

# 磁电阻式传感器及其应用<sup>1)</sup>

陈慧余 马书炳 罗有泉 刘明威 李志超

(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

介绍了由81NiFe/Cr多层膜制作的磁电阻式传感器的新应用。一对易磁化轴相互垂直的磁电阻元件构成二维磁场探头,用它检测了钢板上人工微裂缝附近的磁场分布。磁电阻元件与永磁块组合构成力矩传感器,用于人体重心摇摆检测。

**关键词** 磁电阻,传感器,磁场分布,人体重心摇摆检测

## Abstract

In this paper new applications of magnetoresistance sensor are introduced. The sensors are made from 81NiFe/Cr multilayer films. The probe for the two-dimensional magnetic field test consists of two magnetoresistance elements, whose easy-axis are perpendicular to each other. The distribution of magnetic field on the surface of steel plate near some cracks can be tested by this sensors for measuring the moment of a force consist of magnetoresistance elements and permanent magnets and can be used for body sway test.

**Key words** magnetoresistance, sensors, distribution of magnetic field, human body's center of gravity sway

铁磁性金属薄膜磁电阻式传感器具有灵敏度高、温度特性好、非接触式、体积小、结构简单、易于集成化和多功能化等优点,在国内外已有广泛的应用。例如,用作磁记录读出头,无触点开关,旋转角度和位置检测器以及精密的弱场磁强计等。最近发展了坡莫合金(Permalloy, 79-82NiFe)系列多层膜,用它们制成的磁电阻器件性能超过单层膜。如 Permalloy/FeMn, Permalloy/TbCo 多层膜通过层间交换耦合作用提供偏场使器件的特性有明显改善和提高<sup>[1,2]</sup>。伴随优质磁电阻材料的发展,新型的高质量器件也不断出现<sup>[3]</sup>。更引人注目的是先后在 Fe/Cr 和 Co/Cu 多层膜中发现“巨磁电阻(Giant Magnetoresistance)”<sup>[4,5]</sup> 这种现象源于一种新的电子自旋相关散射(spin dependent scattering)机制,即传导电子被散射介质散射

作用的强弱与其自旋相对介质磁矩的取向相关。例如, Co/Cu 在温度为 4.2K 和外磁场为 1.5T 时,磁电阻率大于 100%<sup>[6]</sup>。随后又报道 NiFeCo/Cu/Co/Cu超晶格在室温磁场为 0.05T 时的磁电阻率高达 15%<sup>[7]</sup>。显然巨磁电阻效应的发现为新型优质传感器件的发展开辟了广阔的前景。

我们用 Si 衬底的 Cr/81NiFe/Cr/81NiFe 多层膜制作了几种磁电阻元件。所用的多层膜材料是采用电子束蒸发法制作的,其最大各向异性磁电阻率  $(R_{\parallel} - R_{\perp})/R$  为 3.5—4.7% (其中  $R_{\parallel}$  和  $R_{\perp}$  分别表示外磁场平行和垂直于电流方向情况下,磁化饱和时的电阻),高于优质的 82NiFe 单层膜的报道值 3%<sup>[8]</sup>。

1) 国家自然科学基金资助项目。

本文报道我们开发的两项新应用。其一为二维磁场分布检测，检测了钢铁试件上人工微裂缝所引起的漏磁场分布，所给出的信息量超过传统的感应法和霍尔效应法；其二为人体重心摇摆检测，用磁电阻元件搭配钕铁硼永磁块构成位移敏感元件，再结合弹性配件，用于检测力矩，并且制成了人体重心摇摆计，该仪器的灵敏度高，而且稳定性好。

### 一、二维磁场分布检测

薄膜磁电阻器件尺寸小，又对平行于膜面的磁场敏感，用作磁场分布检测具有高空间分辨率。我们制作了二维磁场探头，它可以简便地测量平行膜面的磁场分量，还可推广用于制作三维矢量磁场探头。

