

## 多工位送料机械手的机构设计及速度规划

常孝聪, 曹春平

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了实现动力电池壳冲压生产线的自动化生产, 在多工位拉伸压力机的基础上设计了送料机械手的机械结构, 该机械手采用桁架式结构, 通过  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  这 3 个方向的自由度上的直线运动模块来实现夹紧-张开、升举-下降和移送-回退 3 个动作, 规划了机械手的运动周期, 并在正弦速度规划算法的基础上设计了一种加加速度连续的 4 阶 S 型曲线速度控制算法, 避免了机械手在运动中发生过大冲击。最终建立了机械手刚柔耦合动力学模型, 通过对机械手刚柔耦合运动特性分析, 研究了速度优化算法对机械手运动精度的影响, 研究结果表明, 在速度优化算法控制下, 运动振幅明显减小, 满足设计要求。

**关键词:** 动力电池壳; 多工位送料机械手; 桁架式结构; 速度控制算法; 刚柔耦合

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.03.022

中图分类号: TG315.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 03-0170-08

## Mechanism design and speed planning on multi-station feeding manipulator

Chang Xiaocong, Cao Chunping

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to realize the automatic production of power battery shell stamping production line, the mechanical structure of feeding manipulator was designed on the basis of multi-station stretching press, which adept a truss structure to realize the three movements of clamping-opening, lifting-falling and transferring-returning by the linear motion module in three degrees of freedom of  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  directions, and the motion cycle of manipulator was planned. Then, based on the sinusoidal velocity planning algorithm, a four-order S-shaped curve speed control algorithm with continuous jerk was designed to avoid the excessive impact of manipulator in motion. Finally, the rigid-flexible coupling dynamic model of manipulator was established, and the influence of speed optimization algorithm on the motion accuracy of manipulator was researched by analyzing the rigid-flexible coupling motion characteristics of manipulator. The research results show that under the control of speed optimization algorithm, the amplitude of motion is obviously reduced, which meets the design requirements.

**Key words:** power battery shell; multi-station feeding manipulator; truss structure; speed control algorithm; rigid-flexible coupling

随着国家产业升级转型的逐步深化, 我国新能源

技术显著提升, 企业竞争力大幅度增强, 汽车产业进入一个新的发展阶段。多工位冲压自动化生产在汽车生产中占有举足轻重的作用, 相比于普通冲压生产, 其具有高效性、高经济性、高安全性等显著特点。

多工位送料机械手可以实现零部件的抓取、定位等操作, 广泛应用于自动化生产线等工业生产中,

收稿日期: 2023-07-17; 修订日期: 2023-10-19

基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金 (BA2021067)

作者简介: 常孝聪 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: changxcie@163.com

通信作者: 曹春平 (1976-), 女, 博士, 副教授

E-mail: ccp\_alice@163.com

Li M, Wang J X, Xiao K, et al. Digital robust sliding mode control of robot manipulator with dynamic friction block compensation using fuzzy RBF neural network [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23 (23): 2792-2796.

[17] 刘艳雄, 王根聚, 华林, 等. 采用自适应滑模变结构控制的精冲机双驱动协调控制系统 [J]. 中国机械工程, 2021, 32 (18): 2189-2196.

Liu Y X, Wang G J, Hua L, et al. Double-drive coordinated control systems of fine stamping machines based on adaptive sliding mode variable structure control [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32 (18): 2189-2196.

[18] 陈俊侨, 汪晓军, 崔臣君, 等. 模糊自抗扰的双电机同步驱动电

动缸起竖策略 [J]. 现代防御技术, 2022, 50 (3): 119-126.

Chen J Q, Wang X J, Cui C J, et al. Research on erecting strategy of double motor synchronous drive electric cylinder based on fuzzy active disturbance rejection [J]. Modern Defense Technology, 2022, 50 (3): 119-126.

[19] Li X, Zhou W L, Jia D, et al. A decoupling synchronous control method of two motors for large optical telescope [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69 (12): 13405-13416.

[20] Li T C, Kuo C C, Yang C Y, et al. Influence of motion curve errors of direct-drive servo press on stamping properties [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120: 4461-4476.

