

跳跃式移动机构的移动机理及实验研究

卢永奎¹, 吴月华¹, 杨杰¹, 青山尚之²

(1. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026;
2. 日本国电气通信大学 智能机械工学科, 东京都调布市 182-8585)

摘要:介绍了一种新型跳跃式移动机构, 阐述了该机构的移动机理及其控制方法。跳跃式移动机构采用小型振动电机作为驱动, 利用电机内偏心轮的旋转所产生的周期性的向心力及与工作表面的间歇性摩擦力的共同作用, 实现机构的跳跃移动, 两个不同放置位置的电机的组合运用, 可实现机构可调速的直线运动和回转运动, 通过一系列实验, 验证了跳跃式移动机构可实现二维平面内的自由移动。

关键词: 跳跃式移动; 摩擦力; 偏心轮

中图分类号: TH112.93 文献标识码: A

Experimental study on the displacement mechanism of a hopping locomotion mechanism

LU Yong-kui¹, WU Yue-hua¹, YANG Jie¹, AOYAMA Hisayuki²

(1. *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*
2. *University of Electro-Communications, Tokyo 182-8585, Japan*)

Abstract: The displacement mechanism of a new hopping locomotion mechanism driven by small vibratory motors is detailed. The joint application of the periodical centripetal force generated by the rotation of the eccentric inside the motor and the intermittent friction with the working surface brings about the hopping locomotion of the mechanism. The combined operation of the two motors located in different positions makes the linear movement and rotation of the mechanism at adjustable speeds possible. It is verified through a series of experiments that the hopping locomotion mechanism can freely move in a 2D plane.

Key words: hopping; friction; eccentricity

1 引言

近年来工业制品的加工系统、加工机械的移动系统多采用高性能的大型装置, 大型装置必然需要复杂的操作以及高能量需求。如今, 高能量需求所产生的问题越来越引起人们的注意, 于是利用小型机器人组成机器人群来控制加工的方案正在试验之中^[1]。小型移动机构多以压电陶瓷作

为驱动, 控制结构比较复杂, 而且要求输入能量比较高, 同时靠电磁吸附的爬行结构, 通常对工作表面的要求比较高。笔者以小型化、节约能量和提高对工作表面适应性为目标, 设计并研制出跳跃式移动机构, 通过对该跳跃式移动机构进行的大量试验研究, 证明它不仅能做直线运动, 而且可以根据电机的不同布置组合, 实现 2 维平面内的自由运动。

2 移动机理

2.1 小型振动电机原理

该小型振动电机的结构与普通电机类似, 定子永久磁铁固定在电机的外壳上, 转子由偏心轮组成, 三组线圈并排在偏心轮的内部。该电机的机理和普通电机大致相同, 在任意一个时刻只有一组线圈通电, 当其中一组线圈通电后, 由该线圈产生的磁场和永久磁铁产生的磁场相互作用, 在磁力的作用下, 偏心轮开始旋转, 使该线圈脱离通电位置, 另一个线圈进入通电位置后, 通电产生新的磁场, 推动偏心轮继续旋转。依此类推, 通电后, 电机的偏心轮将不断绕电机的中心旋转。

该振动电机和普通电机最大的不同在于转子由偏心轮组成。普通电机的转子为以电机中心为中心的圆柱, 通电后绕转子的重心回转, 转子各部分产生的离心力互相抵消, 除产生运动转矩外, 不对整个机构产生其它力的作用。振动电机的转子由偏心轮组成, 回转时, 偏心轮的离心力将通过转子的转轴, 作用于电机的外壳。当电机悬空通电时, 电机的外壳由于受到转子离心力的影响而振动。将该振动电机和整个移动机构固接时, 整个机构将受到转子离心力的作用而跳跃式移动。该电机的驱动力不是轴的力矩(转轴悬空放置), 而是转子的离心力。电机采用直流电压输入, 当电压增大时, 转子线圈的电流增大, 磁场变强, 将使转子的转速加快, 即电机转子的转动频率增高, 振动强度加大。

