第5卷 第2期 无锡轻工业学院学报 JOURNAL OF THE WUXI INSTITUTE OF LIGHT INDUSTRY Vol. 5 1986 No. 2

铂电阻测温电路非线性补偿的计算机辅助设计

朱立强

（化工系）

一、前　言

在工程上，热电偶一般适用于测量500℃以上的高温，对于500℃以下的温度，则以热电阻较为适宜。因热电偶的材料比热电阻贵，而且在中、低温区域热电偶输出的热电势很小，这样小的热电势对放大器的信噪比和防干扰措施要求很高。尤其在较低的温度区域，由于冷端温度变化和环境温度变化而引起的误差就显得很突出，而且不易得到精确补偿。所以在工业中广泛应用热电阻(尤其是铂电阻)测量中、低温度。其突出的优点是价格较低，精度高，性能稳定可靠，不需冷端补偿，便于远距离传送、记录，在低温测量时比热电偶有更高的灵敏与精度。其中铂电阻能抗氧化，性质十分稳定，容易取得高纯度的铂材来制造电阻体，应用更为广泛。但铂电阻的温度——电阻特性呈非线性。当使用指针式仪表显示测量温度时可以调整标尺的刻度来校正。但在数字显示仪表中，就必须进行非线性补偿。可以应用计算计机辅助设计的铂电阻非线性补偿电路。

铂电阻的温度——电阻特性如图1实线所示。铂电阻在0～630℃范围内的电阻值 R_t 为

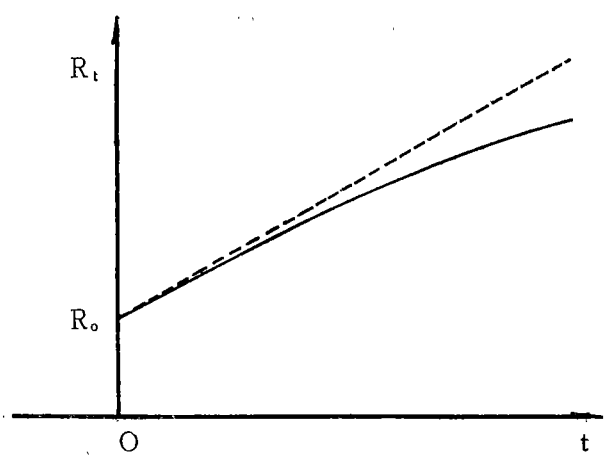


图 1　铂电阻的温度——电阻特性

本文1986年1月10日收到。

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

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (1)$$

式中

R_0——$t = 0℃$ 时铂电阻的阻值

t——被测温度。

$A = 3.96847 \times 10^{-3}℃^{-1}$

$B = -5.847 \times 10^{-7}℃^{-2}$

铂电阻的温度——电阻特性的非线性补偿方法较多。例如可以用分段折线补偿法，使用计算机处理时可用编程序的方法加以补偿。有人提出用一块四运放集成块对铂电阻的非线性进行补偿的电路[1]，但是对该电路未作详细分析，又未给出必要的数据。为了得到具体数据，笔者使用计算机对该类电路求最佳线性化，重新设计了整个电路，进行了实验。实验数据与计算机分析结果对比表明，计算机的设计是可靠的。

二、电路原理

电路原理图如图2所示。这里用了五个运算放大器。很明显，该电路是上下完全对称的。若运放 $IC_1 \sim IC_4$ 的特性完全一致的话，整个放大器的温度漂移便可做得很小。这就充分发挥了四运放集成块的特点。

取 $R_1 = R_2$，$R_3 = R_4$，$R_5 = R_6$，$R_7 = R_8$，$R_9 = R_{10}$，$R_{11} = R_{12}$。

R_t 即为铂电阻。

电阻 R_0 等于铂电阻 R_t 在 0℃ 时的阻值。

运放 IC_1 和 IC_2 分别与 R_1、R_2 和基准电压 V_{REF} 组成两个完全相同的恒流源，分别供给 R_0 和铂电阻 R_t 以恒电流 I_0。显然

$$I_0 = \frac{V_{REF}}{R_1} \quad 或 \quad I_0 = \frac{V_{REF}}{R_2} \quad (2)$$

R_0 和 R_t 上的电压降分别送到运算放大器 IC_3、IC_4 的同相输入端。经放大后的信号再送到由 IC_5 构成的减法器进行减法运算。IC_5 的输出电压即为放大后的温度信号。

