

doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.201704004

一种柔顺 5 杆机构的运动原理分析

陈西府,李 明,卢 倩,王正刚,黄传锦
(盐城工学院 机械优集学院,江苏 盐城 224002)

摘要:利用柔顺结构和压电叠层元件的优点,在分析常见柔顺机构的基础上,提出一种压电驱动的柔顺 5 杆机构。研究该机构各部件的位移输出特性,得到 5 杆机构顶端的椭圆运动轨迹方程;通过搭建振动位移测试系统,测得该 5 杆机构顶端的振动位移曲线,验证该柔顺 5 杆机构可用于精密位移致动器的设计。

关键词:柔顺机构;5 杆机构;运动原理;振动位移

中图分类号:TH112.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2017)04-0017-04

传统的刚性位移输出机构或者刚性位移传递机构,比如齿轮机构、刚性连杆机构等都由较多构件组成,结构复杂、体积庞大,且运动副构件之间存在经常性的相对运动,导致摩擦磨损、振动冲击等现象^[1-2],从而降低了刚性机构的运动精度,使其不适宜于高精度的场合。而柔顺机构不需要刚性运动副,能够消除传统机械系统存在的空程和摩擦,进而实现纳米级的位移输出,因而适用于精密仪器仪表、精密传动等精密机械系统^[3-4]。

常见于精密微位移输出的柔顺系统包括以下 3 类:一是柔顺杆结构,利用材料力学中的柔顺压杆原理实现,如图 1a 所示^[5];二是柔顺三角结构,利用三角形微位移输出的放大原理实现柔顺位移输出,如图 1b^[6]、图 1c^[7]所示;三是柔顺菱形结构,微位移输出原理类似于柔顺三角结构,如图 1d 所示^[8]。这 3 类柔顺机构都能够利用微观几何原理,把某一方向的位移转化为另一方向的位移,并保持位移输出转化的良好线性度和高精度。

叠层压电陶瓷是采用机械串联、电学并联的原理将多片压电陶瓷叠加制作而形成的,采取相邻压电陶瓷片极化方向相反的结构形式。因此叠层压电陶瓷相当于弹簧串联和电容并联,从而实现各压电陶瓷片的位移输出线性叠加^[9]。其位移输出精度可以达到纳米级,最终输出位移可以达到几

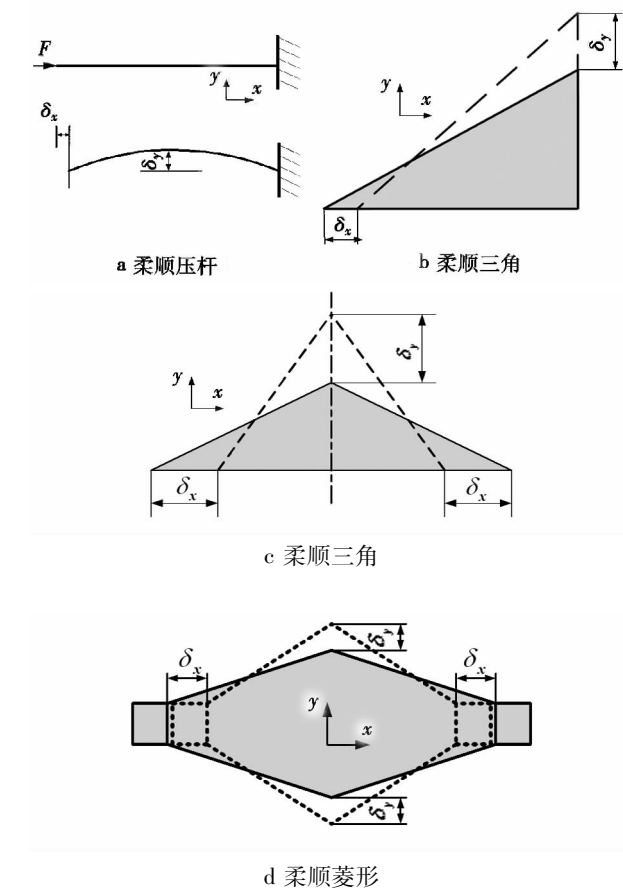


图 1 常见柔顺结构

Fig. 1 Common flexible structure

微米、甚至几十微米。

由于压电叠层的高位移输出特点和柔顺结构的高精度位移转化特性,许多学者把两者结合起来,用于高精度的多自由度定位平台、微细操控装置等高精度作动系统中。超声电机就是采用各种各样的柔顺机构,以提高设计精度、简化结构复杂性,并利用压电元件的逆压电效应,在弹性体上激发超声振动并在定子表面形成椭圆运动,利用摩擦力实现定子对动子的驱动。实现摩擦驱动的关键是形成定子表面或定子端部的椭圆运动。为此,我们利用压电叠层和柔顺结构的高精度位移输出,在柔顺机构端部形成摩擦驱动所需要的椭圆运动轨迹。与超声电机不同的是,该椭圆运动是在非共振状态下实现的,有利于降低柔顺结构的加工精度和装配要求,提高压电作动系统的运行稳定性。

