

# HD-802 型大应力扭摆式金属材料 阻尼性能测试仪的研制

方志成 杜 民 柯金锁

(电子工程系)

## 摘 要

大应力扭摆式金属材料阻尼性能测试仪是研究高阻尼合金的一项重要测试设备。我国过去还没有这种仪器,国外也没有定型产品。本文作者从测试机理、传感器、单自由摆力学模型、干扰源及其抑制等方面的论述和探索,从而阐明整个仪器的设计思想及有关各个环节的技术关键。

## 一、 前 言

振动、冲击不仅使各种机械构件因疲劳失效,导致灾难性的突然事故并且随着工业化的发展,由机械构件的振动,冲击所产生的噪声已成一种公害。在国防上,噪声的危害更为突出,如以水下隐蔽性为主要战术性能的潜艇,因其螺旋桨的振动和空泡噪声严重干扰自载声纳的战术性能,并且易暴露自己而处于被挨打的困境。现代科学技术的发达,要求很多工业产品的机械振动及噪声能降到最低,如配电子计算机的电传打字机或有关精密机械等。降低振动和噪声是提高产品质量的一项关键性问题。

目前降低振动和噪声的方法基本有两大类:一为在机械结构上从力学角度出发,采用增加质量、提高刚度与附加阻尼,避免共振等有效措施。但这种方案在小型化、轻量化、高速化的今天,因受到各种条件的限制而无法采用。因此,目前世界很多先进工业国家竞相采用第二种方案,即致力于研究高阻尼合金材料,利用结构本体材料的高阻尼特性来达到减振降噪的目的,这是一种治本的方案。所以研究新型的高强度、高阻尼合金已成为世界各国研究的重要课题。

为配合高阻尼合金材料的研究,探讨合金成份,工艺、热处理及使用温度、应力等因素对阻尼性能的影响,就需要有一种在实际工程应力振幅条件下测量合金比阻尼性能的测试设备。为此原因,本文作者于1981年在上海交通大学材料科学系研制成功JD-801型大应力扭摆式金属材料阻尼性能测定仪,已经通过技术鉴定,并获得了部级及上海市的重大科技成果奖。随后,作者在此基础上,进一步改进传感器、机械部分、电测部分,并采用计算机进

本文1984年9月20日收到。

行快速采样及数据自动处理,使仪器智能化,该套设备称为 HD-802 型,于 83 年 7 月鉴定通过,并作为试产品出售给洛阳 725 所,为研究高阻尼合金性能的一项重要设备。为进一步将这套测试设备的机理、测试原理、设计方法做一归纳,所以撰写此论文与有关方面的专家们共同探讨。关于微型计算机快速采样及数据处理这一部分,作者已有论文,这里不重复。

## 二、测试机理

### 1. 金属材料的内耗及其度量

一个自由振动的固体,即使与外界完全隔离,它的机械能也会转化为热能而耗损,从而使振动逐渐衰减一直到停止。这种由于材料内部的原因而使机械能消耗的现象称为内耗、内摩擦或内阻尼。

金属材料内部产生这种内耗的根本原因,是其内部某种结构或状态发生了不可逆的变化,在应力—应变图上出现滞后回线,造成能量耗损(图 1)。

内耗机理粗略分为两大类,一类是以弛豫时间为其特征,内耗依赖于频率,称为弛豫大内耗;另一类是与振幅有关而与频率无关,称为静滞后型内耗。前者主要发生在小应力值,其弛豫谱特点是在某些频率出现内耗峰,如图 2 所示。后者其特点是内耗随振幅增大而增大(图 3),工程上感兴趣的高阻尼合金就属于这种静滞后型内耗的合金。