2.2 直线运动

移动机构实现直线运动的机构模型如图 1 所示, 电机在机座的中央对称竖直放置并固接在机架上。电机通电时, 电机转子绕电机中心回转, 离心力的方向随着偏心轮的转动而变化并始终指向电机的轴心, 该力通过电机的外壳而作用于固接在电机的机架和整个移动机构, 带动移动机构跳跃运动。其中图 1 中所示 F 即为电机的驱动力。

首先对竖直方向进行分析^[2-4]。竖直方向受到驱动力 F 的竖直分力 F_A 和重力 G 和支持力 N 的作用, 当力 F_A 大于 G 和 N 的合力时, 移动机构向上跃起, 此时, 只有力 F_A 和 G 的作用, 运动方程如式(1)。当移动机构落下后, 竖直方向速度为零, 此 $N = G - F_A \cos(\omega t)$ 。作用力、速度和位移的曲线

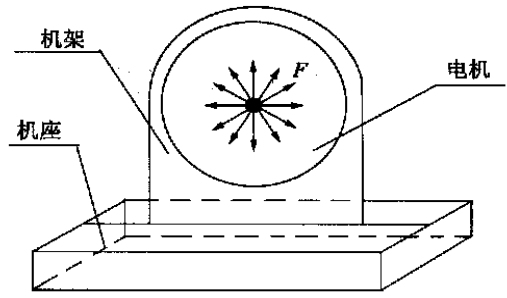
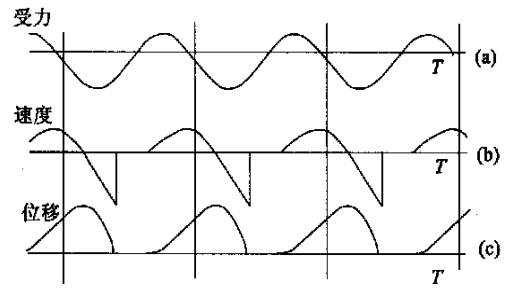


图 1 移动机构直线运动的机构模型

Fig. 1 Mechanism model of going forward

如图 2 所示, 图 2(a) 为力与时间曲线, (b) 为速度与时间曲线, (c) 为位移与时间曲线。图(b)中曲线的瞬间剧变的原因是由于移动机构落地碰撞后, 竖直方向位移变为零, 速度瞬间变为零所致。

$$-M_{\text{robot}}g + F_A \cos(\omega t) = M_{\text{robot}}\ddot{z}, \quad (1)$$



(a) 移动机构竖直方向运动的驱动力曲线

(a) Image of vertical strength going forward

(b) 移动机构竖直方向运动的速度曲线

(b) Image of vertical speed going forward

(c) 移动机构竖直方向运动的位移曲线

(c) Image of vertical displacement going forward

图 2 移动机构竖直方向运动的运动参数曲线

Fig. 2 Image of vertical movement while going forward

当考虑无摩擦力作用时, 移动机构水平方向只受到电机驱动力的水平分力的影响, 则运动方程如式(2)所示。

$$M_{\text{robot}}\ddot{x} = F_A \sin(\omega t), \quad (2)$$

当考虑到摩擦力作用时, 摩擦力只有当移动机构与表面接触的时候才起作用, 如图 2 所示的位移等于零的部分, 此时竖直方向速度为零, 移动机构受到电机驱动力的分力和重力的作用, 可以得到摩擦力的运动方程如式(3)所示。

$$F_f = f(M_{robot}g - F_A \cos(\omega t)), \quad (3)$$

摩擦力的大小曲线如图 3 所示。

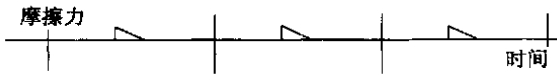


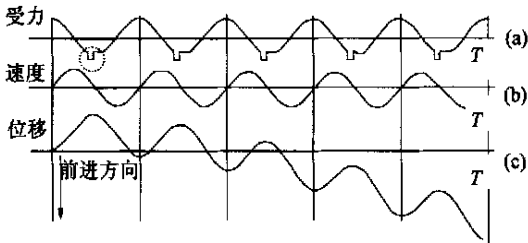
图 3 移动机构运动受到的间歇性的摩擦力

Fig. 3 Friction of the hopping mechanism

水平方向运动方程为式(4)所示。其中图 3 的曲线表示摩擦力的大小,摩擦力的方向由运动中的速度方向决定,即摩擦力的方向为运动速度的反方向。所以在式(4)中,方向用±表示。

