

文章编号:1001-4888(2011)04-0397-07

# 一种用于测量鱼体材料粘弹性性质的弯曲变形试验机<sup>\*</sup>

王拓道, 贾来兵, 尹协振

(中国科学技术大学 近代力学系, 安徽合肥 230027)

**摘要:** 研究生物材料力学性质是生物力学的重要内容之一。测量材料粘弹性性质的传统方法是单轴拉伸松弛或蠕变实验。与传统方法不同,为了测量鱼体材料粘弹性性质,本文设计了一种用于测量鱼体材料性质的弯曲变形试验机,通过模拟鱼体摆动,可以测得鱼体材料的储能模量、耗散模量、滞后相位角等参数。通过弹性体(铜片)和粘弹性体(橡胶)材料实验证明了该试验机的可靠性,并对鱼鳍进行了实验,计算出鱼鳍的粘弹性性质的各个参数。实验结果表明,实验测试系统可靠而且简单实用。

**关键词:** 粘弹性材料; 试验机设计; 鱼; 储能模量; 耗散模量

**中图分类号:** O345; Q66      **文献标识码:** A

## 0 引言

经过上亿年的进化,鱼类已具有完美的生理结构和高超的水下游动能力。对鱼类和鱼类游动机理的研究是人类认识自然、拓展科学知识的重要组成部分,成为仿生学研究的重要理论依据,也为研制新型水下仿生机器人提供了思想源泉。至今,关于鱼类游动过程中高效率、高机动性、高稳定性和低噪声的原理仍在深入研究中。在以往的研究中大多把鱼体假想为弹性体,研究鱼体与周围水介质的相互作用。众所周知,生物材料都具有粘弹性性质,但在过去的研究中只有不多的论文涉及鱼体材料的粘弹性性质<sup>[1,2]</sup>以及材料粘弹性对生物运动的影响<sup>[3]</sup>。

研究生物材料时如何测量生物材料的粘弹性性质是首先要解决的难题。传统方法是采用单轴拉伸的松弛或蠕变实验来进行研究分析,例如已有的对鱼皮或肌肉的单轴拉伸松弛实验<sup>[4,5]</sup>。但是真实的鱼游动时,鱼体是做周期性弯曲运动的,单轴拉伸松弛实验是否能完全反映真实鱼体材料的特性还存在疑问。随着鱼类摆动频率的变化,其材料的特性会发生改变,并且像鱼鳍、脊椎等材料其形态复杂,采用单轴拉伸实验带来的误差也会变大。因此,本文针对这些情况设计了一种适用于测量鱼类材料弯曲变形的试验机。该试验机有二个特点:(1) 鱼类游动时其躯体在水平断面内来回绕其背腹轴摆动,本文设计的试验机需尽量模仿鱼的周期性弯曲变形;(2) 鱼类一般都在特定的频率范围游动,故本文设计的试验机运行频率在数赫兹左右。本文介绍的材料弯曲变形试验机能够很好地测量鱼体、脊椎等形态复杂材料的材料特性。本文首先介绍该试验机的结构和原理,接着通过测量弹性材料和粘弹性材料试样,验证该仪器的可靠性,最后给出一个测量鱼体材料的实例。

\* 收稿日期: 2010-12-23; 修订日期: 2011-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(10832010, 11002138)、中科院知识创新工程重要研究方向项目(KJCX2-YW-L05)、中国博士后基金(20090460733)、王宽诚博士后工作奖励基金和中央高校基本科研业务费专项资金资助

通讯作者: 尹协振(1946—), 男, 教授。研究方向: 流体力学。E-mail: xzyin@ustc.edu.cn

## 1 实验装置

大部分鱼游动时,其躯体在水平断面内来回绕背腹轴摆动,形成了人们所看到的各种不同的游动方式。针对鱼游过程中的躯体形变演变出不同的变形梁模型,我们设计了如图1所示的弯曲变形机。弯曲变形机主要由两部分组成:机械部分和数据采集部分。