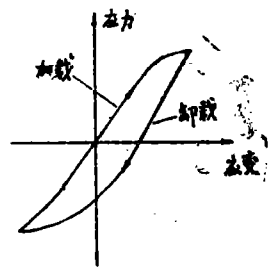


图 1 应力应变滞后回线

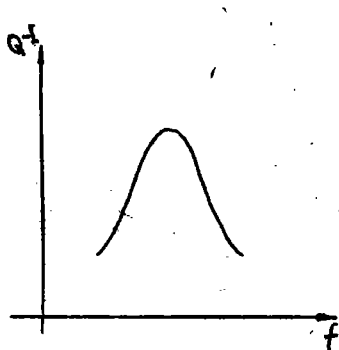


图 2 弛豫型  $Q^{-1}-f$  曲线

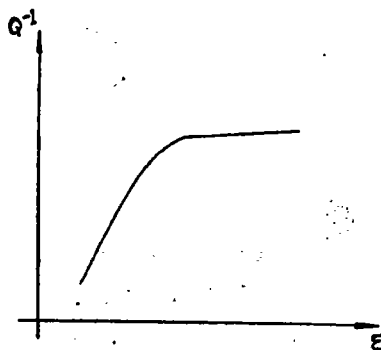


图 3 静滞后型  $Q^{-1}-\epsilon$  曲线

金属材料内耗的大小,常用对数衰减量  $\delta$ ,内耗值(损耗因子)  $Q^{-1}$ ,比阻尼能力  $S$ 、 $D$ 、 $C$ 、(Specific Damping Capacity)来表示。

对数衰减量  $\delta$  表示自由衰减振动中,相邻两个振幅  $A_n$ ,  $A_{n+1}$  之比的自然对数,即:

$$\delta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (1)$$

内耗值  $Q^{-1}$  表示系统振动一周所损耗的能量  $\Delta w$  与系统能量  $w$  的  $2\pi w$  之比:

$$Q^{-1} = \frac{\Delta w}{2\pi w} \quad (2)$$

比阻尼能力 S. D. C 表示系统振动一周所损耗能量  $\Delta w$  与系统能量  $w$  之比:

$$S. D. C (\%) = \frac{\Delta w}{w} \times 100 (\%) = \frac{A_n^2 - A_{n+1}^2}{A_n^2} \times 100 \% \quad (3)$$

根据不同金属材料的内耗和应力幅值的大小, 内耗测量常用以下三种方法:

- ①弯曲自由衰减法;
- ②频响法;
- ③扭摆自由衰减法。

上述①②测量方法的激振力受到限制, 应力幅值很小, 因此一般只适用于研究金属材料内耗机理, 微观结构及材料阻尼性能的定性对比。工程上应用的阻尼合金其内耗随应力幅值的增加而明显变化, 因此, 为了测得工程实际应力下的材料阻尼性能, 必须提供一个相应的初始应力, 而扭摆自由衰减法是最可靠和经典的方法。HD-802 型大应力扭摆式金属材料阻尼性能测试仪就是根据这一经典方法设计制造的。

## 2. 扭摆测定仪的力学模型

实际的工程结构都是连续体, 质量是连续分布, 属于分布参数的力学系统。但许多结构物可以用有限自由度的力学模型来代替, 而仍基本保持原结构的动力特性。扭摆测定仪由于试样 (即被测试的材料) 的轴直径很细, 一般仅有 5~6 毫米, 与横梁相比, 其转动惯性应变极小, 又由于横梁弹性应变极小, 与试样相比, 其所提供的恢复力可忽略不计, 因此横梁与试样可简化为一个只有转动惯量的刚体在无惯量的恢复力矩作用下作单自由度扭摆的力学模型 (图 4)。

其运动方程:

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + c \frac{d\theta}{dt} + k\theta = 0 \quad (4)$$

式中:

$I$ —横梁绕轴转动惯量;  $k$ —轴的扭转刚度;  $c$ —阻尼系数;  $\theta$ —扭转角;  $t$ —时间。  
当  $\theta$  很小, 且  $R \gg r$  时, 可认为  $\theta \propto y$ , 这样式 (4) 可以改写为:

$$I \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = 0 \quad (5)$$

其解为

$$y = A_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \phi) \quad (6)$$

式中:

$A_0$ —初始振幅;  $\phi$ —初始相位角。

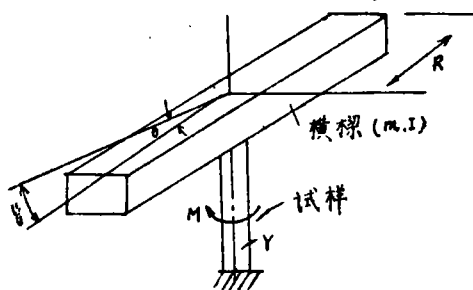


图 4 力学模型

可以看出有阻尼的扭摆自由振动的波形曲线在两条指数曲线之间变化, 振幅随着  $t$  增加而减小, 如图 5 所示。

### 3. 扭摆仪的主要干扰源及其抑制

如果不是单自由摆的力学系统时, 振动的振幅将不会是单一频率, 并且含有谐波, 其拍摄下来的波形如图 6 所示。由于包络线的不规则性, 将使  $A_n, A_{n+1} \dots$ , 偏离了真正的数值, 使得  $S, D, C$  值产生很大误差, 甚至出现负值。要避免这种干扰, 就必须满足理想单自由摆的力学模式。这样, 在设计制造中应采取下列措施:

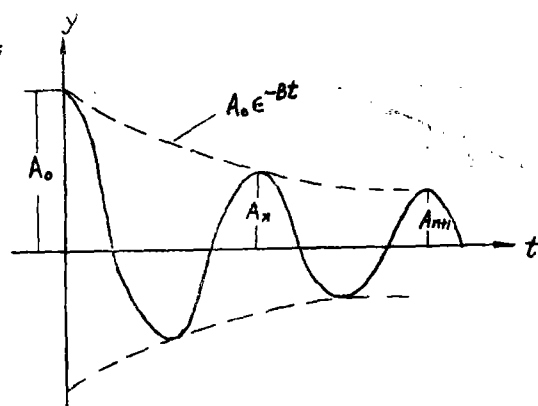


图 5 欠阻尼自由振动衰减曲线

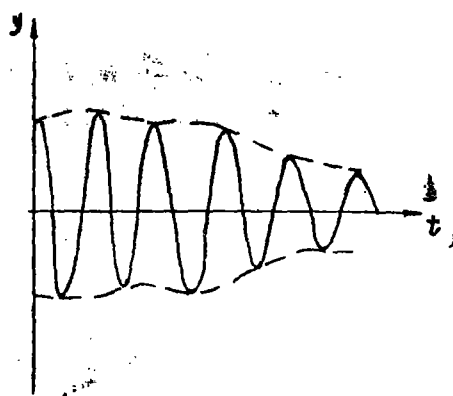


图 6 不满足单自由度摆力学模型时的振动波形

①试样直径必需很细, 与横梁相比, 其惯量可以忽略不计, 横梁弹性应变必须很小, 与试样相比, 其提供的恢复力矩可以忽略不计。同时试样必需严格垂直水平底盘, 使横梁作绕轴的水平扭转振动。这些在横梁和试样的设计、制造时必需严格保证。

②摆的振幅不能过大, 即扭转角  $\theta$  必须较小。因为  $\sin \theta$  的级数展开为:

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} \dots$$

当  $\theta$  较小时, 高次项方可忽略, 使  $\sin \theta = \theta$  成立, 从而使扭转运动方程具有

$$y = A_0 e^{-\beta t} [\sin(\omega t + \phi)]$$

的解和频率基本不变。三次谐波的干扰振幅也可忽略不计。因此在设计时, 既要满足工程上大应力的要求, 又不能使振幅或扭转角  $\theta$  过大。

③必需严格保证加工的精度, 如横梁质量必需保证对称均匀, 而且装试样的中心孔必需保证加工精度, 孔的中心必需是在横梁的中心位置, 而且孔的外围必需保证  $x, z$  方向的对称性, 整个加工误差不能大于  $2 \times 10^{-3}$  毫米, 如图 7 所示。此外, 使试样产生初始扭转角的吸铁必需保证对

