

工艺与装备

机电混驱弧面凸轮机构运动学数值法分析

曹巨江, 杨坤, 闫茹, 杨奔奔, 龚琰
(陕西科技大学 机电工程学院, 西安 710021)

摘要: **目的** 获得机电混合驱动弧面凸轮机构的运动规律。**方法** 针对解析法无法直接求解非线性运动叠加的问题, 采用数值分析的方法对其运动规律进行分析研究。将分析后得到的数值点代入到已编写好的 Matlab 程序中, 并进行运算求解。对 3 种不同非线性运动规律与凸轮运动规律叠加后的结果进行分析。**结果** 经拟合得出的机电混驱弧面凸轮机构的运动规律曲线, 与理论的凸轮运动规律曲线趋势相似。**结论** 这种数值分析的方法可有效解决非线性运动规律叠加后复合难度大、复合函数难求解的问题, 在保持原有凸轮运动规律的情况下, 进一步将从动件运动规律由单一化向多元化发展, 且为其后续的复合运动规律的优化提供了依据。

关键词: 机电混驱; 弧面凸轮; 数值法; 非线性运动

中图分类号: TH123 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)03-0164-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.03.025

Numerical Analysis on Kinematics of Electromechanical Hybrid Drive of Globoidal Cam Mechanism

CAO Ju-jiang, YANG Kun, YAN Ru, YANG Ben-ben, GONG Yan

(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The paper aims to obtain the motion law of the electromechanical hybrid drive globoidal cam mechanism. For the problem that the analytical method cannot directly solve the nonlinear motion superposition, the numerical analysis was used to analyze the motion law. The numerical points after the analysis were put into the program, which was prepared in MATLAB to make an operation. The results of three different nonlinear motion rules superimposed with cam motion rules were analyzed. The trend of the curve of motion law of the electromechanical hybrid drive globoidal cam mechanism was similar to the curves of theoretical cam motion law. This method of numerical analysis can effectively solve the problem of great difficulty of compositing and the compound function. Under the condition of maintaining the original cam motion law, it promotes further development of motion law from singularization to diversification and lays a foundation for the optimization of its subsequent composite motion law.

KEY WORDS: electromechanical hybrid drive; globoidal cam; numerical method; nonlinear motion

在包装设备中, 凸轮机构因兼具传动、导向和控制的功能而被广泛使用。由于凸轮机构结构简单, 其运动规律受限于凸轮轮廓的设计, 因此存在着单一性。随着大多学者将伺服控制系统应用于凸轮机构

中, 实现了凸轮机构运动规律输出的多样性。对于一些不可更改的参数, 可以通过改变控制程序来实现^[1-4], 因此, 目前对于机电混合的研究变得越来越广泛。HCOC M 等对电子凸轮的控制系統做了简要的

收稿日期: 2019-08-30

基金项目: 国家自然科学基金 (51175313)

作者简介: 曹巨江 (1955—), 男, 博士, 陕西科技大学教授, 主要研究方向为机械设计及理论。

分析研究^[5]。冷东等^[6]将凸轮与连杆组合并研究了其动态特性。曹巨江等^[7]提出构建复合机构运动规律参数化模型的方法,研究了机电复合凸轮机构的运动规律。对于电子凸轮控制系统的研究也颇为广泛^[8—11]。将机电混驱弧面凸轮机构作为传动机构应用到包装机械中,通过改变伺服系统的输入,可实现整个传动机构输出不同的运动规律。由于非线性运动叠加后复合难度大、复合函数难求解^[12],解析法难以求解,故文中采用数值法进行分析。在确定弧面凸轮轮廓后,对伺服电机输入不同的运动规律,使得机电混驱弧面凸轮机构输出不同的运动轨迹,为机电混驱弧面凸轮机构运动学的研究提供一种新的方法。文中研究的是运用在机器人腰身转位装置上的一种减速机构,功能是实现机器人的水平回转运动。在不同的包装工序中,包装机械的运动规律各不相同,传统弧面凸轮无法根据实际工程需要灵活改变运动规律,文中提出的机电混驱弧面凸轮机构可以进一步弥补传统凸轮的这种缺点。