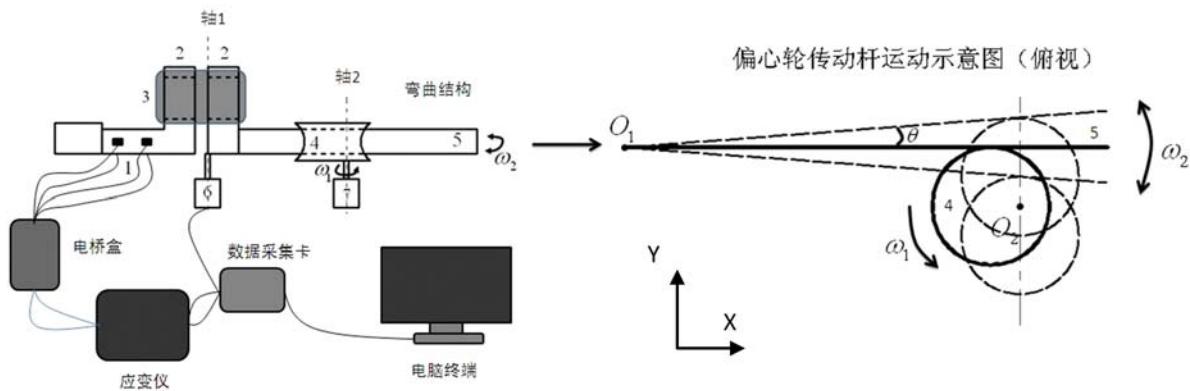


图1 弯曲变形试验机示意图

1 应变片,2 夹具,3 实验试件,4 偏心轮,5 传动杆,6 差分角度传感器,7 直流电机

Fig. 1 Sketch of bending test machine

### 1.1 机械部分

机械部分工作原理如图1上半部分所示。偏心轮4在电机7的带动下,绕 $O_2$ 轴以角速度 $\omega_1$ 旋转,其偏心距为e。偏心轮4与传动杆5连接,推动传动杆以角速度 $\omega_2$ 绕定轴轴心 $O_1$ 旋转,轴 $O_1$ 同时与差分角度传感器6相连并与6的轴心重合,纪录传动杆5的旋转角度。偏心轮4可以沿导轨水平滑动,调节传动杆的振动振幅。传动杆左端通过夹手2带动实验试件3的一端进行周期性定轴转动。而实验试件的另一端在另一夹手的固定下保持空间相对静止。通过贴在悬臂梁上的应变片1同步记录其受力,通过差分角度传感器6(ROMUON E6B2-CWZ3E 编码器,1000 线/周)记录其角位移,达到实现并记录周期性弯曲变化的目的。

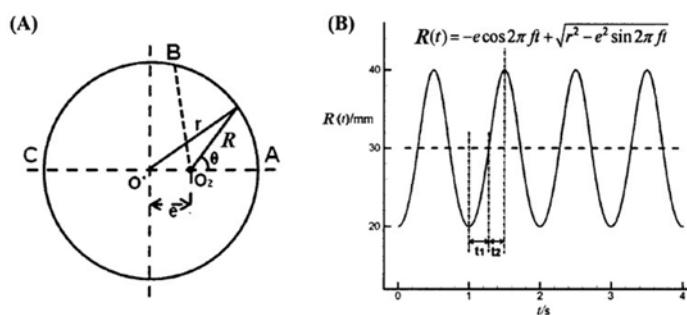


图2 偏心轮与角位移输出

Fig. 2 Eccentric wheel and output of angular displacement

偏心轮的结构如图2(A)所示,转轴为 $O_2$ ,形心为O,转角为 $\theta$ ,半径 $r=30\text{mm}$ ,偏心距 $e=10\text{mm}$ , $t$ 时刻回转半径即偏心轮轴心到凸轮与摆杆切点的距离为 $R(t)$ ,顺时针旋转时,由A经B至C,其中B位置为平衡位置且 $|O_2 B|=r$ 。由余弦定理可知:

$$r^2 = R^2 + e^2 - 2R\cos(\pi - \theta) \quad (1)$$

公式(1)通过化简并带入 $\theta=2\pi ft$ 可得:

$$R(t) = -e \cos 2\pi f t + \sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 2\pi f t} \quad (2)$$

