

# 一种吹瓶机取送瓶机械手取瓶运动的改进设计

葛嵇南,冯志华

(苏州大学 机电工程学院,江苏 苏州 215021)

**摘要:**为了研究机械手在工作中的运动状态,提高机械手的工作效率,对一种吹瓶机机械手取送瓶的运动过程进行分析,在其取瓶靠近阶段设计出一条新的运动轨迹,并用五次多项式进行拟合。采用三次样条函数对接点及同步阶段轨迹进行拟合,保证了机械手速度与加速度的连续。模拟分析表明,改进后的机械手绝对速度变得平顺,绝对加速度也大幅度降低。

**关键词:**机械手;凸轮机构;轨迹改进;运动分析

**中图分类号:**TP241.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)02-0189-05

## Improved Design of Bottle Taking Movement of Bottle Blowing Machine

GE Jinan, FENG Zhihua

(School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

**Abstract:** In order to study the motion state of the manipulator during work and improve the efficiency of the manipulator, the movement of a bottle blowing machine manipulator to take and send bottles was analyzed. A new movement trajectory was designed in the near phase of bottle taking and the fifth-degree polynomial was used. The fitting and the trajectory of the synchronization point and the trajectory of the synchronization phase were fitted using a three-system spline function to ensure the continuous acceleration of the manipulator speed. According to the analysis of the simulation data, it is found that the absolute speed of the manipulator becomes smooth in the improved design scheme and absolute acceleration is greatly reduced as well.

**Keywords:** manipulator; cam mechanism; trajectory improvement; motion analysis

## 0 引言

我国塑料机械已成为机械制造业发展最快的行业之一,年需求量在不断地加大<sup>[1]</sup>。目前,高速 PET 吹瓶机已有了长足的进展。如克朗斯新型高速吹瓶机 Contiform 3 Speed,单模产能已达到 2 750 BPH,最高设备产能达到 82 500 BPH<sup>[2]</sup>。旋转式吹瓶机作为一种新型的高效吹瓶设备,逐步取代直线式吹瓶机,占据主要的市场份额,并逐步向吹—贴—灌—旋一体机发展<sup>[3]</sup>。

旋转式吹瓶机作为吹—贴—灌—旋一体机中最关键的一环,它的运行速度决定了机器整体的工作效率。凸轮作为旋转式吹瓶机取送瓶(坯)机构的关键传动零件,控制着机械手的运行轨迹。在设计机械手凸轮轮廓曲线时,文献[4]采用摆线规律和简谐规律作为取、送瓶凸轮的升程和回程规律,这使得凸轮曲线比较平滑,曲率波动较小。文献[5]通过三次插值函数对机械手运动轨迹进行了拟合,并配以试验表明吹瓶机的出瓶质量及效率得到了提高,减小了振动和噪声。

现有文献报道对机械手运动的设计偏简单,未考虑到每个阶段之间机械手加速度衔接的连续性,因此设计一条保证加速度连续的凸轮轮廓曲线是机械手运行稳定的最低保障。本文以实现取送瓶加速度的连续性为基本条件,提出了以五次多项式拟合靠近阶段运动规律,并利用三次样条函数对同步阶段进行拟合的设计方法,为实际设计制

造提供参考。

## 1 机械手运动参数方程的建立与改进

旋转式吹瓶机凸轮机构简图如图 1 所示, $OO_1$ 为主动盘,绕  $O$  点顺时针匀速转动; $O_1O_4$ 为摆动凸轮从动件,在主动盘的带动下沿着轨迹绕  $O_1$  做相对摆动运动; $O_1O_3$ 为直动凸轮从动件,在主动盘的带动下沿着轨迹做相对直线运动。

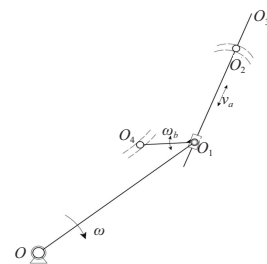


图 1 机械手各机构简化图

本文以机械手取瓶动作为例进行分析。将取瓶阶段运动轨迹分为三段:取瓶靠近阶段、取瓶同步阶段和取瓶退出阶段,并采用复数矢量法导出平面凸轮机构的轮廓参数计算式<sup>[6]</sup>。

