

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.02.017

高次旋转多项式的夹爪驱动盘设计分析

巨刚^{1,2,3}, 罗云秋¹

- (1. 杭州谱育科技发展有限公司, 浙江 杭州 311305;
2. 浙江青科质谱仪器创新有限公司, 浙江 杭州 311305;
3. 聚光科技(杭州)股份有限公司, 浙江 杭州 310056)

摘 要:针对机械夹爪驱动盘运动轨迹平滑性设计问题,提出转盘类时间指数的高次多项式与一次旋转方程相融合的方法。在平面坐标系中对时间类指数高次多项式函数进行参数矩阵(基圆半径、联动圆盘类时间指数、运动行程角、运动行程)设定。将平面坐标系中相关高次多项式离散点带入旋转坐标系中实现偏转,得到高次旋转多项式轨迹方程。采用一次到八次多项式分别对机械夹爪驱动盘运动轨迹曲线的位移、类速度、类加速度、类超加速度进行分析,得知二次以上旋转多项式的机械夹爪驱动盘运动轨迹基本处于平滑状态。实验证明:机械夹爪驱动盘运动的平稳性与次数有关。

关键词:机械夹爪;高次多项函数;旋转矩阵;类时间指数

中图分类号:TP241 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)02-0083-04

Design Analysis of Gripper Drive Disc of High Rotation Polynomial

JU Gang^{1,2,3}, LUO Yunqiu¹

- (1. Hangzhou Puyu Science and Technology Development Co., Ltd., Hangzhou 311305, China;
2. Zhejiang Qinke Mass Spectrometer Innovation Co., Ltd., Hangzhou 311305, China;
3. Concentrating Technology Hangzhou Co., Ltd., Hangzhou 310056, China)

Abstract: For the smoothness design of the mechanical gripper drive disc with the motion trajectory, a method of integrating the high-order polynomial of the turntable index with the primary rotation equation was proposed. The parameter matrix (base circle radius, linkage disk class time index, motion formation angle, motion formation) was set for the time class exponential high-order polynomial function in the plane coordinate system. The correlation high-order polynomial discrete point matrix was brought into the rotating coordinate system to achieve deflection in the plane coordinate system, and the high-degree rotation polynomial trajectory equation was obtained. The displacement, quasi-velocity, acceleration-like and super-acceleration of the motion trajectory curve of the mechanical gripper drive disc were analyzed from one to eight times, reaching a smooth state of the motion trajectory of the mechanical gripper drive disc of the polynomial of more than two rotations. The experiments show that the smoothness of the mechanical gripper drive disc movement is related to the number of times.

Keywords: mechanical gripper; high-order polynomial function; rotation matrix; class time index

0 引言

随着智能科技迅速发展,机械臂替代人工成为当下工业发展必然趋势。机械夹爪作为机械臂执行终端,实现自动化成为重中之重。因此对机械夹爪进行研究显得十分必要。

对机械夹爪的研究,已成为 21 世纪工业研究的热点问题,并取得了相当的研究成果以及理论分析方法。国内很多研究人员对机械臂夹爪的相关问题进行了研究,也取得了一些进展。比如:付振山等^[1]采用弧面与旋转坐标以及二次函数融合方法对设计轨迹进行研究;吴志等^[2]利用刚柔混合以及螺旋传动相配合的方法,设计出一种通用

性的机械夹爪末端执行器;朱毅然等^[3]通过非支配排序遗传算法与响应面法相融合的方法对机械夹爪进行设计研究;皮杰等^[4]结合增材制造技术与仿生学原理,设计一种具有自适应性、结构简单的柔性机械夹爪;刘艳等^[5]采用深度学习神经网络算法,同时多物件抓取,有一定的效能提升;李泊等^[6]使用矩阵法与 D-H 法建立运动学方程以及相关坐标系,采用 MATLAB 软件进行运动轨迹仿真,获得机械夹爪的运动范围;巨刚等^[7]采用高次多项式规律运动位移方程及拟合参数法,对运动轨迹的冲击平稳性进行研究,特别是采用加速度分析法;杜方辉等^[8]采用了气缸驱动的差动平移型机械手夹持器;王阶等^[9]使用气动肌肉收缩