它可以代替人工操作,提高生产效率和精度、降低生产成本<sup>[1]</sup>。陈健等<sup>[2]</sup>基于 EtherCAT 设计了三轴送料机械手,提高了机械手的效率与精度。黄伟等<sup>[3]</sup>与赵文凯<sup>[4]</sup>设计了机械手 B 样条曲线的时间最短优化模型,避免了机械手工作中的干涉,提高了工作效率。汪永明等<sup>[5]</sup>建立了自动化送料系统的动力学模型,并将驱动函数进行约束,从而求解出各机构的受力和力矩变化曲线。李健洪等<sup>[6]</sup>通过建立刚柔耦合动力学模型,分析机械手刚柔耦合运动特性,研究了关键零部件对末端执行器运动精度的影响。

目前,工业领域常用的速度控制算法主要有梯形速度控制算法、指数型速度控制算法、三角函数控制算法以及 S 型速度控制算法。但是,由于上述控制算法的加速度或加加速度存在阶跃变化,会引起系统振动,限制了机器人系统的柔性,难以达到预期的位置精度<sup>[7]</sup>。在满足多工位冲压生产线的送料要求下,本文以桁架式机械手为研究对象,完成了机械手的结构设计,对机械手送料周期进行了合理的安排,并对正弦速度控制算法进行了优化,保证了曲线的加加速度连续,约束了机械手的最大运行速度与最大加速度,并且通过建立刚柔耦合动力学模型验证了速度规划的合理性。

## 1 机械手结构与周期规划

### 1.1 多工位冲压送料机械手机械结构

本文研究的送料机械手适用于某款多工位拉伸压力机,主要应用于汽车动力电池壳零件的冲压加工,如图 1 所示。根据实际生产中的产品特性,将加工工艺流程分为冲孔、粗拉(第 1 次拉深)、精拉(第 2 次拉深)和切边 4 个工序,通过机械手上安装的 4 个机械夹爪完成工件夹紧-张开动作。

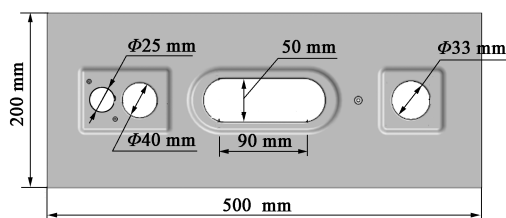


图 1 动力电池壳零件图

Fig. 1 Part drawing of power battery shell

由于送料机械手的速度高、快速往复运动、精度高等特点,运动模块均采用伺服电机驱动。3 个驱动机构均包括伺服驱动电机、减速器、联轴器、传动齿轮和驱动安装板。 $X$  方向上的往复运动采用

齿轮齿条传动,双直线导轨导向。 $Z$  方向的夹紧-张开运动采用双齿轮-单齿轮的传动方式,可保证机械手  $Z$  方向运动时可以承受较大的负载,导向装置采用双直线导轨。 $Y$  方向的升降装置采用每边设置两根丝杠以起到  $Y$  方向的传动与支撑作用,而且每边布置有两根导柱。为了保证机械手在  $Y$  方向不运动时丝杠螺母不发生移动, $Y$  方向的驱动电机设置有抱闸装置,由此保证机械手工作的安全性。将 3 个模块装配完成后的机械手总体结构如图 2 所示。机械手布置于立柱之间的工作台上,负责完成工件的移送,具体位置如图 3 所示。

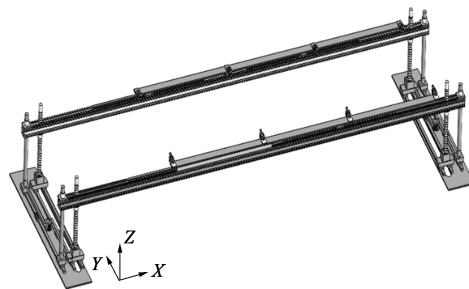


图 2 机械手总体机构图

Fig. 2 Overall mechanism diagram of manipulator

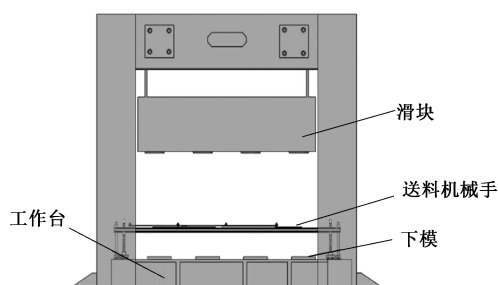


图 3 机械手安装位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of installation position for manipulator

### 1.2 多工位送料机械手运动周期规划

送料机械手具有 3 个自由度,通过  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  这 3 个方向的运动叠加实现工件在压力机模腔中的移送。机械手具体运动过程包括夹紧、举起、移送、下降、张开、回退,整个过程全部按照直线运动实现,机械手运动示意图如图 4 所示。

机械手在工作时需要与压力机滑块保持联动。这就需要结合压力机滑块的运动规律对机械手的运动周期进行分析研究。本文选择的研究对象为偏置曲柄式压力机,由于其制造和安装简便、易于维护,以及具有急回特性等优点<sup>[8]</sup>,被广泛应用于金属板材冲压拉深加工,其机构简图如图 5 所示,主要设计参数如表 1 所示。