由公式(2)可知回转半径近似为余弦信号,可以满足试验机所需的角度输出要求。需要注意的

是,当电机匀速旋转时该机构给出的角位移输出前1/4周期与后1/4周期有一些差别,如图2(B)所示,K=t<sub>1</sub>:t<sub>2</sub>=1.27。

试验机通过滑轨调节偏心轮的位置来调整传动杆的振动幅度,传动杆一直保持与凸轮相切的状态,因此将造成两个极限位置的极限角度有细微差别。根据图2(A)所设计的凸轮参数,可推导出两极限角θ<sub>1</sub>,θ<sub>2</sub>的正弦值分别为:

$$\sin\theta_1 = \frac{40L - 30\sqrt{L^2 - 700}}{L^2 + 900}, \quad \sin\theta_2 = \frac{-20L + 30\sqrt{L^2 + 500}}{L^2 + 900} \quad (3)$$

其中L为图1中偏心轮轴心O<sub>1</sub>距O<sub>2</sub>的x方向距离。如表1所示,分别取L为100mm,150mm,200mm和250mm带入公式(3),可以发现两极限角存在微小差别并且随着L的增大,极限位移角的减小,二者趋向相同。在所规定的θ=2°~6°范围误差小于5%,仍在可接受范围内。

表1 不同L情况角位移输出结果

Tab. 1 Angular displacement for different L

L(mm)	$\sin\theta_1$	$\sin\theta_2$	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_1(\text{rad})$	$\theta_2(^{\circ})$	$\theta_2(\text{rad})$	$\frac{\theta_1+\theta_2}{2}(^{\circ})$	$\frac{\theta_1+\theta_2}{2}(\text{rad})$
100	0.102	0.099	5.85	0.1021	5.68	0.0991	5.77	0.1006
150	0.067	0.066	3.84	0.0670	3.78	0.0659	3.81	0.0665
200	0.050	0.050	2.87	0.0501	2.87	0.0501	2.87	0.0501
250	0.040	0.040	2.29	0.0399	2.29	0.0399	2.29	0.0399

## 1.2 数据采集部分

采集部分主要需要采集实验试件的角位移信号、测力天平信号,并处理最终得出试件的角位移曲线和力矩变化曲线。数据采集部分由电桥盒、应变仪(SINOCERA-YE1940C)、采集卡(NI USB-6212)和计算机组成。考虑到弯曲变形试验机仅测量弯曲变形过程中的力矩,故应测力天平采用四个应变片的双半桥电路,以实现力、矩分离,经应变仪放大后由采集卡记录两个半桥电路通道1和通道2的输出信号U<sub>1</sub>和U<sub>2</sub>,进而换算为输出力矩。通过标定实验,得出了力矩与两个半桥电路产生的电压信号的关系公式。

