

# 一种计算机模拟补偿称重传感器线性的方法

浙江南洋传感器制造有限公司 邓林祯 黄光明 孙亮

**【摘要】** 传统的柱式称重传感器线性补偿方法是采用尝试几组电阻并联在半导体上，然后分别测试出数据，再根据得到的数据按经验选择一个较为理想的并联电阻的阻值，该方法比较费时，对员工要求较高，并且很难把称重传感器的性能补偿到最佳值。本文从最基本的电路分析开始，介绍了柱式称重传感器的线性补偿方法和计算以及采用计算机模拟补偿的基本思路。

**【关键词】** 柱式称重传感器；线性补偿；过补精调；计算机模拟

柱式称重传感器以其独特的优点，一直以来是称重传感器尤其是大吨位称重传感器的主要结构形式。然而，由于结构的泊松比以及弹性体腰鼓变形的存在，使得柱式称重传感器的固有非线性在 0.05%FS-1%FS 之间，并且很难有所提高，为了得到较高线性的柱式称重传感器，通常的做法是采用半导体进行补偿。

## 一、补偿原理

柱式称重传感器有个共同特点，就是随着载荷的增加，其输出量逐渐低于理想直线，近似一条递减的抛物线，具体表现见下图 1。

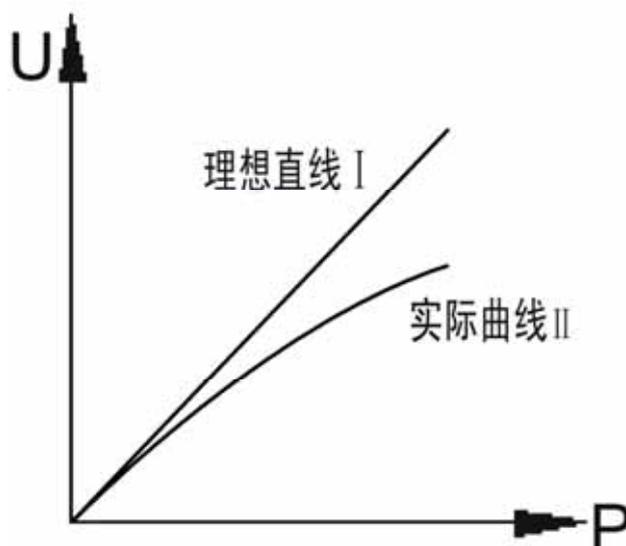


图 1

线性度是称重传感器的一个重要指标，因此必须对称重传感器进行线性修正。线性修正可以在称重传感器内部或者外部进行，外部补偿主要是利用仪表或者软件对称重传感器作线性化处理，内部补偿是对称重传感器本身进行操作，使之能够线性化。作为称重传感器厂家而言，需对称重传感器进行内部补偿，以增强称重传感器的通用性和互换性。

组成称重传感器的主要电路是惠斯顿电桥，如图 2 所示，R1，R2，R3，R4 为应变计，E 为输入电压，U1 就是我们所要得到的信号，即图 1 的实际曲线。

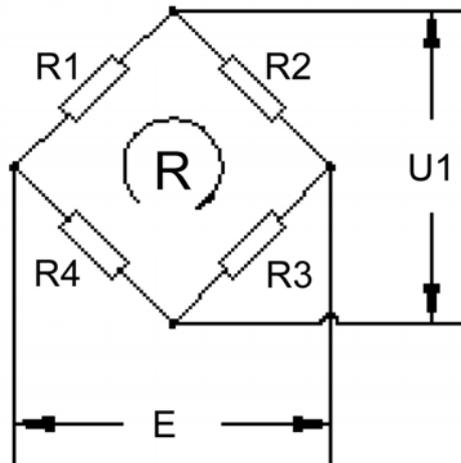


图 2

解图 2 可以得出：

$$U_1 = E \times \frac{R_2 \times R_4 - R_1 \times R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \dots\dots\dots \text{公式}$$