1 工作原理

机电混合驱动凸轮机构,由伺服电机以及控制系统和弧面凸轮串联组成,机构的原理见图 1。由计算机程序控制伺服控制系统,PLC 控制伺服电机,实现对弧面凸轮的启停、转速的大小的控制。不同的程序控制弧面凸轮输出不同运动规律的运动^[13—15]。

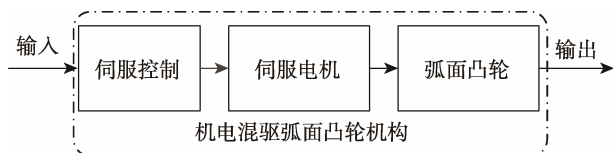
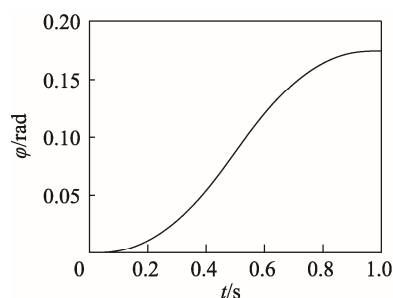


图 1 机电混驱原理

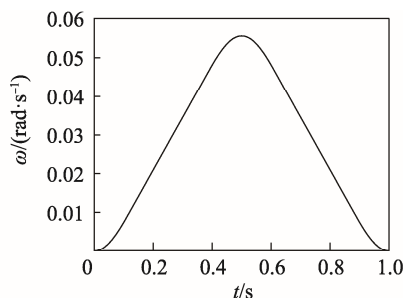
Fig.1 Schematic diagram of electromechanical hybrid drive

2 确定弧面凸轮的运动规律

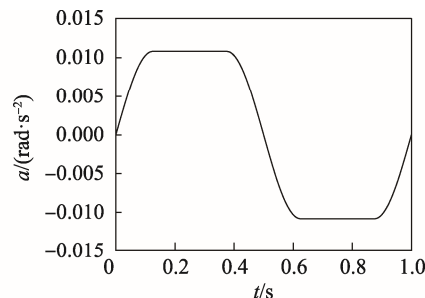
为了避免由于速度的突变引起的刚性冲击和加速度突变引起的柔性冲击,在选取从动件运动规律



a 位移曲线



b 速度曲线



c 加速度曲线

图 2 弧面凸轮运动曲线

Fig.2 Globoidal cam motion curve

时,需根据不同的工作情况进行选取,见式(1)。

$$\varphi_{\text{从}} = \begin{cases} \frac{\pi}{18(2+\pi)} \left(\frac{2\pi}{\beta} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{4\pi\theta}{\beta} \right) \right) & \left(0 < \theta < \frac{1}{8}\beta \right) \\ \frac{\pi}{18(2+\pi)} \left(\frac{4\pi\theta^2}{\beta^2} - \frac{(\pi-2)\theta}{\beta} + \frac{\pi}{16} - \frac{1}{2\pi} \right) & \left(\frac{1}{8}\beta < \theta < \frac{3}{8}\beta \right) \\ \frac{\pi}{18(2+\pi)} \left(\frac{2(\pi+1)\theta}{\beta} - \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{4\pi\theta}{\beta} - \pi \right) \right) & \left(\frac{3}{8}\beta < \theta < \frac{5}{8}\beta \right) \\ \frac{\pi}{18(2+\pi)} \left(\frac{(2+7\pi)\theta}{\beta} - \frac{4\pi\theta^2}{\beta^2} - \frac{33\pi}{16} + \frac{1}{2\pi} \right) & \left(\frac{5}{8}\beta < \theta < \frac{7}{8}\beta \right) \\ \frac{\pi}{18(2+\pi)} \left(\frac{2\theta}{\beta} + \pi - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{4\pi\theta}{\beta} - 2\pi \right) \right) & \left(\frac{7}{8}\beta < \theta < \beta \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\varphi_{\text{从}}$ 为从动件的角位移; β 为凸轮周期转角; θ 为凸轮的实时转角。