温度 t 为 0℃ 时，$R_t = R_0$，整个放大器处于平衡状态，输出电压 V_0 为零，反馈电流 I_f 亦为零。若温度 t 上升，R_t 增大，输出电压 V_0 也跟着上升，此时反馈电流 I_f 增大，流经铂电阻的电流上升为 $I_0 + I_f$，使 R_t 上的电压降进一步上升。这种正反馈应用适当，就可补偿铂电阻 R_t 的非线性，使之趋近于理想的直线(如图1虚线所示)。

三、放大器输出电压方程式的推导

为了简明扼要，这里仅对放大器输出电压方程式进行推导。

设运放 IC_3 和 IC_4 的电压增益为 A_{V1}，运放 IC_5 的电压增益为 A_{V2}，则

$$V_{01} = -I_0R_0 \quad (3)$$

$$V_{02} = -(I_0 + I_f)R_t$$

$$= -\left(I_0 + \frac{V_0}{R_f}\right)R_t \quad (4)$$

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

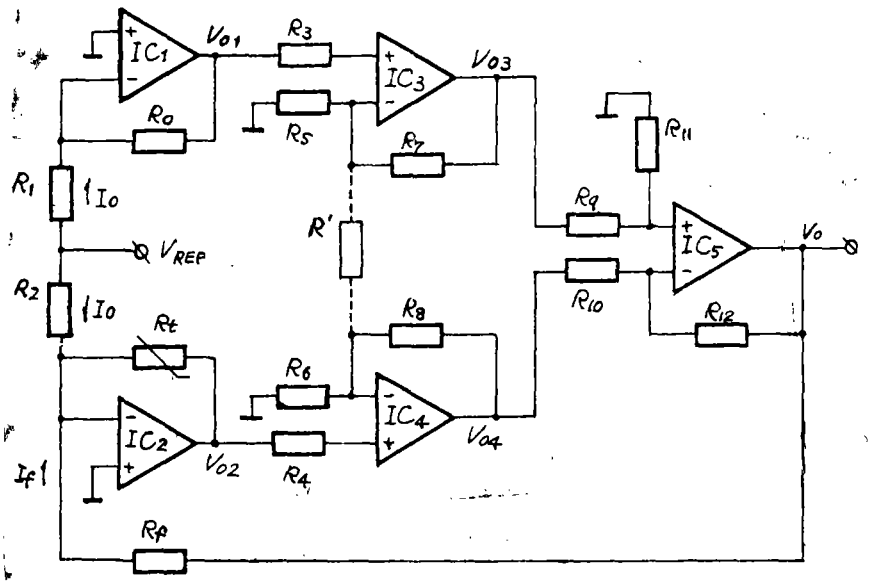


图 2　电　路　原　理　图

$$V_{03} = A_{V1}V_{01} = -A_{V1}I_0R_0 \tag{5}$$

$$V_{04} = A_{V1}V_{02} = -A_{V1}\left(I_0 + \frac{V_0}{R_f}\right)R_t \tag{6}$$

$$V_0 = A_{V2}(V_{03} - V_{04}) \tag{7}$$

将式(1)、(5)、(6)代入式(7)整理后解得放大器输出电压 V_0 与温度 t 的关系为

$$V_0 = \frac{A_V I_0 R_0 (At + Bt^2)}{1 - \frac{A_V R_0}{R_f}(1 + At + Bt^2)} \tag{8}$$

式中　　$A_V = A_{V1} \cdot A_{V2}$

从式(8)可以看出，当温度 t 上升时，分母中右项 $\frac{A_V R_0}{R_t}(1 + At + Bt^2)$ 增大，使整个分母的值变小，从而补偿了温度升高时铂电阻特性下弯的非线性。确定 A_V 后，只要调整反馈电阻 R_f 的大小即可在一定温度范围内使铂电阻的非线性得到最佳补偿。

