



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102128752 B

(45) 授权公告日 2012. 09. 05

(21) 申请号 201010560900. 3

(22) 申请日 2010. 11. 26

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路 15 号

(72) 发明人 郇勇 张泰华

(74) 专利代理机构 北京中创阳光知识产权代理有限公司 11003

代理人 尹振启 马知非

(51) Int. Cl.

G01N 3/22(2006. 01)

G01L 3/00(2006. 01)

(56) 对比文件

US 6443017 B1, 2002. 09. 03, 说明书第 2 栏第 22 行至第 4 栏第 11 行, 图 1.

CN 2758720 Y, 2006. 02. 15, 说明书第 2 页倒数第 4 行至第 3 页最后 1 行, 图 1.

CN 1740769 A, 2006. 03. 01, 说明书第 5 页第 8 行至第 6 页最后 1 行, 图 1-4.

CN 2489326 Y, 2002. 05. 01, 说明书第 2 页第 8 行至最后 1 行, 图 1-3.

汪诤等. 扭矩测量技术浅谈. 《甘肃科技》. 2005, 第 21 卷 (第 3 期), 99, 100.

贾宏光等. 高精度微扭矩动态测试仪. 《仪器仪表学报》. 2000, 第 21 卷 (第 3 期), 233-235, 239.

审查员 张沫

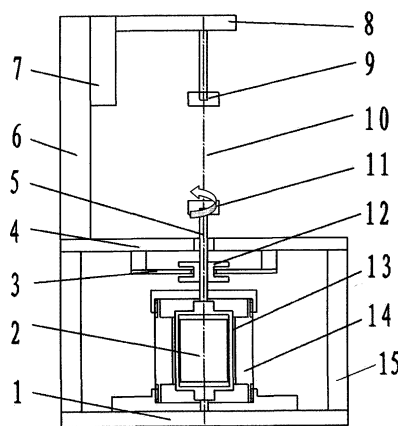
权利要求书 2 页 说明书 5 页 附图 3 页

(54) 发明名称

一种微扭矩力学试验机及其测试方法

(57) 摘要

本发明涉及一种微扭矩力学试验机及其测试方法。该试验机包括：控制装置和试验机主机，所述控制装置用于设置试验方法，向试验机主机发出命令和分析处理从试验机主机得到的实验数据；所述试验机主机用于对试样进行加载。测试方法包括：通过定制的试验软件控制信号发生模块产生一电压信号，经调理放大后驱动试验机主机工作；信号采集模块采集角度信号和线圈的驱动信号；将采集到的角度信号换算为旋转角，将采集到的线圈驱动信号换算为扭矩；按照力学模型进行数据处理，得出被测试样的切应力一切应变曲线，进而可进一步计算出剪切模量和剪切强度。由于采用电磁驱动兼扭矩计量方式，使得本扭转试验机的扭矩分辨力大幅度提高。



1. 一种微扭矩力学试验机,其特征为,该试验机包括:控制装置和试验机主机,所述控制装置用于设置试验方法,向试验机主机发出命令和分析处理从试验机主机得到的实验数据;所述试验机主机用于对试样进行加载;所述试验机主机包括:主机框架,设置在主机框架下方的电磁驱动装置、设置在主机框架上部的夹持装置和设置在主机框架内部的传感装置;所述夹持装置包括用于夹持试样的定夹具和动夹具,所述定夹具设置在主机框架上,动夹具设置在所述电磁驱动装置上,并可随电磁驱动装置旋转,传感装置用于测试电磁驱动装置所旋转的角度;所述主机框架包括:机架底板,机架盖板,立柱和机架侧板,机架侧板设置机架底板上,机架盖板盖在机架侧板上;所述电磁驱动装置包括:电磁驱动机构和加载轴;所述传感装置为非接触式角度传感器,包括:角度传感器活动极板和角度传感器定极板;其中,所述电磁驱动装置设置由在所述机架底板机架侧板和机架盖板围成的空间中;所述立柱设置机架盖板上;所述电磁驱动装置中的加载轴可随电磁驱动机构旋转,并且其上端通过机架盖板中间的通孔伸出,在所述机架盖板的下方设置有所述角度传感器,角度传感器的定极板与机架盖板相连接,角度传感器的活动极板与加载轴相连接;所述夹持装置中的动夹具设置在所述加载轴由机架盖板伸出段的端部。