第一作者简介:巨刚(1988—),男,陕西咸阳人,高级工程师,硕士,研究方向为机械设计,932284026@qq.com。

量与并联机构平台转动角度的函数关系,对机械夹爪运行轨迹进行了相关研究;胡海霞等^[10]采用 TRIZ 理论对双夹持自适应的末端执行器进行了相关研究。这些研究对机械夹爪相关设计、冲击优化等分析提供了重要的技术手段与理论基础。

本文采用 MATLAB 软件对高次旋转多项式的机械夹爪进行轨迹分析研究,进而对一次到八次旋转运动轨迹曲线位移、类速度、类加速度、类超加速度等进行分析,从而得出了二次以上曲线对机械夹爪平稳性有着重要影响。

1 建立高次多项旋转矩阵方程

1.1 机械夹爪结构图

建立高次多项旋转矩阵方程前,需要对机械夹爪结构进行说明,如图 1 所示。机械夹爪包括四大部分,分别为机械夹爪驱动、机械夹爪驱动盘 A、机械夹爪驱动盘 B、机械夹爪执行总成。建立的矩阵方程主要与机械驱动盘 A 和 B 有关,如图 2 所示。

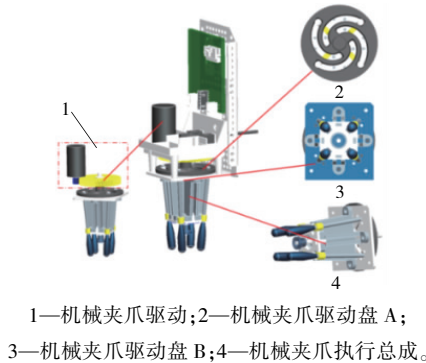


图 1 机械夹爪结构图示

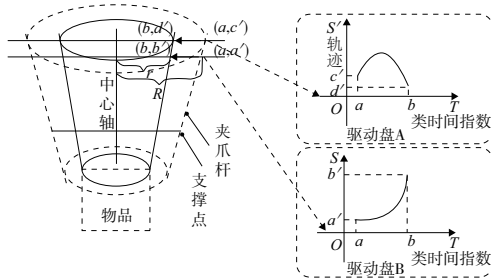


图 2 机械夹爪驱动盘函数示意图

1.2 高次旋转矩阵

机械夹爪驱动盘建立高次多项式函数:

$$S = r + KT + C_0 T^2 + C_1 T^3 + C_2 T^4 + C_3 T^5 + \dots + C_{n-1} T^{m+1} + C_n T^{m+2} \quad (1)$$

式中: S 为驱动盘夹爪运行轨迹位移曲线; r 为基圆半径; T 为联动圆盘类时间指数, 且 $T \in [0, 1]$; K 为运动行程; $C_0 \sim C_n$ 为补偿系数, 一般取 $0 \leq 1$, 且

n 为自然数。

为了在坐标系中进行相关轨迹计算, 分解为:

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} K & C_0 & \dots & C_{n-1} & C_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T & \dots & T^{m+1} & T^{m+2} \end{bmatrix}^{-1} \\ \begin{bmatrix} K & C_0 & \dots & C_{n-1} & C_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T & \dots & T^{m+1} & T^{m+1} \end{bmatrix} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r \\ r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \tau \\ \forall \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: τ 为 x 轴运行轨迹位移曲线; $\forall$ 为 y 轴运行轨迹位移曲线; α 为初始位置与 x 轴夹角。

建立旋转矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ \forall \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu \\ \exists \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\delta = \vartheta \cdot T \quad (4)$$