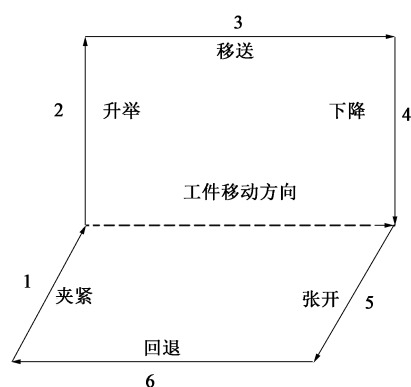


图 4 机械手运动示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of manipulator movement

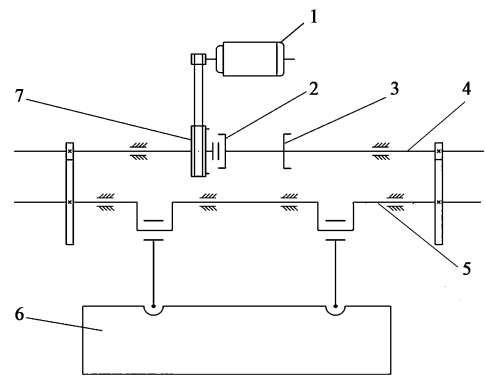


图 5 压力机传动机构简图  
1. 电动机 2. 离合器 3. 制动器 4. 轴 5. 双曲轴 6. 带轮 7. 滑块  
Fig. 5 Schematic diagram of transmission mechanism for press

表 1 压力机主要设计参数  
Table 1 Main design parameters of press

型号	公称力/kN	行程/mm	行程次数/(次·min <sup>-1</sup> )	调节量/mm	下模板尺寸/(mm×mm)	下模板厚度/mm	主电机功率/kW	工位
JMP36-315	3150	500	10~25	120	2800×1200	250	45	8

根据设计需要，现以压力机滑块的运动周期为基准，规划送料机械手的送料周期。为了尽可能避免机械手在升举时与滑块下降发生碰撞，需设定机械手先于压力机运动。实际生产频率为 20 件·min<sup>-1</sup>，压力机运动一个周期为 3 s。为了保证机械手运动的准确性，机械手在夹紧与升举、下降与张开、张开与回退、回退与夹紧之间设置有 6° 的动作暂停。具体送料周期规划如图 6 所示。

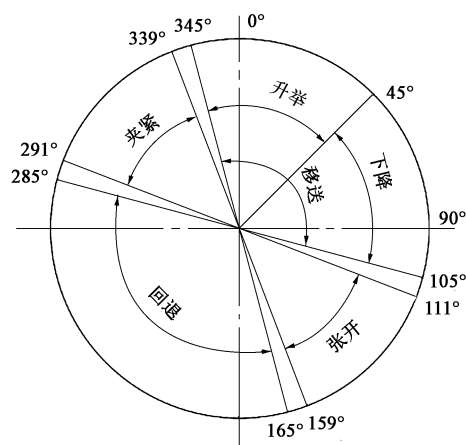


图 6 机械手运动周期图  
Fig. 6 Movement cycle diagram of manipulator

## 2 机械手速度规划

为了使机械手在高速运动过程中不发生巨大振

动，需要对 3 个方向的直线运动进行速度规划。机械手速度控制方案应满足以下基本条件：（1）整个过程的速度与加速度变化曲线应平稳连续；（2）启停阶段加速度必须为 0；（3）运动速度与加速度不超出允许的最大值<sup>[9]</sup>。钟前进等<sup>[10]</sup>利用三角函数在梯形速度轨迹上拟合出一条如图 7 所示的新型 S 形曲线，该算法容易实现且能够输出连续的速度与加速度。但是，其加加速度并不连续，在高速运动中仍存在柔性冲击，不利于机械手的高精度运动。

综合考虑了运动平稳性与算法实现难度，本文在正弦加减速控制方案的基础上设计了一种加加速度连续且起止端无突变的 4 阶 S 型速度控制算法，其中，加速度曲线由余弦函数和直线构成，加加速度曲线由正弦函数构成。在图 7 原有的 5 段速度变化的基础上，增加匀变速阶段，优化后的速度控制具有 7 个阶段。这样既可以保证加加速度为一条连续的曲线，又可以确保加加速度不会过大。图 8 为速度控制算法全过程的位移、速度、加速度和加加速度的变化曲线，其中  $t_1 \sim t_7$  为每个阶段的运动时间。

### 2.1 机械手速度规划曲线构造

整个运动过程包括加加速、匀加速、减加速、匀速、加减速、匀减速和减减速 7 个阶段，每个阶段的运动时间为  $t_i (i=1, \dots, 7)$ ，最大速度为  $V_{\max}$ ，最大加速度为  $A_{\max}$ ，设定位移为  $L$ ，运动总时间为  $t_m$ 。整个过程的运动方程如下。