2. 根据权利要求1中所述微扭矩力学试验机,其特征为,所述夹持装置还包括:电动平移台,悬臂梁;所述电动平移台安装在所述主机框架上部,并可以上下移动;所述电动平移台上安装有所述悬臂梁,悬臂梁的下侧安装所述定夹具,并和所述动夹具对中安装。

3. 根据权利要求1中微扭矩力学试验机,其特征为,所述电磁驱动机构包括内磁体、外磁体和线圈;所述线圈套放在所述内磁体外围,所述外磁体套装在线圈的外侧,三者共轴;所述加载轴设置在线圈上;所述线圈和内磁体之间,线圈和外磁体之间均具有间隙;所述线圈可围绕其中心轴旋转。

4. 根据权利要求1中所述微扭矩力学试验机,其特征为,所述角度传感器为电感式角度传感器、电容式角度传感器或光学类非接触式角度传感器。

5. 根据权利要求1中所述微扭矩力学试验机,其特征为,所述控制装置中包括计算机,控制器;计算机用于设置试验方法和分析处理实验数据;控制器用于所述计算机和试验机主机之间的数据通信,包括功率放大模块、信号采集模块、信号发生模块、信号调理模块;其中

功率放大模块用于将信号发生模块产生的信号进行放大,然后传输给试验机主机中的线圈;

信号发生模块与计算机相连,用于产生一电压驱动信号;

信号采集模块与所述传感装置相连,用于采集试验机主机内的角度信号和线圈驱动信号;

信号调理模块用于将采集到的信号进行滤波和线性变换,以适合信号采集模块采集。

6. 使用权利要求1中所述微扭矩力学试验机进行测试的方法:其特征为,包括下列步骤:

1) 用计算机控制信号发生模块产生一电压信号,该信号经功率放大模块放大后驱动试验机主机工作;

2) 用控制器内的信号采集模块采集旋转角度电压信号和线圈的驱动电流信号;

3) 将采集的旋转角度信号和线圈的驱动信号分别换算为角度和扭矩值;

4) 对步骤 3) 中得到的一系列角度值和扭矩值,按照力学模型进行数据处理,得出被测试样的切应力-切应变曲线、剪切模量和剪切强度极限参数。

7. 使用权利要求 6 中所述测试方法:其特征为,所述步骤 4) 中,包括下述子步骤:

- (1) 由步骤 3) 中得出的角度和扭矩值,得到切应力-切应变曲线;
- (2) 根据切应力-切应变曲线,按照力学模型进行数据处理,得出被测试样的剪切模量。

## 一种微扭矩力学试验机及其测试方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种用于微尺度材料或结构力学性能测试的仪器及其测试方法,特别涉及一种用扭转方式对微尺度试样的力学性能进行测试的仪器及其测试方法。

### 背景技术

[0002] 目前对材料进行扭转力学性能测试,一般采用扭转材料试验机进行。根据匹配的扭矩传感器不同,这类试验机扭矩量程从  $10^0\text{Nm}$  至  $10^3\text{Nm}$  不等,可满足工程界对宏观尺度试样扭转测试的需求。但是由于传统扭转材料试验机采用应变式扭矩传感器测量扭矩,即通过应变片测量弹性元件的变形来计量扭矩,从原理上讲,分辨力难些继续提高。目前国际上最小的商业化扭转试验机也只能满足  $10^{-1}\text{Nm}$  以上的扭转测试需要。

