助两者之间的压差间歇补液。当然，如果根据流体力学有关公式和工作介质的耗量，通过计算和试验，也可以用一细长毛细管连续补液。不过，理论计算和实验均已表明，工作介质耗量极小，间歇补液周期很长，不会给测量操作带来太多的麻烦。

3　结果与讨论

作者是先后用水和分析纯无水乙醇为工作介质作试验。

3.1　用水作工作介质

3.1.1　在不同压力、不同电流下，得到一组R_t-I-P曲线。如图 3 所示。

由图 3 可见，在同一压力下，R_t随电流的增大而增加，而在同一电流下，R_t随着压力的增大而增加。也就是说，热电阻阻值R_t是加热电流I和压力P的函数，如果电流I一定，则R_t与P成单值函数关系。

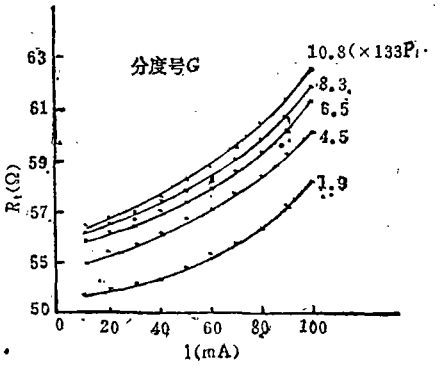


图 3　不同压力、电流的R_t-I-P曲线

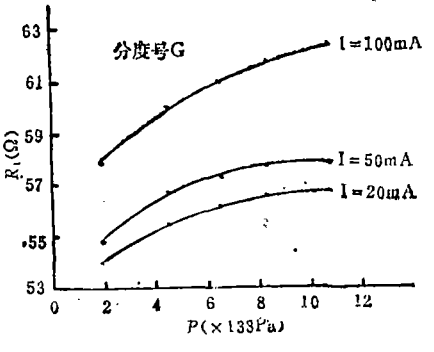


图 4　R_t-P-I曲线

为了作更一步分析，将图3转绘成一组R_t—P—I曲线。如图4所示。

结合式(1)、(5)和图 4 可见：

(1)在同一电流下，R_t与P成非线性关系。将水在(1—10)×133Pa范围内的三组P(×133 Pa)；t_0(℃)值[3]代入(1)式，得到其间的安托因方程为

$$\log P = 8.33 - \frac{1864.12}{t_0 + 243.08} \tag{6}$$

由式(6)可得表1。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 水的饱和蒸汽压与沸点温度关系

饱和蒸汽压P(×133Pa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
水的沸点t_0 (℃)	−19.3	−10.9	−5.7	−1.9	1.2	3.8	6.0	7.9	9.7	11.2

由表1可见，单位压力变化所对应的沸点温度的变化不同。压力低时大，压力高时小。结合(5)式不难看出，在较低压力时，单位压力变化所引起的阻值变化大，反之要小。所以曲线起始段斜率大，而末端斜率小。这也说明，该方法尤宜测量微小的绝对压力。

(2)在相同最低压力(例如2×133Pa)下，加热电流I越大，则热电阻的初始值R_{t0}越大。这一结果同样可由式(5)看出。因为压力相同，对应的t_0也相同，亦即式(5)的分子相同；而电流I越大时，式(5)的分母则越小，所以R_{t0}必然增大。

(3)在相同压力变化范围内(例如(2—10)×133Pa)，加热电流I越大，其阻值变化量ΔR_t越大($I=20$mA，$\Delta R_t=2.55\Omega$，$I=50$mA，$\Delta R_t=2.90\Omega$，$I=100$mA，$\Delta R_t=4.15\Omega$)，亦即R_t-P曲线的平均斜率越大，转换灵敏度越高，线性关系也明显改善。

如令(2、10)×133Pa下水的沸点分别为t_0、t_0'，相应的热电阻值为R_t、R_t'，并将其分别代入式(5)不难得到

$$\Delta R_t = R_t' - R_t = \frac{\alpha(t_0' - t_0)}{1-(\alpha/KS)I^2} \tag{7}$$

