

装备与成套技术

多工位冲压自动送料系统运动规划仿真及实验验证

汪永明, 李 偲, 胡继涛, 谈莉斌, 董书豪

(安徽工业大学 机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 基于销合链链板多工位冲压自动化加工平台, 对其自动送料系统的运动可靠性展开研究。首先, 依据实际工况, 对自动送料系统的动作需求进行分析, 并完成各运动部件的运动规划及动作时序的划分。然后, 基于 ADAMS 软件建立自动送料系统的仿真模型, 设置好仿真参数和各运动的驱动约束函数, 通过运动仿真获得各构件的位移、受力和力矩的变化曲线; 对自动送料系统的末端执行机构的水平、竖直方向的速度与加速度进行分析。最后, 在完成控制系统设计的基础上, 搭建了销合链链板多工位冲压自动化加工平台样机, 并进行实验验证。实验结果表明: 销合链链板多工位自动冲压的生产效率可以达到 $6\sim 7$ 件 $\cdot \text{min}^{-1}$, 满足销合链链板生产节拍 ≤ 10 s/件的要求。

关键词: 多工位冲压; 自动送料系统; 运动规划; 自动化加工; 销合链链板

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.025

中图分类号: TP241.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 05-0167-08

Simulation and experimental verification on motion planning for multi-station stamping automatic feeding system

Wang Yongming, Li Wei, Hu Jitao, Tan Libin, Dong Shuhao

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

Abstract: Based on the multi-station stamping automation processing platform of pin-joint chain plate, the movement reliability of its automatic feeding system was studied. First of all, according to the actual working conditions, the motion requirements of the automatic feeding system was analyzed, and the motion planning of each moving part and the division of action sequence were completed. Then, based on software ADAMS, a simulation model of the automatic feeding system was established, the simulation parameters and the driving constraint function of each movement were set up, and the change curves of displacement, force and torque for each component were obtained through motion simulation. Furthermore, the velocity and acceleration of end effector for the automatic feeding system in the horizontal and vertical directions were analyzed. Finally, on the basis of completing the control system design, a prototype of the multi-station stamping automation processing platform for the pin-joint chain plate was built, and the experimental verification was carried out. The experimental results show that the production efficiency of multi-station automatic stamping for pin-joint chain plate can reach 6–7 pieces per minute, which meets the requirement that the production cycle of pin-joint chain plate is less than ten seconds per piece.

Key words: multi-station stamping; automatic feeding system; motion planning; automatic processing; pin-joint chain plate

自动送料系统是一种集机、电、液和气等传动方式为一体, 依靠控制系统的运动控制, 能够在一定的空间范围内完成抓取、运输、放置等工作的操作平台, 被广泛应用于冲压制造行业中。目前, 针对机械手运动规划的研究日益增多。吴志鹏等^[1]针对目前现有的机器人制造系统, 分析了各种运动规划算法的优劣势, 为机器人的制造提供了理论基础;

徐晓慧等^[2]提出将机械臂连杆运动方程与人工势场算法结合, 构建机械臂代价函数并作为转化测试的判断依据, 实现了避免节点陷入局部极小值及调节碰撞检测位置的目的; 段现银等^[3]以 6 个转动关节构成的串联型机械手为研究对象, 利用 7–5–7 次多项式插值算法对多自由度机械手关节空间轨迹进行了规划, 有效地改善了机械手运行过程的冲击振动问题; Samaneh H S 等^[4]引入深度强化学习和基于力的运动规划的混合算法, 以解决分布式多运动状态下机械手的运动规划问题; 沈桐等^[5]研究了由两个解耦并联机构混联而成的用于微创腹腔镜手术的操作机器人, 通过对其进行运动学建模与运动规划,

收稿日期: 2021–03–29; 修订日期: 2021–07–02

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目 (202004a05020008)