四、应用计算机辅助设计求取反馈电阻 R_f 的最佳值

要确定反馈电阻 R_f 的值，一般有三种方法：

1．数学推导法

为了使放大器的输出电压——温度特性(V_0—t) 趋近于直线，应该使 $\frac{dV_0}{dt}$ 尽量接近于常数，也就是二次导数 $\frac{d^2V_0}{dt^2}$ 的绝对值应该趋向于零，由此即可求得反馈电阻 R_f 在温度 t 时最

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

$$R_{f最佳}=\lim_{d^2V_0/dt^2\to 0} R_f \tag{9}$$

佳值但在实际应用中，尤其是温度 t 在几百度范围内变化时要确定一个最佳 R_f 值并非易事。

2．经验法

根据实践经验先设定一个 R_f 值，并在整个温度测量范围内检验电路的输出电压——温度关系的线性程度。如果不合要求，可依照优选法另设一个 R_f 值，再检验 V_0—t 的线性程度，直到符合要求为止。显然此法费时费工，并且不易得到最佳非线性补偿。

3．应用电子计算机辅助设计求取铂电阻最佳非线性补偿时反馈电阻 R_f 的值

分析式(8)可知，式中 A_V、I_0、R_0 均为定值。为了达到 V_0—t 特性的最佳线性化(即最佳非线性补偿)，唯一需要确定的变量是 R_f。将式(8)适当变换可得

$$\frac{V_0}{A_V I_0 R_0}=\frac{At+Bt^2}{1-\frac{A_V R_0}{R_f}(1+At+Bt^2)} \tag{10}$$

令

$$V_0'=\frac{V_0}{A_V I_0 R_0} \tag{11}$$

$$k=\frac{A_V R_0}{R_f} \tag{12}$$

代入式(10)得

$$V_0'=\frac{At+Bt^2}{1-k(1+At+Bt_2)} \tag{13}$$

应用式(13)即可用计算机求得最佳线性化时的系数 k 的值，再根据式(12)即可求得反馈电阻 R_f 的最佳值。

1) 程序介绍　计算机程序框图如图3所示。

启动程序后，计算机清屏幕，输出程序名称以及有关说明文字。接着，计算机要求操作者以 $y=f(x,k)$ 的形式输入需要进行最佳线性化的计算方程式，同时输入自变量 x 和待定系数 k 的范围。

输入工作完毕后，计算机进行初始化，把输入的方程式和数据存入内存，并确定系数 k 变化的步长 Δk。k 每变化一步，计算机就按照输入的方程式 $y=f(x,k)$ 逐点计算 y 值，并计算统计出它与理想的拟合直线方程之间的偏差。如果偏差已达到最小值，则转到下一步判断是否已经达到足够的精度。精度已达到则转入输出数据部分；否则就减小步长 Δk，进行第二次扫描，直到精度满足要求为止。为了防止计算机陷入无休止的循环，程序中设置了最大扫描次数。

在数据输出部分，计算机以 $y=ax+b$ 的形式显示出最佳拟合直线方程、最佳非线性补偿时的 k 值和相关系数 r，并在 x 的变化范围内分11点计算出 $y=f(x,k)$ 的值(y计算值)、拟合直线 $y=ax+b$ 的值(y理论值)与它们之间的差，用表格打印

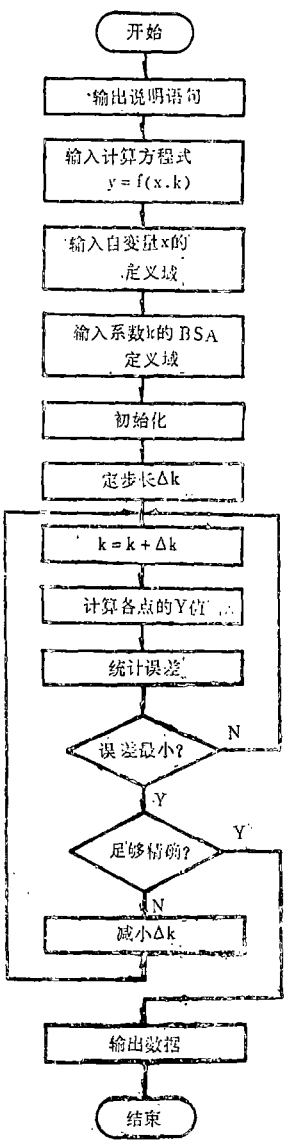


图3　计算机辅助设计程序框图

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

列出。

本程序用 BASIC 语言编写，并在 APPLE Ⅱ 微型计算机上通过。

2）程序运行　由于本程序使用 BASIC 语言编写，所以人机对话十分方便。本程序中解决了把计算方程直接输入计算机的技术问题，使得操作更加方便，扩大了应用范围。只要稍具计算机使用常识的人都能顺利使用本程序。