由(7)式可见，对于某一确定的压力范围来说，$t_0'-t_0=$常数。那么，随着I的增大，ΔR_t必将迅速增加。

综上所述，如不顾及其他方面的限制条件，仅从压力—电阻转换关系考虑，增大热电阻的加热电流显然是有利的。这从理论和实践两方面为进一步试验研究指出了方向。

3.1.2 复现性试验

加热电流I分别恒定在100mA和110mA，在每一种电流下，系统压力由小到大，再由大到小地作两个来回的重复试验，两组试验结果见图5。

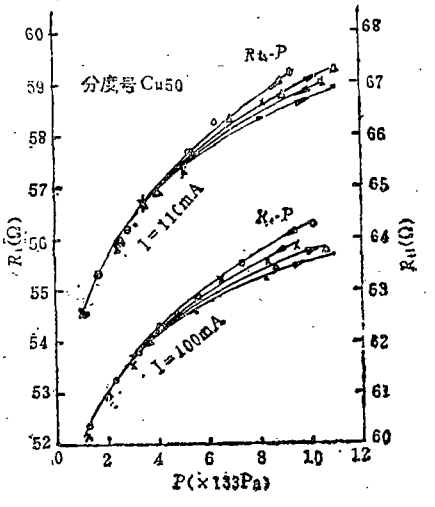


图5 复现性试验结果

由图5可见，当压力较低时，R_t-P关系的复理性都较好。随着压力升高到一定程度，复现性逐渐变差。另一方面，电流越大，亦即加热功率越大，复现范围越宽，而且曲线斜率较大，线性较好，这与前面的实验结果是一致的。

出现上述情况的原因是，当加热功率足以使液膜沸腾，曲线就重合。反之就分离。因为当液膜处于沸腾态时，其饱和温度t_0仅与系统压力相对应。不管压力由低升高或由高降低到同一值，其t_0相等，根据(5)式，R_t值也相等，所以复现性较好。此时加热量等于蒸发所带走的汽化潜热，即达到了热平衡。如果这时系统压力升高，起初液体停沸，并处于表面自然蒸发状态。若此时加热功率($I^2\cdot R_t$)大于蒸发速率(w)与蒸汽的汽化潜热(γ)之积，液膜显热增加，温度升高，表面自然蒸发速率及带走了汽化潜热也随之增加，温升速率逐步降低。至某一时刻，又达到了新的热平衡状态。如果

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

此时液膜达到了饱和温度，液体就重新沸腾，否则就不沸腾。如果是后者，由于转换器通过各种途径与外界的热交换的情况不同等原因，就可能处于不同的平衡温度，以致 R_t-P 关系无法再现。反之，当液膜处于沸腾态时，与外界热交换的结果只影响其蒸发速率，而不影响其沸腾温度和R_t值。由于随着压力的升高，蒸汽的密度及蒸发速率增加，蒸发所带走的汽化潜热也更多，以致在一定的加热功率下，无法达到沸腾态，所以在较高压力下复现性变差。而增大加热功率，液膜就会在更宽的压力范围内达到沸腾态，所以复现段上移。

实验结果和理论分析再次说明，增大加热电流在扩大测量范围、改善线性关系等方面是有利的。然而，由于现有微型铜热电阻结构上的原因，为了保证其长时间的正常工作，已不宜继续加大其工作电流(实验中，一支G分度号微型热电阻，当电流加大到150mA 时立即烧断)。为了在较低的工作电流下适当扩大测压范围，基于上述分析，并比较了乙醇与水的有关物性参数，又用乙醇作工作介质做了类似的试验。

3.2　用分析纯无水乙醇作工作介质

3.2.1　在80mA 电流下，改变压力作复现性试验，其结果如图6。由图6可见，用乙醇作工作介质时，虽然加热功率降低了许多，但在作者所试压力范围内，表现了较好的R_t-P关系的再现性。其原因是乙醇的汽化潜热和比热比水低得多(分别为水的37%和57%左右)。其蒸发所带走的汽化潜热和液膜升温所需显热较少，以致能在较大压力范围内达到沸腾态，进一步证明了上述的理论分析。