选择弧面凸轮的运动规律为简单的组合运动规律。其设计参考位移、速度、加速度曲线见图 2。

3 运动学数值法

弧面凸轮机构的运动规律研究对于整个机构的运动学和动力学性能都有着重要的意义。通过伺服电机输出给定的运动规律,带动凸轮主动轴转动,在凸轮主动轴旋转时,凸轮带动从动件运动,从而获得从动件的运动规律。采用数值法对机电混合驱动的弧面凸轮机构的运动规律进行理论分析研究。在对弧面凸轮选取一种运动规律后,在相同的工作周期内,根据给定的伺服电机运动规律:

$$\varphi_{\text{同}} = \varphi_1(t), \varphi_{\text{从}} = \varphi_2(\varphi_{\text{凸}}), \varphi_{\text{凸}} = \varphi_3(T) \quad (2)$$

每个时间点 t 可以获得对应的一个角位移 $\varphi_{\text{同}}(t)$, 再通过弧面凸轮的运动规律关系, 将 $\varphi_{\text{同}}(t)$ 带入到式 (2) 中, 求出弧面凸轮输出相等角位移下的时间 T , 对 $\varphi_{\text{从}} = \varphi_2(\varphi_{\text{凸}})$ 进行微分计算, 求得弧面凸轮的角速度、加速度关系式, 并求出在 T 时刻的从动件角速度、加速度值:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{同}} &= \varphi_1(t) = \varphi_3(T) \\ T &= \varphi_{\text{凸}}^{-1}(\varphi_1(t)) \\ \omega_{\text{从}} &= \omega_2(T), a_{\text{从}} = a_2(T) \end{aligned} \quad (3)$$

根据自然时间点 t 与在时间点 T 对应的角速度、加速度构成一一对应的点坐标, 根据这些对应点坐标, 绘制出机电混驱弧面凸轮机构的运动规律曲线。

4 案例分析

4.1 余弦加速度运动

给定伺服电机的运动规律为余弦加速度运动规律, 曲线参数方程为:

$$\begin{cases} \varphi_{\text{余}} = 1 - \cos(\pi t) \\ \omega_{\text{余}} = \sin(\pi t) \\ a_{\text{余}} = \pi \cos(\pi t) \end{cases} \quad (0 < t < T) \quad (4)$$

其中: $\varphi_{\text{余}}$ 为伺服电机输出角位移; $\omega_{\text{余}}$ 为伺服电机输出角速度; $a_{\text{余}}$ 为伺服电机输出角加速度。

由上述伺服电机的运动规律, 其位移、速度、加

速度变化规律见图 3。

对伺服电机按照选定的余弦加速度运动规律, 首先, 取相等的工作时间周期, $\Delta t = 0.005 \text{ s}$, 由每个时间点可以得出该时间点伺服电机的角位移, 再由弧面凸轮的运动规律, 可以得出弧面凸轮输出相等角位移下的时间 t_1 。由时间 t_1 可求得在此时间下的位移、速度、加速度值。在伺服电机的输入下的机电混合驱动弧面凸轮机构输出位移、速度、加速度曲线见图 4。