使用时，先把软盘插入驱动器，开启计算机，屏幕上即显示出说明文字。操作者按照计算机的提示输入方程式和有关的数据后，稍待片刻，计算机即自动输出运算结果。

程序运行情况如下：

```
* * * * * * * * * * * * * * *
        LINEARIZOR
* * * * * * * * * * * * * * *
  This program will help you find out the value of coefficient k where
the given function achieves
        LINEAR OPTIMIZATION

PLEASE INPUT THE EQUATION FOR CALCULATING [y=f(x,k)]
y=(3.96847E-3*X-5.847E-7*X*X)/(1-k
*(1+3.96847E-3*X-5.847E-7*X*X))
PLEASE INPUT THE RANE OF
   INDEPENDENT VARIABLE x:1,201
PLEASE INPUT THE RANGE OF k:0,1

THE LINEARIZED EQUATION IS
   Y=4.12347303E-03X+-1.05737351E-05
  SCANNING TIMES:12
                K=.0372191728
X=1-201         r=.9999999996
```

No	X	Y(theory)	Y(cal)	Y(dif)
1	1	4.11289929E-03	4.12190804E-03	9.00874329E-06
2	21	.0865823598	.0865697605	-1.25993101E-05
3	41	.16905182	.169033114	-1.87062542E-05
4	61	.251521281	.251507596	-1.36845047E-05
5	81	.333990741	.333988779	-1.96206383E-06
6	101	.416460202	.416472181	1.19791366E-05
7	121	.498929663	.498953264	2.36013439E-05
8	141	.581399123	.581427435	2.83122063E-05
9	161	.663868584	.663890048	2.14644242E-05
10	181	.746338044	.7463364	-1.64378434E-06
11	201	.828807505	.828761735	-4.57696151E-05

设整个电路的电压增益 $A_V=100$；当铂电阻的分度号为 BA1 时，$R_0=46\Omega$；取 $R_1=1k\Omega$。

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

若采用 MC1403 精密稳压集成块为基准电压，则 $V_{REF}=2.5V$。

由式(2)得

$$I_0=\frac{V_{REF}}{R_1}=\frac{2.5V}{1\times10^3\Omega}=2.5\times10^{-3}A(=2.5mA)$$

符合铂电阻的使用要求。

由计算机运算结果知 $k=0.0372191728$，将 k 值及 A_V 值代入式(12)，求解 R_f 值

$$R_f=\frac{A_VR_0}{k}=\frac{100\times46}{0.0372191728}$$

$$=123592.21(\Omega)$$

根据计算机分析结果，设计了整个电路的参数。具体数据如下：

R_1, R_2	$1k$
R_3, R_4	$4.7k$
R_5, R_6	$5.1k$
R_7, R_8	$47k$
R_9, R_{10}	$5.1k$
R_{11}, R_{12}	$47k$
R_0	46Ω
R_f	$120k$

由于各元件参数本身有误差，所以 R_f 要适当修正。

3) 实验数据　按照图 5 所示电路进行了实验。电路主要参数及所用仪器如下：

电路主要参数：　电路增益(计算值)$A_V=91$。非线性补偿反馈电阻(实测值)$R_f=123k$。

仪器：　*DT*—831 型数字万用表。直流电压测量精度 ± (0.8% + 2 个数字)，电阻测量精度 ± (1.0% + 2 个数字)。

*ZX*38A/11 型交/直流电阻箱。精度 0.15%。

实验数据如表 1 所示，输出电压——温度特性见图 4 所示，图中虚线是未经补偿时铂电阻测温电路的理论输出电压。

由表 1 可以看，计算机辅助设计铂电阻测温电路在 0～220℃ 范围内的输出电压与温度成直线关系。这证明本文的计算辅助设计方法完全令人满意。

表1实验数据　　相关系数 $r=0.9999888$

R_t (Ω)	*温度 (℃)	输出电压 (V)	**拟合直线方程计算值 (V)	R_t (Ω)	*温度 (℃)	输出电压 (V)	**拟合直线方程计算值 (V)
46.0	0.00	0.000	0.004	70.0	134.12	1.688	1.682
50.0	21.98	0.276	0.279	75.0	162.76	2.04	2.040
55.0	49.67	0.626	0.626	80.0	191.66	2.40	2.401
60.0	77.58	0.978	0.975	85.0	220.83	2.76	2.766
65.0	105.73	1.333	1.327				

