**文章编号**: 1004-2474(2005)03-0316-04

# 压电型惯性冲击机构的驱动波形分析

陈西平<sup>1</sup>, 付 庄<sup>1</sup>, 曹其新<sup>1</sup>, 赵言正<sup>1</sup>, 杨志刚<sup>2</sup>, 程光明<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 机器人研究所, 上海 200030; 2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

摘 要: 压电型惯性冲击式机构是利用压电元件的急速变形来产生连续运动位移的机构。它在精密驱动与定 位领域有着重要应用。驱动电压波形是影响机构运动性能的重要因素。从运动学角度分析了驱动电压波形对运动 步距的影响,提出了一种优化的驱动电压波形,并进行了压电叠堆型惯性冲击式管内移动机构的驱动试验,结果表 明该优化波形比标准锯齿波形具有更好的驱动效果。

关键词: 压电驱动器; 惯性冲击机构; 运动分析; 驱动波形; 管内移动机构 中图分类号: TH 703.8 **文献标识码:** A

# Analysis on Drive Waveform of Piezoelectric Inertial Impact Mechanism

CHEN Xi-ping<sup>1</sup>, FU Zhuang<sup>1</sup>, CAO Qi-xin<sup>1</sup>, ZHAO Yan-zheng<sup>1</sup>, YANG Zhi-gang<sup>2</sup>, CHENG Guang-ming<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract Piezoelectric inertial impactmechanism, which exerts continuous movement by using rapid formation of piezo body, has an important application in precision displacement field. When the device is decided, drive waveform is a key factor influences the movement capability. In this paper the relation of movement steps and drive voltage waveform is analysis, and an optional waveform is proposed. The experiment of in-pipe locomotive mechanism of piezo stacks shows this waveform has better effect than the standard ones.

Key words: piezoelectric actuator; inertial in pact mechanism; kinematics analysis; drive waveform; locomotive mechanism in pipe

在经济与社会高度信息化的今天, IC 产业已成 为影响国家经济、政治和国防安全的战略支柱产业 之一。而在 IC 产业中, IC 装备有着极其重要的战略 地位,目前 IC 芯片的制作精度达到0.09 µm,并且还 在向更高的层次发展<sup>[1,2]</sup>。然而要达到纳米级定位精 度,单纯的机械方式已不能满足 IC 制造与封装的需 要,必须依靠新型的驱动与定位方式。利用压电元件 的急速变形带动惯性冲击体(通常由压电元件和惯 性块组成)产生惯性冲击力,通过克服机构本身的摩 擦力形成连续大范围的运动,这是一种新的探索。由 于它利用冲击作用形成运动,往往能产生更为精密 的驱动或定位<sup>[3,4]</sup>。因而可用于电子隧道显微镜。多 自由度驱动机构、微操作手、微机器人手臂等领 域<sup>[5~9]</sup>。 影响机构运动性能的主要因素包括压电元件性 能、机构各部分尺寸、接触表面摩擦状况和驱动电压 与驱动波形等。当机构的设计参数一定时,驱动电压 与波形成为影响机构运动性能特别是运动步长的主 要因素。对机构驱动波形进行分析和优化是提高机 构运动步长精度和效率的有效途径。本文从机构运 动学分析入手,通过对驱动波形与运动步长关系的 研究,寻找一种更利于机构运动的驱动电压波形。

## 1 压电型惯性冲击机构运动步长分析

惯性冲击式机构的结构如图1(a)所示。其中压 电元件C为关键部件,它要求能够产生较大的运动 变位和力,并具有足够的响应速度。通常可选择压电 叠堆或压电晶片作为机构的驱动元件。当对压电元

**收稿日期**: 2003-10-22 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50390060); 国家自然科学基金资助项目(50128504); 上海交通大学青年教师校内启动基金资助项 目