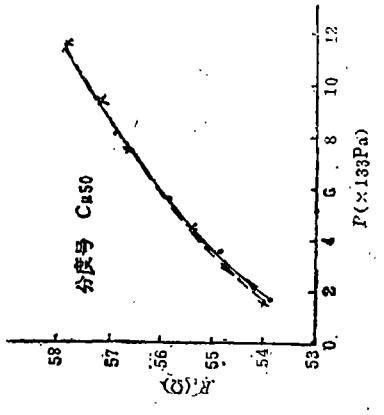


图 6　改变压力重复试验结果

3.2.2　动态响应　当将上述压力—电阻转换器与后面将要提及的模拟显示仪表联机调试时，阶跃增加 133Pa 左右压力，其响应时间，用水作介质时约为1min，而用乙醇作介质时约为 20s。作为完全相同的转换器和显示仪表，其差别当决定于它们物性参数的不同。

如前所述，忽略与外界的热交换，其热平衡关系式可写为

$$(I^2\cdot R_t - w\cdot\gamma)\,dt = MC\,d\theta \tag{8}$$

式中

t——时间

θ——液膜温度

M——液膜质量

c——工作介质的比热

w——蒸发速率

γ——介质的汽化潜热

将(8)式整理得到

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{I^2\cdot R_t - W\cdot\gamma}{MC} \tag{9}$$

(9)式中，液膜的温升速率$d\theta/dt$的大小与转换器对压力变化的响应速度直接有关。显然，增大加热电流，使用具有较小汽化潜热和比热的工作介质，既保证热电阻套管外湿润，

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

又设法使液膜层薄一些，这些都将有利于改善其动态响应特性。水和乙醇两者响应速度的差别，是这些因素的综合结果。不过，增大加热电流和用汽化潜热较低的介质，必将导致介质耗量的增加，这是需要兼顾考虑的。

应特别指出的是，乙醇属易燃易爆化合物。其最小引爆电流i>120mA。在用直流稳压电源供电时，必须设计限流电路，以防热电阻万一短路时，其电流小于120mA为宜。另外，由于在相同压力下，乙醇的饱和温度及汽化潜热都比水低得多，所以转换器外壳应特别注意保温，以尽量减少其中储液的不必要消耗。

4 显示方法

4.1 模拟显示

用自制的串联稳压电源和测量桥路与一只配BA_2热电阻的0—30℃的动圈表表头对压力进行显示。图7为用水作工作介质，(1—5)×133Pa压力范围(I=110mA)的显示电路。

一开始，表头是根据图5的R_t'—P曲线和式(10)进行压力分度(最小格值0.1×133Pa系均匀刻度)。

$$\Delta E = I_{t0} \cdot \Delta R_t \cdot \frac{R_2}{R_\Sigma + \Delta R_t} \qquad (10)$$

式中

ΔE——桥路输出电压(mV)

I_{t0}——刻度起始值(P=133Pa，R_{t0}'=62.5Ω)下的支路电流(I_{t0}=110mA)

R_Σ——支路电阻之和($R_\Sigma = R_3 + R_0 + R_1 + R_{t0}'$ = 100Ω)

ΔR_t——热电阻阻值变化量(Ω)

校验时发现，最大绝对误差达0.3×133Pa，即相对误差为7.5%，显然太大了。

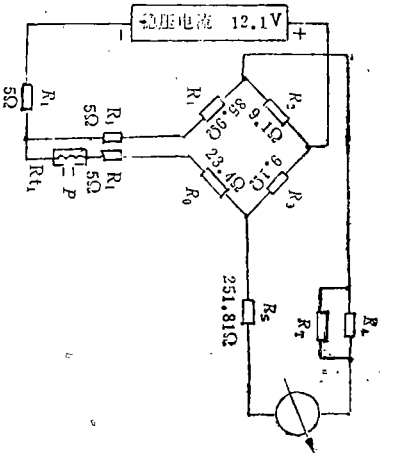


图7 用水作介质，一定压力范围的显示电路

分析最大绝对误差明显集中地出现在近上限刻度处而且是负偏差的情况后认为，关键是用稳压电源供电；当压力升高时，R_t'增大，热电阻支路电流减少(P_{max}=5×133Pa时，I=106.9mA<110mA)。如前所述，当加热电流减小时，同样压力变化所引起的热电阻阻值的变化量减少，即转换器实际工作与刻度条件不符。后根据实际工作条件仔细定标后，其最大绝对误差减小到约0.1×133Pa，即相对误差为2.5%。

值得注意的是，对桥路中大电阻R_1必须采取有效的散热措施，否则会出现较大的零漂。因为锰铜的电阻温度系数虽小，但必竟不为零。

4.2 数字显示

鉴于单片机体积小，功能强，价格低，特别适合于研制智能化仪表，故选用MCS—51系列单片机8031来实现压力的数字显示，其原理框图如图8(略去了与图7相同的测量桥路及运放电路)：