$$F_A \sin(\omega t) \pm F_f = M_{robot} \ddot{x}, \quad (4)$$

由式(4),可得到移动机构在水平方向的运动模型如图 4 所示。其中受力曲线(a)是由驱动力所构成的周期性的正弦曲线和间歇性的摩擦力曲线合成,如图 4(a)虚线圆圈所示,在摩擦力突然产生的瞬间,力产生了跳变。这种跳变改变了速度曲线(b)和位移曲线(c)的走向,使速度在前进方向上产生偏移,这种偏移在各运动周期中积累、叠加,使整个运动机构在进行不停往复运动的同时,朝某一方向前进,如图 4(c)所示。



(a) 移动机构在摩擦力作用下的水平运动的力曲线

(a) Image of horizontal strength going forward with friction

(b) 移动机构在摩擦力作用下的水平运动的速度曲线

(b) Image of horizontal speed while going forward with friction

(c) 移动机构在摩擦力作用下的水平运动的位移曲线

(c) Image of horizontal displacement while going forward with friction

图 4 移动机构在摩擦力作用下的水平运动的参数曲线

Fig. 4 Image of horizontal movement while going forward with friction

参照图 3 和图 4,综合移动机构在水平方向和竖直方向的运动图形,我们可以得到移动机构

的运动曲线,如图 5 所示。

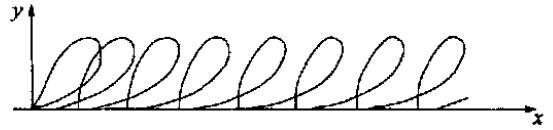


图 5 移动机构的运动曲线

Fig. 5 Movement of the hopping locomotion mechanism

2.3 圆弧曲线运动

振动电机构成的移动机构不仅能实现直线运动,也可实现曲线运动,其机构模型如图 6 所示。电机在机座的前部中央倾斜放置。由前面分析可以知道,振动电动机将产生斜前方的力,这将牵引移动机构在做前进运动的同时绕自身回转,运动形式将随着电动机的倾斜角度的不同而不同。移动机构前进和回转的运动方程分别如式(5)和式(6)所示。其中α为驱动电机的倾斜角。F_f为摩擦力。r_c为摩擦力的平均转动臂。

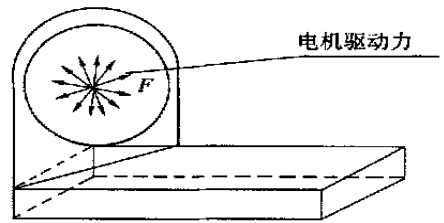


图 6 移动机构恒曲率的圆弧曲线运动的运动模型

Fig. 6 Mechanism model going around a circle

$$A \sin(\omega t) \cos \alpha \pm F_f = M_{robot} \ddot{x}, \quad (5)$$

$$A \sin(\omega t) d - F_f r_c = I_{robot} \ddot{\theta}, \quad (6)$$

移动机构的运动形式受到电机放置的倾斜角度的影响,倾斜角度决定了做前进运动和做回转运动的分力的大小,电机放置的倾斜角度和移动机构运动形式的关系如图 7 所示。从左至右的角度依次为 15°, 30°, 45°, 90°。

当倾斜角度为零度时,即为图 1 所示的移动机构,运动形式为直线前进,当倾斜角度逐渐增大时,使移动机构做回转运动的分力将增加,移动机构开始回转运动,并且随着倾斜角度的增加,移动机构的回转半径逐渐减小。当倾斜角度达到 90°的时候,移动机构不再有向前运动的分力,则移动机构在原地做回转运动,这时电机的作用与下述图 8 中的水平电机的作用相同。