在图 4a 中, 在 $0 \sim 0.5 \text{ s}$ 时间内, 从动件到达同等位移的情况下, 机电混驱弧面凸轮机构比弧面凸轮机构所用的时间长, 而在 $0.5 \sim 1 \text{ s}$ 内, 则机电混驱弧面凸轮机构所用的时间较短。而图 4c 中, 在时间 $0 \sim 0.375 \text{ s}$ 内, 机电混驱弧面凸轮机构的加速度一直小于或等于弧面凸轮的加速度; 在 0.415 s 时, 机电混驱弧面凸轮机构加速度开始减小, 并在 0.585 s 达到反方向最大值; 在 $0.585 \sim 0.77 \text{ s}$ 内, 机电混驱弧面凸轮机构以最大加速度减速; $0.77 \sim 1 \text{ s}$ 时间段, 加速度逐渐减小。在整个变速过程中, 机电混驱弧面凸轮机构的速度始终小于或等于弧面凸轮的速度, 其速度曲线见图 4b。由图 4 可以得出, 从动件输出的位移、速度、加速度达到相同数值时, 机电混驱弧面凸轮机构与弧面凸轮机构所用的时间不同, 但其运动规律趋势基本相似。

4.2 修正等速运动

保持弧面凸轮机构的运动规律不变, 给伺服电机修正等速运动规律, 曲线参数参考方程为:

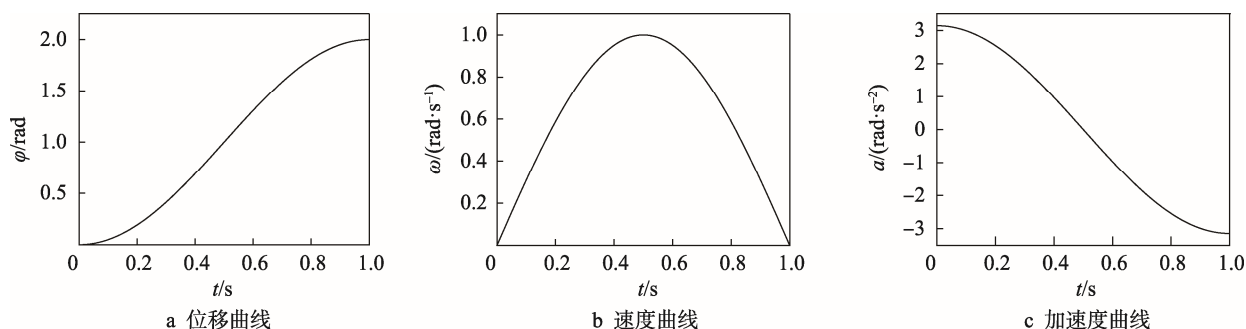


图 3 伺服电机余弦加速度运动曲线

Fig.3 Cosine acceleration curve servo motor

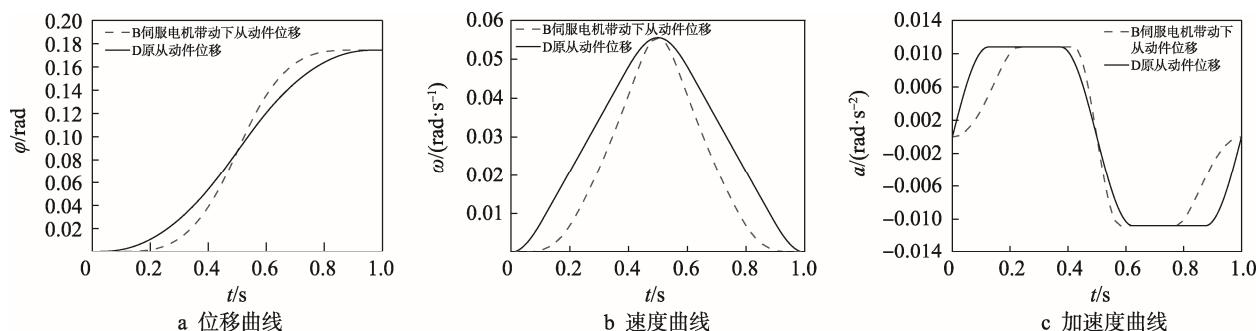


图 4 余弦加速度机电混驱运动曲线

Fig.4 Cosine acceleration curve of electromechanical hybrid drive

$$\varphi_{\text{修}} = \begin{cases} \frac{(-\sin 4\pi t + 4\pi t)}{3\pi} & \left(0 < t < \frac{1}{4}T\right) \\ \frac{(8\pi t - \pi)}{3\pi} & \left(\frac{1}{4}T < t < \frac{3}{4}T\right) \\ \frac{\left(-\cos\left(4\pi t - \frac{\pi}{2}\right) + 4\pi t + 2\pi\right)}{3\pi} & \left(\frac{3}{4}T < t < T\right) \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\varphi_{\text{修}}$ 为伺服电机输出角位移。

由上述伺服电机的运动规律，其位移、速度、加速度变化规律见图 5。

取相等的工作时间周期 $\Delta t = 0.005 \text{ s}$ ，计算该时间点伺服电机的角位移，再由弧面凸轮的运动规律，求出此时间下凸轮机构的位移、速度、加速度值。在伺服电机的输入下机电混合驱动弧面凸轮机构输出位移、速度、加速度曲线见图 6。

如图 6a 所示，给伺服电机修正等速运动规律后，机电混驱弧面凸轮机构输出的运动规律位移曲线相对于图 4a 的位移曲线较平缓。在 $0 \sim 0.5 \text{ s}$ 达到相同角位移 0.02 rad 时，修正等速运动规律下机电混驱弧面凸轮机构用时 0.315 s ，余弦加速度运动规律下机电混驱弧面凸轮机构用时 0.345 s ，可以得出对于机电混驱弧面凸轮机构而言，在修正等速运动规律下比在余弦加速度运动规律下达到相同位移所用时间短，效率高。在 0.5 s 时，两者具有相同的角位移，在 $0.5 \sim 1 \text{ s}$ 范围内，其两者运动情况与 $0 \sim 0.5 \text{ s}$ 内相反。速度曲线图

6b 和加速度曲线图 6c 所反映的运动情况与图 6a 一致。

4.3 摆线运动

对伺服电机输入摆线运动规律，其参考曲线方程如下：

$$\begin{cases} \varphi_{\text{摆}} = \frac{2\pi t - \sin(2\pi t)}{\pi} \\ \omega_{\text{摆}} = \frac{2\pi - 2\pi \cos(2\pi t)}{\pi} \\ a_{\text{摆}} = \frac{4\pi^2 \sin 2\pi t}{\pi} \end{cases} \quad (0 < t < T) \quad (6)$$

式中： $\varphi_{\text{摆}}$ 为伺服电机输出角位移， $\omega_{\text{摆}}$ 为伺服电机输出角速度， $a_{\text{摆}}$ 为伺服电机输出加速度。

由上述伺服电机摆线运动规律，得到位移、速度、加速度变化曲线见图 7。

绘制在伺服电机给予摆线运动规律的输入下，所得机电混驱弧面凸轮机构的输出位移、速度、加速度曲线见图 8。

图 8a 位移曲线同图 4a、图 6a 对比，在 0.36 s 时， $\varphi_{\text{摆}} = 0.0161 \text{ rad}$ ， $\varphi_{\text{余}} = 0.0253 \text{ rad}$ ， $\varphi_{\text{修}} = 0.031 \text{ rad}$ ， $0 \sim 0.5 \text{ s}$ 范围内，在相等的时间下，机电混驱弧面凸轮机构达到的角位移从大到小依次是 $\varphi_{\text{修}} > \varphi_{\text{余}} > \varphi_{\text{摆}}$ ； 0.5 s 时刻，三者具有相同的角位移；在 $0.5 \sim 1 \text{ s}$ 范围内，在相等的时间下，机电混驱弧面凸轮机构达到的角位移从大到小依次是 $\varphi_{\text{摆}} > \varphi_{\text{余}} > \varphi_{\text{修}}$ 。速度曲线图 8b 和加速度曲线图 8c 所反映的运动情况与图 8a 一致。