令 
$$K = \frac{R_2 \times R_4 - R_1 \times R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \dots\dots\dots \text{公式}$$

因此，公式 可以变成 
$$U_1 = K \times E \dots\dots\dots \text{公式}$$

公式 中，U1 的变化是随着 K 的变化而变化，而 K 的变化规律与弹性体、应变计、生产工艺等一系列的因素有关，随着应变计粘贴在弹性体上也即定了，但是其变化量是不定的，我们很难改变，最好的办法就是改变电压 E 的值修正 U1 使之近似的成为一直线。然而电压 E 由仪表或者稳压电源提供，直接改变供电电压 E 是不可行的。分析图 2 的桥路可以发现，U1 只和惠斯顿桥路两端的电压有关，只要我们能够改变惠斯顿桥路两端的电压就能够改变 U1 的值。假如在供电端串联一可变电阻 Rc (图 3)

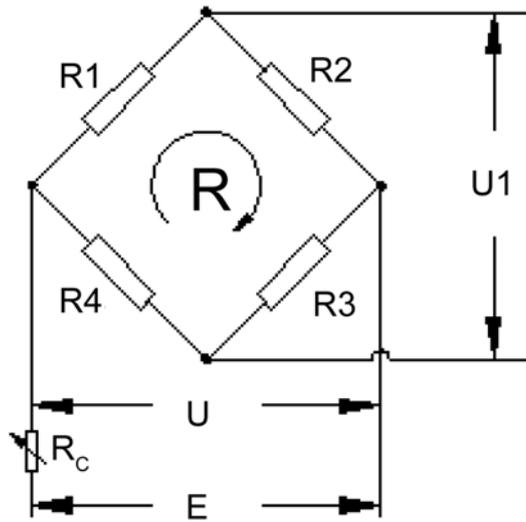


图 3

令：

$$R = \frac{(R1 + R2) \times (R3 + R4)}{R1 + R2 + R3 + R4}$$

有：

$$U = E \times \frac{R}{R + Rc} \dots\dots\dots \text{公式}$$

将公式 带入公式 后可得：

$$U1 = K \times U = E \times \frac{R}{R + Rc} \times K \dots\dots\dots \text{公式}$$

分析 式，当 Rc 减小时，U1 将增大，反之 Rc 增大，U1 减小。前面已经说过柱式称重传感器载荷与其输出量近似的是一条递减的抛物线，因此，我们只要逐渐增加惠斯顿桥路两端的电压，亦即在不同的载荷下减小 Rc 的值，就能够使 U1 成直线，就能达到我们的补偿目的。

## 二、可变电阻 Rc 的选择和使用

我们知道，一段导线被拉长后其电阻值通常是增大的，反之减小，那么是否所有的导体都适合用来补偿？

分析一下，当我们串连进 Rc 后，由于分压的作用，降低了惠斯顿桥路两端的电压，使得输出将减小，将公式 -公式 后可以得到：

$$\Delta U = E \times K - E \times \frac{R}{R + Rc} \times K = E \times K \left(1 - \frac{R}{R + Rc}\right)$$

由于补偿的需要，Rc 需要有个变化量，为了使 Rc 对灵敏度的影响最小而又能达到补偿的效果，我们就必须选择那些有较大灵敏系数的材料。目前有半导体应变计和镍箔应变片可以选择。半导体

应变计的灵敏系数约 67~177；镍箔应变片的灵敏系数是负的，也就是说被拉长后其电阻值通常是减小，反之增大，灵敏系数约-12~-20。虽然有两种材料可以选择，但是半导体应变计才是首选：一则，半导体应变计的灵敏系数大于镍箔应变片；二则，前面我们分析过只有逐渐减小  $R_c$  的值，才能修正  $U_1$ ，如果采用镍箔应变片，我们只能在应变区圆周方向粘贴才能使电阻值降低，而圆周方向的应变只有母线方向的 0.28，为了达到补偿效果，就需要大量牺牲称重传感器的灵敏度，这对称重传感器的安全能力，长期稳定性能都是极其不利的；三者镍箔应变片的有效应变约 625 个微应变，也就是说，当称重传感器的灵敏度大于 1mV/V 时，镍箔应变片无法达到补偿目的。