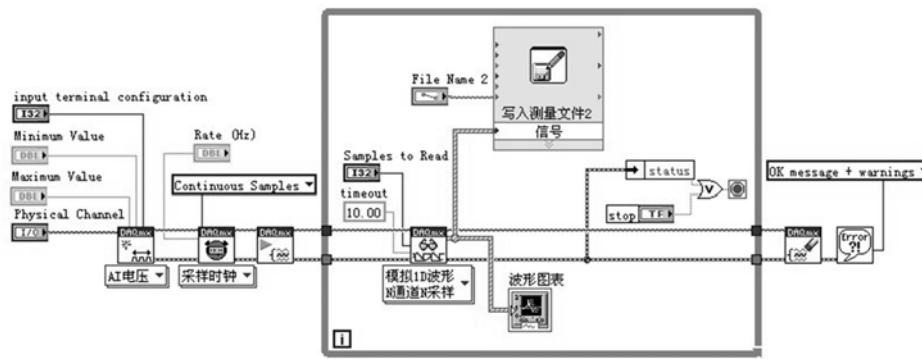


图3 LabView 采集程序

Fig. 3 LabView data acquisition program

差分角度编码器(A6B2-CWZ3E)用于测量角位移,编码器产生两项脉冲方波,由采集卡记录,通过自行编写的程序换算成角位移变化。数据采集卡记录由NI公司采集软件LabView实现。图3所示为LabView采集程序,其功能是设置采集卡的采样率,记录应变仪和编码器输出的数据,以得到编码器的脉冲方波曲线、应力天平两通道数据曲线,并保存于电脑终端。编码器脉冲方波曲线由自己编写的小程序转换成角位移变化曲线,最后电脑处理分析角位移及力矩数据。

整个弯曲摆动机将电机固定在固定滑轨的滑块上面,通过移动滑块来调节弯曲摆动的摆幅,摆幅变

化范围为 $+2^\circ \sim +6^\circ$ ,通过调节电机的供电电压来实现摆动频率的变化,变化范围为 $0.5\text{Hz} \sim 6\text{Hz}$ ,基本满足鱼类巡游的摆动模式。

## 2 实验与结果分析

为验证系统,我们首先对弹性体(导电铜片)及粘弹性体(橡胶)试件进行了实验,并分析了结果。

### 2.1 铜片实验结果

在铜片测试实验中,试件为厚度 $b=0.21\text{mm}$ 、高度 $h=10\text{mm}$ 、长度 $a=7\text{mm}$ 的铜片。实验中数据采样率为 $10000\text{Hz}$ ,采样时间为 $4\text{s}$ ,摆动频率为 $3\text{Hz}$ ,摆幅为 $5^\circ$ 。

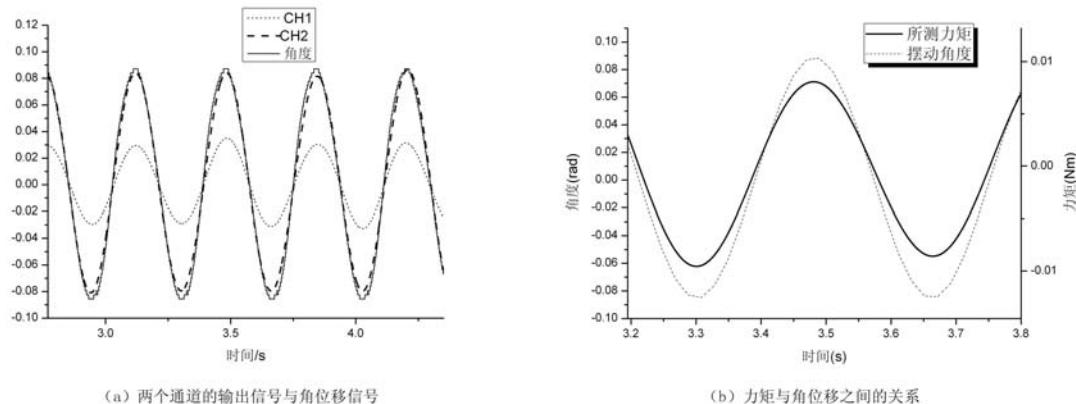


图4 铜片的实验结果

Fig. 4 Test results of copper

图4为检测到的铜片实验信号,其中图4(a)是两通道输出信号与角位移信号,图4(b)是力矩与角位移的信号。从图4(b)可以发现力矩与角位移信号之间没有相位延迟,说明铜片是弹性体。由公式 $E(i\omega)=E_1(\omega)+iE_2(\omega)$ <sup>[6]</sup>可知,弹性体损耗模量 $E_2$ 为零,我们就可以根据力矩与角位移之间的关系计算出铜片的弹性模量。