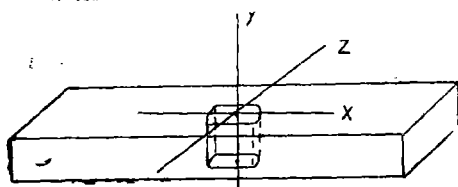


图 7 横梁中心孔示意图

称性。试样直径必需保证均匀,与横梁插孔必需紧配合,防止打滑。总之,要保证整个单摆的同心度和垂直度。

④对传感器和电测部分的要求:传感器关键是要解决非线性问题及不能对横梁有存在力的作用。前者会使  $A_n, A_{n+1}, \dots$  值偏离真正数值,而引起  $S, D, C$  值比真正数值偏大。这方面问题如何解决将在设计部分讨论。电测部分的关键问题是避免零点漂移,因这样将引起包络线的移动,引起误差。

### 三、仪 器 的 设 计

#### 1. 试样和横梁的设计

试样与横梁是组成一个单自由摆的二个基本构件,摆的频率  $f$ 、试样的最大剪切应力  $\tau_{max}$  和扭转角  $\theta$  分别由下列各式决定:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{I}}$$

式中:  $K = \frac{\pi G d_1^4}{32 L_1}$   $d_1$ —试样直径,  $L_1$ —试样有效长度,  $G$ —试样材料的剪切模量

$$I = \frac{1}{12} m L_2^2 \quad m \text{—横梁质量, } L_2 \text{—横梁长度}$$

$$\theta = 2 \tau_{max} \frac{L_1}{d_1 G} \quad \tau_{max} \text{—试样最大剪切应力, } L_2 \text{—扭转角}$$

在实际设计时,试样要尽可能细,以满足单自由摆力学模式,但又要有一定刚度,才能避免其它干扰振动,因此这些要求都是互相制约的。在满足测试频率和最大剪切应力(即  $f=10\text{Hz}$ ,  $\tau_{max}=3\text{kg/mm}^2$ )的同时,必须对试样和横梁尺寸进行权衡设计和计算。根据上述要求及公式,本仪器横梁与试样尺寸设计如下:

试样直径  $d_1 = 5\text{mm}$

试样有效长度  $L_1 = 100\text{mm}$

横梁长度  $L_2 = 250\text{mm}$

横梁质量  $m = 1100\text{g}$

扭转角  $\theta = 1.5 \times 10^{-2}$  弧度。

#### 2. 传感器的选型与设计

该仪器对传感器的要求主要有三点:①线性度;②对横梁不能有力的作用;③由于测试时要经常调换试样,所以传感器的调整移动必需很方便。根据上述三点要求,我们选择高频涡流传感器。它是一个高频线圈按一定要求绕在磁芯上,并配上黄铜制成的横梁组合而成的。其工作原理如下:

高频电流通过探头线圈,产生高频磁场,穿过横梁表面,使横梁表面产生涡流,涡流产生同频磁场,并消耗一定的功率,产生反射阻抗,从而改变了探头线圈的原阻抗值,如图8所示。随着探头与横梁距离(机械振