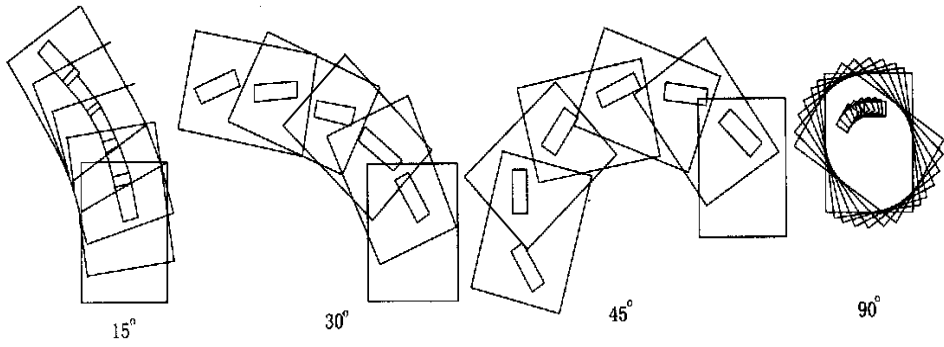


图 7 电机的倾斜角度与移动机构运动形式的关系

Fig. 7 Relation between movement and the angle of the vertical motor

2.4 二维平面自由移动

为实现在二维平面内的自由移动, 移动机构的机构模型如图 8 所示, 在上层竖直放置的电机用于控制机构的直线运动; 在机座中央水平放置的电机, 用于控制移动机构的回转运动。运动模型如图 9 所示, 其中 M_{Motor} 为偏心轮的重心, M_{Robot} 为移动机构的重心, O_{Motor} 为电机的中心。电机转子的离心力作用于机构的其余部分, 使其余部分绕电机转轴旋转, 两部分转动向心力相等, 则机构运动方程可表为式(7)。

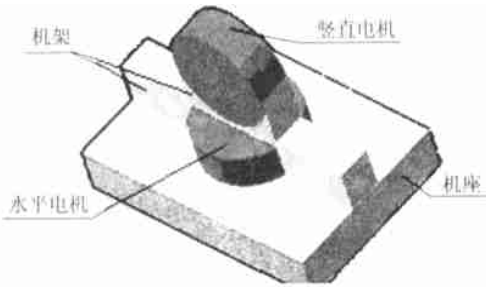


图 8 二维平面运动的移动机构模型

Fig. 8 Mechanism model moving in planar surface

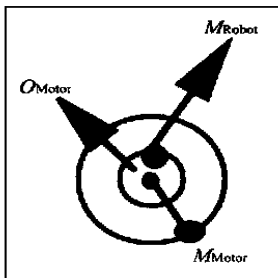


图 9 移动机构旋转运动模型

Fig. 9 Mechanism model of turning around

$$M_{\text{Robot}} D \omega_{\text{Robot}}^2 = M_{\text{Motor}} R_{\text{Motor}} \omega_{\text{Motor}}^2, \quad (7)$$

在式(7), D 为移动机构的重心到电机的中心的距离, R_{Motor} 为电机偏心轮的回转半径。由此我们可以得到移动机构的回转角速度 ω_{Motor} 。

3 实验

3.1 实验条件

振动电动机采用 FM26A (东京机械工业制造), 直径 13.6 mm, 偏心轮的质量为 0.72 g, 偏心轮回转半径为 2.25 mm, 偏心轮的振动频率约为 3 200 rpm。电源为 1.0~1.5 V 的直流输入, 能耗很低, 可以采用普通的钮扣电池作为电源输入。机座及连接机构采用树脂 (ABS)。各部件由胶粘合而成。

实验工作表面采用坚硬的铝板、表面凹凸严重的键盘、柔软的地毯、砂石面等, 在不同表面上测得的移动速度值如表 1 所示。从表中可以看到, 在坚硬的铝板上的移动速度最快, 在键盘上的移动速度最慢。

3.2 不同的运动形式

振动电机在底盘上的不同安放位置可实现不同的运动方式, 图 10(a) 所示的机构可实现直线运动, 图 10(b) 所示的机构可实现圆弧运动。经过测定, 如图 10(b) 中所示跳跃式移动机构的倾斜角为 15° , 直线运动速度为 1.2 mm/s, 角速度为 1.12 rad/s。