（1）当  $0 \leq t < t_1$  时：

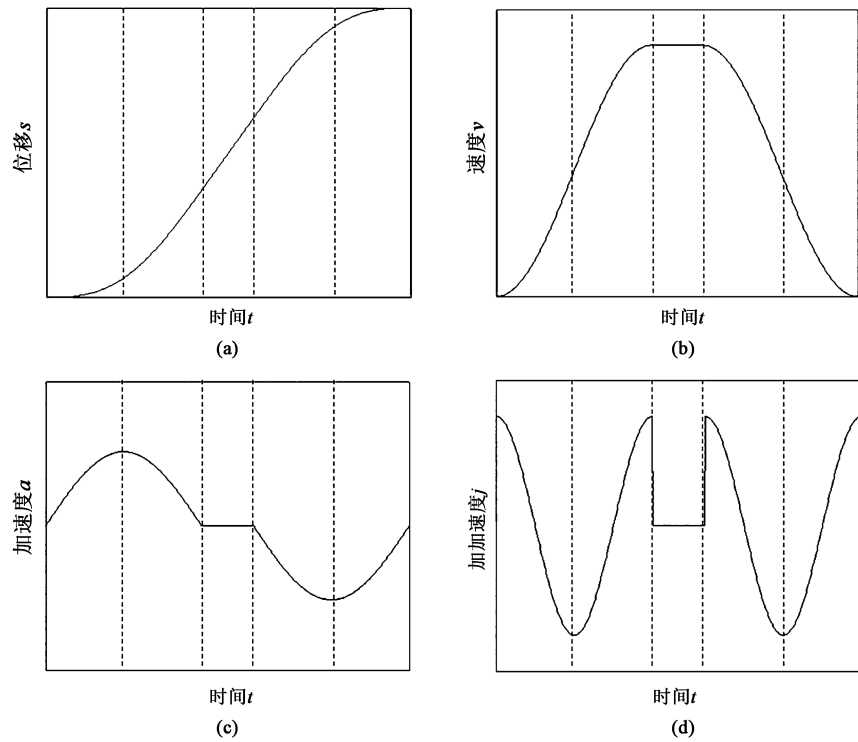


图7 S形速度规划曲线

(a) 位移 (b) 速度 (c) 加速度 (d) 加加速度

Fig. 7 S-shaped speed planning curves

(a) Displacement (b) Velocity (c) Acceleration (d) Jerk

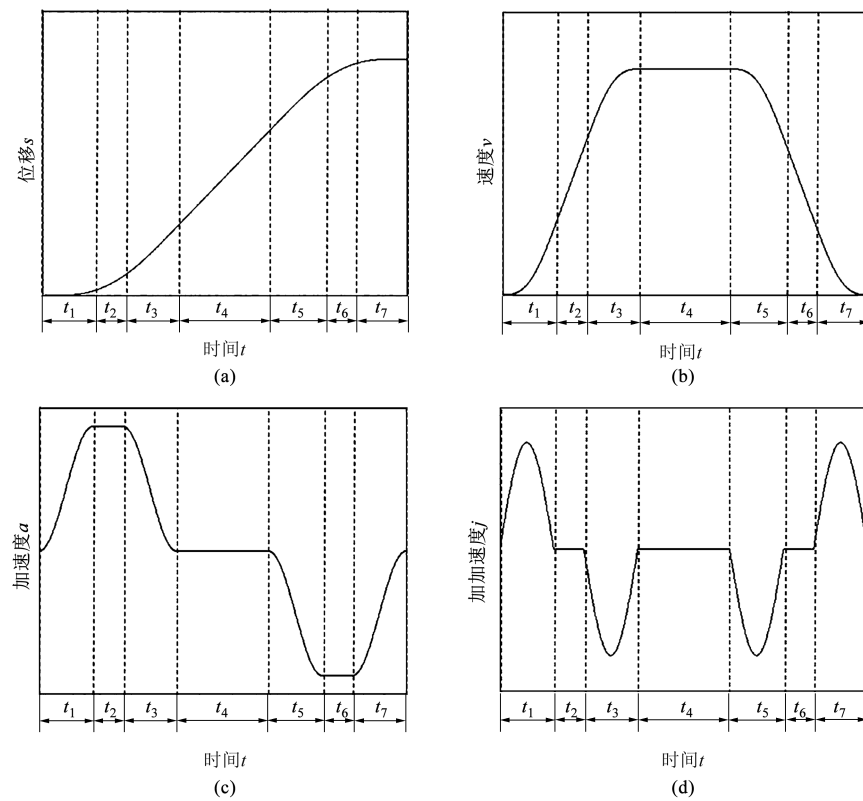


图8 加加速度连续的速度规划曲线

(a) 位移 (b) 速度 (c) 加速度 (d) 加加速度

Fig. 8 Speed planning curves with continuous jerk

(a) Displacement (b) Velocity (c) Acceleration (d) Jerk

$$\begin{cases} j = \frac{A_{\max} \pi}{2t_1} \cdot \sin \frac{t\pi}{t_1} \\ a = -\frac{A_{\max}}{2} \cdot \cos \frac{t\pi}{t_1} + \frac{A_{\max}}{2} \\ v = -\frac{A_{\max} t_1}{2\pi} \cdot \sin \frac{t\pi}{t_1} + \frac{A_{\max} t}{2} \end{cases} \quad (1)$$