[0003] 随着材料微/纳米化技术的发展以及微电子机械系统 MEMS 的推广应用,对直径  $10^0\mu\text{m} \sim 10^2\mu\text{m}$  的单根细丝、微电子机械系统 MEMS 扭转微镜等的扭转测试需求变得尤为迫切。一方面,基础研究人员在微/纳尺度取得的研究成果,例如,应变梯度理论等,迫切需要实验手段的支持和推动;另一方面,工程技术人员不再满足采用经典宏观力学知识预测微构件的强度,希望通过更为贴切的实验来指导工程设计。

[0004] 然而,上述测试涉及的扭矩一般小于  $10^{-3}\text{Nm}$ 。传统扭转试验机扭矩分辨力难以满足。必须采用新的原理来实现微尺度试样的扭转测试。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种针对微尺度试样进行扭转测试的仪器及其测试方法,以获得微尺度试样在扭转状态下的力学性能。

[0006] 该仪器的设计原理为:载流线圈在均匀磁场中受力,力的大小与电流成正比,即: $F \propto I$ 。式中  $F$  为安培力,  $I$  为通过线圈的电流。试验机产生的扭矩:

$$[0007] \quad T = 2FL \propto I \quad (1)$$

[0008] 式中  $L$  为导线至转轴中心的垂直距离。

[0009] 由此可以看出,扭矩和电流之间成线性关系。所以只要计量出驱动电流大小,就可以准确计量扭矩大小。这种方式抛弃了应变式扭矩传感器需要敏感元件先将变形信号转换为电信号的中间过程。从原理上讲,这种测量扭矩的方式可以获得很好的分辨力。

[0010] 为达到上述目的,本发明提供的微扭矩力学试验机包括:控制装置和试验机主机,所述控制装置用于设置试验方法,向试验机主机发出命令和分析处理从试验机主机得到的实验数据;所述试验机主机用于对试样进行加载。

[0011] 进一步,所述试验机主机包括:主机框架,设置在主机框架下方的电磁驱动装置、设置在主机框架上部的夹持装置和主机框架内部的传感装置;所述夹持装置包括用于夹持试样的定夹具和动夹具,所述定夹具设置在主机框架上,动夹具设置在所述电磁驱动装置上,并可随电磁驱动装置旋转,传感装置用于测试电磁驱动装置所旋转的角度。

[0012] 进一步,所述主机框架包括:机架底板,机架盖板,立柱和机架侧板,机架侧板设置

机架底板上,机架盖板盖在机架侧板上;

[0013] 所述电磁驱动装置包括:电磁驱动机构和加载轴

[0014] 所述传感装置为非接触式角度传感器,包括:角度传感器活动极板和角度传感器定极板;

[0015] 其中,所述电磁驱动装置在所述机架底板、机架侧板和机架盖板围成的空间中;所述立柱设置在机架盖板上;所述电磁驱动装置中的加载轴可随电磁驱动机构旋转,并且其上端通过机架盖板中间的通孔伸出,在所述机架盖板的下方设置有所述角度传感器定极板,角度传感器定极板与机架盖板相连接,角度传感器活动极板与加载轴相连接;所述夹持装置中的动夹具设置在所述加载轴由机架盖板伸出段的端部。

[0016] 进一步,所述夹持装置还包括:电动平移台,悬臂梁;所述电动平移台安装在所述主机框架立柱上;所述电动平移台上安装有所述悬臂梁,悬臂梁的下侧安装所述定夹具,并和所述动夹具对中安装。

[0017] 进一步,所述电磁驱动机构包括内磁体、外磁体和线圈;所述线圈套放在所述内磁体外围,所述外磁体套装在线圈的外侧,三者共轴;所述加载轴设置在线圈上;所述线圈和内磁体之间,线圈和外磁体之间均具有间隙;所述线圈可围绕其中心轴旋转。