表 1 不同表面上机构的行进速度

Tab. 1 Speeds on different surfaces

工作表面	铝板	键盘表面	地毯	硬纸面	桌子面	沙石面
速度(mm/s)	30	5	10	25	22.2	15.48



(a) 直线前进运动的移动机构实体 (b) 圆弧曲线运动的移动机构实体 (c) 二维平面内自由运动的移动机构实体
 (a) Locomotion mechanism of going forward (b) Locomotion mechanism of turning around a circle (c) Locomotion mechanism of moving in the surface of two dimensions

图 10 各种运动形成的移动机构实体

Fig. 10 Locomotion mechanism of various movements

图 10(c) 所示的两个电机组合机构可实现二维平面自由运动。水平电机正向通电时, 该机构做顺时针回转运动, 回转的速度将随着输入电压的变化而变化, 电压增至 1.5 V 时, 回转角速度可达到 $4\pi/s$; 当水平电机反向通电时, 该机构将按逆时针回转。当竖直电机通电时, 该机构将做跳跃直线运动。

工作, 如图 11 所示, 从 A 到 B 就可采用先给水平电机通电, 当旋转至合适位置, 停止给水平电机通电, 然后再给竖直电机通电, 直线运动到 B; 或者两者同时通电, 合理控制电压值的大小, 到达位置 B 等多种运动方式。

4 结 论

跳跃式移动机构采用小型振动电动机作为驱动, 可以实现二维平面内的直线运动和曲线运动。由于是跳跃式前进, 大大降低了对工作表面的要求, 增加了移动机构的适应性。跳跃式移动机构能耗低。实验中以氧化银纽扣电池 LR44 作为电源, 寿命可以达到 24 000 s, 以 SR44 作为电源, 寿命可达 12 000 s。跳跃式移动机构只要直接控制电机的输入电压即可实现对移动机构运动的控制, 控制方法简单灵活。

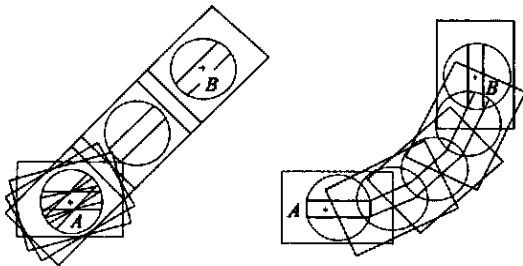


图 11 二维曲线运动的各种运动方式

Fig. 11 Different movement styles on the planar surface

水平电机和竖直电机可以独立或者互相配合

参考文献:

- [1] 松岗. 反复跳跃运动的机械模型[M]. 日本: 东大出版社, 1979. 251.
MATUOKA. *Repeated hopping locomotion mechanism* [M]. Japan: Publishing Company of University, Tokyo, 1979. 251. (in Chinese)
- [2] 庞国仲. 自动控制原理[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1998.
PANG G ZH. *Principle of automatic control system* [M]. Beijing: Publishing Company of USTC, 1998. (in Chinese)
- [3] 卢永奎, 许旻, 吴月华, 等. 微型机器人蛇行游动机构的系统仿真[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(6): 542-547.
LU Y K, XU M, WU Y H, *et al.* System simulation of snake traveling mechanism [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(6): 542-547. (in Chinese)
- [4] 徐小云. 微型六足仿生机器人及其三角步态的研究[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(4): 392-396.
CHEN X Y. Research on miniature hexapod bio robot and its tripod gait [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(4): 392-396. (in Chinese)

作者简介: 卢永奎(1975-), 男, 辽宁瓦房店人, 中国科学技术大学博士研究生。

《发光学报》(双月刊)

——物理学类; 无线电电子学、电信技术类核心期刊

《发光学报》是中国物理学会发光分科学会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分科学会学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊, 曾于1992年, 1996年和2000年连续三次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年始; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)自2000年始已定期收录检索该刊论文。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”, 首批进入“中国期刊方阵”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》为双月刊, 大16开本, 100页, 国内外公开发行人。2003年国内定价: 12.00元, 全年72元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

地 址: 长春市人民大街140号

《发光学报》编辑部

邮 编: 130022

电 话: (0431) 5684692-2534

E mail: fgxb@ciomp.ac.cn

国内统一刊号: CN22-1116/O4

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 8-173

国外发行代号: 4863Q

http://www.ciomp.ac.cn