#### 1. 二维磁场探头的构造和工作原理

探头包括两个四端磁电阻元件(如图1(a))，它们采用掩模光刻和离子刻蚀法制成。取同一块蒸发膜刻制成的四端元件a和b，把无磁膜面粘在一起，保持磁膜的易磁化轴(易轴)相互垂直。没有外磁场作用时，磁膜内的磁矩沿易轴取向，外加磁场后，磁矩随磁场增大逐渐转向磁场方向。根据各向异性磁电阻理论，一段磁膜的电阻值与磁矩M和电流I之间的夹角θ有关<sup>[9]</sup>，即

$$R = R_{\perp} + (R_{\parallel} - R_{\perp})\cos^2\theta, \quad (1)$$

式中  $R_{\parallel}$  和  $R_{\perp}$  为  $M//I$  和  $M \perp I$  时的电阻值， $(R_{\parallel} - R_{\perp}) = K_1$  是由材料成分和内禀性质决定的常数。外加磁场H所引起的电阻变量为

$$\Delta R = K_1(\cos^2\theta_H - \cos^2\theta_0), \quad (2)$$

式中  $\theta_H$  和  $\theta_0$  分别表示外磁场值为H和零时M与I之间的夹角。

上述四端元件的  $ss'$  两端外接恒流源， $R_1$  和  $R_3$  两臂中的电流方向与  $R_2$  和  $R_4$  中的相互垂直。由于在外场作用下电阻所发生的变化不同，相应  $oo'$  两端桥路输出电压的变量  $\Delta V$  与  $(\Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_2 - \Delta R_4)$  成正比，与外磁场的关系须经实验标定。图1(a)表示外场

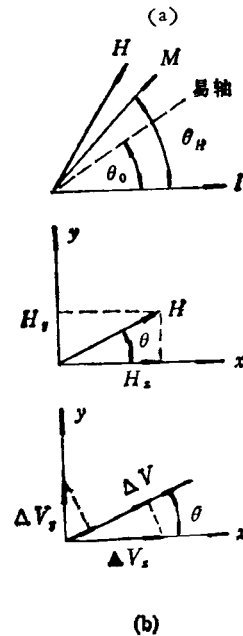
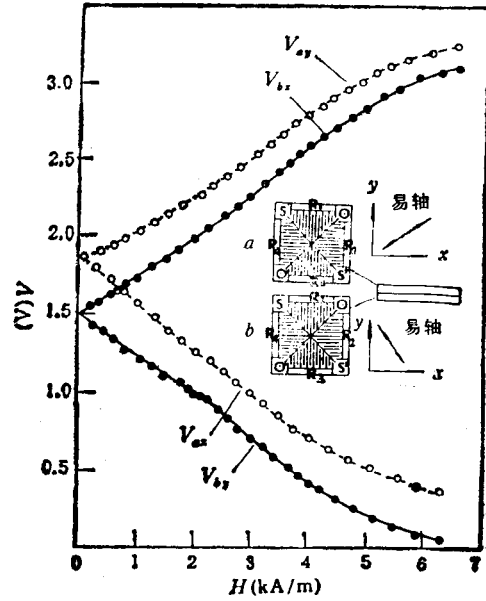


图1 (a)二维磁场探头中a和b两路电压与外场关系曲线；(b)磁电阻效应相关的几个矢量图

沿x和y方向时a和b两元件的标定曲线，分别用  $V_{ax}, V_{bx}, V_{ay}, V_{by}$  表示。由图1(a)可见V-H曲线接近于直线。在  $H < 3\text{kA/m}$  时，线性度较高。由此近似有

