

文章编号 1004-924X(2009)02-0350-06

# 旋转型压电惯性冲击马达的工作特性

姜楠,刘俊标

(中国科学院 电工研究所,北京 100190)

**摘要:**为了研究惯性冲击机构中的旋转运动,设计了一台可调节预压力的旋转型压电惯性冲击马达。分析了该马达的运动原理及过程,研究了驱动信号、结构参数、压电元件等对马达运动特性的影响及规律。实验结果表明,该马达的转动速度与驱动信号的频率、电压成正比,与主体和配重的比值( $M/m$ )成反比,转动速度随压电元件充放电时间增加而减小。研究还显示,旋转型惯性冲击马达的机械特性和正反转特性不同于电磁马达,该马达的转动速度-转矩特性为一折线,马达的正向转动速度始终大于反向速度。当驱动信号频率为 1 100 Hz、电压为 50 V、充电时间为 70  $\mu$ s、 $M/m = 8.9$  时,该马达的转动速度为 1.75  $\text{r/s}$ ,最大转矩为 0.13 N·m。结果表明,旋转型惯性冲击马达是一个多变量系统,其运动性能受多种因素的控制。

**关键词:**惯性冲击马达;压电马达;旋转运动;工作特性

中图分类号:TM35;TN384 文献标识码:A

## Operating characteristic of rotary piezo impact drive mechanism

JIANG Nan, LIU Jun-biao

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** A rotary piezo motor with adjustable preload function is designed to study the rotational motion of an Impact Drive Mechanism (IDM). The motion principles of this Rotary Impact Drive Mechanism (RIDM) are investigated, the influencing factors of driving signal, structural parameters as well as piezoelectric element on motion characteristics of the mechanism are analyzed. The research results reveal that the rotational velocity of this motor is in proportion to the frequency or the voltage of driving signal, and in inverse proportion to  $M/m$  (the ratio of the main body and the weight). The velocity decreases as the charge time increasing of piezo element. Furthermore, the results also show that the torque-speed property and forward-backward rotation of rotary motor are both different from that of traditional motor. The torque-speed curve of the rotary motor is a fold line, and the forward rotational velocity is larger than the backward rotation velocity all the time. When the frequency, voltage and the charge time are 1100 Hz, 50 V and 70  $\mu$ s, respectively, and  $M/m$  is equal to 8.9, rotational velocity is about 1.75  $\text{r/s}$  and the maximum torque is 0.13 N·m. These results reported here show that the rotary impact drive mechanism is a multivariable system, whose performance is decided by many factors.

**Key words:** impact drive mechanism; piezo motor; rotation motion; operating characteristic

收稿日期:2008-04-28;修订日期:2008-06-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50607018)

### 1 引 言

惯性冲击马达是一种利用压电元件突然变形产生的驱动力来克服摩擦力,从而实现负载位移的运动机构。该马达一般包括 3 个部分:主体、压电元件和配重。主要依赖压电元件产生运动,因此属于一种压电马达(Piezo Motor),在精密定位和微纳操纵领域的应用前景广阔,优势明显,已在扫描探针显微镜、微操作臂、微机器人、精密工件台等领域获得应用<sup>[1-4]</sup>。

目前研究惯性冲击马达的大量文献资料,无论基础研究还是实验测试,主要集中在直线型结构,包括建模、仿真、应用和非线性研究等方面<sup>[5-8]</sup>。关于旋转型结构马达的研究相对不足,文献涉及很少<sup>[9-12]</sup>,不够系统和全面。实际上,作为一种主要的运动形式,旋转运动在精密机构和仪器中的存在非常普遍,比如多自由度工件台、光路调节装置、精密加工机床、机器人关节等<sup>[13-17]</sup>。尽管旋转型惯性冲击马达的致动原理与直线型结构非常相似,但由于测量方法和设计理论的不同,其运动特性与直线机构存在着很大差异。为了给旋转型结构的设计提供理论基础和参考依据,本文设计了一台旋转型惯性冲击马达,并对其运动特性做了详细分析。

### 2 工作原理与实验装置

旋转型惯性冲击马达(RIDM)的运动原理与直线型结构基本类似,图 1~图 3 分别为其原理结构、驱动信号及简化运动模型。该马达由主体、配重、压电元件及驱动臂组成。在图示锯齿电压的驱动下,压电元件首先缓慢伸长,继而突然缩短,于是圆盘(主体)在压电元件产生的惯性冲击力作用下,产生逆时针方向的位移,如果施加反方向的驱动信号,圆盘将作顺时针转动。压电器件为一压电堆叠元件,该元件由多个薄片陶瓷粘接而成,电路上并联,机械上串联。