(2) 当  $t_1 \leq t < t_1 + t_2$  时:

$$\begin{cases} j = 0 \\ a = A_{\max} \\ v = A_{\max} t - \frac{A_{\max} t_1}{2} \end{cases} \quad (2)$$

(3) 当  $t_1 + t_2 \leq t < t_1 + t_2 + t_3$  时:

$$\begin{cases} j = -\frac{A_{\max} \pi}{2t_3} \cdot \sin \frac{(t - t_1 - t_2)\pi}{t_3} \\ a = \frac{A_{\max}}{2} \cdot \cos \frac{(t - t_1 - t_2)\pi}{t_3} + \frac{A_{\max}}{2} \\ v = \frac{A_{\max} t_3}{2\pi} \cdot \sin \frac{(t - t_1 - t_2)\pi}{t_3} + \frac{A_{\max}(t + t_2)}{2} \end{cases} \quad (3)$$

(4) 当  $t_1 + t_2 + t_3 \leq t < t_1 + t_2 + t_3 + t_4$  时:

$$\begin{cases} j = 0 \\ a = 0 \\ v = \frac{A_{\max}(t_1 + 2t_2 + t_3)}{2} \end{cases} \quad (4)$$

(5) 当  $t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \leq t < t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$  时:

$$\begin{cases} j = -\frac{A_{\max} \pi}{2t_5} \cdot \sin \frac{(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)\pi}{t_5} \\ a = \frac{A_{\max}}{2} \cdot \cos \frac{(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)\pi}{t_5} + \frac{A_{\max}}{2} \\ v = \frac{A_{\max} t_5}{2\pi} \cdot \sin \frac{(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)\pi}{t_5} + \frac{A_{\max}(t + t_4)}{2} \end{cases} \quad (5)$$

(6) 当  $t_m - t_6 - t_7 \leq t < t_m - t_7$  时:

$$\begin{cases} j = 0 \\ a = 0 \\ v = -A_{\max} t + \frac{A_{\max}}{2}(t_m - t_7) \end{cases} \quad (6)$$

(7) 当  $t_m - t_7 \leq t < t_m$  时:

$$\begin{cases} j = \frac{A_{\max} \pi}{2t_7} \cdot \sin \frac{(t - t_m - t_7)\pi}{t_7} \\ a = -\frac{A_{\max}}{2} \cdot \cos \frac{(t - t_m - t_7)\pi}{t_7} - \frac{A_{\max}}{2} \\ v = -\frac{A_{\max} t_7}{2\pi} \cdot \sin \frac{(t - t_m - t_7)\pi}{t_7} - \frac{A_{\max} t}{2} + \frac{A_{\max} t_m}{2} \end{cases} \quad (7)$$

由图 8 和式 (1)~式 (7) 可知, 加速与减速阶段的  $a$  和  $j$  对称, 加加速与加减速阶段  $a$  和  $j$  对称, 因此, 可得到以下时间关系:

$$t_1 = t_3 = t_5 = t_7 = t_m - \frac{L}{V_{\max}} - \frac{V_{\max}}{A_{\max}} \quad (8)$$

$$t_2 = t_6 = \frac{2V_{\max}}{A_{\max}} - t_m + \frac{L}{V_{\max}} \quad (9)$$

$$t_4 = \frac{2L}{V_{\max}} - t_m \quad (10)$$

## 2.2 机械手速度控制算法实现

针对机械手实际运动过程中存在全程无匀速或者无匀变速的情况, 本文提出一种根据各阶段运动时间判断的时间适配法。首先, 将设定位移  $L$ 、运动总时间  $t_m$ 、最大加速度  $A_{\max}$  和最大速度  $V_{\max}$  代入式 (8)~式 (10), 计算求解各阶段时间  $t_i$ , 再通过  $t_2$  和  $t_4$  来判断是否存在匀速和匀变速阶段, 具体判别过程如下。