### 1.1 机械手轨迹方程的建立

建立矢量模型如图 2 所示。以主动盘回转中心  $O$  为

原点,主动盘回转中心与模腔回转中心的连线  $OO'$  为极轴,逆时针方向为正方向建立极坐标系。

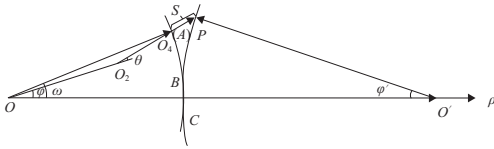


图2 机械手取瓶矢量图

为保证机械手能准确取到瓶子,在靠近阶段机械手直动手臂需指向模腔中心即点  $O_2$ 、 $O_4$ 、 $P$  在一条直线上。曲线  $S_{ABC}$  为机械手运行轨迹,  $A$  点为靠近阶段起点位置,  $B$  点为同步阶段起点位置,  $C$  点为同步阶段终点位置。吹瓶机主动盘回转半径为  $R$ , 模腔回转半径为  $r$ , 主动盘回转中心与模腔回转中心的圆心线长度为  $o$ 。凸轮盘的转速与模腔回转速度成正比, 比值为  $\eta$ , 由此可以推断出  $\varphi$  与  $\varphi'$  之间的比值也为  $\eta$ 。表1给出吹瓶机各部件的基本尺寸。

表1 吹瓶机的部件尺寸

$o/\text{mm}$	$R/\text{mm}$	$r/\text{mm}$	$\eta$
2 050	390	1 425	0.5

假设机械手  $OO_4$  的长度为  $\rho$ , 顺时针方向与极轴的夹角为  $\omega$ 。因此可得机械手运动轨迹矢量方程如下:

$$OO_4 + O_4P = OO' + O'P \quad (1)$$

转化为欧拉方程:

$$\rho e^{j\omega} = o + re^{j(\pi-\varphi')} - Se^{j(\varphi+\theta)} \quad (2)$$

其中:

$$OO_2 + O_2P = OO' + O'P \quad (3)$$

$$Re^{j\varphi} + le^{j(\varphi+\theta)} = o + re^{j(\pi-\varphi')} \quad (4)$$

可得  $\theta$  的函数如下:

$$\theta = \arctan \frac{r\sin(1+\eta)\varphi - o\sin\varphi}{o\cos\varphi - r\cos(1+\eta)\varphi - R} \quad (5)$$

整理后可得参数方程为:

$$\begin{cases} \rho = o\cos\omega - r\cos(\eta\varphi + \omega) - S\cos(\theta + \varphi - \omega) \\ \omega = \arctan \left[ \frac{r\sin\eta\varphi - S\sin(\theta + \varphi)}{o - r\cos\eta\varphi - S\cos(\theta + \varphi)} \right] \end{cases} \quad (6)$$

结合矢量图和参数方程可将这段运动分为两段, 第一段: 机械手在心与模腔之间的距离  $S$  在不断减小, 直至为 0, 这一阶段可称之为取瓶靠近阶段; 第二段: 机械手心与模腔完全重合, 机械手完全跟随模腔的轨迹运动, 这一阶段称之为取瓶同步阶段。

## 1.2 曲线规律的改进

分析上文得出的机械手运动轨迹参数方程,  $\rho$ 、 $\omega$ 、 $\theta$  都是关于  $\varphi$  的变量, 只有  $S$  的变化规律是不确定的, 因此需要设计出一种函数规律以保证机械手运动轨迹的平稳流畅。对于  $S$  的规律函数文献[4]采用摆线规律, 如式(7)所示。

$$S = S_0 \left[ \frac{\varphi_0 - \varphi}{\varphi_0 - \varphi_T} - \frac{1}{2\pi} \sin \left( 2\pi \frac{\varphi_0 - \varphi}{\varphi_0 - \varphi_T} \right) \right] \quad (7)$$

此规律在靠近阶段直动凸轮的加速度变化很大, 会对凸轮机构造成很大的冲击, 为减小控制机械手的直动凸轮最大加速度, 同时保证机械手运动轨迹在取瓶靠近阶段前后加速

度连续, 本文将高阶插补方法与可行的凸轮曲线动态改进模型相结合, 建立确定最优高阶运动参数的改进模型<sup>[7-8]</sup>。最终采用五次多项式运动规律对运动轨迹进行改进设计, 并根据机械手的实际运动规律设计出理想的边界条件。