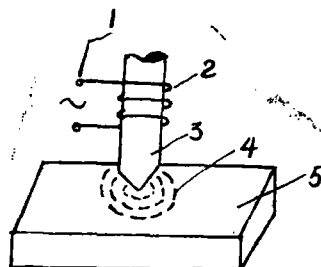


图8 涡流传感器原理 1—高频电流;2—线圈;3—磁芯;  
4—涡流;5—横梁部分表面

幅)的改变,反射阻抗也跟着改变,于是机械振幅的变化就转换为阻抗的变化,如果将探头与电容 $C$ 并联,并组成 $LC$ 并联谐振回路,(图9)。设探头与横梁的原始距离为 $x_0$ ,对应的电感为 $L_0$ ,品质因数为 $Q_0$ ,输出电压为 $U_0$ 。这时探头与电容 $C$ 组成的并联谐振电路,其 $Q_0 = \frac{\omega L_0}{R_0}$ ,固有频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_0 C}}$ ,对应谐振曲线如图10中的曲线1。由于仪器的工作频率是固定在 $f$ 值( $f \neq f_0$ ),所以这时探头与 $C$ 组成的并联谐振电路是工作在失谐状态,其工作点为 $0$ 点,对应的电压为 $U_0$ 。当振幅为 $x_b$ ( $x_b > x_0$ )时,对应的电感为 $L_b$ ( $L_b > L_0$ ),品质因数 $Q_b = \frac{\omega L_b}{R_b}$ ,( $Q_b > Q_0$ ),其固有频率 $f_b = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_b C}}$ ,( $f_b < f_0$ ),所以对应的谐振曲线如图10中的曲线3,其工作点为 $b$ 点,对应的输出电压为 $U_b$ 。又设振幅为 $x_a$ ( $x_a < x_0$ ),这时电感 $L_a < L_0$ ,所以固有频率 $f_a > f_0$ ,品质因数 $Q_a < Q_0$ 。对应的谐振曲线如图10中曲线2。工作点为 $a$ 点,对应的输出电压为 $U_a$ 。很明显,要得到良好的线性,必须使 $U_b - U_0 = U_0 - U_a$ ,这样就必须选好电容值 $C$ ,并仔细调整原始间隙 $x_0$ 。在探头设计方面,对磁芯尺寸及截面积、线圈匝数要合理选择,并对线圈采取特殊绕法,这样谐振曲线左边,就能得到足够宽的线性范围。此外,在整个传感器的安装上,必须采用对高频损耗极不敏感的材料,否则会将 $Q$ 值降低,使传感器(即探头)灵敏度下降。

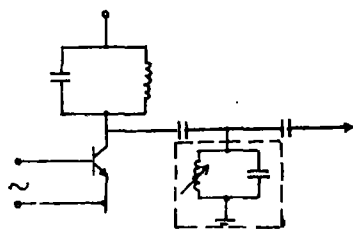


图9 探头的并联谐振回路

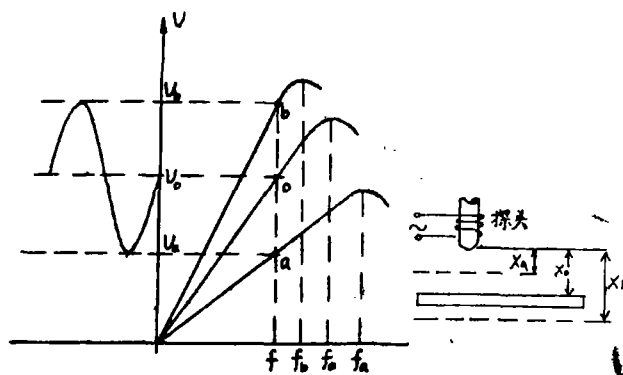


图10 探头与横梁间隙改变转换为电压幅度改变的原理图

在测量小振幅时,这时主要矛盾是灵敏度而不是线性度,所以传感器可以放在横梁端部。但如测量大振幅时,这时主要矛盾变成是线性度而不是灵敏度了。为此,我们将传感器做成可以平移,将传感器移向扭转中心,这样反映到传感器的振幅就比横梁端部小得多,传感器的线性范围要求也就降低了。