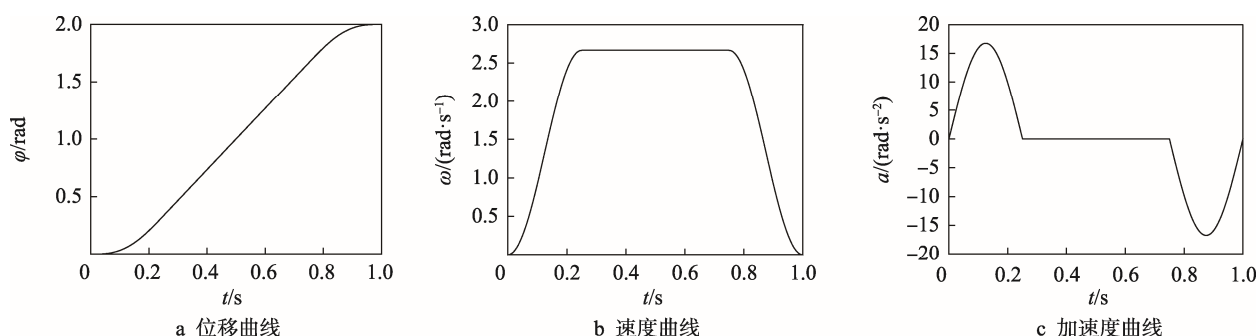


图 5 伺服电机修正等速运动曲线

Fig.5 Corrective curve of isokinetic motion of servo motor

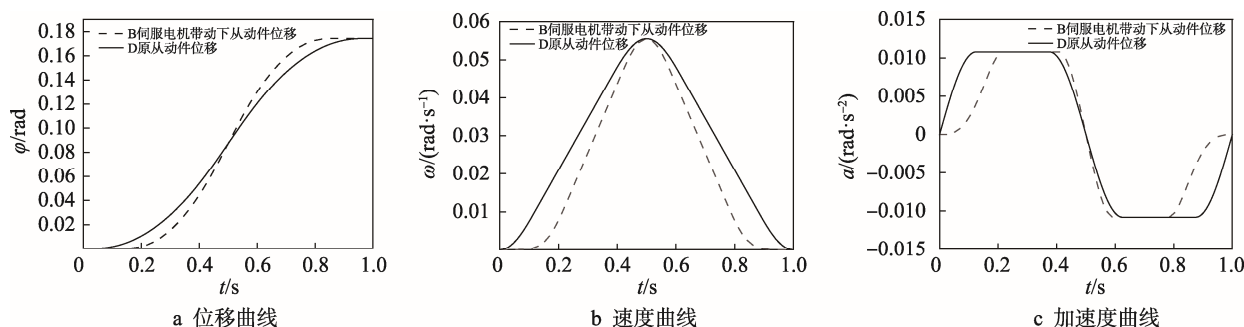


图 6 修正等速机电混驱运动曲线

Fig.6 Correction curve of isokinetic electromechanical hybrid drive

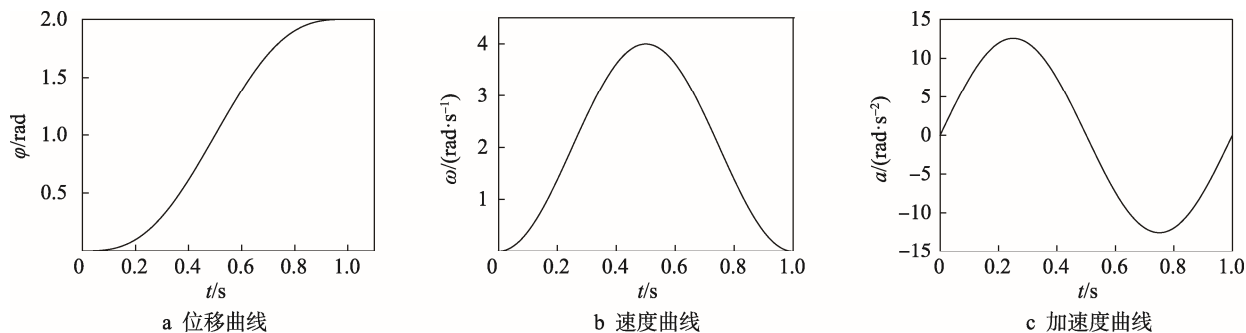


图 7 摆线运动曲线

Fig.7 Isokinetic motion curve

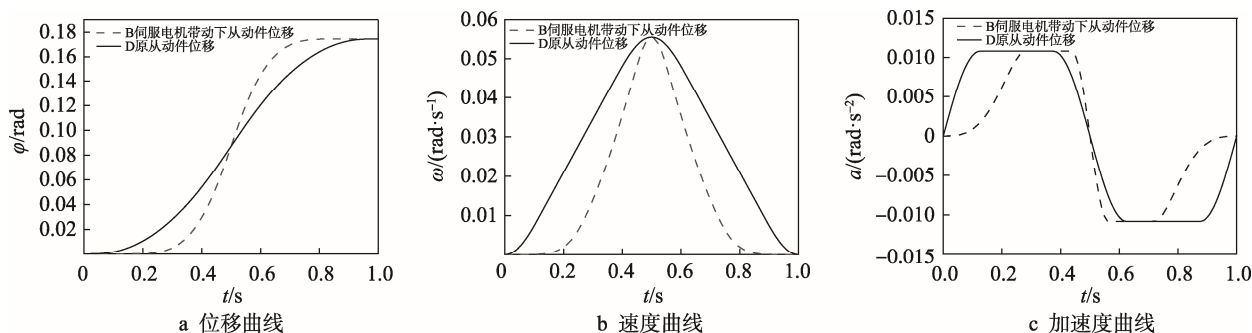


图 8 摆线运动机电混驱运动曲线

Fig.8 Hybrid drive curve of cycloidal motor

综合分析图 4、图 6、图 8，给伺服电机分别输入上述 3 种不同运动规律，通过伺服电机带动弧面凸轮机构转动，由从动件输出得到的运动规律即为机电混驱弧面凸轮机构的运动规律，从而实现了 2 种非线性运动规律的叠加。

5 结语