作者简介:陈西平(1971-),男,河南新乡人,博士后,主要从事机电控制、压电驱动与控制技术和精密机械的研究。

件施加如图1(b)所示的驱动电压时,机构产生运动 位移。为了分析机构的运动性能,有必要对机构的运 动过程进行更详尽的分析。



图1 压电型惯性冲击式机构

Fig. 1 Piezoelectric inertial impact mechanism

图2为一个周期内机构可能产生运动位移的3 个阶段:

(1) 压电元件急速变形阶段

惯性冲击体在压电元件的作用下,产生的冲击 力大于机构本身的静摩擦力,机构主体向左运动一 段距离。

(2) 主体动量释放阶段

当压电元件的变形达到某一值时, 元件不再伸 长, 但由于主体具有一定的动量, 这个动量克服动摩 擦力和机构本身内力继续移动一段距离。

(3) 移动终了冲击体动量释放阶段

一个运动周期的结束阶段, 主体不动, 压电元件 缓慢收缩, 当接近原始长度时突然停止, 其冲击体对 主体形成冲击作用, 使得主体可能向左运动一个较 小的值。



图 2 冲击式机构运动阶段分析 Fig. 2 Movement phase of inpact drive mechanism

3 个运动阶段, 第一阶段是运动的基础, 只有压 电元件急速变形引起的惯性冲击力大于摩擦力时, 机构才能产生运动; 第二阶段是第一阶段运动的延 伸, 第一阶段产生的运动动能须得到释放, 能量的释 放将会导致运动位移的产生; 第三阶段是运动的一 个附加, 当压电元件由缓慢变形到突然停止时, 惯性 冲击体对主体产生的冲量可能使得机构产生运动。 在一个周期内, 机构产生的运动位移实际上是这三 部分的累加。在精密机构中,可调整驱动电压的波 形,使得第三阶段压电元件停止变形时,惯性冲击体 所具有的动量最小,即控制驱动电压波形使得第三 部分的运动位移为零,这时机构的运动位移就由前 两个阶段产生,分析机构运动步长可只对前两个阶 段进行。

由于机构运动过程中始终存在电能通过压电元 件转化为机械能,同时伴随着其他形式的能量转换, 如热能、声能和压电能等的存在。因此,不能使用动 能守恒来求解机构的运动步长。以下从受力分析和 运动分析的角度进行求解。

为进行机构的运动学分析, 可做以下假定:

 (1) 压电元件匀质且压电变形迅速且沿长度方 向均匀;

(2) 主体A 和惯性块B 为刚体;

(3) 机构的各部分之间严格遵循连续性条件, 不存在间断点。

1.1 急速变形阶段的运动位移

图 3 为惯性冲击式机构在压电元件急速运动时 水平方向的各部分受力图。

#### 图 3 冲击式机构各部件的受力分析

Fig. 3 Force analysis of the parts of inpact drive mechanism

假定向左的方向为机构力与运动的正方向,x、 v、a 分别表示机构各部分运动的位移、速度和加速 度。

当 $F_1$  f 时,有

$$u(m_{\rm A} + m_{\rm B} + m_{\rm C})g$$
-  $(m_{\rm C}ac + m_{\rm B}a_{\rm B}) = m_{\rm A}a_{\rm A}$  (1)

图 4 显示了机构的运动学关系, 由连续性条件 可得

$$a_{\rm B} = a_{\rm A} + \frac{{\rm d}^2 \Lambda L}{{\rm d} t^2}$$
(2)

$$ac = a_{\rm A} + \frac{1}{2} \frac{{\rm d}^2 \Lambda L}{{\rm d}t^2}$$
(3)

代入式(1),得

$$a_{\rm A} = \mu_g - \frac{(m_{\rm B} + \frac{m_{\rm C}}{2})\frac{d^2 \Lambda L}{dt^2}}{(m_{\rm A} + m_{\rm B} + m_{\rm C})}$$
(4)

由式(4)知<sub>a</sub> < 0,与假定的加速度方向相反,这 说明运动位移方向与假定方向相反。为计算方便,下 面对主体A 的运动位移大小进行求解。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