关于传感器是否影响机械系统的背景阻尼问题,由于通到传感器的高频电流是微安级,并且横梁采用非导磁材料,因此可以认为传感器与横梁不存在力的影响。

### 3. 传感器的监视系统的设计

传感器原始间隙 $x_0$ 是一个很重要的参数,因为它决定原始工作点是否是在谐振曲线1的

0点,如果这一工作点选择得不好,就会导致严重的非线性失真,如图11所示。但由于试样在测试时要经常调换,加上试样的加工有时不够精确,这样就很难保证传感器与横梁的原始间隙 $x_0$ 为最佳值,所以要设计一个传感器原始间隙 $x_0$ 的监视系统,该系统是利用如下原理。从图10可以看出,最佳工作点 $o$ (即对应最佳原始间隙 $x_0$ )对应一个输出电压 $U_0$ , $U_0$ 值由数字电压表读出,如偏离此值,应调节传感器与横梁间隙,直到数字电压表指 $U_0$ 值为止。由于采用了此简单的监视系统,使得仪器的线性度以及重复性(即精密度)都得到很大地提高。

#### 4. 电磁吸铁的设计

它的功能是吸放横梁,使横梁带着试样做自由衰减运动,但是它有一个技术关键问题必须给予充分注意,即如何避免吸铁产生的剩余吸力,从而减小系统的背景阻尼。为此,采取四点措施:

- ①选择剩磁很小的材料做吸铁铁芯和衔铁;
- ②吸铁与横梁不直接吸牢,而留有间隙;
- ③将产生吸力的激磁电流调节在临界状态;
- ④吸铁卸放时,装有快速退磁回路,使铁块快速退磁。

采用上列措施,证明效果是良好的,因此本系统的背景阻尼可达很小。当然,这个指标的获得是靠各部分的综合措施来获得的。

#### 5. 机械滤波器

为了避开和抑制外来因素的干扰,在试样顶端中心——扭转振动的节点上附加一个顶针式机械滤波装置。此顶针装置不仅能检查试样加工同心度和垂直度,监视试样的正确按装,其主要作用是限止试样非绕轴的摆动,从而起到机械滤波的作用。由于顶针是支顶在轴线上即扭转振动的节点上,所以对单自由摆基频能量消耗很小,基本上没有影响,而对非绕轴的振动信号却起着抑制削弱作用。为此,设计了机械滤波装置,大大提高了测试的准确度和精密度。

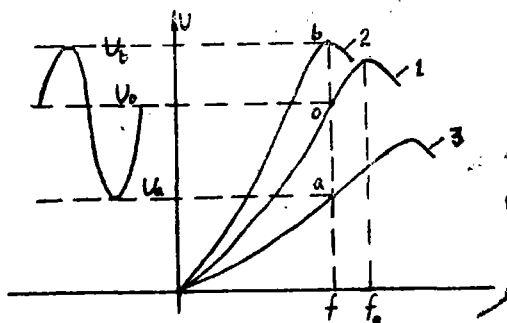


图 11 工作点选择不妥时产生的非线性失真

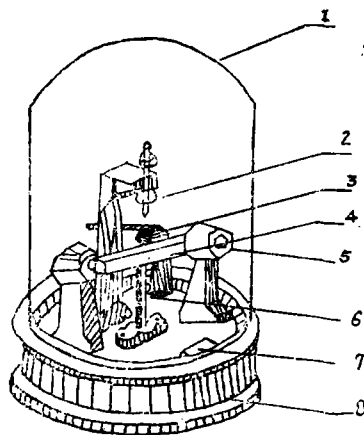


图 12 整个传感装置图

1. 玻璃罩; 2. 顶针; 3. 传感器;
4. 惯性梁; 5. 电磁铁; 6. 试样;
7. 转角调节器; 8. 底座

整个传感装置,包括自由摆力学系统,传感器、吸铁、顶针等部分如图 12 所示。

## 6. 电测部分

主要技术要求是:①提高信噪比;②低频响应要好;③零漂要小。为此,仪器采用调制,选频放大等工作方式,最后输出端配有运算放大器组成的减法器,以提高灵敏度。仪器中采用石英晶体隐频,以减少直流输出的零漂。测量仪的原理方框图如图 13 所示。