主要运用数值法分析，通过给伺服电机输入不同的非线性运动规律，研究了不同运动规律与弧面凸轮运动规律的叠加，从而获得了 3 种不同的位移、速度、加速度曲线，实现了机电混驱弧面凸轮机构运动规律输出的多样性，进而拓宽了弧面凸轮机构应用的场合。该方法很大程度上解决了解析法在非线形运动叠加的问题上存在的复合难度大、运算过程复杂的问题，对后续研究凸轮复合运动规律具有重要的意义。

参考文献：

- [1] 马慧丽, 杨玉虎, 刘永明. 可控电机实现凸轮机构从动件运动规律的研究[J]. 机械设计与研究, 2005, 21(2): 30—31.
MA Hui-li, YANG Yu-hu, LIU Yong-ming. Study on the Motion Law of the Follower of Cam Mechanism by Controllable Motor[J]. Machinery Design and Research, 2005, 21(2): 30—31.
- [2] 范志锋. 基于多软件联合的凸轮机构设计[J]. 包装

工程, 2019, 40(3): 174—178.

FAN Zhi-feng. Design of Cam Mechanism Based on Multi-Software Combination[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(3): 174—178.

- [3] 张焱, 黄松和. 基于 ADAMS 的凸轮连杆系统中凸轮的 CAD 系统开发及机构仿真分析[J]. 包装工程, 2018, 39(9): 171—176.