#### 图4 冲击式机构的运动分析

Fig. 4 Movement analysis of inpact drive mechanism

假定以主体开始运动时刻为*T*<sub>0</sub>, 压电元件伸长 量 ΔL<sub>0</sub>> 0; 以压电元件运动至最大位移时刻为*T*<sub>1</sub>, 压电元件的伸长量 ΔL<sub>1</sub>; 在*T*<sub>0</sub> 至*T*<sub>1</sub> 时间段二次积 分, 得

$$x_{1} = \frac{T_{1}}{T_{0}} \frac{(m_{B} + \frac{m_{C}}{2})}{(m_{A} + m_{B} + m_{C})} \frac{d\Delta L}{dt} \Big|_{T_{0}}^{T_{1}} - \mu g (T_{1} - T_{0}) dt = \frac{(m_{B} + \frac{m_{C}}{2})}{(m_{A} + m_{B} + m_{C})} (\Delta L_{1} - \Delta L_{0}) - \frac{\mu g (T_{1} - T_{0})^{2}}{2} (5)$$

从式(5)可看出,主体的运动步长与主体开始运动时压电元件的伸长量 ΔL 。压电元件的最大伸长量 ΔL 」以及主体的运动时间 T<sub>1</sub>-T<sub>0</sub>都有关系。为提高机构的运动步长,驱动波形应尽量使压电元件的初始运动伸长量和运动时间减少,而增加压电元件的最大伸长量。

#### 1.2 急速变形终了阶段的运动位移

对于机构运动第二阶段的位移分析,它的运动 学条件与前一阶段相同,不同的只是受力条件。图5 为其受力分析。它与第一阶段的不同在于压电元件 的作用力F1也为阻碍主体运动的力。



图 5 运动第二阶段机构受力分析

Fig. 5 Force analysis of the 2 phase of movement

下面分析主体A 在这一阶段的水平方向运动和 受力。设起始时主体A 具有速度为v<sub>A</sub>,其运动距离为 x<sub>2</sub>,由动能定理得

 $(f + F_{1}) x_{2} = 12m_{A}v_{A}^{2}, F_{1} = m_{C}a_{C} + m_{B}a_{B}$ (6) **求解得** 

#### $x_{2} = m_{\rm A} v_{\rm A}^{2} \{ 2 [\mu (m_{\rm A} + m_{\rm B} + m_{\rm C}) g +$

 $(m_{\rm C}+m_{\rm B}) a_{\rm A} + \frac{{\rm d}^2 \Lambda L}{{\rm d}t^2} (\frac{1}{2}m_{\rm C}+m_{\rm B}) ]\}^{-1}$  (7)

由式(7)可知,当机构确定时,这一阶段的位移 仅与主体A 的运动加速度和压电元件的运动变位的 2 阶导数有关,而压电元件的变形的二阶导数是由 驱动电压的驱动波形决定的。故改变机构的驱动电 压波形可提高机构的运动性能。

# 2 压电型惯性冲击机构的优化波形

在惯性冲击式机构的驱动中,一般使用锯齿波 形。若压电元件产生的惯性力大于机构本身的摩擦 力时,机构就可形成运动位移;在后面的阶段中使 得压电元件缓慢变形,若所产生的惯性力小于机构 的摩擦力,机构总体保持静止状态。这种波形虽也能 产生一定的驱动效果,但从提高机构的效率角度,还 是希望能找到更优的驱动波形。

综上所述可知, 在机构运动的第二阶段, 压电元 件的伸长量的2阶导数与这一阶段位移大小有关。 为提高运动步长, 可考虑通过驱动电压的改变来控 制压电元件的伸长量, 使其产生负值, 这样可减少压 电元件变形对机构性能的影响, 获得最佳的运动性 能。图6为机构驱动的优化波形。如图所示, 它采用 匀加速度下降的波形, 这时机构获得的加速度为负 值, 机构能产生更大的运动冲量, 也就具有更大的运 动步长。这种优化波形在一个周期内的数学表达式 为