本文根据吹瓶机实际工况设计出以下机械手运动规律: 在靠近阶段, 机械手在径向做减速运动; 机械手在到达夹取目标位置的时候预留一小段空隙, 此时径向速度和加速度都变为 0, 留一小段空隙是为在同步阶段能更好地进行速度和加速度匹配。如图3所示, 与常规设计运动轨迹曲线  $S_{A'BC'}$  相比, 改进后的运动轨迹  $S_{ABC}$  在取瓶同步时速度、加速度衔接得更顺畅平缓。

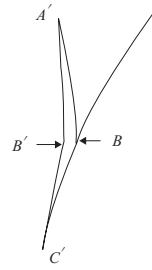


图3 轨迹改进前后对比示意图

设  $S$  关于  $\varphi$  的五次函数  $S(\varphi)$ , 如式(8)所示。将函数  $S(\varphi)$  带入  $\rho$  的参数方程, 因为  $S(\varphi)$  有 6 个未知系数, 因此需要设置 6 个边界条件: 始末位移、始末速度、始末加速度。

$$S(\varphi) = C_0 + C_1\varphi + C_2\varphi^2 + C_3\varphi^3 + C_4\varphi^4 + C_5\varphi^5 \quad (8)$$

始末位移直接采用现有的设计参数, 而在末尾位置时空缺一小段距离, 根据机械手偏置的误差距离, 设  $S_T = 0.5 \text{ mm}$ ; 选出合理的初始径向速度以及径向加速度。而终止径向速度和加速度是在设计运动轨迹时就已确定, 都为 0。机械手在靠近阶段的边界条件如表2所示。

表2 机械手靠近阶段边界条件

$\varphi_0/(\circ)$	$S_0/\text{mm}$	$\rho_{v0}/(\text{m/s})$	$\rho_{a0}/(\text{m/s}^2)$
12.5	30.0	1.0	-22.0
$\varphi_T/(\circ)$	$S_T/\text{mm}$	$\rho_{vT}/(\text{m/s})$	$\rho_{aT}/(\text{m/s}^2)$
6.5	0.5	0.0	0.0

为了保证高速运动的平稳性, 机械手运动轨迹曲线需要在靠近阶段与同步阶段结合点二阶导数连续。在实际加工中是选取曲线上的点, 然后再形成轮廓曲线。因此基于这样的实际情况, 本文提出一种新的规律曲线设计方法对原有规律进行改进, 方法如下。

机械手在抓取瓶子的实际工况中, 因其手指是由弹簧进行约束的, 在误差允许的情况下, 机械手在跟随阶段的运行轨迹可以略微有些偏差, 只需在整个过程中大体上跟着模腔运动。基于这种工况, 在设计机械手同步阶段中, 无需完全同步整个轨迹。因此利用三次样条插值函数的特性, 结合机械手运动轨迹的基本要求, 只要在原有的精确轨迹上取足够的点, 并进行拟合, 可以求出一条既在误差允许范围之内又能保证在衔接处速度、加速度平稳连续的规律曲线。

首先将同步阶段极坐标方程转化为直角坐标方程:

$$\begin{cases} x = \rho \cos \omega \\ y = \rho \sin \omega \end{cases} \quad (9)$$

将原有取瓶同步阶段运动轨迹划分为  $n$  个小区间,任取小区间  $[x_{i-1}, x_i]$ ,

$$s_i(x) = a_i + b_i x + c_i x^2 + d_i x^3, i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

其中待定系数是  $a_i, b_i, c_i, d_i$ , 共有  $4n$  个。

其次为保证在两阶段连接点处加速度连续, 因此采用第二类边界条件:  $S''_1(x_0) = M_0, S''_{n-1}(x_n) = M_n$ 。通过第二类边界条保证了衔接点处的加速度连续。

表 3 是对本文机械手进行的取点, 在机械手到达衔接位置时, 主动盘每转动  $1^\circ$  就在原轨迹上取 1 个点。

表 3 三次样条函数点集

$\varphi / (^\circ)$	$x / \text{mm}$	$y / \text{mm}$
6.5	626.80	80.71
5.5	626.29	68.36
4.5	626.10	55.95
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
0.5	625.01	6.22