假定经过一个周期的锯齿信号驱动,驱动臂顶端质点由 A 到达 B,如图 3 所示,其位移为 AB ( $x$ ),但其运动轨迹却是弧线,假定弧长为  $l$ ,则  $l$

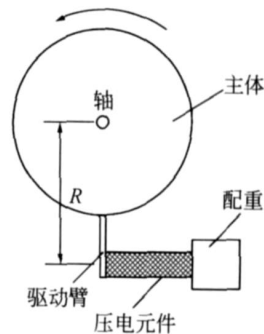


图 1 旋转型 IDM 的结构  
Fig. 1 Structure of rotary IDM

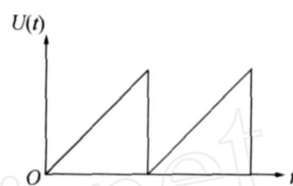


图 2 驱动信号  
Fig. 2 Driving signal

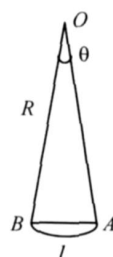


图 3 简化运动模型  
Fig. 3 Simplified model

$= \frac{l}{R}$ 。由于位移  $x$ (约几个微米)远远小于半径  $R$ (约十几个厘米),因此可认为  $l = x$ ,于是可得每个周期的角位移:

$$= \frac{x}{R}, \tag{1}$$

如果驱动频率为  $f$ ,则可得角速度:

$$= \frac{x}{R} \cdot f, \tag{2}$$

根据<sup>[13-14]</sup>的分析,旋转运动中压电元件受到锯齿信号的激励后产生的形变与直线型机构相同,其最大值为:

$$x_{\max} = \frac{2m}{M+m} \cdot L. \tag{3}$$

因此当旋转型 IDM 条件设置合适,可获得最大角

速度：

$$\omega_{\max} = \frac{2m}{M+m} \frac{L}{R} \cdot f, \quad (4)$$

式中  $M$  为圆盘质量,  $m$  为配重质量,  $L$  为压电元件的形变量,  $L = d_{33} \cdot U$ ,  $d_{33}$  为压电常数,  $U$  为驱动电压幅值。

根据以上分析,设计 RIDM 如图 4 所示。该装置根据图 1 设计而成,不同的是可以施加适当的预压力以获得最大运动速度。该预压力调节机构安装于主体部分上方,由弹簧、螺母和轴承 3 个元件组成。其中调节螺母上下位置使得弹簧伸缩施加预压力,轴承位于弹簧的下方,既可将轴向预压力平均分布至圆盘中心位置,又可减少弹簧对圆盘运动的摩擦,降低振动对圆盘运动的影响。

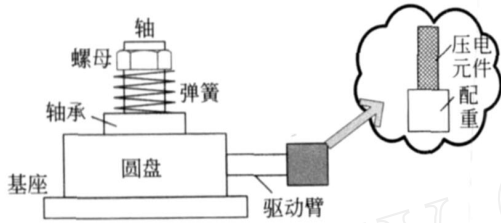


图 4 旋转型惯性冲击马达的结构示意图

Fig. 4 Mechanical structure of rotary IDM

经测量,系统摩擦力约为  $0.0086 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,驱动臂顶端距离轴心的距离  $R$  为  $36 \text{ mm}$ ,压电元件采用晶丰电子生产的 PT200/8 × 8/20,压电常数为  $92800 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ ,尺寸为  $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,圆盘直径为  $48 \text{ mm}$ ,重  $0.069 \text{ kg}$ ,配重尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,重  $0.00776 \text{ kg}$ 。主体、驱动臂、压电元件和配重等各部件之间均以 704 粘合剂粘接而成,在室温下即可固化。采用自行设计的光电角速度检测器测量 RIDM 的转动速度。图 5 为实验装置的照片。

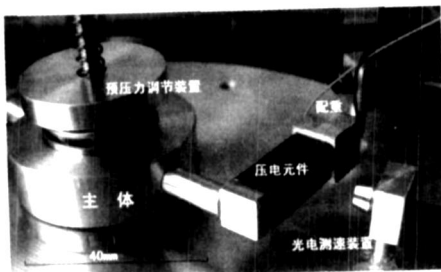


图 5 旋转型 IDM 的实物照片

Fig. 5 Photograph of RIDM

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 角速度与驱动频率之间的关系

图 6 为该 RIDM 在驱动电压为固定值  $50 \text{ V}$  条件下得到的角速度-频率曲线,通过对比可以发现当频率低于  $1000 \text{ Hz}$  时,实验测量得到的数值与理论计算值基本上保持一致,曲线呈直线上升趋势,角速度与驱动频率呈正比例关系。当频率  $> 1000 \text{ Hz}$  后,角速度逐渐大于理论值,至  $1200 \text{ Hz}$  又突然降低,这是由振动所导致。图中理论值由式(4)计算得到。