#### 图6 冲击式机构的优化波形



### 3 试验研究

以上分析了压电型惯性冲击式机构的运动过 程,并根据分析的结论提出了一种优化波形。为验证 优化波形的驱动效果,进行如下试验。选择宽度为22 mm 的玻璃材料的矩形管道作为管内移动机构设计 的标准管道。图7为设计的管内移动机构的结构示 意图。机构的整体尺寸为40mm×22mm×6mm。 主要由主体、压电元件(压电叠堆)和惯性块三部分 组成。在一个矩形的框架外侧固接四个支撑腿组成。 调整支撑腿与管道的夹角获得合适的摩擦力,从而 获得机构的最佳性能。



图7 冲击式管内移动机构结构图

Fig. 7 Configuration of impact drive mechanism in-pipe

图8 是在频率为600 Hz 时的驱动电压与运动步 长关系曲线图。比较图8 (a)、(b)得,不论是正向运动 还是反向运动,优化波形的驱动效果要明显优于标 准波形。当电压为100 V 优化波形时,机构的正向运 动为4 μm /步;反向运动为2.23 μm /步。而标准驱动 波形的运动步长只有2.1 μm /步和1.69 μm /步。这 也证明优化波形的存在和这种优化波形用于叠堆型 惯性冲击式机构的驱动时可获得更好的驱动效果。



Fig. 8 Relationship of drive Voltage-displacement of inpact drive mechanism

4 结论

2

对影响惯性冲击式驱动机构运动性能的因素进

行了分析,得出驱动波形对改善机构性能特别是提 高运动步长有着重要作用,并由此提出了一种优化 的驱动电压波形。针对叠堆型管内移动机构进行的 试验研究结果表明,该波形比标准的电压波形具有 更好的驱动效果。

a. 驱动电压波形对机构的运动步长有着重要 影响, 其中压电元件急速变形阶段和压电元件急速 变形终了阶段对机构运动步长有重要影响。

b. 在压电元件快速变形阶段, 应使得压电叠堆 在较短的时间内获得足够的运动速度; 而在压电元 件的动量释放阶段, 应使得惯性冲击体对主质量块 产生的阻力最小。

需指出的是,本文研究的惯性冲击式机构是在 假定压电元件线性变形和压电元件具有足够响应速 度前提下进行的,实际上,由于压电元件的非线性因 素的存在和各种压电元件的响应速度不同,机构驱 动的更优化波形还有待于进一步的探索。

#### 参考文献:

- [1] 汪劲松,朱 煜. 我国"十五"期间 Ⅳ 制造装备的发展 战略研究[J]. 机器人技术与应用, 2002, (2): 5-9.
- [2] 孙立宁,杨 永,曲东升.压电陶瓷微位移驱动器在 ℃ 封装设备中的应用研究[J].自动化技术与应用, 2002, 21(5):56-58.
- [3] 刘 华,颜国正,丁国清.惯性式压电陶瓷驱动器的研究[J].压电与声光,2001,23(4):275-278.
- [4] 程光明,杨志刚,曾 平,等.压电式移动机构研究 [J] 压电与声光,2003,25(2):275-278.
- [5] 章海军,黄文浩,林 松.与光学显微镜结合的原子力显微镜及其冲击式微位移机构[J].仪器仪表学报, 1996,17(1):364-367.
- [6] KAWA KA TSU H, H IGU CH I T.A dual tunneling-unit scanning tunneling microscope [J]. J Vac Sci Technol, 1990, A 8(1): 319-324.
- [7] KAWA KA TSU H, KOU GAM I H. Step height measurements using a scanning tunneling microscope equipped with a crystal line lattice reference and interferometer [J]. J V ac Sci Technol, 1996, B14 (1): 11-18.
- [8] ZHANGH, HIGUCHIH, NISHDKIN. Dual tunneling unit scanning tunneling microscope for length measurement base d on crystalline lattice [J]. J V ac Sci Technol, 1997, 15(1): 174-178.
- [9] 陈西平. 压电型惯性冲击式运动机构驱动理论和试验 研究[D]. 长春: 吉林大学, 2003.