$$E = \frac{M\rho}{I_z} = \frac{12aM}{\theta b^3} \quad (4)$$

其中 $\rho$ 是曲率半径; $I_z$ 是转动惯量。由图4(b)得出 $M=0.01\text{Nm}$ , $\theta=0.09\text{rad}$ ,带入公式(4)计算得铜片的弹性模量为 $E=1.01 \times 10^{11}\text{Pa}$ 。纯铜的弹性模量为 $1.15 \times 10^{11}\text{Pa}$ ,但是因为导电铜片掺入其他元素,因此弹性模量的测试是可信的。

### 2.2 橡胶实验结果

对于粘弹性体,采用橡胶进行实验,橡胶试件厚度为 $1.85\text{mm}$ 、高度为 $10\text{mm}$ 、长度为 $7\text{mm}$ ,摆动频率选择 $1\text{Hz}, 2\text{Hz}, 3\text{Hz}, 4\text{Hz}$ 。摆幅为选取 $2.5^\circ, 3^\circ, 5^\circ$ 。单个实验数据如图5所示,通过两个电桥的响应,计算力矩,然后便可得出相位角、力矩。实验结果如表2所示。

表2 不同摆幅和频率时橡胶的相位延迟角和力矩

Tab. 2 Phase lag and moment for different amplitude and frequency

摆幅 频率	2.5°			3°			5°		
	M(Nm)	$\tan\delta$	$E_l(\text{Pa})$	M(Nm)	$\tan\delta$	$E_l(\text{Pa})$	M(Nm)	$\tan\delta$	$E_l(\text{Pa})$
1	0.00159	0.0703	$2.44 \times 10^7$	0.00183	0.0658	$2.36 \times 10^7$	0.00293	0.0583	$2.22 \times 10^7$
2	0.00162	0.0582	$2.48 \times 10^7$	0.00184	0.0556	$2.37 \times 10^7$	0.00293	0.0485	$2.22 \times 10^7$
3	0.00161	0.0650	$2.47 \times 10^7$	0.00184	0.0563	$2.37 \times 10^7$	0.00292	0.0419	$2.21 \times 10^7$
4	0.00157	0.0344	$2.41 \times 10^7$	0.00181	0.0292	$2.33 \times 10^7$	0.00295	0.0222	$2.24 \times 10^7$

表注:加载频率单位为 $\text{Hz}$ ; M、 $E_l$ 与 $\tan\delta$ 代表不同摆幅和频率下试件的力矩幅值、储能模量与损耗因子。

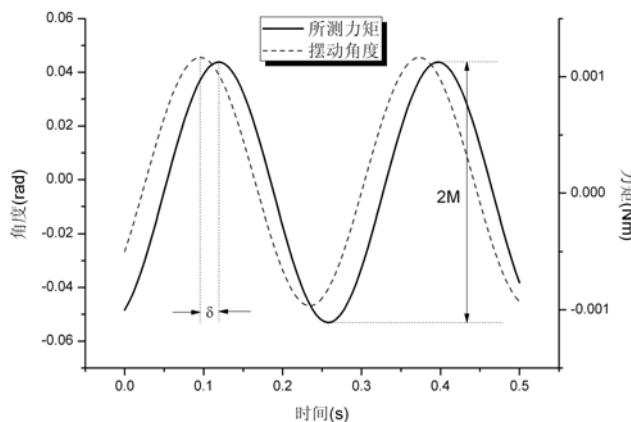


图5 橡胶的实验结果

Fig. 5 Test results of rubber

若把橡胶作为标准线性固体来考虑，则有耗散比：

$$Z = \frac{\Delta E}{E_{\max}} = -2\pi \frac{E_2}{E_1} = 2\pi \tan \delta = 2\pi \frac{\lambda \omega (1 - \eta)}{\eta + \lambda^2 \omega^2} \quad (5)$$