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

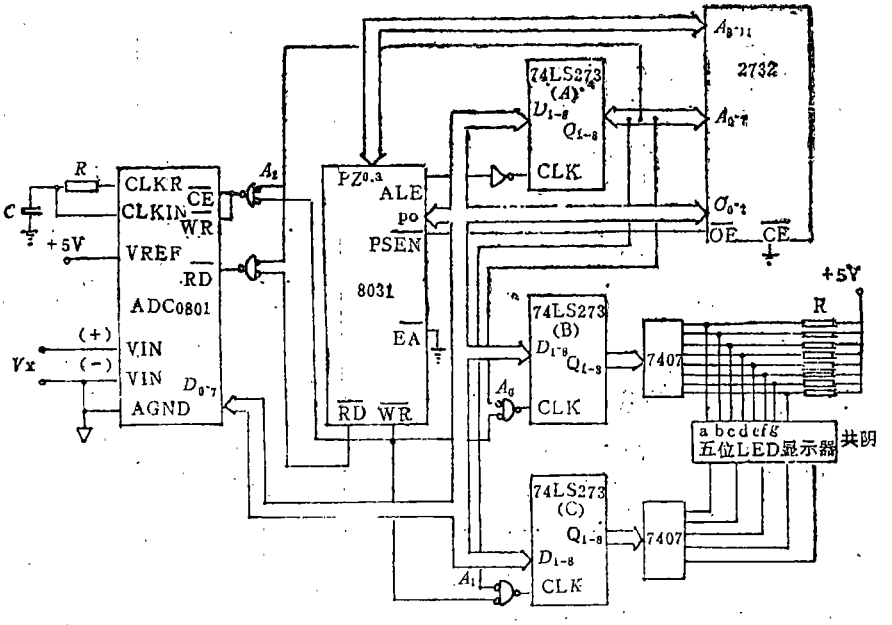


图8　压力数字显示原理框图

图8中2732为4K×8EPROM，作为8031的外部ROM，用来固化控制*A/D*转换，数据处理及压力值显示的系统程序，地址OOOH—FFFH。74LS273(*A*)八*D*触发器作为8位地址锁存器。因8031无片内ROM，每次取指操作都必须指向片外，故使8031的$\overline{EA}$引脚接地[4]。又因该系统中仅扩展一片EPROM，故将2732的片选信号引脚$\overline{CE}$接地，使其始终处于选通状态。

*A/D*转换器件采用单路8位*A/D*片ADC0801，转换时间约为100μs，转换精度±$\frac{1}{4}$LSB。片内时钟频率范围是100KHz—1.28MHz，在CLKR和CLKIN引脚外接不同的*RC*电路可调整时钟频率。它的数据输出端具有三态闩锁，可直接与单片机的数据总线相连[5]。测量桥路输出的代表绝对压力大小的直流mV信号经运放电路线性放大成0—5V后由$V_{IN}^{(+)}$和$V_{IN}^{(-)}$之间引入ADC0801，转换后的数字信号由D_{0-7}传送至8031数据总线。本系统经口地址FBH启动*A/D*转换后延时1ms读出转换结果，经数据处理后的压力*P*(× 133Pa)值送LED显示器显示。

74LS273(*B*)和74LS273(*C*)分别用来锁存LED显示器的段选码和位选码，口地址分别是FEH和FDH，7407是集电极开路的同相驱动器，以增强驱动能力。显示时从左至右依次点亮7段LED，每次LED点亮后延时1ms，这样循环往复不断显示测量值，直至断电。显示格式为××.××。

数据处理的任务是对*A/D*转换后的数字量进行非线性补偿和标度变换。由于运放的输出与输入之间为线性关系，非线性只是出现在压力与毫伏信号的转换上，故而线性补偿与标度变换可同时进行。

运放输出(V)、*A/D*转换后的数字量(D_x)与压力(*P*)的关系如图9所示。我们将该曲线用两段直线来近似，其转折点$P=3\times133$Pa，$D_B=168$，则：