$$V_{ax} = V_{a0} + k_{ax}H, \quad (3)$$

$$V_{bx} = V_{b0} + k_{bx}H, \quad (4)$$

$$V_{ay} = V_{a0} + k_{ay}H, \quad (5)$$

$$V_{b,y} = V_{b0} + k_{b,y}H, \quad (6)$$

其中  $k_{ax}, k_{bx}, k_{ay}, k_{by}$  分别为  $V_{ax}, V_{bx}, V_{ay}, V_{by}$  曲线在起始段的斜率。如果  $H > 3\text{kA/m}$ ,  $V-H$  曲线偏离直线, 则这些系数需根据图 1(a) 给出的标定曲线进行修正。  $V_{a0}$  和  $V_{b0}$  为  $H = 0$  时 a 和 b 两元件的桥路输出电压。若待测场值  $H$  与  $x$  轴间夹角为  $\theta$ , 则可把它分解为  $x$  和  $y$  两个分量, 即  $H \cos \theta$  和  $H \sin \theta$ , 分别计算  $\Delta V_x$  和  $\Delta V_y$ , 再合成  $\Delta V = \Delta V \cos \theta + \Delta V \sin \theta$ 。在此情况下, a 和 b 两元件的输出电压为

$$\Delta V_a = k_{ax}H \cos^2 \theta + k_{ay}H \sin^2 \theta, \quad (7)$$

$$\Delta V_b = k_{bx}H \cos^2 \theta + k_{by}H \sin^2 \theta. \quad (8)$$

根据实测的  $V_a$  和  $V_b$  以及标定的  $k_{ax}, k_{bx}, k_{ay}$  和  $k_{by}$ , 代入(7)和(8)式, 先求出  $H$  和  $H \cos \theta$ , 然后再求出  $\theta$ 。

## 2. 探头二维扫描和数据采集系统

采用 286 微机控制探头沿  $x$  和  $y$  方向等间距地自动扫描。所用扫描系统由一个大型的  $x-y$  记录仪改造成, 由一个并行接口输出信号经光电隔离器, 再经功率放大后驱动  $x$  和  $y$  方向的两个直流电机, 实现按指定程序作  $x, y$  二维扫描[图 2(a)]。

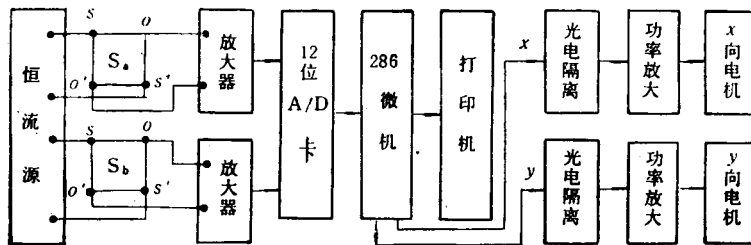
数据采集和处理与扫描系统兼用同一台

286 微机。配用一个模拟开关和一个 12 位的 A/D 卡轮流采集探头中 a 和 b 两个四端桥路的输出信号。这两个信号在反馈到模拟开关之前都各自经前级差分放大再经一级单边放大。采集的信号经处理后, 直接把结果打印输出。

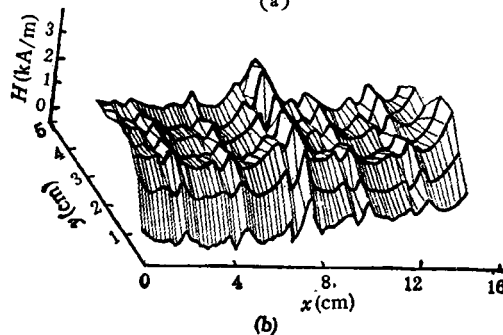
## 3. 二维磁场分布检测试验和结果

钢铁试件微裂纹以及锈蚀斑等缺陷可通过表面漏磁场分布来探测。这是材料无损检测和质量评估领域中的一个重要的课题。磁粉探伤是目前广泛使用的方法。这种方法的缺点是只能给出裂纹的位置。近年来有以感应线圈代替磁粉的自动检测仪器问世<sup>[10]</sup>。但我们所见用这类仪器检测结果都是一维场分布, 而理论计算出来的结果所给出的是各种缺陷附近的二维磁场分布<sup>[11,12]</sup>。因此特设计下面的二维磁场分布检测试验。