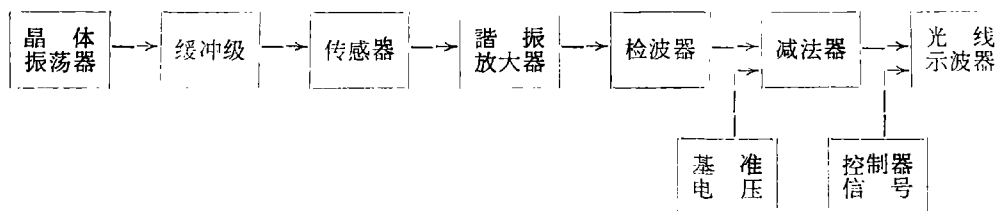


图 13 电测部分原理方框图

本系统采用 Z-80 单板微型计算机,有关专用软件写在 EPROM 里面。计算机主要起三方面作用:①对整个测试系统起自动测试、程序控制功能;②对振动衰减信号起快速采样作用;③数据自动处理,包括峰值检波以及阻尼能力 S、D、C 值的计算等等。有关计算机方面的问题作者已另写有专门文章发表,这里不再重复,仅对测试程序略加说明一下:

命 令	动 作
计算机发出开始测试命令	①吸铁动作,将横梁与试样扭转; ②光线示波器动作—延时可调 0.01 秒~1 秒。
发出吸铁释放命令	①横梁开始扭转振动; ②快速自动退磁电路工作; ③计算机通过 A/D 接口对传感器输出信号进行快速采样,并存于预先指定存贮区。
发出停止测试命令,转入数据处理	①计算机通过预先置好的专用软件对采集数据进行峰值检波处理,将各波形的峰值 $A_n, A_{n+1}, A_{n+2}, \dots$ 存于指定存贮区。 ②按预先编好软件,算出 S、D、C 值,即 $S、D、C\% = \frac{A_n^2 - A_{n+1}^2}{A_n^2} \times 100\%$ 并将结果存于预先指定存贮区。 ③将有关结果调出显示。可以调出 $A_n, A_{n+1}, A_{n+2}, \dots$ 值,也可以调出 S、D、C% 值。

## 四、结 束 语

该仪器由于配用单板微型计算机,在机械系统、传感器、电测部分都在 JD-801 型基础



上进一步改进。所以无论是结构、还是主要参数以及数据处理都比 JD-801 型进一步提高。所研制成的仪器已在洛阳 725 所等单位使用, 实为我国研究高阻尼合金材料的一项重要测试设备。作者目前还在 HD-802 型基础上, 进一步配置微型计算机, 并在传感器, 吸铁系统等做进一步改进, 应中国科学院冶金所要求, 于年内研制成更高级更完善的 HD-85 型大应力金属材料阻尼性能测试仪。

### 参 考 文 献

- [1] 方志成等, JD-801 型大应力扭摆式金属材料阻尼测定仪, 上海交大 85 周年校庆论文, (1981)
- [2] K. P. Neubert., Instument Transducers, Oxford, (1975).
- [3] O. Doebelin., Measurment Systems-Application and Design, (1975).
- [4] N. Norton., Handbook of Transducers for Electronic Measuring Systems, (1969).
- [5] 方志成等, 无损检测讲义(下册), 上海交大, (1980)。

## A Study of the Large Stress Twisting Instrument to Measure the Damping Property of Metal Material

Fang Zhicheng Du Min Ke Jinsho

### Abstract

The large stress twisting instrument to measure the damping property of metal material is an important testing equipment for researching the high-damping alloy. Up till now it hasn't been produced in our country, and hasn't been finalized abroad either. In this paper, the writers have explored some questions of measuring mechanism, probe, mechanical model of single-free swing, interference and how to restrain it. For this reason, the idea of designing the whole instrument and the key of technology in each link have been expounded.