作者简介: 汪永明 (1971–), 男, 博士, 教授

E-mail: wangym@ahut.edu.cn

提高了机器人在术中的操作安全性;孙朝阳等^[6]设计了一种双滑块的翻转机器人机械夹持器,并对夹钳夹持钢板和翻转过程进行了动力学仿真分析,获得了夹持力随翻转速度、等效推力的变化规律;张忠雷等^[7]采用坐标矢量变换法和机构几何关系,求得送料机械手的位置反解,并绘制其工作空间,分析了该送料机械手的主要几何参数对其工作空间大小的影响规律;Di Y P 等^[8]采用 ADAMS 软件对冲床的自动送料机构进行动态仿真,输出了执行器的运动曲线,分析了压料机构与送料机构的配合情况,并验证了设计的正确性;于涛等^[9]针对 YT28-1030 闭式压力机的上、下料问题,设计了单机自动化上、下料机械手,通过 ADAMS 软件对机械手进行运动学仿真和优化,保证了机械手在运动过程中无明显冲击和振动;朱仁森等^[10]研发了一种大型电子伺服三坐标多工位送料系统;Luo L 等^[11]设计了一种新型伸缩冲床自动上、下料机械手,实现了两个角度的伸缩运动,并采用 PLC 控制实现对加工原料的连续拉伸和堆垛动作;侯雨雷等^[12]开展了冲压自动线运动学仿真研究,采用 D-H 法对冲压自动线上、下料机器人进行了运动学分析,利用图解法求得机器人工作空间并对其运动轨迹进行规划;郑方圆等^[13]针对无人机在飞行过程中的机械臂协调抓取问题,采用梯度投影运动规划算法,对多约束条件下的无人机机械臂抓取目标进行运动规划,并通过仿真验证了此方法的有效性;张志刚等^[14]对汽车外覆盖件冲压整线运动进行运动规划和仿真,通过优化整线送料机构的送料路径,有效地提高了生产线的生产节拍。

安徽工业大学机器人与先进制造技术安徽省优秀科研创新团队开发了一个销合链链板多工位冲压自动化加工平台,如图 1 所示,它主要由冲床、冲床上下模座、冲床上下模、储料装置以及自动送料装置 5 个部分组成。本文根据销合链链板的冲压制造工艺及实际工况,对其自动送料系统的动作需求进行分析,完成各运动部件的运动规划和时序划分;并建立 ADAMS 虚拟样机仿真模型,对自动送料系统的运动过程进行仿真,以验证相关设备选型是否可靠,并对自动送料系统末端执行器的抓取稳定性展开研究;最后,完成控制系统设计及销合链链板加工平台的搭建,并进行实验验证,以验证自动送料系统的生产节拍是否满足设计要求。

1 自动送料系统的动作需求分析

销合链链板多工位冲压的自动送料系统,其目

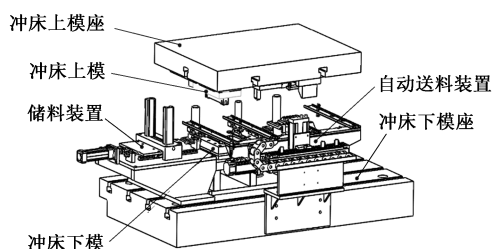


图 1 销合链链板多工位冲压自动化加工平台

Fig. 1 Multi-station stamping automation processing platform for pin-joint chain plate

的是为实现工件在各工位间的运输和位置转换,以实现链板冲压过程的自动化生产。根据图 1 所示的销合链链板多工位冲压自动化加工平台,自动送料系统的运动主要包括以下两个部分。

(1) 储料装置中落料工件的输送运动。其目的在于解决落料工序与后续工序之间的衔接问题,为自动送料装置的抓取做准备工作。工件由初始位置运动至事先规定的待取位置,整个过程是由单个双作用驱动气缸来完成的往复运动,要求具备一定的位置重复精度。

(2) 自动送料装置中多工位工件的输送运动。自动送料装置需要完成水平方向上 4 个工位等距离运输的任务,以及竖直方向上工件从模具中取出的工作,具体位置参数如图 2 所示。其中,相邻两工位间的运输距离为 240 mm,如果工件脱离冲孔模具,在竖直方向上机械手至少需要提升 85 mm。由此可知,自动送料装置需要具备在竖直方向和水平方向上两个运动自由度,分别完成抓取与放置工件的竖直运动和两相邻工位间工件输送的水平运动。其次,为了适应多工位模具的加工工艺,自动送料装置在完成工件运输的同时,还需要完成成形工位与冲孔工位之间工件的位置转动。

2 自动送料系统的运动规划

自动送料系统的运动规划同样包括两个方面:储料装置的运动规划和自动送料装置的运动规划。根据销合链链板多工位冲压加工工艺,其落料工序在单独的压力机上完成,折弯、成形和冲孔 3 道工序在同一台压力机上完成。