其中  $\lambda$  与  $\eta$  为表征材料的粘性属性的材料系数。

由式(5)可以看出，随着  $\omega$  增大，耗散比  $Z$  应该减小，即耗散因子  $\tan \delta$  随频率  $\omega$  的增加而减小。由表 2 可得损耗因子  $\tan \delta$  随着频率的增加而减小，与之前分析一致。由于  $\tan \delta$  很小，那么  $\delta$  也很小，而  $\delta$  代表材料偏离弹性性质的程度<sup>[6]</sup>。因为试件的弹性性质占据主要地位，那么由胡克定律，应变越大，力矩的幅值也应该越大，这也与表 2 中力矩随着角度的增大而增大相吻合。另外摆动试验机摆幅 5°时试件应变约为 1%，将试件橡胶放于动态疲劳试验机上进行动态拉伸实验，可以测出橡胶在 1% 应变下其弹性模量为  $2.7 \times 10^7$  Pa，与表 2 中摆幅为 5°时的  $E_1$  在一个数量级之上，且非常接近，因此试验机下所测得的储能模量即  $E_1$  真实可信。

该试验机能够实现精确测定材料周期性弯曲运动时的力矩与角位移的关系，因此使用  $\tan \delta$  来对试验机进行误差估计。仪器精度指的是单次测量值与平均值之差，只要按照公式  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}$  计算出输出信号的方差，就可按照公式  $S = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\%$  计算出精度。该试件在摆幅为 2.5°、频率为 1Hz 下进行 5 次实验， $\tan \delta$  值分别为 0.0703、0.0728、0.072、0.0726、0.071。通过上述方法可计算出仪器精度  $S$  为 1.5%。

### 2.3 鱼鳍实验结果

最后采用鱼体材料鱼尾鳍进行实验。尾鳍厚度为 2.35mm、宽度为 7mm，高度为 20.6mm。尾鳍上半部分一共 10 根尾鳍，摆动角度为 3°，摆动频率为 3Hz。实验数据如图 6 所示，从图 6 可以得出  $A_M = 0.002$ ,  $A_\theta = 0.0527$ ,  $\Delta t = 0.001$ s。

由  $\epsilon(t) = \frac{y}{\rho(t)} = \frac{y\theta(t)}{l} = \frac{yA_\theta \sin \omega t}{l}$ ,  $\epsilon(t) = A \sin \omega t$  可得  $A = \frac{yA_\theta}{l}$  并与  $\delta = \omega \Delta t$  一起带入到  $\sigma(t) = A E_1(\omega) \sin \omega t + A E_2(\omega) \cos \omega t = A |E(i\omega)| \sin(\omega t + \delta)$ <sup>[6]</sup> 得：

$$\sigma(t) = \frac{yA_\theta}{l} |E(i\omega)| \sin(\omega t + \delta) \quad (6)$$

而

$$\sigma(t) = \frac{M(t)y}{I_z} = \frac{A_M y}{I_z} \sin \omega(t + \Delta t) \quad (7)$$

由公式(6)与公式(7)可得  $|E(i\omega)| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \frac{A_M l}{A_\theta I_z} = \frac{12 A_M l}{A_\theta b h^3}$ ，带入数据得  $|E(i\omega)| = 11.9 \times 10^6$ 。又由

$\frac{E_2}{E_1} = \tan \delta = \tan \omega \Delta t = 0.019$  可见  $\delta$  很小, 材料可视为弹性材料。将  $\frac{E_2}{E_1} = 0.019$  带入  $|E(i\omega)|$  可得储能模量  $E_1 = 11.79 \times 10^6 \text{ Pa}$ , 耗散模量  $E_2 = 2.24 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