ZHANG Yi, HUANG Song-he. CAD System Development and Mechanism Simulation Analysis of Cam in Cam Linkage System Based on ADAMS[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(9): 171—176.

- [4] 饶成明. 基于 ARM 的机电复合式凸轮控制器电控系统设计[J]. 装备, 2014(4): 47—49.

RAO Cheng-ming. Design of Electronic Control System of Electromechanical Compound Cam Controller Based on ARM[J]. Equipment, 2014(4): 47—49

- [5] MAEDA HCOC. Method of Controlling Electronic Cam and Servo Motor Control System: USA Patent, US EP 1659464 A3[P]. 2011-05-12.

- [6] 冷东, 黄松和, 朱鹏飞. 包装机凸轮连杆组合机构的动态特性分析[J]. 机械设计与制造, 2015(6): 188—189.

LENG Dong, HUANG Song-he, ZHU Peng-fei. Analysis of Dynamic Characteristics of Cam Linkage Mechanism of Packaging Machine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(6): 188—189.

- [7] 曹巨江, 高瑾, 闫茹. 机电复合凸轮机构的运动规律[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 141—147.

CAO Ju-jiang, GAO Jin, YAN Ru. The Motion Law of

- Electromechanical Composite Cam Mechanism[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 141—147.
- [8] 刘亚成, 周广明, 李为薇. 一种通用的机电耦合传动特性分析方法[J]. 汽车技术, 2016(10): 17—21.
LIU Ya-cheng, ZHOU Guang-ming, LI Wei-wei, et al. A General Analysis Method of Electromechanical Coupling Transmission Characteristics[J]. Automobile Technology, 2016(10): 17—21.
- [9] 李丙才, 胡静萍, 魏泰. 可控凸轮机构与步进电机控制系统的集成设计[J]. 机械与电子, 2011(1): 17—19.
LI Bing-cai, HU Jing-ping, WEI Tai, et al. Integrated Design of Controllable Cam Mechanism and Stepper Motor Control System[J]. Machine and Electronics, 2011(1): 17—19.
- [10] PENG Bi, GONG Shi-hua, HUANG Yu, et al. Research on Tension Control of Winding Systems Using Electronic CAM[J]. Advanced Materials Research, 2012, 2075(590): 272—278.
- [11] 柏淑红. 采用伺服电机的电子凸轮控制系统设计[J]. 机电工程, 2012, 29(6): 689—692.
BAI Shu-hong. Design of Electronic Cam Control System Using Servo Motor[J]. Mechanical & Electrical Engineering, 2012, 29(6): 689—692.
- [12] 陈继生, 张彩丽. 自动机械的凸轮机构运动规律及其通用性研究[J]. 机械设计与制造, 2008(3): 221—222.
CHEN Ji-sheng, ZHANG Cai-li. Study on the Motion Law and Generality of Cam Mechanism of Automatic Machine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(3): 221—222.
- [13] 高琨, 张森林. 基于 PLC 控制的电子凸轮系统设计[J]. 机电工程, 2014, 31(11): 1419—1422.
GAO Kun, ZHANG Sen-lin. Design of Electronic Cam System Based on PLC Control[J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2014, 31(11): 1419—1422.
- [14] 卫光, 郭坤. 三伺服枕式包装机电子凸轮控制系统的应用[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(6): 57—59.
WEI Guang, GUO Kun. Research and Application of Electronic CAM Control System for Three Servo Pillow Packaging Machine[J]. Packaging and Food Machinery, 2012, 30(6): 57—59.
- [15] 陈明霞, 郑谊峰. 基于 PLC 与伺服的枕式包装机电子凸轮特性设计[J]. 包装工程, 2017, 38(23): 167—171.
CHEN Ming-xia, ZHENG Yi-feng. Design of Electronic Cam Characteristics of Pillow Packaging Machine Based on PLC and Servo[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(23): 167—171.