由于在产生过程中存在着弹性体的机械尺寸上的误差，贴片时的贴片位置的误差，以及应变计、半导体本身的离散性，我们不可能选择刚好阻值的半导体贴在弹性体上，因此在使用时，先根据实际需要，采用下面公式计算出补偿大致需要的半导体阻值。

$$R_L = K_1 K_2 \frac{L(R + R_s + R_t)}{K_L \varepsilon}$$

$R_L$ ：估算的半导体阻值

$R$ ：惠斯顿桥路阻值

$R_s$ ：灵敏度补偿电阻

$R_t$ ：弹性模量补偿电阻（有效）

$\varepsilon$ ：半导体的应变

$K_L$ ：半导体的灵敏系数

$K_1$ ：余量系数，取  $K_1 = 1.5$

$K_2$ ：经验系数，对于圆柱式弹性体， $K_2 = 6$

此时的计算结果通常比实际需要的补偿电阻要大，必须通过并联电阻精确调整，才能达到理想的线性指标，这个过程就是一个“过补精调”法。

### 三、过补精调

“过补精调”的原理非常简单，可称之为“分阻法精确调整”，此时的电路如下图 4。

其中： $R_L$  为半导体

$R_L'$  为并联精补电阻

假设在一定的应变下，称重传感器的输出（串入半导体）为  $S$ ，而理想状态下的输出为  $S'$  ( $S > S'$ )，我们认为惠斯顿电桥两端的电压过

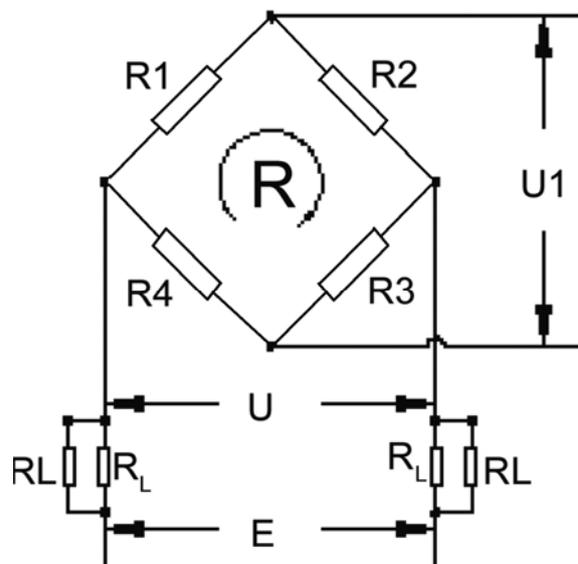


图 4

高，因此，我们要降低惠斯顿电桥两端的电压，也就是要增加半导体两端的电压。由于半导体的阻值固定，只要增加半导体并联电阻的阻值就能降低惠斯顿电桥两端的电压，从而使 S 接近 S'。