选用两块长 9cm、宽 6.8cm、厚 1.8cm 的钕铁氧体永磁块, 把它们的 N 和 S 极相对, 取间距 40cm 放置, 提供磁化场。利用其中间部分, 磁场虽然不均匀, 但它是连续分布的。两磁极面中间夹一块平铁板, 板面上放有 6 条长 30cm、宽 3cm、厚 0.3mm 的钢片。它们的长边彼此平行, 垂直于两磁极面。各条之间留一缝隙。五



(a)



(b)

图 2 (a)二维磁场分布测量原理框图; (b)有缝钢板表面的磁场分布图

个缝宽分别为0.02,0.03,0.06,0.03,0.02mm,用它们来模拟有裂纹的试样。探头在垂直于长边方向( $x$ 方向)6cm和平行于长边方向( $y$ 方向)15cm的区域内扫描,沿 $x$ 方向每间隔0.2cm采一组数据,沿 $y$ 方向每隔1cm采一组数据。检测结果如图2(b)所示。在各个间隙附近磁场都有起伏,起伏量随缝隙宽度增大而增加。缝附近的磁场分布与文献[12]中给出的理论计算的钢铁试件表面凹沟附近磁场分布非常相似。

由上述原理性实验推广到实用还须作许多细致的技术研究。

## 二、人体重心摇摆检测

人体神经平衡能力与多项生理和病理因素相关,是现代医学诊断的一项重要指标。最简便地表现神经平衡能力的办法是令受试者自然站立,测定一分钟内身体重心的摇摆轨迹。这种轨迹再经过计算处理,便可得到多项供诊断用的参数。

我们用磁电阻元件作传感器制成检测人体重心摇摆的仪器,结构简单,性能良好。

### 1. 仪器结构和工作原理

重心位置测试平台如图3(a)所示,它由上下两块边长为35cm的正方形板组成。上板有足印指示受试者立足位置,以左右为 $x$ 方向,前后为 $y$ 方向。上下板之间有四个圆筒形弹簧(T),它由磷青铜片制成。筒轴取水平位置,四个筒各占据平台的一边,在与上下板接触处分别与这两板钉在一起。下板中心位置固定一个立柱,其上端有顶珠支撑着上板。如果受试者的重心在上板面的铅垂投影点与支撑点 $O$ 重合,则人体的全部重量由立柱承担,上板不动,四个弹簧也均无变形。若重心的铅垂投影偏离 $O$ 点,落到 $O'(x,y)$ 点,则形成力矩 $T = Wx$ 和 $T = Wy$ (其中 $W$ 为受试者体重),致使上板倾斜。由检测 $x$ 和 $y$ 两个方向的倾斜量,再根据受试者的体重就可确定人体重心的位置 $O'(x,y)$ 。

物理

所用的力矩传感器由三端磁电阻元件 $S$ 和钕铁硼永磁块 $m$ 相互搭配构成。四对 $S,m$ 分别安装在平台四边的中心位置, $S$ 固定在上板下面, $m$ 固定在下板上。安放在 $x$ 方向的两个三端元件构成一个四端电桥[图3(b)],安放在 $y$ 方向的两个 $S$ 元件也同样构成另一个四端电桥。如果上板左右倾斜,右方下倾,左方上倾,则右方的磁电阻元件 $S$ 与永磁块 $m$ 靠近,其中外磁场增大,磁矩取向更接近外磁场方向,因此, $R_1$ 臂的电阻值增大,而 $R_2$ 减小;左方情况与之相反。这样就会使桥路失去平衡。输出电压变量与上板的倾斜量相关,由 $T_x$ 决定。如果前后方向发生倾斜,则 $y$ 方向两个 $S$ 所构成电桥的输出电压将随前后倾斜量变化,由 $T_y$ 决定。