式中: μ 为新 x 轴旋转位移曲线; $\exists$ 为新 y 轴旋转位移曲线; ϑ 为行程角。

将式(2)带入式(3)中得到高次多项式旋转矩阵:

$$\begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} r + KT + C_0 T^2 + C_1 T^3 + C_2 T^4 + \dots + C_{n-1} T^{m+1} + C_n T^{m+2} \end{bmatrix} \cos \alpha \\ \begin{bmatrix} r + KT + C_0 T^2 + C_1 T^3 + C_2 T^4 + \dots + C_{n-1} T^{m+1} + C_n T^{m+2} \end{bmatrix} \sin \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu \\ \exists \end{bmatrix} \quad (5)$$

类速度方程:

$$\begin{bmatrix} \partial \mu / \partial T \\ \partial \exists / \partial T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial \tau / \partial T \\ \partial \forall / \partial T \end{bmatrix} \quad (6)$$

类加速度方程:

$$\begin{bmatrix} \partial \mu^2 / \partial T^2 \\ \partial \exists^2 / \partial T^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial \tau^2 / \partial T^2 \\ \partial \forall^2 / \partial T^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

类超加速度方程:

$$\begin{bmatrix} \partial \mu^3 / \partial T^3 \\ \partial \exists^3 / \partial T^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial \tau^3 / \partial T^3 \\ \partial \forall^3 / \partial T^3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2 实例验证

2.1 机械夹爪高次旋转理论仿真分析

分别对一次到八次多项旋转方程进行验证。机械夹爪参数设定, 如表 1 所示。

表 1 机械夹爪参数设定

运动行程 k/mm	基圆半径 r/mm	初始角 α/rad	行程角 ϑ/rad
12	7	$\pi/4$	$5\pi/6$

机械夹爪驱动盘驱动轨迹位移、类速度、曲线函数、类加速度、类超加速度分别如式(9)~式(12)所示。

$$\begin{bmatrix} S_x(T) \\ S_y(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x(T) \\ f_y(T) \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta \\ -\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (r+KT)\cos\alpha \\ (r+KT)\sin\alpha \end{bmatrix}, C_0 \sim C_n = 0 \\ \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta \\ -\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (r+KT+T^2)\cos\alpha \\ (r+KT+T^2)\sin\alpha \end{bmatrix}, C_0 \sim C_n = 1, n=0 \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta \\ -\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (r+KT+\dots+T^8)\cos\alpha \\ (r+KT+\dots+T^8)\sin\alpha \end{bmatrix}, C_0 \sim C_n = 1, n=6 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_x(T) \\ \dot{V}_y(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{S}_x(T) \\ \dot{S}_y(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{f}_x(T) \\ \dot{f}_y(T) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $\dot{V}_x(T)$ 为 x 方向类速度曲线; $\dot{V}_y(T)$ 为 y 方向类速度曲线。

$$\begin{bmatrix} \ddot{V}_x(T) \\ \ddot{V}_y(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{S}_x(T) \\ \ddot{S}_y(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{f}_x(T) \\ \ddot{f}_y(T) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $\ddot{V}_x(T)$ 为 x 方向类加速度曲线; $\ddot{V}_y(T)$ 为 y 方向类加速度曲线。

$$\begin{bmatrix} \dddot{V}_x(T) \\ \dddot{V}_y(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dddot{S}_x(T) \\ \dddot{S}_y(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dddot{f}_x(T) \\ \dddot{f}_y(T) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $\dddot{V}_x(T)$ 为 x 方向类超加速度曲线; $\dddot{V}_y(T)$ 为 y 方向类超加速度曲线。

图3为机械夹爪一次到八次旋转轨迹位移曲

线(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。图上显示出在 $T \in [0, 1]$ 范围内, $T=0.2 \sim 0.5$ s 这段区间, y, z 方向一次旋转位移曲线较二次以上旋转曲线位移最大差值约 $x=0.5$ mm, $y=2.6$ mm, 平滑性略差。图4为机械夹爪一次到八次旋转轨迹类速度曲线。图上显示在类时间指数 $T=0.42$ s 时, 一次

曲线 $\begin{bmatrix} \dot{V}_x(T) \\ \dot{V}_y(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.218 \\ -0.07 \end{bmatrix}$ 处于类速度突变最高点,