#### 四、详细计算

##### 1. 原理思路

假如我们能够求出半导体在各个应变下的实际阻值 $R_L$ ，我们就能够计算出半导体在该应变下并联一电阻以后的称重传感器的输出 $S'$ 。

##### 2. 公式推导

方法一：通过计算求出半导体的阻值

要计算半导体在某应变下的阻值，需要几个已知量

S：有半导体时的称重传感器的电压输出

S'：无半导体时的称重传感器的电压输出

R：惠斯顿电桥阻值

以上几组数据都可以通过测量得到。

当无半导体时（见图 2）

$$S' = E \times \frac{R2 \times R4 - R1 \times R3}{(R1 + R2)(R3 + R4)}$$

$$\text{令：} K = \frac{R2 \times R4 - R1 \times R3}{(R1 + R2)(R3 + R4)}$$

$$S' = K \times E \dots\dots\dots\text{公式}$$

当有半导体时，假设半导体阻值为 $R_L$ （见下图 5）

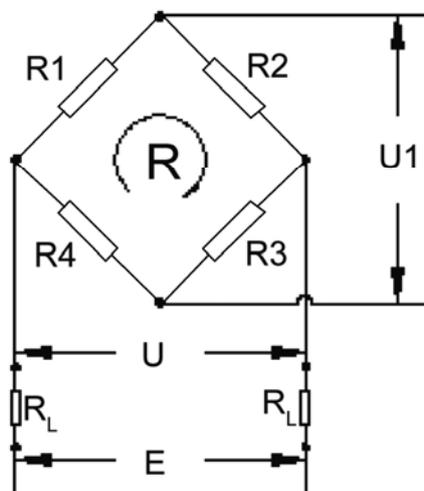


图 5

同理：
$$S = K \times E \times \frac{R}{R + 2R_L} \dots\dots\dots \text{公式}$$

用  $\frac{6\text{式}}{7\text{式}}$  得到：

$$\frac{S'}{S} = \frac{R + 2R_L}{R}$$

整理得到：

$$R_L = \left(\frac{S'}{S} - 1\right) \times R \dots\dots\dots \text{公式}$$

公式 就是用来求半导体阻值的公式。

求当半导体并联电阻后的称重传感器输出 S1 ( 电路见图 4 )

由于串入半导体后半导体的分压作用使得惠斯顿桥路两端电压 U 降低

$$U = E \times \frac{R}{R + 2 \times \frac{R_L \times R_L'}{R_L + R_L'}}$$

当无半导体时， $S' = K \times E$

当有半导体和并联电阻后

$$S1 = K \times U = S' \times \frac{R}{R + 2 \times \frac{R_L \times R_L'}{R_L + R_L'}} \dots\dots\dots \text{公式}$$

通过公式 ，我们就可以求出所有测试点上的半导体并联电阻  $R_L'$  后的实际输出值。

方法二：通过测量得出半导体的阻值

此方法就是在测试称重传感器性能时，同时测出两组数据：无半导体时称重传感器的输出  $S'$  和半导体阻值的变化  $R_L$ ，然后通过公式 求出所有测试点上的半导体并联电阻后的实际输出值。

这种做法在实际操作中有一定难度，不作重点讲述。

## 五、误差分析

### 1. 惠斯顿电桥阻值的变化引起的误差

前面的计算中，我们把惠斯顿桥路的阻值看作是定值来计算，但是实际上当称重传感器受力形变后，由于应变计阻值的变化，使得惠斯顿桥路的阻值也发生了变化。

假设组成惠斯顿电桥的应变计的阻值为  $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ ，则在称重传感器受力之前桥路的实

际电阻为 
$$R = \frac{(R_1 + R_2) \times (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = R$$

当称重传感器受力后,各应变计的阻值发生变化,假设受压方向的应变计阻值发生 $-R$ 的变化,根据泊松比,则受拉方向的应变计阻值发生 $0.28R$ 的变化,因此受力之后桥路的实际电阻为

$$R' = \frac{(R_1 + R_2) \times (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{(R - \Delta R + R + 0.28\Delta R) \times (R - \Delta R + R + 0.28\Delta R)}{R_1 - \Delta R + R + 0.28\Delta R + R - \Delta R + R + 0.28\Delta R} \dots\dots \text{公式}$$

$$= R - 0.36\Delta R$$

将公式 代入公式

$$S1' = K \times U = S' \times \frac{R - 0.36\Delta R}{R - 0.36\Delta R + 2 \times \frac{R_L \times R_L'}{R_L + R_L'}}$$