[0018] 进一步,所述角度传感器为电感式角度传感器、电容式角度传感器或光学类非接触式角度传感器。

[0019] 进一步,所述控制装置中包括计算机,控制器;计算机用于设置测试方法和分析处理实验数据;控制器用于所述计算机和试验机主机之间的数据通信,包括功率放大模块、信号采集模块、信号发生模块、信号调理模块;其中

[0020] 功率放大模块用于将信号发生模块产生的信号进行放大,然后传输给试验机主机中的线圈;

[0021] 信号发生模块与计算机相连,用于产生电压驱动信号;

[0022] 信号采集模块与所述传感装置相连,用于采集试验机主机内的角度信号和线圈驱动信号;

[0023] 信号调理模块用于将采集到的信号进行滤波和线性变换,以适合信号采集模块采集。

[0024] 使用微扭矩力学试验机进行测试的方法:其特征为,包括下列步骤:

[0025] 1) 用计算机控制信号发生模块产生一电压信号,该信号经功率放大器放大后驱动试验机主机工作;

[0026] 2) 用控制器内的信号采集模块采集旋转角度电压信号和线圈的驱动电流信号;

[0027] 3) 将采集的旋转角度信号和线圈的驱动信号分别换算为角度和扭矩值;

[0028] 4) 对步骤3)中得到的一系列角度值和扭矩值,按照力学模型进行数据处理,得出被测试样的切应力-切应变曲线、剪切模量和剪切强度极限等参数。

[0029] 进一步,所述步骤4)中,包括下述子步骤:

[0030] 41) 由步骤3)中得出的角度和扭矩值,得到切应力-切应变曲线;

[0031] 42) 根据切应力-切应变曲线,按照力学模型进行数据处理,得出被测试样的剪切模量。

[0032] 由于采用电磁加载方式进行驱动兼扭矩计量,使得试验机的扭矩分辨力得以大幅

度提高,可以满足  $10^{-3}\text{Nm}$  以下的微小扭矩测试需要。这是目前常规材料试验机无法实现的。该试验机可以通过扭转方式直接对微尺度试样进行测试,真实模拟试样在切应力状态下的力学工况,不仅能为微纳米工程技术领域提供有效的检测手段,对基础研究领域也具有重要意义。

### 附图说明

- [0033] 图 1 为本发明提供的电磁式微扭矩力学试验机测试系统示意图；  
[0034] 图 2 为微扭矩力学试验机主机结构示意图；  
[0035] 图 3 为微扭矩力学试验机主机电磁驱动装置结构示意图；  
[0036] 图 4 为用本发明提供的微扭矩力学试验机的扭矩和电流的标定曲线；  
[0037] 图 5 为微扭矩力学试验机测试方法流程图。

### 具体实施方式

[0038] 下面结合附图对本发明的实施例进行详细说明：

[0039] 图 1 所示的是本发明提供的微扭矩力学试验机的系统结构示意图,包括控制装置和试验机主机 C,控制装置中包括计算机 A,控制器 B。计算机 A 上安装试验软件,用于设置测试方法和分析处理实验数据;控制器 B 用于计算机和试验机主机之间的数据通信,包括功率放大模块、信号采集模块、信号发生模块、信号调理模块。功率放大模块用于将信号发生模块产生的信号进行放大,然后传输给试验机主机中的线圈;信号发生模块与计算机相连,用于产生电压驱动信号;信号采集模块与所述传感装置相连,用于采集试验机主机内的角度信号和线圈驱动信号;信号调理模块用于将采集到的信号进行滤波和线性变换,以适合信号采集模块采集;试验机主机 C 用于对试样进行加载测试,试验机主机 C 与控制器 B 电连接,受控制器的信号发生模块的控制并将测量信号传输给控制器的信号采集模块。