第二类边界条件:

$$S''_1(x_0) = -0.75, S''_{n-1}(x_n) = -8447.67$$

综上可以求得机械手在同步阶段的三次样条拟合曲线。

## 2 建立机械手凸轮曲线参数方程

确定好机械手运动轨迹参数方程后, 可由轨迹方程反推出摆动凸轮和直动凸轮的的运动轨迹。将机械手凸轮结构进行简化后如图 4 所示, 凸轮结构与上文机械手运动轨迹在同一极坐标系里, 因此这里不再设置坐标系。图中  $OO_1$  为主动盘, 半径为  $R$ ;  $O_1O_2$  为摆动从动件, 长度为  $N$ ;  $O_1O_3$  为直动从动件, 长度为  $M$ , 与摆动从动件之间的夹角为  $\varepsilon$ , 与主动盘之间的夹角为  $\theta$ ;  $O_3O_4$  为机械手臂, 长度为  $m$ 。凸轮结构各部件尺寸如表 4 所示。

表 4 机械手凸轮机构的部件尺寸

$R / \text{mm}$	$m / \text{mm}$	$N / \text{mm}$	$\varepsilon / (^\circ)$
390	165	70	105

从图 4 中可以列出机械手的矢量方程:

$$OO_3 = OO_1 + O_1O_3 \quad (11)$$

转化为欧拉方程:

$$\rho e^{j\omega} = R e^{j\varphi} + l e^{j(\varphi+\theta)} \quad (12)$$

$$\begin{cases} I = R = \rho \cos(\omega - \varphi - \theta) \\ \theta = \arctan \left[ \frac{\rho \sin(\omega - \rho)}{\rho \cos(\omega - \rho) - R} \right] \end{cases} \quad (13)$$

摆动凸轮的轨迹方程为:

$$OO_4 = OO_1 + O_1O_4 \quad (14)$$

转化为欧拉方程:

$$R_B e^{j\omega} = R e^{j\varphi} + N e^{j(\varphi+\theta+\varepsilon)} \quad (15)$$

由此可得摆动凸轮的参数方程为:

$$\begin{cases} R_B = R \cos(\varphi - b) + N \cos(\varphi + \theta + \varepsilon - b) \\ b = \arctan \left[ \frac{R \sin \varphi + N \sin(\varphi + \theta + \varepsilon)}{R \cos \varphi + N \cos(\varphi + \theta + \varepsilon)} \right] \end{cases} \quad (16)$$

直动凸轮曲线方程:

$$OO_2 = OO_1 + O_1O_2 \quad (17)$$

转化为欧拉方程:

$$R_Z e^{j\omega} = R e^{j\varphi} + M e^{j(\varphi+\theta)} \quad (18)$$

其中  $M = l - m$ 。

由此可得直动凸轮的参数方程为:

$$\begin{cases} R_Z = R \cos(\varphi - \alpha) + M \cos(\varphi + \theta - \alpha) \\ \alpha = \arctan \left[ \frac{R \sin \varphi + M \sin(\varphi + \theta)}{R \cos \varphi + M \cos(\varphi + \theta)} \right] \end{cases} \quad (19)$$

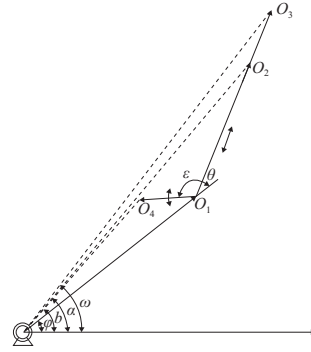


图 4 机械手与凸轮结构关系矢量图

## 3 改进设计结果分析

考虑到压力角与凸轮转角的关系<sup>[9]</sup>, 当压力角增到一定数值时, 由于摩擦阻力大于有效分力, 机构将发生自锁。有时机构虽然没有自锁, 但是过大的压力角会导致摩擦损耗增大, 传动效率低, 加剧零件的磨损。