二次以上曲线基本处于平滑过度。图5为机械夹爪一次到八次旋转轨迹类加速度曲线。从图上可以看出, 在类时间指数 $T=0.52$ s 时, 一次曲线

$\begin{bmatrix} \ddot{V}_x(T) \\ \ddot{V}_y(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.006 \\ -0.004 \end{bmatrix}$ 处于类加速度突变最高点,

二次以上曲线基本没有突变点出现。

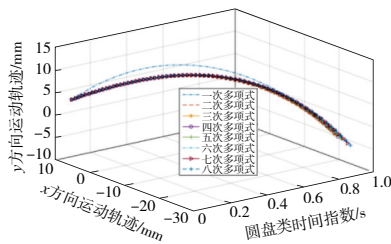


图3 机械夹爪轨迹位移曲线

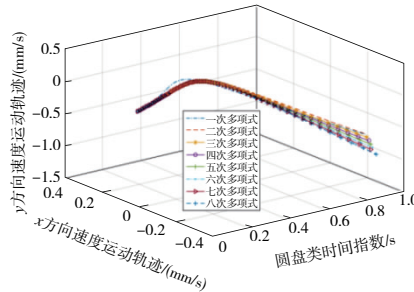


图4 机械夹爪轨迹类速度曲线

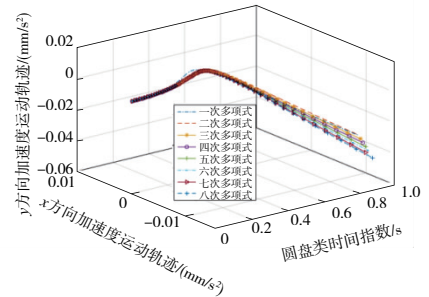


图5 机械夹爪轨迹类加速度曲线

图6为机械夹爪一次到八次旋转轨迹类超加速度曲线。从图上可以看出, 在类时间指数 $T=0.58$ s 时, 一次曲线 $\begin{bmatrix} \dddot{V}_x(T) \\ \dddot{V}_y(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0001 \\ -0.0001 \end{bmatrix}$ 处于类加速度突变最高点, 二次以上曲线突变点变化不明显。

机械夹爪轨迹位移曲线实际反映夹爪运动情况, 整体运动趋势越趋于平缓越呈现平滑状态。夹爪类速度曲线参数、类加速度曲线参数以及类超加速度曲线可以真实反映夹爪冲击运动情况。通过以上分析得出二次以上旋转位移曲线, 夹爪冲击性随之减少。

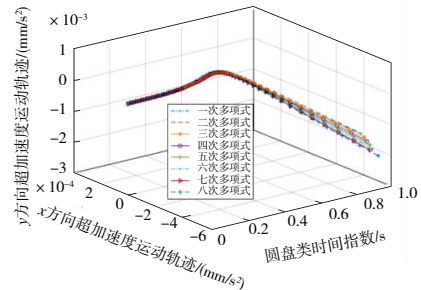
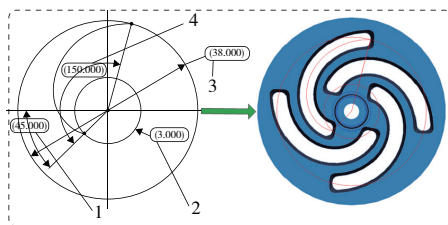


图6 机械夹爪轨迹类超加速度曲线

2.2 机械夹爪实物验证

机械夹爪进行实物验证设计, 根据高次多项

旋转轨迹位移曲线通用公式,设置初始角为 $\pi/4$ rad,基圆半径为 7 mm,运动行程为 12 mm,行程角为 $5\pi/6$ rad。实物实际设计设置为二次多项旋转曲线,如图 7 所示。