[0040] 微扭矩力学试验机主机 C 的结构如图 2 所示,包括:主机框架,设置在主机框架下方的电磁驱动装置、设置在主机框架上方的夹持装置和设置在主机框架内部的传感装置。其中主机框架包括机架底板 1,机架盖板 4,立柱 6 和机架侧板 15。夹持装置包括:电动平移台 7,悬臂梁 8,定夹具 9 和动夹具 11,电磁驱动装置包括:线圈 13 和外磁体 14、加载轴 5,内磁体 2。传感装置为非接触式角度传感器,包括:角度传感器活动极板 12 和角度传感器定极板 3。其中,机架侧板 15 设置机架底板 1 上,机架盖板 4 盖在机架侧板 15 上,立柱 6 设置机架盖板 4 上。电磁驱动装置设置在由机架底板 1、机架侧板 15 和机架盖板 4 围成的空间中,并且位于机架底板 1 的中间位置,电磁驱动装置中的加载轴 5 通过机架盖板 4 的中间通孔伸出。角度传感器定极板 3 安装在机架盖板 4 下面,角度传感器活动极板 12 固定安装在加载轴 5 中部,角度传感器活动极板和定极板之间平行,存在间隙,夹持装置中的动夹具 11 设置在加载轴 5 从机架盖板 4 伸出段的端部,电动平移台 7 安装在立柱 6 上部,该电动平移台 7 上安装有悬臂梁 8。悬臂梁 8 的下侧安装一定夹具 9,和动夹具 11 对中安装。电动平移台 7 可以上下调节高度,以便于测试不同长度的试样 10。

[0041] 电磁驱动装置的结构如图 3 中所示,线圈 13 套放在内磁体 2 外围,外磁体 14 套装在线圈 13 的外围,三者共轴。在内磁体 2、外磁体 14 的磁隙内形成一个近似均匀的磁场。线圈 13 和内磁体 2 之间,线圈 2 和外磁体 14 之间均具有一定间隙。线圈 13 可围绕内磁体

2、外磁体 14 的中心轴旋转。加载轴 5 设置在线圈 13 上,可随线圈 13 旋转。

[0042] 角度传感器活动极板 12 的旋转会引起电感量的变化,根据电感的变化可测量出活动极板 12 的旋转角。控制器 B 中的功率放大模块与试验机主机中的线圈 13 电连接,并将信号发生模块发生的驱动电信号放大后传输给线圈。控制器中 B 的信号采集模块与试验机主机中的角度传感器定极板 3 电连接,并通过信号采集模块对角度传感器定极板 3 中所测量的角度电信号进行采集。

[0043] 本实施例中采用角度传感器为电感式角度传感器,其测量原理为两电极板相对转动时角度随电感量线性变化,电感量的变化可以通过电压信号的变化测量。其他非接触式高分辨力位移传感器:例如,电容式或光学类非接触式角度传感器也可以在试验机主机中使用,这是本专业领域的技术人员所公知的。另外,本发明中的控制装置也可以由其他具有同样功能的装置代替。

[0044] 利用本发明提供的微扭矩力学试验机的测试方法如下:

[0045] 在试验时,如图 1、2 所示,首先需将试样 10 安装在定夹具 9 和加载轴 5 上的动夹具 11 之间,然后进行如下步骤:如图 5 中所示:

[0046] 步骤 101:通过软件控制信号发生模块产生一电压驱动信号。

[0047] 步骤 102:步骤 101 中产生的电压驱动信号通过控制器进行信号调理。

[0048] 步骤 103:用调理后的信号驱动试验机主机工作。其驱动原理为:载流线圈在均匀磁场中受电磁力,电磁力的大小与电流成正比,即: $F \propto I$ 。式中 F 为电磁力, I 为通过线圈的电流。试验机主机产生的扭矩可通过下面的式 1 计算得到:

$$[0049] \quad T = 2FL \quad (1)$$

[0050] 式中 L 为导线至转轴中心距, F 为电磁力, I 为通过线圈的电流。

[0051] 线圈 13 处于内磁体 2 和外磁体 14 产生的均匀磁场中。当电流通过线圈 13 时,线圈 13 受到一对水平的力,形成旋转的力矩,线圈 13 带动加载轴 5 转动,驱动动夹具 11 旋转,从而将被测试样 10 扭转。