图 5、图 6 为改进前后摆动凸轮和直动凸轮压力角随运动时间变化的曲线图。

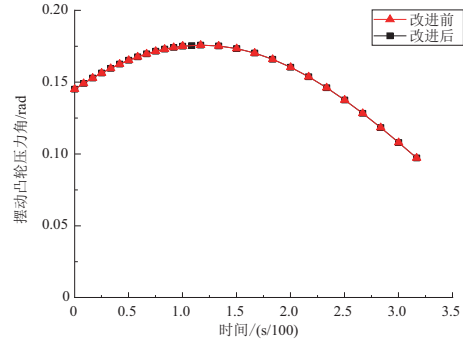


图 5 摆动凸轮改进前后压力角结果对比

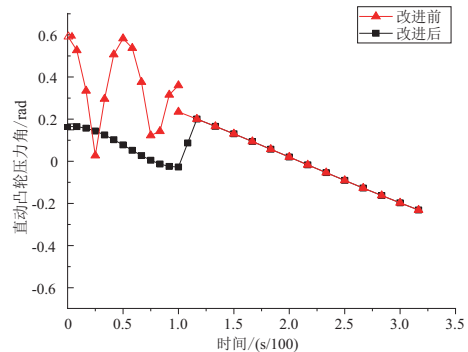


图 6 直动凸轮改进前后压力角结果对比

摆动凸轮的最大压力角为  $10^\circ$ , 根据表 5 给出的工程

推荐许用压力角<sup>[10]</sup>可知,是远小于45°,在同样的尺寸大小下,改进前后摆动凸轮的压力角并没有变化,是保持一致的。但是直动凸轮的压力角由之前的剧烈波变得连续平缓,同时改进前的最大压力角为35°,仅仅满足最低要求,而且在衔接点处还是断开的。改进后的直动凸轮压力角有了明显的改进,不仅最大压力角为13.5°,远小于所允许的最大压力角,而且在衔接点处压力角保持连续的。由图7可知与改进前的方案相比,摆动凸轮的相对速度并没有发生变化,这也可由推导出的公式得知。从图8中可以看出改进前直动凸轮的相对速度从3.7 m/s急剧降低到-3 m/s,然后再回到2.1 m/s,并且在衔接点处还存在速度断点,与之相比改进后的相对速度变化则比较平缓,没有突然变大或变小,而且在衔接点处速度连续。

表5 凸轮机构许用压力角值

锁合形式	运动形式	推程	回程
外力锁合	直动 摆动	$[\alpha] = 25^\circ \sim 35^\circ$ $[\alpha] = 35^\circ \sim 45^\circ$	$[\alpha'] = 70^\circ \sim 80^\circ$
几何形状锁合	直动 摆动	$[\alpha] = [\alpha'] = 25^\circ \sim 35^\circ$ $[\alpha] = [\alpha'] = 35^\circ \sim 45^\circ$	

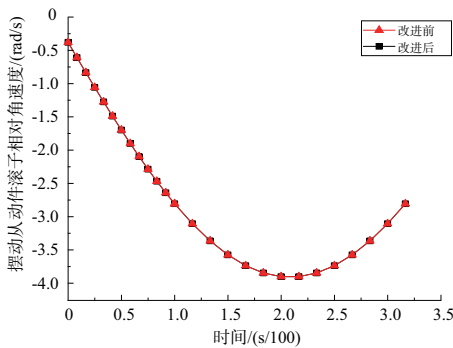


图7 摆动凸轮改进前后滚子相对角速度结果对比

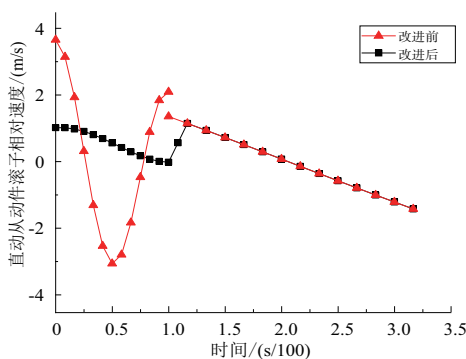


图8 直动凸轮改进前后滚子相对速度结果对比

图9为摆动凸轮改进前后滚子的相对角加速度图。从图中可以看出,改进前后的相对角加速度没有变化,这也符合推导出的公式。图10为改进前后的直动凸轮相对加速度对比图。改进前的加速度呈波浪型上下浮动,且幅度较大,最大加速度能达到2 000 m/s<sup>2</sup>,而改进后的相对加速度几乎呈一条直线,与同步阶段的相对加速度保持一致。

对机械手的参数方程 $(\rho, \omega)$ 进行求导,求出径向速

度、加速度和切向速度、加速度,如式(20)所示。

$$v_p = \frac{d\rho}{d\varphi}, v_\omega = \frac{d\omega}{d\varphi}, a_p = \frac{d^2\rho}{d\varphi^2}, a_\omega = \frac{d^2\omega}{d\varphi^2} \quad (20)$$