1 柔顺 5 杆机构的椭圆运动原理

1.1 集中柔性杠杆的微位移原理

图 2 为柔顺 5 杆机构结构示意图。其中, EF 为 5 杆机构的机架, AE 和 BF 为连接机架的刚性杆件,在 E 、 F 处设计集中柔性铰链,这样 EA 和 BF 就可以绕 E 和 F 点做微幅转动; AC 和 BC 为柔顺杆件结构,当 A 、 B 处输入切向位移后,在 C 处将会产生切向位移和法向位移(定义切向为 x 方向,法向为 y 方向)。 δ_1 和 δ_2 分别为两叠层型压电陶瓷的两个正弦波形位移输入,且这两个正弦位移之间存在 $\pi/2$ 的相位差。

在 AE 和 BF 刚性杆件中,设 $k = AE/EG = BF/HF$,由于在 G 和 H 处的输入位移均为微米级的小变形,可以近似为线弹性变形,因此在 A 、 B 处的变形可以近似为沿切向的线弹性变形,变形位移方向分别与 G 和 H 处的输入位移方向相同。

设 G 和 H 处的位移输入分别为 $\delta_1 = A \sin \omega t$ 和 $\delta_2 = A \cos \omega t$,其中 A 为正弦位移输入的位移幅值(微米量级), ω 为正弦位移输入的角频率。则 A 和 B 处的微位移方程分别为:

$$\begin{aligned} x_A &= k A \sin \omega t \\ x_B &= k A \cos \omega t \end{aligned} \quad (1)$$

1.2 柔顺三角的微位移原理

柔顺三角变形位移示意图如图 3 所示^[10], ABC 变形后的位置为 $A'B'C'$ 。设变形前柔顺三角顶点 C 的坐标为 $(0,0)$,点 C 与点 C' 在切向和法向的距离分别为 Δx 和 Δy 。

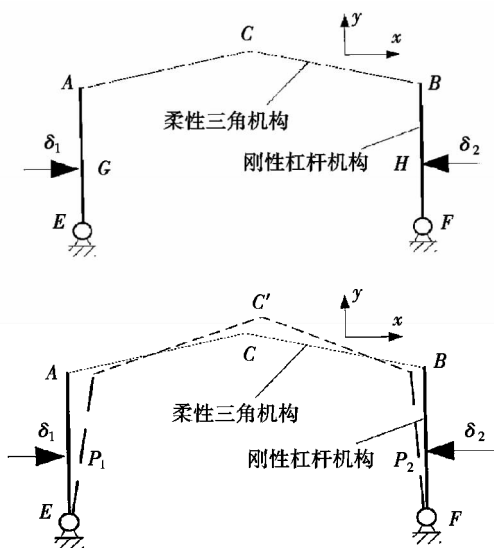


图 2 驱动足的机构运动原理

Fig. 2 Mechanism motion principle of driving foot

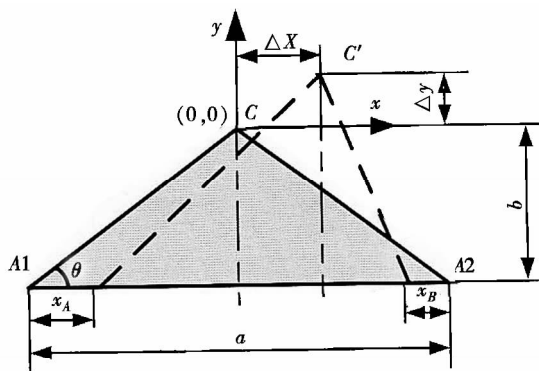


图 3 驱动足端部运动分析模型

Fig. 3 Motion analysis model of driving foot end

根据几何原理可知:

$$\Delta x = x_A - x_B \quad (2)$$

$$\Delta y = \frac{1}{\tan \theta} \times \frac{x_A + x_B}{2} = 2(x_A + x_B) \cot \theta \quad (3)$$

$$\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b^2 = \left(\frac{a - x_A - x_B}{2}\right)^2 + (b + \Delta y)^2 \quad (4)$$