当$0\leqslant D_x<D_B$，$P=(0.012D_x+1)\times133$Pa

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

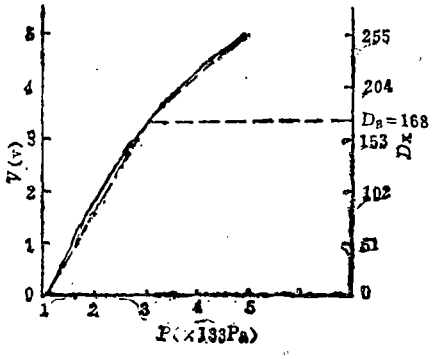


图9 数字量与压力的关系

当 $D_B \leqslant D_x \leqslant 255$时，$P=(0.023D_x-0.86)\times 13_3$ Pa

为保证计算精度，并充分利用单片机开发系统的子程序库，加快调试速度，采用了三字节浮点运算，对运算结果的小数部分经四舍五入取十分位。

综上所述，系统的软件粗框图如图10所示。其中显示子程序实现五位 LED 从左至右依次点亮一次的功能。如图11所示。

对于绝对误差为0.1×133Pa的设计指标而言，数字显示部分所选择的8位A/D所产生的量化误差为5mV(±½LSB)约).01×133Pa 及三字节浮点运算中所产生的量化误差显然可忽略不计，D_x-P关系中以直代曲近似处理中所产生的最大绝对误差约为0.1×133 Pa，即相对误差为2.5%。数字式仪表调试运行结果与理论分析相等。

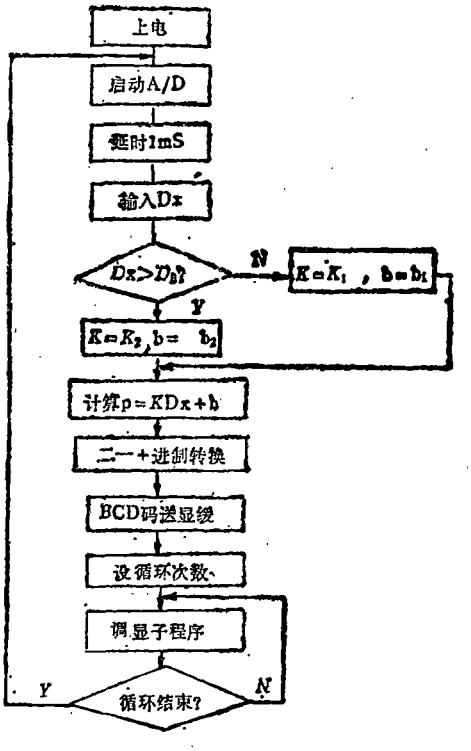


图10 系统软件框图

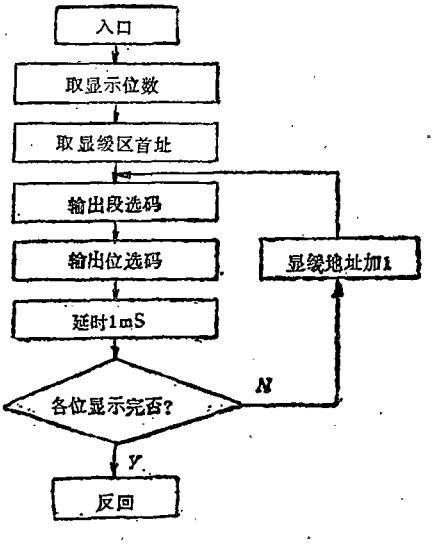


图11 五位LED功能框图

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参　考　文　献

1　天津大学化工原理教研室.化工原理(下册).天津科技学术出版社，1987：65
2　天津大学化工原理教研室.化工原理(上册).天津科学技术出版社，1987：279
3　徐同举.新型传感器基础.机械工业出版社.1987：342
4　徐君毅等.单片微型计算机原理与应用.上海科学技术出版社，1988：167
5　鄢定明.单片计算机应用技术.人民邮电出版社，1988：150

The Experimental Investigation of A Measurement Method for Tiny Absoluce Pressure

Lu Jigong　　Xu Ling
(Dept.of Auto.)

Abstract This paper introduces the method to measure tiny absolute pressure by using the relationship between staturation vapour pressure and temperature of a chemicalpure liquid. Some test are also provided.

Keywords absolute pressure; saturation vapour pressure; temperature thermal resistance; heater current; heat transfer

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net