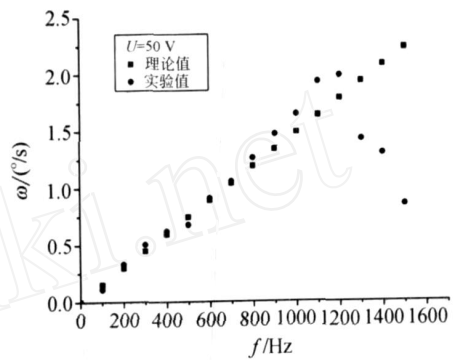


图 6 角速度-驱动频率曲线

Fig. 6 Curve of rotational velocity and driving frequency

#### 3.2 角速度与驱动电压之间的关系

图 7 为 RIDM 的角速度-驱动电压曲线,如图中所示,理论值和实验值均是在驱动频率为  $1100 \text{ Hz}$  的情况下得到的。在该图中,实验测量结果和理论计算结果基本上保持吻合,当电压达到  $60 \text{ V}$  时,角速度约为  $2.9 \text{ s}$ 。

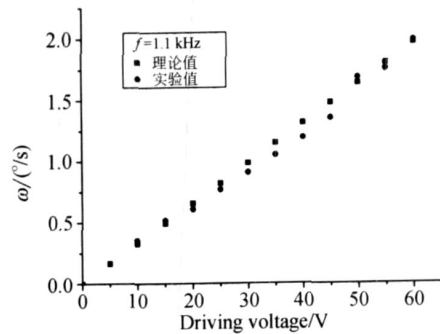


图 7 角速度-驱动电压曲线

Fig. 7 Curve of rotational velocity and driving voltage

### 3.3 角速度与充放电时间之间的关系

压电堆叠元件在电路中可等效为一个电容,因此其充放电不是突然完成的,而是存在一个过渡过程。理论上讲,充放电时间越短,越有利于 IDM 的运动,但实际上当压电堆叠元件及电源确定后,其最小充放电时间也已基本确定。正如图 8 中所示,最小时间约为 70 μs,该实验结果是在电压为 50 V、频率为 1 100 Hz 条件下取得的。当时间 < 200 μs 时,实验结果与理论值基本一致,同时也可看到充放电时间对角速度的影响不大;但当时间 > 200 μs 后,角速度下降较快。这一现象可解释如下:该实验是在频率为 1 100 Hz 情况下取得的,此时信号周期约为 900 μs,当充电时间为 200 μs 时,对压电陶瓷而言,其突然伸长时间与缓慢下降时间之比为 1 : 3.5,尚可产生性能较佳的惯性冲击运动;而当时间增大为 300 μs 时,时间比为 1 : 2,冲击作用已非常微弱,当然随着时间之比接近 1 : 1,运动效果将变得更差。

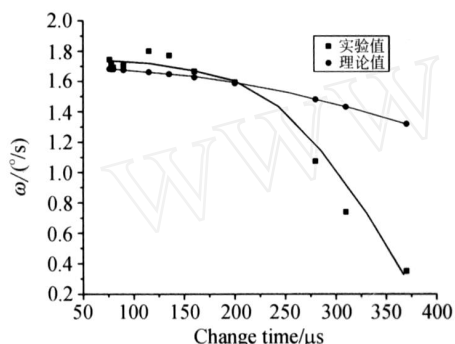


图 8 角速度与充放电时间之间的关系

Fig. 8 Curves of rotational velocity and charge time

### 3.4 角速度与转矩之间的关系

转矩是各种转动工作机械的基本载荷形式,是表征动力机械工作能力的重要指标。对电磁电机而言,其机械特性曲线(即转矩-转速曲线)是一条斜率小于零的直线,曲线与纵轴的交点为最大转矩(速度为零),与横轴的交点为最大速度(转矩为零,也称空载)。

对 IDM 来说,其转矩-速度曲线是一条折线,如图 9 所示。这是由于 IDM 在克服负载产生运动的同时,也需要克服自身重量造成的阻碍作用。当电机本身质量固定,改变负载时,便可得到图中的 *ab* 段直线,这与传统电机的机械特性一致的;而当电机处于空载状态,改变主体和配重之间的