*系根据方程 $R_t=R_0(1+At+Bt^2)$ 计算而得。式中 $R_0=46\Omega$，$A=3.96847\times10^{-3}C^{-1}$，$B=-5.847\times10^{-7}℃^{-2}$。

**拟合直线方程为 $V_0=0.012506\ t+0.0044$

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

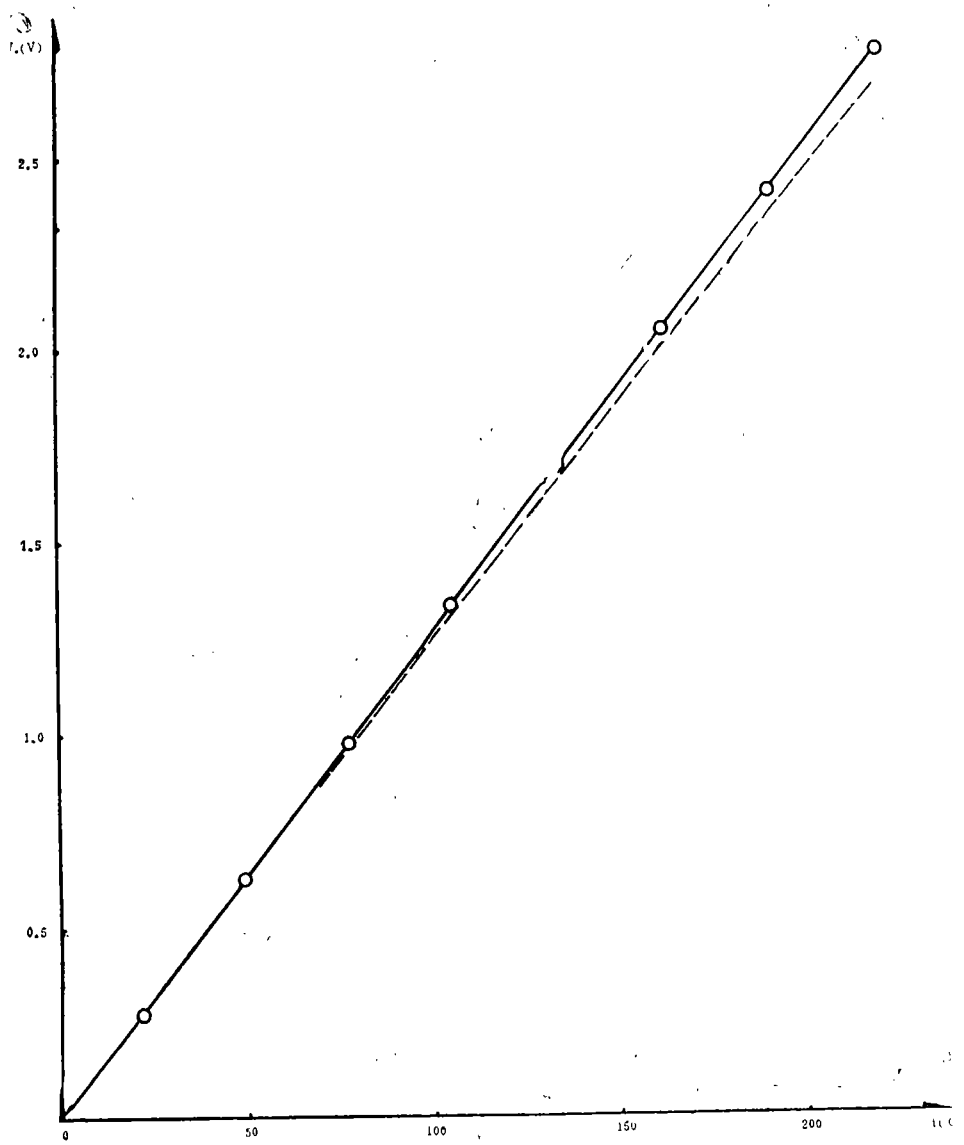


图 4　非线性补偿后的铂电阻测温电路特性(实线)与未补偿时的特性(虚线)的比较。

五、结束语

本文采用图 2 所示电路，是为了便于举例说明本程序产生的缘由、使用方法等问题。在实际应用时应该对电路作适当修改。例如取消 R_5,R_6 而代之以 R' (图中虚线所示)。该电路的特点是温度零漂小，抗共模性能好，增益高。若对温漂的要求不很高时，可采用图 5 所示电路，甚至更加简单的电路。对它们加以变通也可以用于其他场合。

由于本程序解决了把计算方程式直接输入计算机的问题，从而避免了在每次输入计算方程时都要修改程序的麻烦。所以，对于可以用 $y=f(x,k)$ 形式表达的方程均可以用本程序进行计算机辅助设计，以求取最佳非线性补偿——即最佳线性化。对程序稍加修改，也可应用于多维变量问题。

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

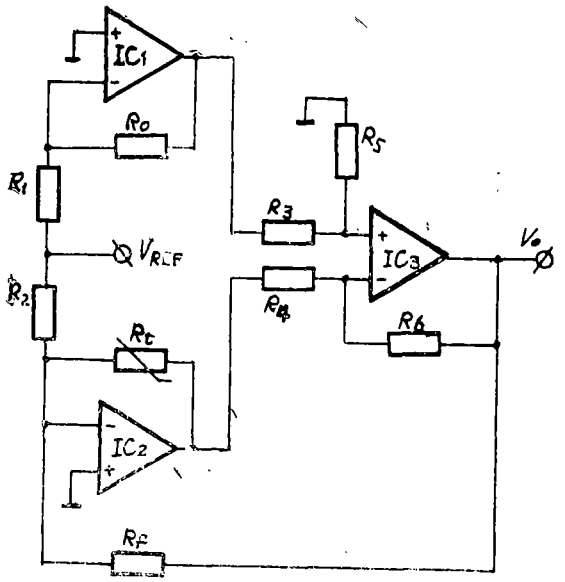


图 5 简化后的电路

本文得到蒋锡康老师的悉心指导，谨此致谢！

参 考 文 献

[1] 郑尚德，“新型高精度铂电阻数字温度计”，《电子科学技术》，1985.11