[0052] 步骤 104:用信号采集模块采集角度信号和线圈的驱动信号。其中角度信号是角度传感器定极板 3 的电压信号,线圈的驱动信号由信号采集模块在线圈驱动电路上采集。

[0053] 步骤 105:步骤 104 中采集到的角度信号和线圈的驱动信号被传输至计算机,并通过换算得到角度值和扭矩值。该换算方法将在下文中详述。

[0054] 步骤 106:判断是否满足试验条件。该试验条件为:扭矩是否达到试验方法中的设定值,或角度是否达到试验方法中的设定值,或试验持续时间是否达到试验方法中的设定值。若判断为是,进入步骤 107;若判断为否,回到步骤 101 继续试验。

[0055] 步骤 107:根据步骤 105 中得到的一系列角度值和扭矩值,按照力学模型进行数据处理。其原理及过程将在下文中详述。

[0056] 步骤 108:得出并输出结果。

[0057] 步骤 105、107 中的数据处理的原理及过程叙述如下:

[0058] 对采集到的角度信号和驱动信号进行处理。将采集的角度信号称为  $\phi_v$ ,采集的驱动信号称为  $T_v$ ,转化为角度和扭矩值为:

$$[0059] \quad \phi = \phi_v \times S_\phi \quad (2)$$

$$[0060] \quad T = T_v \times S_T \quad (3)$$

[0061] 式中  $\phi$  为加载轴的旋转角,可代表试样的扭转角; $S_{\phi}$  为角度灵敏度系数,通过对角度传感器标定获得; $T$  为扭矩; $S_T$  为扭矩灵敏度系数,通过对电磁驱动装置标定获得。

[0062] 根据材料力学知识,对于各向同性、线弹性材料、小变形时等直径圆轴试样的扭转,横截面边缘上各点的切应力最大,其值为:

$$[0063] \quad \tau_{\max} = \frac{T}{W_p} \quad (4)$$

[0064] 式中,  $W_p$  为抗扭截面系数。对于实心圆轴,

$$[0065] \quad W_p = \frac{\pi d^3}{16} \quad (5)$$

[0066] 式中  $d$  为圆轴试样的直径。由式 (4) 和 (5) 可得到切应力。

[0067] 在小变形范围内,切应变为

$$[0068] \quad \gamma = \frac{\phi d}{2l} \quad (6)$$

[0069] 式中  $l$  为试样夹持段内的长度,  $\phi$  由试验机测得。有式 (6) 可得到切以切应变。剪切模量  $G$  为:

$$[0070] \quad \tau = G \gamma \quad (7)$$

[0071] 容易理解,使用本发明提供的仪器也可以方便地从切应力一切应变曲线上找到切应力最大值即为被测试样的剪切强度。

[0072] 本发明提供的试验机和测试方法是针对微尺度试样的扭转力学性能测试而设计的。由于目前微电子机械系统 MEMS 的迅速发展,使得微尺度材料和结构的扭转力学性能测试成为一个迫切问题。本发明可以对 MEMS 扭转微镜等常用结构和材料进行扭转试验,将扭转试验方法引入到微尺度领域,提高了扭矩分辨力。并且该测量装置体积小、重量轻,自动化程度高,使用方便。