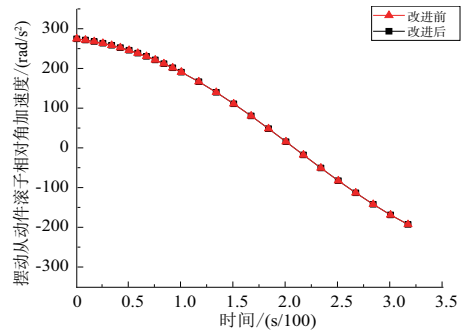


图9 摆动凸轮改进前后滚子相对角加速度结果对比

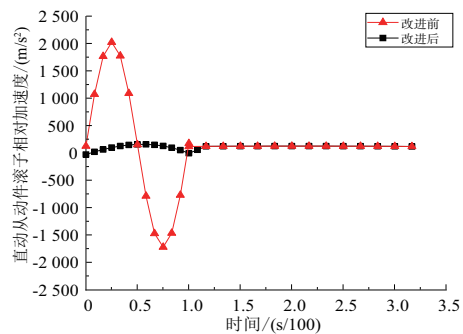


图10 直动凸轮改进前后滚子相对加速度结果对比

通过极坐标速度、加速度合成公式推导出机械手的绝对速度和加速度如式(21)、式(22)所示。

$$v^2 = v_p^2 + (\rho v_\omega)^2 \quad (21)$$

$$a^2 = (a_p - \rho v_\omega^2)^2 + (2v_p v_\omega + \rho a_\omega)^2 \quad (22)$$

由此可以分析得出机械手的速度、加速度随时间变化情况,如图11、图12所示。

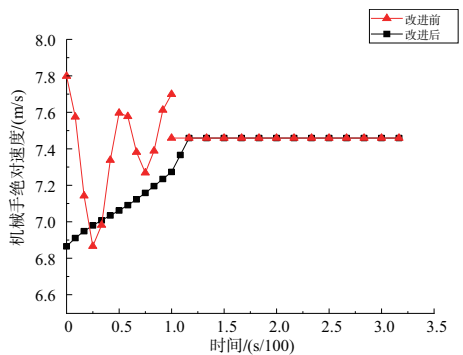


图11 机械手改进前后绝对速度结果对比

在同样的结构和工况下,改进前机械手的绝对速度上下波动逐渐变得平缓,而改进后的速度则是均匀变化从低到高直至达到平稳;改进前绝对加速度呈“M”型大幅波动,与之相比,改进后的绝对加速度则变得平缓并且与同步后的加速度基本保持一致。

## 4 结语

本文首次将五次多项式应用于取瓶靠近阶段,根据实

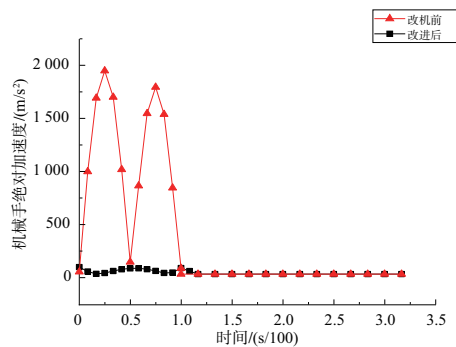


图 12 机械手改进前后绝对加速度结果对比

际工况设计出合理的边界条件,同时还将理想运动曲线与实际工况相结合,提出用三次样条函数对同步阶段运动曲线进行拟合。期望能够降低机械手在运动过程中的最大加速度,并为机械手设计提供理论与方法指导,具体结论如下:

1) 在取瓶靠近阶段将机械手径向运动设置为减速运动,同时在衔接点处不与理论点相重合,而是在误差允许范围内偏移一定距离,让机械手过渡得更平稳。

2) 通过设计计算出边界条件,并采用五次多项式对靠近过程的运动轨迹进行拟合,比原有设计采用的摆线规律相比整个运动过程中的速度、加速度都有大幅度降低,使得运动过程更稳定。