[2] Good, Phillip I., *A* critic's guide to software for Apple computers. (1983)
[3] 张郁弘、庄灿涛。《晶体管运算放大器及其应用》，国防工业出版社，(1978)
[4] Linear Databook, National Semiconductor Corporation, (1982)

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

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

86014

盘形凸轮机构几何尺寸的计算及计算机辅助设计《无锡轻工业学院学报》1986年，第5卷，第2期

主题词 凸轮机构；计算机辅助设计；移动式或摆动式盘形凸轮机构

摘 要 本文从简单的几何图形出发，对移动和摆动滚轮从动件盘形凸轮机构几何尺寸的计算提出了一套简便而行之有效的方法，尤其是凸轮廓线曲率半径的精确计算，并为这类机构的机辅设计提供了一套程序流程图。

作者：陈金元

86015

一种中碳钢的疲劳短裂纹特性《无锡轻工业学院学报》1986年，第5卷，第2期

主题词 疲劳短裂；疲劳力学；短裂机理；中碳钢／疲劳特性；短裂纹

摘 要 用复型技术研究含碳0.4%钢的扭转疲劳的起始阶段和短裂纹特性。发现疲劳短裂纹在铁素体中发生并扩展。裂纹增长速度取决于裂纹端部塑性范围的大小和程度。因而每循环的裂纹增长正比于滑移带强度。裂纹扩展的减速和可能停止证明晶界是裂纹扩展的强障碍。升高应力值后，原有的不扩展裂纹可能产生支裂纹或连接其它裂纹继续扩展。这个过程反复到一个或多个主导性裂纹的应力达到能导至破坏的继续增长的临界值为止。