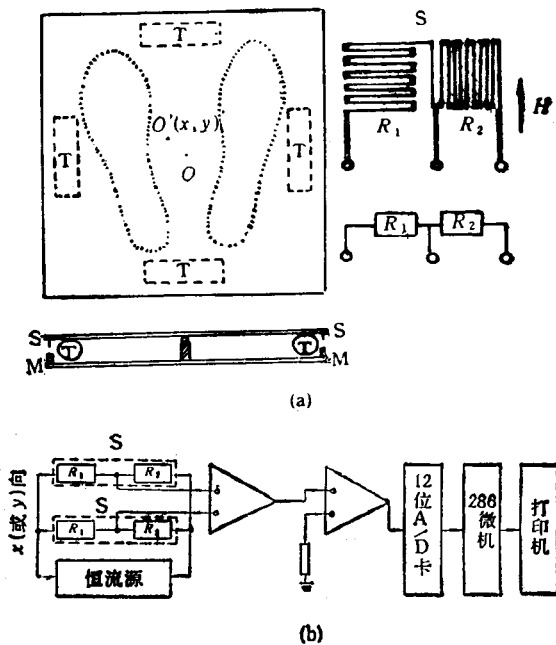


图3 (a)人体重心摇摆检测平台和磁电阻元件;  
(b)工作原理框图

### 2. 仪器的标定

用有对称形状的重物标定仪器。在称好重量并确定重心位置后,把它放在测试平台上,形成 $x$ 方向或 $y$ 方向的力矩 $T_x$ 或 $T_y$ ,分别记录 $x$ 方向和 $y$ 方向的桥路输出电压与 $T_x$ 和 $T_y$ 的关系(图4)。其中 $V_{xx}, V_{yx}, V_{xy}$ 和 $V_{yy}$ 的前脚标是桥路代号,后脚标是所受力矩的方向。

容易看到  $T_y$  对  $x$  方向输出电压没影响. 同样,  $T_x$  对  $y$  方向输出也没影响, 又  $V_{xx}$  与  $T_x$  和  $V_{yy}$  与  $T_y$  都有好的线性关系. 这些结果完全符合设计要求.

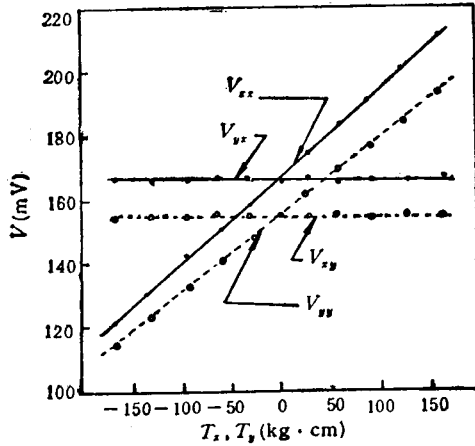


图4 磁阻式力矩传感器  $x$  和  $y$  两路电压与力矩关系曲线

### 3. 数据采集和处理

应用 286 微机采集和处理数据. 工作原理框图如图 3(b) 所示,  $x$  和  $y$  方向两个桥路输出, 分别经两级放大后通过 A/D 变换馈入微机. 当受试者站稳后开始采集数据. 所用的 12 位 A/D 卡的转换时间为 50ms. 在规定的检

测时间一分钟内, 轮流采集  $x$  和  $y$  两路的数据, 每路 512 个, 共计 1024 个数据. 当数据采集完毕后, 可立即显示并打印输出  $x-t$  图,  $y-t$  图以及重心  $O'(x, y)$  摇摆轨迹.