1—初始角 α ; 2—基圆半径 r ;
3—运动行程 k ($38/2-7=12$); 4—行程角 ϑ 。

图 7 机械夹爪驱动盘设计

设计夹爪轨迹夹取行程范围为 18~22 mm,现取试剂瓶进行实际验证,详细参数如表 2 所示。

表 2 夹取试剂瓶参数

序号	试剂瓶直径/mm	试剂瓶高度/mm	试剂瓶质量/g
1	21	25	15
2	19	25	12

在测试过程中,一次多项旋转曲线旋转盘发现在夹取 1 号试剂瓶,出现严重抖动,并且电机有沉闷响声;夹取 2 号试剂瓶,出现稍微抖动,未见电机有其他异响。二次多项旋转曲线旋转盘,分别夹取 1 号和 2 号试剂瓶,均未出现抖动以及电机异常响声,反映平滑无冲击。

图 8 为机械夹爪实物图。机械夹爪驱动盘实际夹取试剂瓶在运动过程中比较平稳,未出现一次多项旋转曲线抖动,机械夹爪在运动过程中出现电机反馈的电流跳变最大值为 0.021 A/0.013 A,相较于二次曲线均增大,如表 3 所示。

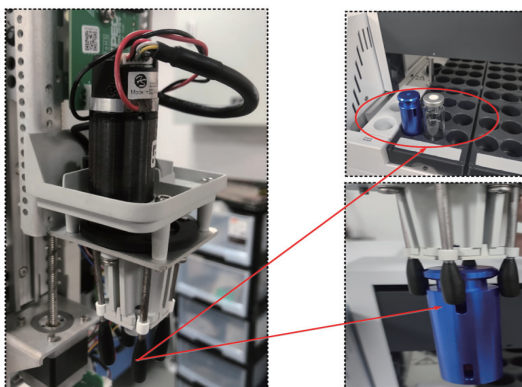


图 8 机械夹爪抓取试剂瓶实物测试

表 3 电机电流变化情况

序号	试剂瓶直径/mm	一次旋转曲线/A	二次旋转曲线/A
1	21	0.021	0.008
2	19	0.013	0.005

3 结语

基于高次旋转多项式机械夹爪驱动盘设计与分析,通过高次多项式与旋转矩阵相结合,设定基圆半径、联动圆盘类时间指数、运动行程角、运动行程等参数,计算机械夹爪驱动盘运动一次到八次轨迹曲线的位移、类速度、类加速度、类超加速度,仿真分析以及试验验证得出:1)二次以上多项旋转轨迹位移曲线具有平滑性;2)二次机械夹爪驱动盘实际夹取试剂瓶的运动过程比较平稳;3)机械夹爪驱动盘运动的平稳性与次数有关。

参考文献:

- [1] 付振山,于春玲,丁进,等. 弧面凸轮两旋转坐标联动机床非等价加工误差分析[J]. 机械设计,2022,39(4):105-109.
- [2] 吴志,宁萌,颜大千,等. 机械手设计及其运动分析[J]. 机械设计与研究,2022,38(2):97-100,119.
- [3] 朱毅然,余朝刚. 轨距调整器夹爪轻量化优化设计[J]. 机械设计与研究,2021,37(1):195-199.
- [4] 皮杰,柳军,徐磊,等. 三指柔性气动夹爪结构设计与实验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):93-101.
- [5] 刘艳,冯志杰. SSD 深度学习算法在机械手抓取系统中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(6):67-70.
- [6] 李泊,李成群. 取药机械手的设计及其运动分析与仿真[J]. 机床与液压,2019,47(17):71-75.
- [7] 巨刚,袁亮,刘小月. 凸轮机构高次多项式运动规律曲线研究及仿真分析[J]. 机械设计与制造,2015(5):107-109,114.
- [8] 杜方辉,盛小明. 由组合气缸驱动的机械手双爪差动平移夹持器[J]. 液压与气动,2012(8):35-37.
- [9] 王阶,金英子,唐智红. 一种气动肌肉机械手关节的机构设计与实现[J]. 机床与液压,2009,37(7):86-88,92.
- [10] 胡海霞,常博斌,王成军,等. 基于 TRIZ 理论的挤奶机器人末端执行器结构设计[J]. 机械制造与自动化,2022,51(5):159-162,166.

收稿日期:2022-10-27