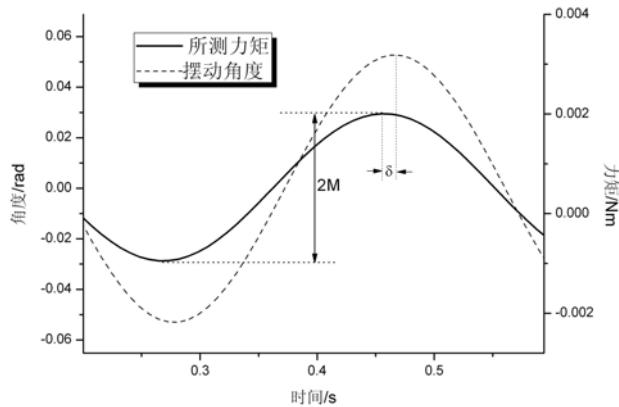


图 6 鱼鳍的实验结果

Fig. 6 Test results of fish fin

### 3 结论

本文介绍了一种新的方法,设计了一个全新的机构,用这种方法,可以测出生物材料随频率与振幅变化时的生物材料所受力矩和相位滞后角的变化,通过力矩和相位滞后角,能够计算出材料的损耗因子、储能模量、耗散模量、耗散比等,进而分析生物材料的粘弹性属性。验证性实验获得的结果,其合理性也说明了实验方法是正确的,而且实验装置简单实用。

#### 参考文献:

- [1] Long J H. Stiffness and damping forces in the intervertebral joints of blue marlin[J]. *J. Exp. Biol.*, 1992, 162:131—155.
- [2] Long J H. Locomotor design of dolphin vertebral columns: bending mechanics and morphology of *delphinus delphis* [J]. *J. Exp. Biol.*, 1997, 200:65—81.
- [3] BAO Lin, HU Jin-song, YU Yong-liang, et al. A Viscoelastic Constitutive Model Related to Deformation of Insect Wing Under Loading in Flapping Motion[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2006, 27(6):741—748.
- [4] 周萌, 尹协振, 童秉纲. 鲫鱼皮肤和肌肉的力学性能研究[J]. 实验力学, 2010, 25(5):536—545 (ZHOUMeng, YIN Xiezhen, TONG Bing-gang. Study of Skin and Muscle Mechanical Properties of Crucian Carp (*Carassius auratus*))[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, 25(5):536—545(in Chinese))
- [5] 陈明, 贾来兵, 尹协振. 描述鱼鳍材料松弛特性的分数 Zener 模型[J]. 力学学报, 2011, 43(1):217—220 (Chen Ming, Jia Laibing, Yin Xiezhen. Relaxation Modulus of Caudal Fin Studied by Fractional Zener Model[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(1):217—220(in Chinese))
- [6] 周光泉, 刘孝敏. 粘弹性理论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1996:36—50 (Zhou Guangquan, Liu Xiaomin. Viscoelastic theory[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1996:36—50(in Chinese))

## On a Bending Test Machine used to Measure Viscoelastic Properties of Fish Material

WANG Tuo-dao, JIA Lai-bing, YIN Xie-zhen

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Mechanical property investigation of biological materials is one of the important branches of biomechanics. Traditionally, the uniaxial tensile test, relaxation or creep, are often used to study the viscoelastic properties of material. However, in order to measure the viscoelastic properties of fish material, a bending test machine was designed and its application is presented in this paper. Fish swing movement can be simulated based on this machine, angular displacement curve and moment of experimental samples were measured and then the storage modulus, loss modulus and phase angle of hysteresis were obtained. Experiment of elastic (copper) and viscoelastic (rubber) specimens was carried out to verify the reliability of this testing machine. Finally, experiment of fish fin was carried out and the parameters of its viscoelastic properties was obtained. Experimental results show that this test system is reliable, simple and practical.

**Keywords:** viscoelastic property of material; test machine design; fish; storage modulus; loss modulus