产生的误差:

$$\Delta S = S1 - S1'$$

以一  $700\Omega$  桥路的称重传感器为例,如果受压方向发生  $1000\mu\epsilon$ ,应变计灵敏系数  $2.0$ ,半导体阻值  $30\Omega$ ,并联电阻  $193\Omega$ ,实际输出  $S'$

$$\Delta S = S1 - S1' = S' \times \left[ \frac{700}{700 + 2 \times \frac{30 \times 193}{30 + 193}} - \frac{700 - 0.36 \times 2.0 \times 1000 \times 10^{-6}}{700 - 0.36 \times 2.0 \times 1000 \times 10^{-6} + 2 \times \frac{30 \times 193}{30 + 193}} \right]$$

$$= 0.00009 \times S'$$

可见,理论计算值将略微大于实际值,并且它们之间的误差是很小的,当温度补偿电阻和灵敏度补偿电阻进入以后,误差值将进一步减小。

## 2. 两半导体阻值不等引起的误差

为了避免称重传感器在成组使用时因为称重传感器的输入电阻的不对称性而产生一个较大的偏流,现在大部分的生产工艺都是将补偿电阻平均在称重传感器的输入桥臂上。然而由于半导体阻值的离散性和贴片工艺的原因,粘贴在弹性体上的两只半导体阻值实际上并不相等,在计算中作了均分处理,从而引入了一定的误差。

假设计算出在某应变下半导体阻值为  $2R_L$ ,并联电阻  $R_L'$ ,两半导体相差阻值 ,

$$\text{则均分时 } R = 2 \times \frac{R_L \times R_L'}{R_L + R_L'}$$

$$\text{实际阻值 } R_{\text{有效}}' = \frac{(R_L + \Delta) \times R_L'}{(R_L + \Delta) + R_L'} + \frac{(R_L - \Delta) \times R_L'}{(R_L - \Delta) + R_L'}$$

$$\text{则 } \Delta R = R_{\text{有效}} - R_{\text{有效}}' = 2 \times \frac{R_L \times R_L'}{R_L + R_L'} - \frac{(R_L + \Delta) \times R_L'}{(R_L + \Delta) + R_L'} - \frac{(R_L - \Delta) \times R_L'}{(R_L - \Delta) + R_L'}$$

分析可知， $\Delta R$  是个  $10^{-5}$  的一个正值，就是说两半导体阻值不等引起理论计算值将略微小于实际值。

### 3. 测量输入电阻不准引起的误差

由于计算需要惠斯顿电桥的阻值，但在测量时多少会引入测量误差，计算可以发现该误差的存在对计算产生的误差更小，在这不讨论

#### 六、计算机模拟“分阻法精确调整”

上面的过程给我们计算柱式称重传感器线性补偿半导体的并联电阻提供了方法，但是如果依靠人工计算，不仅工作量大，而且容易计算错误，造成误判。在计算机高度发达的今天，通过计算机来进行繁琐和机械的计算显然是最佳选择，因此，我们有必要编写程序，让计算机来计算并且找出最佳的并联电阻。

该模拟过程的基本思想就是不断尝试并联电阻，通过计算判断是否是最佳补偿阻值。

#### 1. 计算步骤：

- (1) 根据实际测试数据通过 式计算出各测试点上的半导体的阻值  $R_L$
- (2) 计算出半导体并联电阻后的有效阻值  $R_L'$
- (3) 通过 式计算出并联电阻后称重传感器在各测试点的理论输出  $S1$
- (4) 运用标准计算出称重传感器的误差
- (5) 通过不断变换并联电阻重复一到四的过程
- (6) 判断出误差最小时的一组数据

#### 主要程序段：

*//定义数组*

```
Cap:array of Single;
TV:array of Single;           //无半导体数据
CV:array of Single;         //有半导体数据
VRes:array of Single;       //半导体有效电阻
RealR:array of Single;      //半导体并联电阻后有效电阻
FV:array of Single;         //补偿后的数据
ERR:array of Single;        //补偿后的误差
ERRW:array of Single;       //无半导体的误差
ERRY:array of Single;       //有半导体的误差
```