质量配比,便可得到图中的 *bc* 段,可见主体与配重的质量比对角速度的影响较大。该实验是在驱动信号电压为 50 V、频率为 1 100 Hz 条件下测到的,该马达的最大转矩可达 0.13 N · m。

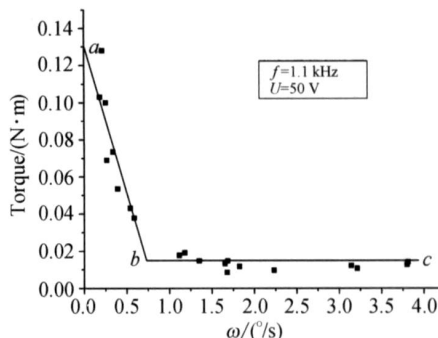


图 9 转矩-角速度曲线

Fig. 9 Curve of rotational velocity and torque

### 3.5 角速度与 M/m 之间的关系

正如 3.4 中所指出的,主体 (*M*) 与配重 (*m*) 之间的质量比对 IDM 的运动速度影响较大。关于角速度与 *M/m* 之间的关系,根据式 (4) 可得到下式:

$$\omega = \frac{2}{M + 1} \frac{L}{R} \cdot f \quad (5)$$

由上式可见,角速度是质量比 *M/m* 的反函数。图 10 中的圆点为电压 50 V、频率 1 100 Hz 情况下改变 *M/m* 的数值测量得到的速度,这一实验结果与根据式 (5) 计算得到的结果基本上保持一致。从图中可发现,随着 *M/m* 的增大,角速度呈下降趋势,从另一角度看,这是由于负载增加所致;随着 *M/m* 的减小,角速度逐渐增大,但当 *M/m* 接近 1 时,速度反而减小。其中当 *M* = 0.069 kg、*m* = 0.007 76 kg 时,角速度约为 1.75 °/s。

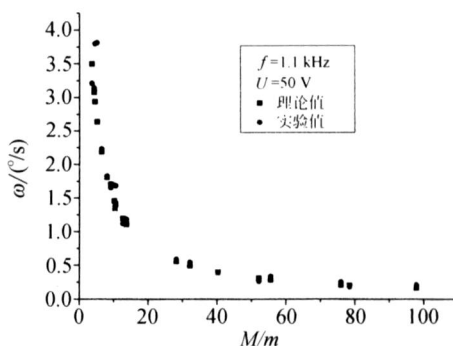


图 10 角速度与 M/m 之间的关系

Fig. 10 Curve of rotational velocity and M/m

### 3.6 旋转型 IDM 正反转之间的区别

图 11 为 RIDM 的正反转速度曲线,显然反向曲线低于正向曲线。这是由于驱动信号不同,导致压电堆叠元件在 RIDM 顺时针旋转(正向)时受到急速的压缩力,而逆时针时受到急速的拉伸力,拉伸对于堆叠元件来说是敏感且具破坏性的,因此相同频率、幅度情况下反向速度一般低于正向速度。该实验同样是在电压 50 V、频率 1 100 Hz 条件下进行的,不同的是  $M$ 、 $m$  分别为 0.087 58 kg 和 0.013 63 kg。

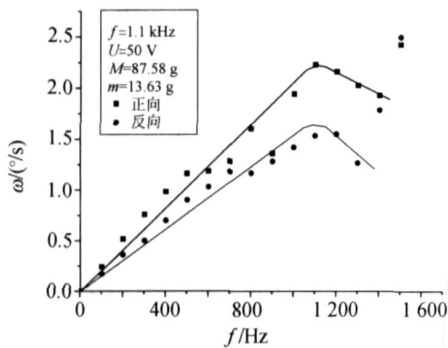


图 11 马达正反转之间的区别

Fig. 11 Curves of positive and reverse rotations

### 参考文献:

- [1] ZHANG H, HIGUCHI T, NISHIOKI N. Dual tunneling-unit scanning tunneling microscope for length measurement based on crystalline lattice [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1997, 15 (1): 174-177.
- [2] KUDOH K, GOTOH T, SAITO K, et al.. Development of piezo micromanipulator for cell micromanipulation [J]. *Journal of Mammalian Ova Research*, 1990, 7(1): 7-12. (in Japanese)
- [3] <http://www.nanotechnik.com/index.html>[OL].
- [4] 刘建芳,杨树臣,杨志刚,等. 新型压电精密步进旋转驱动器研究[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(4): 594-601.  
LIU J F, YANG SH CH, YANG ZH G, et al.. Study on precision PZT rotary step actuator with inner anchor/loosen [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 594-601. (in Chinese)
- [5] HIGUCHI T, WATANABE M, KUDOH K. Pre-