3) 对同步阶段的运动轨迹进行取点,使用三次样条函数进行拟合,在误差允许范围内不仅能保证机械手在同步过程中与模腔同步,还与靠近阶段改进设计方案相匹

配,使得衔接处速度、加速度更平稳。

#### 参考文献:

- [1] 郭洪武. 浅析机械手的应用与发展趋势[J]. 中国西部科技, 2012, 11(10): 3, 12.
- [2] 克朗斯. 克朗斯新型高速吹瓶机 Contiform 3 Speed[J]. 酒·饮料技术装备, 2019(2): 51.
- [3] 郭松旺. 全自动旋转式 PET 吹瓶机凸轮机构优化设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2006.
- [4] 胡安朋. 基于旋转式吹瓶机取、送瓶系统的组合凸轮参数化设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [5] 胡伟, 胡国清, 魏昕, 等. 吹瓶机中机械手凸轮曲线解析计算的研究[J]. 机械设计与制造, 2009(4): 183-185.
- [6] 葛正浩, 杨芙莲, 彭国勋, 等. 凸轮机构运动学研究综述[J]. 机械设计, 2001, 18(3): 4-5, 47.
- [7] YU J W, HUANG K F, LUO H, et al. Manipulate optimal high-order motion parameters to construct high-speed cam curve with optimized dynamic performance[J]. Applied Mathematics and Computation, 2020, 371: 124953.
- [8] XIA B Z, LIU X C, SHANG X, et al. Improving cam profile design optimization based on classical splines and dynamic model[J]. Journal of Central South University, 2017, 24(8): 1817-1825.
- [9] 杨久志. 根据许用压力角确定凸轮机构基本尺寸方法的探讨[J]. 安徽机电学院学报, 1996, 11(1): 49-52.
- [10] MEVSHA N V, PUNTUS A V. Determining the minimum size of cam mechanisms[J]. Russian Engineering Research, 2019, 39(1): 16-19.

收稿日期: 2020-02-17

(上接第 170 页)

综上,试验结果验证了清扫机械臂的实用性和稳定性,装置具有良好的清扫瓷套的能力。

## 5 结语

本文研制了一种 500 kV 瓷套清扫机械臂,该机械臂拥有高效的机械结构和灵活的控制系統,在南京电网的实践表明装置具有良好的清扫瓷套的能力,为以后的研究提供了重要指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 陈昊,徐晶冉,徐雯,等. 一种多功能变电检修测试平台的研制[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(5): 239-242.
- [2] ZHANG Z, CHEN H, WANG J T. Research on the policy of planned - maintenance period optimizing for distribution equipment based on reliability [C]//2012 China International Conference on Electricity Distribution. Shanghai, China: IEEE, 2012: 1-4.
- [3] HE J, GORUR R S. Flashover of insulators in a wet environment [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1038-1044.
- [4] 耿洽, 张建忠, 陈昊. 智能变电站保护装置自动测试系统分析与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 121-125.
- [5] 陈昊, 邓广静, 王玉荣, 等. 电抗器间隔断路器后置式接线所引起二次问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 122-126.

- [6] 张晋,汲胜昌,曹涛,等. 电力设备带电清扫技术的现状及展望[J]. 绝缘材料, 2009, 42(2): 63-66.
- [7] BYUN S H, CHO B H, PARK J Y, et al. Implementation of control system for insulator cleaning robot [C]// 2006 SICE - ICASE International Joint Conference: IEEE, 2007.
- [8] HU Y, CHEN J S. The research of the automatic washing - brushing robot of 500 kV DC insulator string [C]// Proceedings of ESMO '93. IEEE 6th International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live-Line Maintenance. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 1993: 411-424.
- [9] 李浩, 崔国强. 直流换流站绝缘子除污机器人研制与应用[J]. 山东电力技术, 2017, 44(2): 11-14, 19.
- [10] 赵树海. 绝缘子风力清扫环的研究[J]. 中国电力, 2003, 36(10): 85-86.
- [11] 汤君茂. 带电清扫机器人液压自动调平系统的设计与研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [12] 孔祚, 杨汝清, 翁新华. 超高压带电清扫机器人控制系统设计[J]. 机电一体化, 2009, 15(11): 29-32, 41.
- [13] 江凯, 杨佳华. 电力系统污闪分析及其清扫机械手的设计[J]. 机电工程, 2012, 29(10): 1183-1186.
- [14] 张涛, 毕睿华, 张云翔, 等. 基于化学清洗剂与气动清洗机的绝缘子带电清扫技术的研究[J]. 四川电力技术, 2015, 38(3): 12-14, 22.
- [15] 张应和. 捣固车方向水平检测装置结构分析与设计[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(3): 223-225.

收稿日期: 2019-12-20