*begin*

```
For II:=0 To 2 Do
```

```
Begin
```

```
For JJ:=0 To 12 Do
```

```

Begin
  if StrToFloatDef(Data.Cells[II,JJ+1],-1)<0 then
    Begin
      KYJS.Caption:=IntToStr(StrToInt(KYJS.Caption)+1)
    End;
  End;
End;
Try
  SetLength(Cap,13);
  SetLength(TV,13);
  SetLength(CV,13);

  RIN:=StrToFloat(InPutR.Text);
  TempR:=StrToFloat(TR.Text);

  For II:=0 To 12 Do
    Begin
      Try
        Cap[II]:=StrToFloat(Data.Cells[0,II+1]); //对量程进行赋值
        TV[II]:=StrToFloat(Data.Cells[1,II+1]); //对测试值进行赋值
        CV[II]:=StrToFloat(Data.Cells[2,II+1]); //对测试值进行赋值
      Except
        Exit
      End;
    End;
  End;

  Count:=2; //求出数据个数
  For II:=Low(Cap) To High(Cap) Do //求出数据个数
    If (Cap[II]<>0) Then Count:=II; //求出数据个数

  SetLength(VRes,Count+1); //设置数组的长度
  SetLength(RealR,Count+1); //设置数组的长度
  SetLength(FV,Count+1); //设置数组的长度

```

```

VRes[0]:=0.00; //设置数组的第一个值
RealR[0]:=0.00; //设置数组的第一个值
FV[0]:=0.00; //设置数组的第一个值

For ii:=1 To Count Do
  Begin
    VRes[ii]:=0.5*RIN*(TV[ii]/CV[ii]-1); //求出每个量程对应的半导体阻值
    RealR[ii]:=VRes[ii]*TempR/(VRes[ii]+TempR); //求出并联电阻 R'后半导体的有效电阻
    FV[ii]:=TV[ii]*RIN/(RIN+2*RealR[ii]); //求出并联电阻 R'后称重传感器的输出值
    If StrToFloat(WS.Caption)<100 Then
      Begin
        Data.Cells[3,II+1]:=Format("%.5f",[FV[II]]); //显示并联后的数据
      End
    Else
      Begin
        Data.Cells[3,II+1]:=Format("%.1f",[FV[II]]); //显示并联后的数据
      End;
  End;
  {以下开始计算补偿后的非线性开始}
  SetLength(ERR,Count+1); //
  SetLength(ERRW,Count+1); //
  SetLength(ERRY,Count+1); //

  MaxCap:=0.000;
  MaxTV:=0.000;
  MaxTVY:=0.000;
  MaxTVW:=0.000;
  For ii:=0 To Count Do
    Begin
      If Cap[ii]>MaxCap Then MaxCap:=Cap[ii]; //求最大量程
      If FV[ii]>MaxTV Then
        Begin

```

```

    MaxTV:=FV[ii];           //求最大测试值
    WS.Caption:=FloatToStr(MaxTV);
End;
If TV[ii]>MaxTVW Then MaxTVW:=TV[ii];           //无半导体求最大测试值
If CV[ii]>MaxTVY Then MaxTVY:=CV[ii];           //有半导体求最大测试值
End;

{以上开始计算补偿后的非线性结束}
//累加
Per.Caption:=FloatToStr(StrToFloat(Per.Caption)+1);
TR.Text:=FloatToStr(StrToFloat(TR.Text)+StrToFloat(JR.Text));
//累加
//*****
/**以老国标进行计算**/
If Configure.OG.Checked Then
Begin
    MaxErr:=0.0000;
    MaxErrY:=0.0000;
    MaxErrW:=0.0000;
    For ii:=0 To Count Do
    Begin
        ERR[ii]:=FV[ii]-Cap[ii]/MaxCap*MaxTV;           //并联电阻后每档的误差
        ERRW[ii]:=TV[ii]-Cap[ii]/MaxCap*MaxTVW;           //无半导体每档的误差
        ERRY[ii]:=CV[ii]-Cap[ii]/MaxCap*MaxTVY;           //无半导体每档的误差
        If ABS(ERR[ii])>ABS(MaxErr) then MaxErr:=ERR[ii];           //最大误差
        If ABS(ERRY[ii])>ABS(MaxErrY) then MaxErrY:=ERRY[ii];           //最大误差
        If ABS(ERRW[ii])>ABS(MaxErrW) then MaxErrW:=ERRW[ii];           //最大误差
    End;
    Percent:=MaxErr/MaxTV*100;           //求最大非线性
    PercentY:=MaxErrY/MaxTVY*100;
    PercentW:=MaxErrW/MaxTVW*100;
    If ABS(Percent)<=ABS(StrToFloat(MinP.Caption)) Then
    Begin