(1) 若  $t_4 > 0$  且  $t_2 > 0$ , 表明存在匀速和匀变速阶段。整个过程运动规律如式 (1)~式 (7) 所示。

(2) 若  $t_4 \leq 0$  且  $t_2 > 0$ , 表明不存在匀速阶段, 存在匀变速阶段, 且实际运动的最大速度小于  $V_{\max}$ 。此时, 实际运动过程中的最大速度  $V'_{\max}$  为:

$$V'_{\max} = \frac{2L}{t_m} \quad (11)$$

令  $V_{\max} = V'_{\max}$ , 代入式 (8)~式 (10) 计算出  $t_1 \sim t_7$ 。

(3) 若  $t_4 > 0$  且  $t_2 \leq 0$ , 表明不存在匀变速阶段, 存在匀速阶段, 且实际运动的最大加速度小于  $A_{\max}$ 。此时, 实际运动过程中的最大加速度  $A'_{\max}$  为:

$$A'_{\max} = \frac{8L}{t_m^2} \quad (12)$$

令  $A_{\max} = A'_{\max}$ , 代入式 (8)~式 (10) 计算出  $t_1 \sim t_7$ 。

(4) 若  $t_4 \leq 0$  且  $t_2 \leq 0$ , 表明不存在匀变速阶段, 也不存在匀速阶段, 且实际运动的最大加速度和最大速度均小于给定值  $A_{\max}$  和  $V_{\max}$ 。此时, 实际运动过程中的最大加速度  $A''_{\max}$  和最大速度  $V''_{\max}$  为:

$$A''_{\max} = A'_{\max} = \frac{8L}{t_m^2} \quad (13)$$

$$V''_{\max} = V'_{\max} = \frac{2L}{t_m} \quad (14)$$

令  $A_{\max} = A''_{\max}$ ,  $V_{\max} = V''_{\max}$ , 代入式 (8)~式 (10) 计算出  $t_1 \sim t_7$ 。



### 2.3 速度控制算法仿真结果分析

按照式(1)~式(14),在MATLAB软件中编写相应的算法程序,对速度规划进行验证。先设定规划系统参数  $A_{\max} = 6000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ ,  $V_{\max} =$

$1600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $L = 1000 \text{ mm}$ ,  $t_m = 1 \text{ s}$ , 得到如图9所示的速度规划曲线,可以看到,在此速度规划下,速度、加速度与加加速度曲线均连续,未出现突变。