由于 x_A 、 x_B 、 Δy 均为线弹性微变形,其几何量级为微米级,远小于整体结构的宏观尺寸,因此可近似认为 $\left(\frac{x_A + x_B}{2}\right)^2 = 0$, $(\Delta y)^2 = 0$ 。由式(4)知, Δy 与 $\cot \theta$ 成正比,随着 θ 增加, Δy 逐渐变小,因此改变 θ 的数值能够在 C 点获得法向上不同大小的位移输出。

1.3 柔顺 5 杆机构的微位移输出特性

由公式(4)可知,点 C 的运动轨迹方程为:

$$\begin{cases} x_C = k(X_A - X_B) \\ y_C = 2k \cdot (X_A + X_B) \cot \theta \end{cases} \quad (5)$$

得到输出端点 C 的椭圆运动轨迹方程为:

$$\frac{x_c^2}{2k^2A^2} + \frac{y_c^2}{8k^2A^2\cot^2\theta} = 1$$

(6)

结合柔顺 5 杆机构和输出端点 C 的椭圆运动轨迹方程,得到定子驱动足端部 C 在一个周期内的运动情况,如图 4 所示。

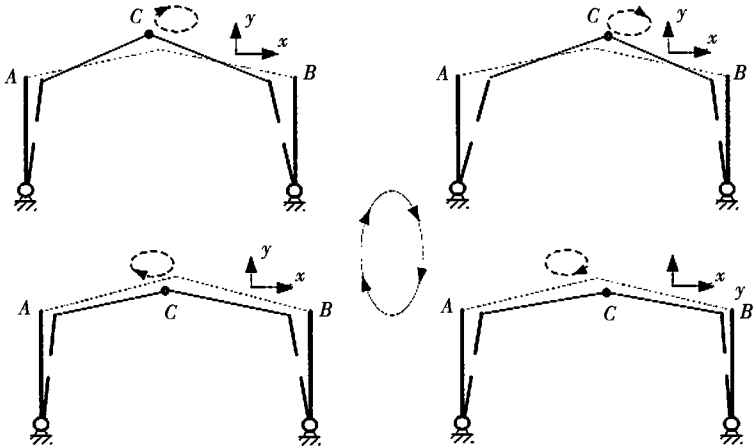


图 4 运动周期原理
Fig.4 Principle of motion cycle

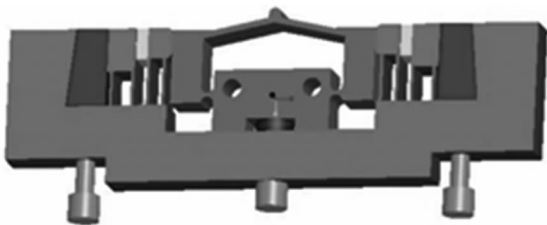
图 4 中,位于图形中间的竖直椭圆及 4 个箭头分别表示运动周期及 4 个不同工作状态,在竖直椭圆四周分布的 4 幅图分别代表 4 个工作状态下柔性 5 杆机构的原始状态和实时运动状态(实线和虚线分别代表原始状态和实时运动状态)。

2 压电柔顺 5 杆机构的设计

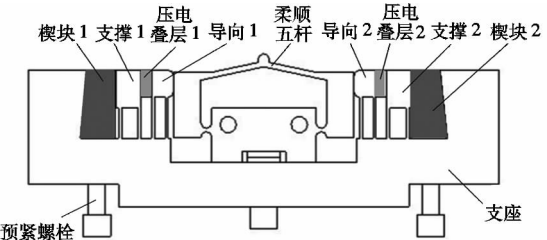
为了实现压电驱动的柔顺 5 杆机构,设计一个具有对称结构的柔顺五杆系统,如图 5 所示(其三维造型如图 5a,主视图如图 5b)。由图 5b 可知:柔顺 5 杆机构位于压电柔顺 5 杆系统的中央,并固定在支座上;其左右两侧对称布置压电叠层,以提供相位差 $\pi/2$ 的正弦位移输出;为保证压电叠层位移输出的对称性,设计了对称的导向机构,如图中的导向 1 和导向 2;最后将该柔顺 5 杆机构用楔块压紧,使之能够动态调整压电叠层的预紧力,控制压电叠层输出位移的有效性。