```

```

MinP.Caption:=FloatToStr(Percent);
BestR.Caption:=FloatToStr(TempR);
BestS.Caption:=FloatToStr(MaxTV);
For ii:=0 To Count Do
Begin
  If StrToFloat(WS.Caption)<100 Then
  Begin
    Data.Cells[4,II+1]:=Format("%.5f",[FV[III]]);//显示并联后的最佳数据
  End
  Else
  Begin
    Data.Cells[4,II+1]:=Format("%.1f",[FV[III]]);//显示并联后的最佳数据
  End;
End;

End;

Data.Cells[1,14]:=FloatToStr(PercentW)+'%FS';//显示并联后的数据
Data.Cells[2,14]:=FloatToStr(PercentY)+'%FS';//显示并联后的数据
Data.Cells[3,14]:=FloatToStr(Percent)+'%FS';//显示并联后的数据
Data.Cells[4,14]:=MinP.Caption+'%FS';      //显示并联后的数据
Data.Cells[3,15]:=FloatToStr(TempR)+'Ω';  //显示并联后的数据
Data.Cells[4,15]:=BestR.Caption+'Ω';      //显示并联后的数据

Chart1.Series[0].AddXY(TempR,ABS(Percent)); //图形显示
If Data.Cells[3,14]<>Data.Cells[4,14] Then
Begin
  Memo1.Lines.Text:='建议并联电阻电阻值为 :'+data.Cells[4,15]+'#10#10+'补偿后的非线性为 :'+data.Cells[4,14]+'#10#10+'补偿后的灵敏度为 :'+Format("%.5f",[StrToFloat(BestS.Caption)]);
End
Else
Begin
  Memo1.Lines.Text:='未计算出最佳值，您可以 :'+#10#10+'1> 增加判断电阻的最大值'+#10#10+'2> 减小判断电阻的起始值'+#10#10+'3> 检查输入电阻是否正确';

```



计算后得出最佳理论数据见下表，其余各并联电阻阻值与称重传感器非线性对比见下表：

测试点	理论最佳并联电阻值 193Ω	实际并联电阻值 193Ω
100kN	6208.8	6208.8
200kN	12422.7	12423.4
300kN	18637.6	18637.6
400kN	24851.2	24851.3
500kN	31059.9	31060.1

可见，理论计算结果与实际数值是相当的吻合的。

#### 八、总结

采用计算机模拟法来进行线性补偿，操作简单，无需繁琐的人工计算，虽然在理论计算过程中带入了误差，但因其影响极小，不对计算精度产生影响，不会造成误判，也不会对生产带来误导；采用模拟法来进行线性补偿能对称重传感器在各种并联电阻下的性能一目了然，从而选择最佳并联电阻，对制作高精度的称重传感器帮助很大，对那些无法补偿或者补偿后仍然达不到性能要求的称重传感器也能立即发现，避免反复补偿，浪费时间；如果能够将该算法应用到测试软件中，更加能够提高效率和称重传感器精度；通过比较，发现其效率并不会低于传统的补偿方法，有时反而更加快速，准确。可见采用模拟法来进行线性补偿应该是可行的，对生产高精度称重传感器具有切实的指导意义。

#### 作者简介

邓林祯，出生于 1980 年 4 月，男，浙江人，毕业于浙江工业大学，2003 进入南洋后一直从事称重传感器的设计与开发工作。