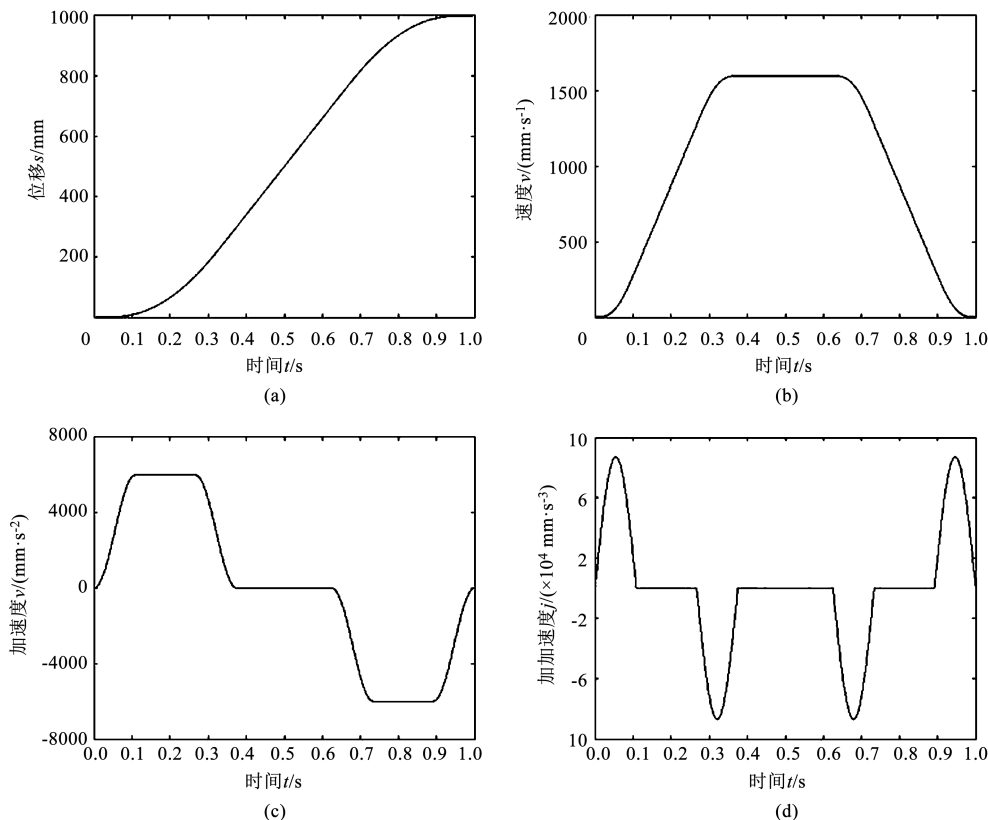


图9 加加速度连续的速度规划曲线实例图

(a) 位移 (b) 速度 (c) 加速度 (d) 加加速度

Fig. 9 Example diagrams of speed planning curves with continuous jerk

(a) Displacement (b) Velocity (c) Acceleration (d) Jerk

## 3 机械手刚柔耦合模型仿真分析

机械手在高速运动下由于主体桁架等刚度较小,会产生弹性变形,因此,在纯刚体模型下研究动态特性得到的结果不够准确。本文建立了刚柔耦合多体动力学模型,将桁架铝材、导柱以及丝杠柔性化,并保持其他零件的刚体特性<sup>[11]</sup>,最大程度上模拟了机械手的实际工作状况,为验证速度规划对机械手振动冲击的影响提供了有效的方法。

### 3.1 机械手刚柔耦合模型建立

由于ADAMS建立柔性体十分复杂,因此,采用有限元软件将关键零部件进行网格化处理。具体操作如下:

(1) 将零部件的三维模型导入ANSYS中,设置材料属性;

- (2) 对零部件进行虚拟切割和网格划分;
- (3) 在各关节连接点设置远程点,创建刚性区域;
- (4) 求解得到“MNF”文件;
- (5) 将生成的“MNF”文件导入Adams中替换刚性体,进行仿真分析,得到的刚柔耦合仿真模型如图10所示。



图10 机械手刚柔耦合模型

Fig. 10 Rigid-flexible coupling model of manipulator

### 3.2 验证速度对刚柔耦合模型的影响

为了简化模型,机械手横杆上的负载由等质量

块代替。结合上述分析的速度控制曲线,利用 IF 函数编写驱动函数,进行刚柔耦合模型仿真分析,在机械手末端建立标记点进行数据测量。设置最大速度为  $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,分别对优化前后算法进行仿真分析,得到如图 11 所示的振幅图。可以看到,在加加速度连续的速度控制下,机械手振幅减少了 2 mm 左右,优化设计有效。

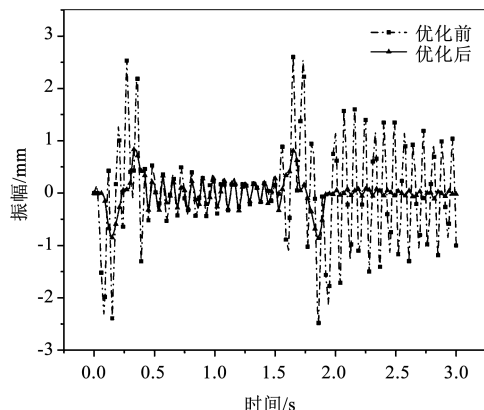


图 11 优化前后振幅曲线

Fig. 11 Amplitude curves before and after optimization

利用加加速度连续的速度控制算法,设置最大速度分别为  $1600$ 、 $1800$  和  $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的 3 组仿真分析<sup>[12]</sup>,得到如图 12 所示的振幅图。可以看到,移送阶段振幅变化不大,回退阶段速度越大振幅越小。

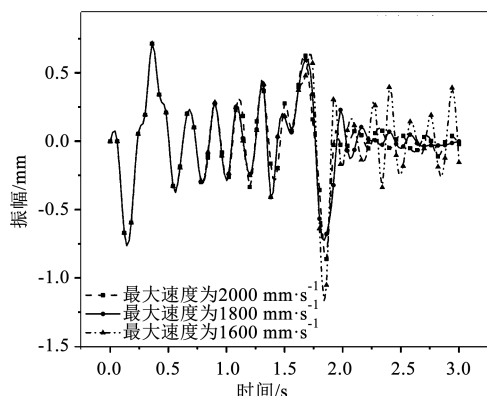


图 12 不同速度控制曲线的振幅图

Fig. 12 Amplitude diagram of different speed control curves

### 3.3 驱动电机主要参数计算

本文研究的送料机械手均为伺服电机经过减速器减速后,由齿轮齿条或者丝杠螺母传动,将电机的旋转运动转化为直线运动。下面以机械手 Y 轴为例进行电机选型计算。

当机械手在 Y 方向上做平移运动时,需要承受板料与自身的负载,其运动所需最大功率  $P_{\max}$  为:

$$P_{\max} = \frac{F \cdot V_{\max}}{\eta} \quad (15)$$

式中:  $F$  为惯性力,  $F = m \cdot A_{\max}$ ;  $m$  为质量;  $\eta$  为机械效率。

根据以上分析,机械手的最大速度为  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大加速度为  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,机械手加板料质量大约为  $120 \text{ kg}$ ,取机械效率为  $0.9$ 。代入求得电机所需最大功率  $P_{\max} = 1.6 \text{ kW}$ 。