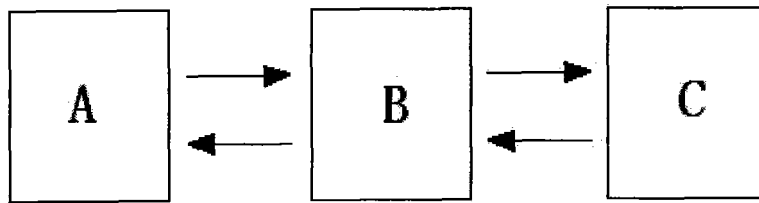


图 1

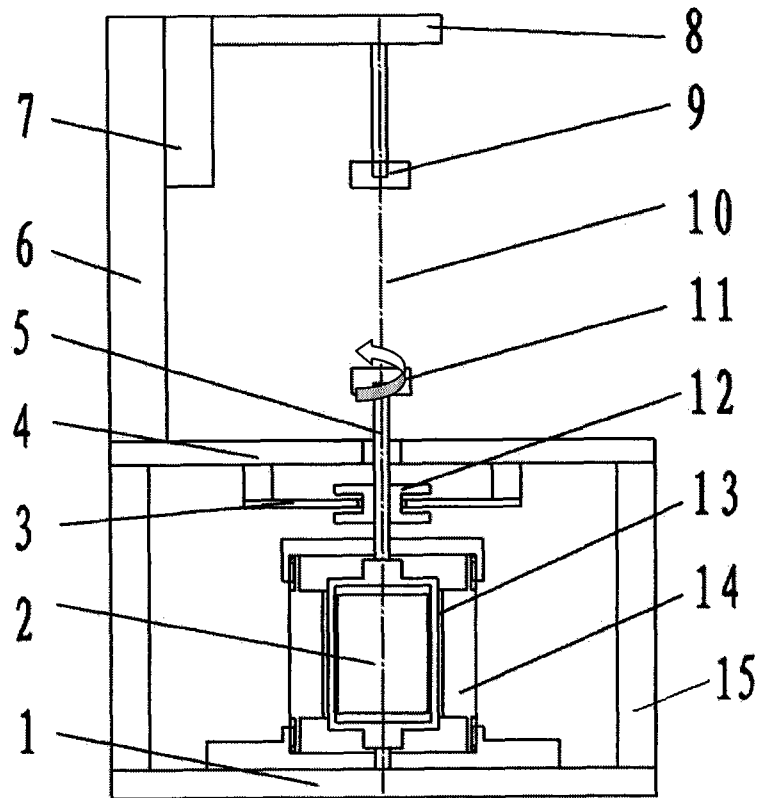


图 2

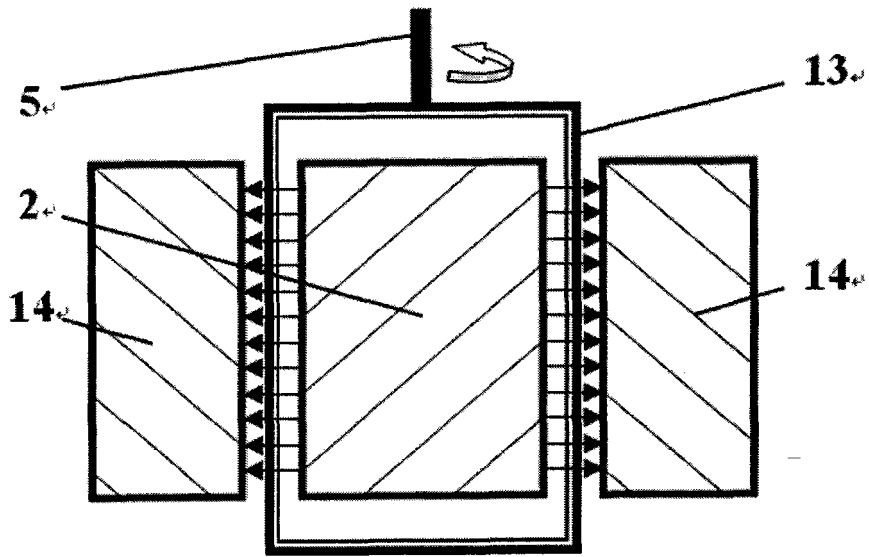