## 4 结 论

本文研究了 RIDM 的工作原理,推导了角速度的表达式,对马达的运动性能进行了测试。分别研究了该马达的角速度与驱动频率、电压、充放电时间、转矩、 $M/m$  之间的关系,以及正反转之间的区别,并对相关的实验现象进行了分析和解释。

研究结果表明:RIDM 的角速度与驱动信号的频率、电压成正比关系,与  $M/m$  (主体和配重的质量之比) 成反比,随充放电时间的增加而降低,该马达的速度-转矩特性为一折线,正向旋转速度大于反向速度。当驱动信号频率为 1 100 Hz、电压为 50 V、充电时间为 70  $\mu$ s、 $M/m = 8.9$  时,该马达的转动速度为 1.75  $^\circ$ /s,最大转矩为 0.13 N·m。因此,旋转型惯性冲击马达是一个多变量系统,其运动性能受到多种因素的影响,在设计时需综合考虑各种因素,以达到马达性能的最优化。

- cise positioner utilizing rapid deformations of a piezo electric element [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1988, 54(11): 2107-2112. (in Japanese)
- [6] POZZI M, KING T. Piezoelectric modelling for an impact actuator [J]. *Mechatronics*, 2003, 13(6): 553-570.
- [7] HA J L, FUNG R F, YANG C S. Hysteresis identification and dynamic responses of the impact drive mechanism [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 283 (3-5): 943-956.
- [8] 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.  
CHEN X P. *Research on Drive Theory and Experiments Piezoelectric Inertial Impact Movement Mechanism* [D]. Changchun: Jilin University, 2003. (in Chinese)
- [9] 张宏壮,曾平,华顺明,等. 压电双晶片型惯性冲击式旋转精密驱动器研究[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13(3): 298-304.  
ZHANG H ZH, ZENG P, HUA SH M, et al..

- Impact drive rotary precision actuator by piezoelectric bimorphs [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (3): 298-304. (in Chinese)
- [10] MORITA T, YOSHIDA R, OKAMOTO Y, *et al.*. Three DOF parallel link mechanism utilizing smooth impact drive mechanism [J]. *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2002, 26(3): 289-295.
- [11] FURUTANI K, MOHRI N, HIGUCHI T. Self-running type electrical discharge machine by using impact drive mechanism [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1997, 63 (9): 1290-1294.
- [12] HIGUCHI T, YAMAGATA Y. Micro robot arm utilizing rapid deformation of piezoelectric elements [J]. *Advanced Robotics of Robotics Society of Japan*, 1992, (63): 353-360.
- [13] 赵宏伟, 吴博达, 杨志刚, 等. 尺蠖型压电旋转驱动器钳位特性分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2007 (9): 1022-1025.
- ZHAO H W, WU B D, YANG ZH G, *et al.*. Clamping performance for inchworm-type piezoelectric rotary actuator [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007 (9): 1022-1025. (in Chinese)
- [14] <http://www.pi-china.cn/products/ArticleShow.asp?ArticleID=149> [OL].
- [15] [http://www.intellect.pe.u-tokyo.ac.jp/research/pidm/pidm\\_e.html](http://www.intellect.pe.u-tokyo.ac.jp/research/pidm/pidm_e.html) [OL].
- [16] JIANG N, LIU J B, TAO T, *et al.*. Motion characteristics of a rotary piezo impact drive mechanism [J]. *SPIE*, 2007, 6423: 642324. 1-642324. 8.
- [17] 姜楠, 刘俊标, 方光荣, 等. 惯性冲击式压电微电机的研究 [J]. *压电与声光*, 2007, 29(2): 187-189.
- JIANG N, LIU J B, FANG G R, *et al.*. Research on impact drive mechanism piezoelectric micro-motor [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2007, 29 (2): 187-189. (in Chinese)

#### 作者简介:



姜楠(1980-),男,山东滕州人,工学博士,助理研究员,主要从事压电微电机、压电微能源、精密驱动与定位等技术的研究。E-mail: jnan@mail.iee.ac.cn

刘俊标(1974-),男,福建莆田人,工学博士,副研究员,主要从事精密机械、微纳加工与测量等技术的研究。E-mail: liujb@mail.iee.ac.cn