选定 Y 轴电机额定转速  $n$  为  $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,电机所需最大负载转矩  $T_{\max}$  为:

$$T_{\max} = \frac{9550 \cdot P_{\max}}{n} \quad (16)$$

将数据代入求得,机械手所需最大负载转矩  $T_{\max} = 5.09 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

因此,在对 Y 轴电机进行选型时,应要求电机的额定功率大于  $1.6 \text{ kW}$ ,额定转矩大于  $5.09 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

## 4 结语

本文从电池壳的实际生产要求出发,设计了机械手结构,对机械手运动周期及速度进行了规划,并在正弦速度规划算法的基础上设计了一种加加速度连续的 4 阶 S 型曲线速度控制算法,保证了机械手工作的运动平稳,避免了因为速度突变和加速度突变引起的过大冲击。最后,利用 ADAMS 建立了刚柔耦合模型,通过分析 3 组最大速度下的振幅,得出机械手最大速度为  $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时比较合适,验证了该优化算法对减少机械手的振动效果明显,优化后振幅不超过  $1 \text{ mm}$ ,达到了设计要求,并且对电机所需最大功率与最大负载转矩进行了计算,为后续电机选型提供了参考。

### 参考文献:

- [1] Zhang W W. Modeling and motion simulation of a stamping manipulator [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1885: 042010.
- [2] 陈健,史政,黄伟,等. 基于 EtherCAT 的三次元高速多工位送料机械手控制系统设计与实现 [J]. 机床与液压, 2016, 44 (5): 127-130, 134.  
Chen J, Shi Z, Huang W, et al. Design and implementation of three-dimensional high feeding manipulator for multistage transfer control system based on EtherCAT [J]. Machine Tools & Hydraulic, 2016, 44 (5): 127-130, 134.
- [3] 黄伟,杨亚威,李梦群,等. 三次元送料机构干涉曲线设计与研究 [J]. 制造业自动化, 2014, 36 (18): 122-125, 131.  
Huang W, Yang Y W, Li M Q, et al. Three-dimensional curve

- design and research feed mechanism interference [J]. Manufacturing Automation, 2014, 36 (18): 122-125, 131.
- [4] 赵文凯. 三坐标多工位伺服送料系统设计与分析 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- Zhao W K, Design and Analysis of Three-coordinate Multi-station Servo Feeding System [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [5] 汪永明, 李偲, 胡继涛, 等. 多工位冲压自动送料系统运动规划仿真及实验验证 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 167-174.
- Wang Y M, Li W, Hu J T, et al. Simulation and experimental verification on motion planning for multi-station stamping automatic feeding system [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 167-174.
- [6] 李健洪, 马平, 刘杰. 上料桁架机械手刚柔耦合运动特性研究 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (23): 11-16.
- Li J H, Ma P, Liu J. Study on rigid-flex coupling kinetic characteristics of loading material truss manipulator [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47 (23): 11-16.
- [7] Lu S, Li Y M. Minimum-jerk trajectory planning of a 3-DOF translational parallel manipulator [A]. ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference [C]. Boston, 2015.
- [8] 杨莉, 赵乾胜, 秦泗吉, 等. 偏置结构曲柄连杆滑块机构压力机设计 [J]. 锻压装备与制造技术, 2017, 52 (1): 28-31.
- Yang L, Zhao Q S, Qin S J, et al. Design of slider-crank mechanism press with offset configuration [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2017, 52 (1): 28-31.
- [9] 李志杰, 蔡力钢, 刘志峰. 加加速度连续的 S 型加减速规划算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (5): 1192-1201.
- Li Z J, Cai L G, Liu Z F. S type acceleration & deceleration fast planning algorithm with continuous jerk [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25 (5): 1192-1201.
- [10] 钟前进, 王科, 丁信忠. 一种新型 S 加减速算法研究 [J]. 电气传动, 2019, 49 (6): 8-12, 37.
- Zhong Q J, Wang K, Ding X Z. Research on a new type S acceleration/deceleration algorithm [J]. Electric Drive, 2019, 49 (6): 8-12, 37.
- [11] 陈威. 桁架机器人可靠性分析及刚柔耦合动态特性研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- Chen W. Reliability Analysis and Research on Rigid-flexible Coupling Dynamic Characteristics of Truss Robot [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [12] 丁鑫, 张锁怀, 祝梦洁. 不同速度控制方式对桁架机器人动态冲击的影响 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (4): 146-150.
- Ding X, Zhang S H, Zhu M J. Influence of different speed curves on dynamic impact of truss robots [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48 (4): 146-150.