图 3

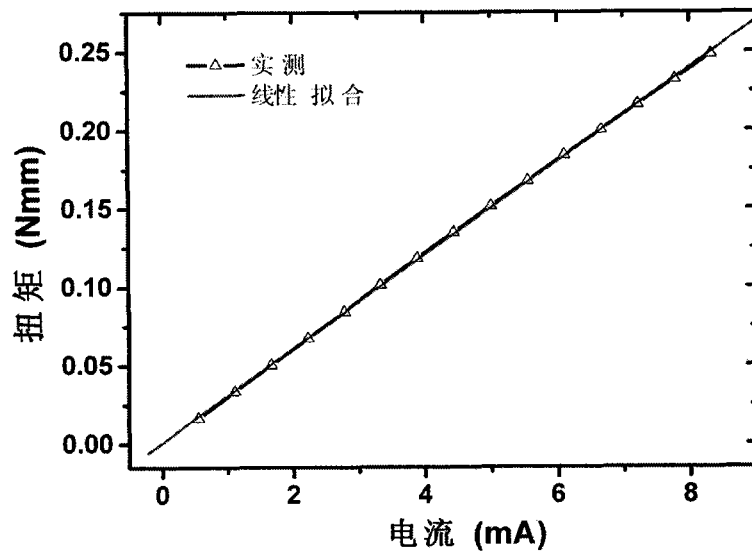


图 4

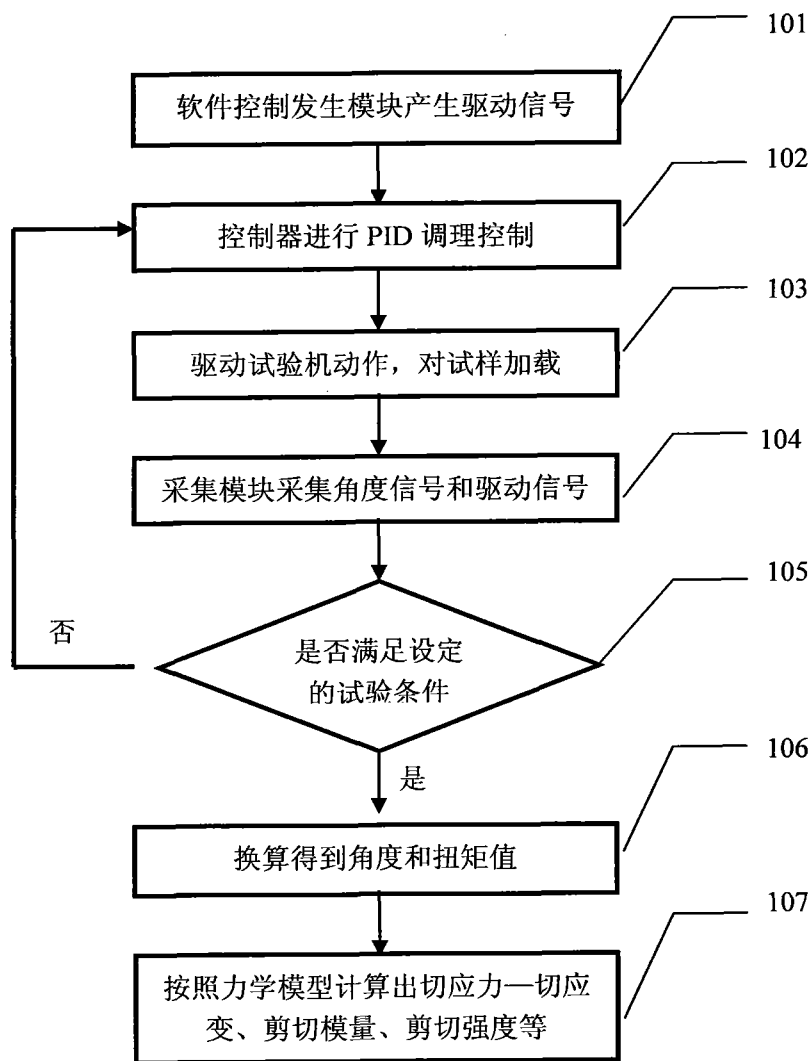


图 5