作者：唐志祥等

86016

微机控制集成运放参数的自动测试《无锡轻工业学院学报》1986年，第5卷，第2期

主题词 微机测运放参数

摘 要 TP—801控制集成运放参数的自动测试系统具有自动测试、自动分档、计数、显示、打印等功能。速度快、结构简单、测试简便、可靠与成本低是系统的主要特点。本文介绍了硬件框图、软件结构和主程序流程图。通过介绍一个测试过程、调试与整定方法，简述计算方法、测试范围与测试精度等问题。

作者：朱定芬 孙星海

86017

铂电阻测温电路非线性补偿的计算机辅助设计《无锡轻工业学院学报》1986年，第5卷，第2期

主题词 计算机辅助设计／非线性补偿，铂电阻测温电路

摘 要 本文阐述了对铂电阻测温电路进行非线性补偿的微型计算机辅助设计方法，给出了程序框图、计算机运行结果和实验数据。由于本程序解决了把形式为 $y=f(x, k)$ 的方程式直接输入计算机的技术问题，所以有较广泛的适应性。

作者：朱立强

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

86016

AUTOMATIC MEASUREMENT of OP. AMP. PARAMETERS by μC. «Journal of the Wuxi Institute of Light Industry», Vol.5, No.2, 1986

SUBJECTWORD Measuring parameters of OP. AMP. by UC

ABSTRACT This paper describes an automatic measuring system for OP. AMP. parameters by Tp-801. The system presented here has the functions of auto-measuring, auto-dividing of elements, calculating, displaying and type-writing etc. Fast speed, simplicity, easy operation, high reliability and low cost are the special features of this system. This paper presents the block diagram ofthe hardware, the software configuration and the flow chart of main program. It introduces the measuring procedure, adjusting and setting method, in which the calculation method, measuring scope and accuracy are showed.

Author: Zhu Ding fen Sun Xing hai

86017

COMPUTER AIDED DESIGN OF PLATINUM THERMO—METER CIRCUIT FOR NON —— LINEARITY COMPENSATION«Journal of the Wuxi Institute of Light Industry», Vol.5, No.2, 1986

SUBJECTWORD Computer aided design/Nonl——inearity compensation; Platinum thermo—meter

ABSTRACT A method of computer aided design for the non-linearity compensation of the platinum thermo meter circuit is described. The block diagram, result of computer calculating, and experimental data are given also in this paper. As this program has solved the technical problem of inputting the equation, which is in the form of $y=f(x,k)$, into the computer directly, it might be used generally in other cases.

Auther: Zhu Liqiang

86014

CALCULATION METHODS of GEOMETRIC SIZES of DISC-CAM MECHANISMS and THEIR CAD. «Journal of the Wuxi Institute of Light Industry», Vol.5, No.2, 1986

SUBJECTWORD cam mechanism; CAD/disc cam mechanisms with translating or swinging roller followers

ABSTRACT In the paper, a set of simple and effective calculation methods of geometric sizes of disc cam mechanisms with translating or swinging roller followers is presented based on simple geometric graphs, in particular, precise calculations of cam profile curvature radii. A series of calculation flow charts for CAD of this mechanisms is also given in the paper.

Author: Chen jinyuan

86015

SHORT CRACK FATIGUE BEHAVIOUR in a MEDIUM CARBON STEEL «Journal of the Wuxi Institnte of Light Industrv», Vol.5, Nn.2, 1986

SUBJECTWORD fatigue fracture fatigue mechanics; mechanism of fracture; medium carbon steels/fatigue behaviour; short crack

ABSTRACT The initiation stage and short crack behaviour in torsional fatigue of a 0.4% C steel was investigated by a replication technique. The initiation and propagation of fatigue crachs ware obserred in the ferrite phase. It is proposed that the crack growth rate depends on the extent and intensity of the plasticity at the tip of the crack. Crack growth per cycle is thus proportional to the strength of the slip band. The ferritepearlite boundaries are strong barriers to the crack, propagaton which is manifested by a deceleration of growth and possible arrest. On raising the seress level the original non-propagating crak may continue to grow by branching or connecting with other crachs. This process is repeated until the stress fields of one or more dominant cracks attain a critical value to sustain continued growth that leads to failure.

Author: Tang Zhixiang; E. R. de los Rios and K. J. Miller