3 实验测试

为了测量柔顺 5 杆系统端部 C 点的运动轨迹,搭建了基于 LK - H020 的两个方向的位移测试系统,如图 6 所示。图 6 中激光头 1、激光头 2 分别测量柔顺 5 杆系统中点 C 切向与法向的位移输出,激光位移传感器的控制器实现激光头测量数值与计算机之间的数据传输和存储。激光位移传感器采样频率为 500 kHz,可以精确测量点 C 在两个方向的位移输出。



a 压电柔顺 5 杆系统的三维造型



b 压电柔顺 5 杆系统的主视图
图 5 压电柔顺 5 杆系统结构

Fig.5 The structure of piezoelectric flexible five bar system

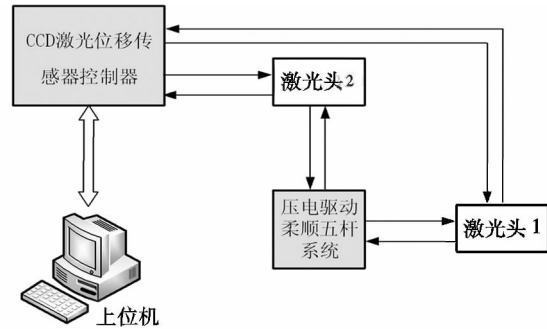


图 6 振动位移测试系统原理图

Fig.6 Schematic diagram of vibration displacement test system

当采用两个相位差 $\pi/2$ 的正弦激励信号激励图 5b 中的压电叠层 1 和压电叠层 2, 利用图 6 的振动位移测试系统, 测试 C 点在水平方向和竖直方向两个方向的振动位移曲线, 如图 7 所示。

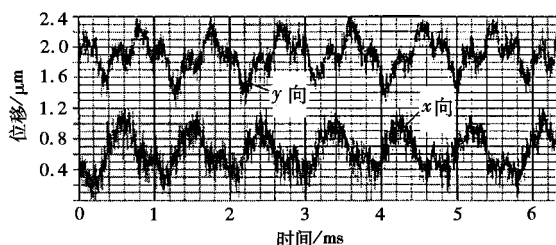


图 7 C 点的振动位移图谱

Fig. 7 The vibrational displacement spectral of point C

从图 7 可以看出, C 点的切向位移曲线和法向位移曲线为相位差 $\pi/2$ 的两近似正弦曲线。由

参考文献:

- [1] 于靖军, 周强, 毕树生, 等. 基于动力学性能的全柔性机构优化设计[J]. 机械工程学报, 2003, 39(8): 32-36.
- [2] 杨启志, 马履中, 尹小琴. 全柔性机构中柔性运动副的结构型式与应用[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2003, 24(4): 9-12.
- [3] 邱丽芳, 翁海珊, 柳林, 等. 不完全分布柔度的全柔性机构的研究[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(S2): 156-158.
- [4] 林雪松, 王淑荣, 李福田. 空间傅里叶变换红外光谱仪用全柔性机构的设计及研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 691-696.
- [5] 刘湘龙. 细长柔性压杆弹性失稳的后屈曲分析[J]. 科技风, 2013(21): 149-150.
- [6] 杜习波. 基于三角放大原理的压电型精密定位机构研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2009.
- [7] 徐晶晶. 基于位移放大结构的压电直线电机的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [8] 张春林, 张希农, 陈杰, 等. 菱形微位移压电作动器的输入输出线性建模[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(5): 102-106.
- [9] 张兆成. 新型压电尺蠖精密驱动器柔性机构分析与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [10] 杜习波, 陈西平, 张斌, 等. 基于三角原理的压电驱动微位移定位机构的设计与分析[J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(6): 10-12.

Study on the Motion Principle of a Compliant Five Bar Mechanism

CHEN Xifu, LI Ming, LU Qian, WANG Zhenggang, HUANG Chuanjin

(College of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224002, China)

Abstract: Based on the analysis of common compliant mechanisms, a compliant five bar mechanism driven by piezoelectric actuator is proposed by using the advantages of compliant structures and piezoelectric laminated elements. The displacement output characteristics of each part of the mechanism are studied, and the elliptic motion trajectory equation of the top end of the five bar mechanism is obtained. The vibration displacement curve of the top end of the five bar mechanism is measured by setting up the vibration displacement test system. It is proved that the compliant five bar mechanism can be used in the design of precise displacement actuator.

Keywords: Compliant mechanism; Five bar mechanism; Motion principle; Vibration displacement

(责任编辑: 李华云)

于激光位移传感器敏感度非常高, 容易受到外界干扰, 因此具体某一点的位移扰动较大, 但从整个振动曲线位移轨迹看, 切向位移曲线与法向位移曲线, 总体上近似谐波曲线, 且它们的相位差近似为 90° , 与前述的位移输出原理相吻合。

4 结论

柔顺结构的高精度位移输出特性, 能够将其与压电叠层系统结合起来, 实现精密位移驱动。通过对柔顺 5 杆机构的位移输出特性研究, 发现当采用两个相位差 $\pi/2$ 的正弦信号分别激励 2 个压电叠层时, 能够利用柔顺 5 杆机构把两压电叠层的位移输入转化为柔顺五杆机构顶端的椭圆运动。