图 5 为一个中年健康女性的检测结果. 如果进行多次检测所得的摇摆轨迹不完全一样, 则需要进一步求出与人体平衡机能相关的参量. 我们参考文献[13]制作了计算软件, 包括计算摇摆参量和功率谱参量, 共计 36 个. 其中 12 个摇摆参量可直接由  $x-t$  和  $y-t$  导出, 包括: 总摇摆距离、左右( $x$ )摇摆距离、前后( $y$ )摇摆距离、摇摆集中面积、摇摆距离有效值、左右摇摆距离有效值、前后摇摆距离有效值、向右( $+x$ )摇摆速度、向左( $-x$ )摇摆速度、向前( $+y$ )摇摆速度、向后( $-y$ )摇摆速度和摇摆速度有效值.

对实测的  $x-t, y-t, V_x-t$  和  $V_y-t$  谱作快速傅里叶变换 (FFT), 得到 24 个功率谱参量:  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, V_{x1}, V_{x2}, V_{x3}, V_{x4}, V_{x5}, V_{x6}, V_{y1}, V_{y2}, V_{y3}, V_{y4}, V_{y5}, V_{y6}$  分别表示左右摇摆距离、前后摇摆距离以及左右摇摆速度和前后摇摆速度的功率谱参数, 下脚标(1—6)表示频段. 功率谱参数为 1—6 各个频段内曲线下的面积在总面积中所占的百分

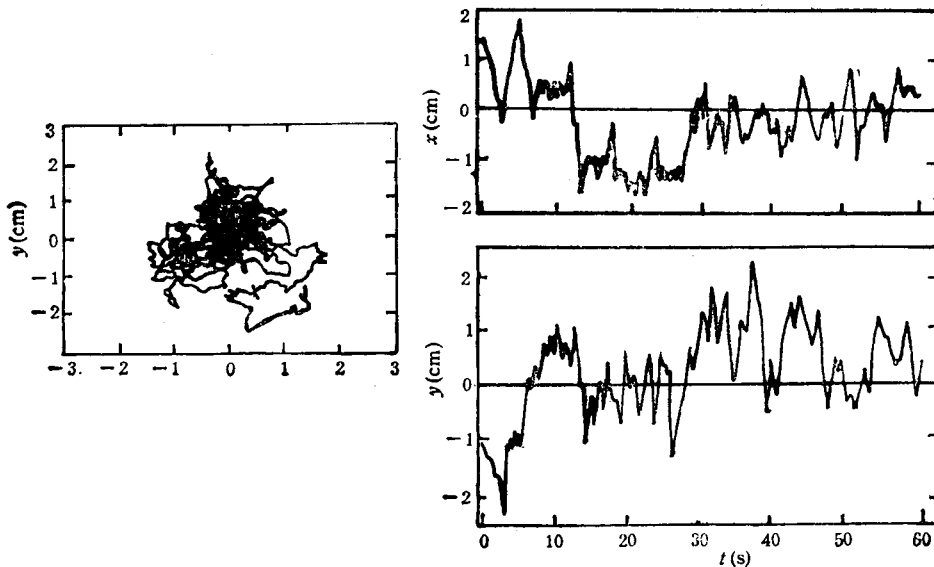


图5 某中年女性的重心摇摆轨迹以及前后( $y$  方向)和左右( $x$  方向)摇摆曲线

比。六个频段分别为(0.03—0.1Hz)、(0.1—0.2 Hz)、(0.2—0.5Hz)、(0.5—1Hz)、(1—2Hz) 和 (2—4Hz)。这些功率谱参量与上述摇摆参量结合可得到更多供诊断用的信息。

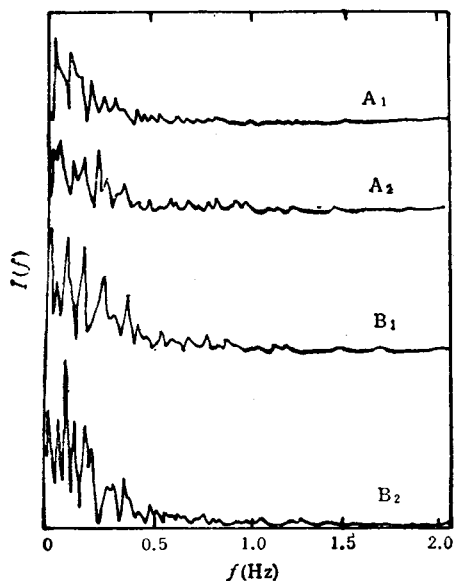


图6 A和B两受试者两次检测的 $x$ 方向摇摆距离功率谱

图6为A和B两个受试者的 $x$ 方向摇摆幅度的功率谱。每个受试者检测两次的结果虽然不完全一样,但有各自的特征。受试者A的平衡机能显然比B好,其功率谱的最大幅度小,且

随频率增加衰减得较快。A和B都是健康人。如果受试者有病,则功率谱幅度远高于健康人,而且有明显的特征峰。

人体重心检测,只需1分钟时间,受试者没有任何痛苦和损伤,所得信息可作为生理指标和进行病理分析。健康人平衡机能的检测对运动员和飞行员等作素质评估也很有用。

- [1] W. C. Cain, W. H. Micklejohn and M. H. Kryder, *J. Appl. Phys.*, **61** (1987) 4170.
- [2] W. C. Cain and M. H. Kryder, *IEEE Trans. on Magn.*, **MAG-25-3** (1989), 2787.
- [3] Bharat B. Pant and Donald R. Krahn, *J. Appl. Phys.*, **68-8** (1991), 5936.
- [4] M.N. Baibich et al., *Phys. Rev. Lett.*, **61**(1988), 2472.
- [5] P. Baumgart et al., *J. Appl. Phys.*, **69-8**(1991), 4792.
- [6] S. S. P. Parkin, N. More and K. P. Roche, *Phys. Rev. Lett.*, **64** (1990), 2304.
- [7] H. Sakakima and M. Satomi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992), L484.
- [8] T. Miyazaki, T. Ajima and F. Sato, *J. Magn. Magn. Mater.*, **81** (1989), 86.
- [9] 近角聪信主编, 磁性体ハンドブック, 朝仓书店, (1975), 949.
- [10] D. L. Atherton et al., *Can. Elec. Eng. J.*, **13-1** (1988), 52.
- [11] D. L. Atherton et al., *NDT International*, **20-4** (1987).
- [12] D. L. Atherton, *Oil & Gas J.*, **7** (1989), 52.
- [13] 新井光男等, 国外医学物理与康复学分册, **13-1**(1993), 24.

## 第八届全国相图学术会议征文通知

根据中国物理学会相图专业委员会决定, 第八届全国相图学术会议将于1995年10月在西安举行。现就会议征文通知如下:

### 1. 征文范围

凡未在公开刊物上发表及在全国性学术会议上未交流过的有关金属、熔盐、氧化物及水盐体系的相图实验构制和计算, 相图理论和应用等方面的论文都在应征之列。

### 2. 征文要求

(1) 论文字数一般限在2个16K页码。计算机激光照排。附图用硫酸纸描绘(图大小为 $6 \times 6 \text{cm}^2$ ), 图

物理

中字用新六号宋体字植好。排版版心为 $22.5 \text{cm}$ (高) $\times$  $14.5 \text{cm}$ (宽)。页码用铅笔标。

(2) 论文格式与排版字体, 请参照科学通报(1994年)格式。

### 3. 征稿时间和版面费

征稿截止日期为1995年6月30日(以当地邮戳为准)。论文每篇收注册费30元, 每页收版面费40元。两费随论文一同汇寄。收据在会议上一并开据。来稿和邮款请寄西安市太白路西北大学化学系张逢星、唐宗薰同志(邮政编码: 710069)。

第八届全国相图学术会议筹备组