储料装置负责将工件从储料位置(初始位置)运输至待取位置,具体运动规划如图 3 所示,其中,“■”为储料装置中的工件,“→”为运动方向,

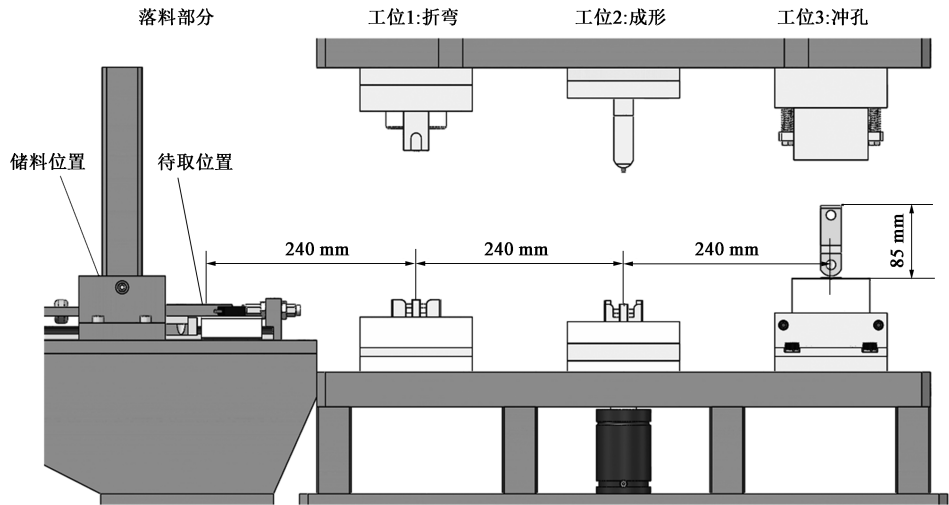


图 2 自动送料装置的运输空间
Fig. 2 Transportation space of automatic feeding device

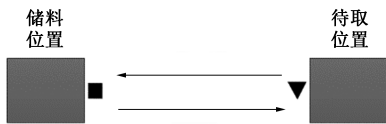


图 3 储料装置运动规划图
Fig. 3 Motion planning diagram of storage device

“▼”为抓取工件。整个输送过程为：自动送料装置抓取工件结束→推板左移→储料装置放置工件→推板右移→至待取位置。整个过程需要与自动送料装置的运动规划结合在一起，相互协调。

自动送料装置负责完成待取位置与折弯工位、折弯工位与成形工位以及成形工位与冲孔工位之间的工件运输。其中，前两者之间的运输动作相同，以折弯工位与成形工位之间的运输过程为例，具体运动规划如图 4 所示，其中，“▼”为抓取工件，“→”为运动方向，“▲”为放置工件，“●”为送

料机械手运动原点（等待压力机完成冲压工作）。
图 4 的整个输送过程为：压力机冲压完毕（回到最高点）→送料机械手运动原点→送料机械手上升→送料机械手左移→送料机械手下降→抓取工件→送料机械手上升→送料机械手右移→送料机械手下降→放置工件→送料机械手上升→送料机械手左移→送料机械手下降→回到送料机械手运动原点→压力机开始冲压。在此过程中，自动送料装置中的一体化悬臂梁结构设计实现了落料、折弯和成形 3 工位之间工件的同步运动；仅需竖直和水平两方向上的往复运动，即可完成工件在工位之间的抓取、放置和运输作业。工件在成形工位与冲孔工位之间的运输，除了需要完成与上述相同的运动外，送料机械手还需要完成 180°的转动，以便工件的放置，具体运动规划如图 5 所示，其中，“◆”为气爪旋转（正向转动和逆向转动）。

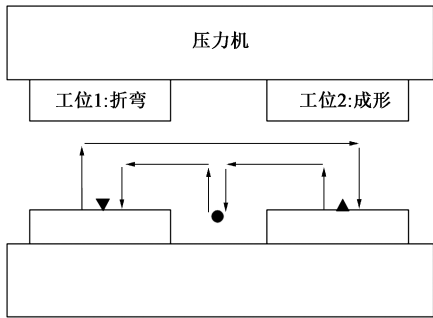


图 4 机械手在折弯与成形两工位间的运动规划图
Fig. 4 Motion planning diagram of manipulator between bending and forming stations

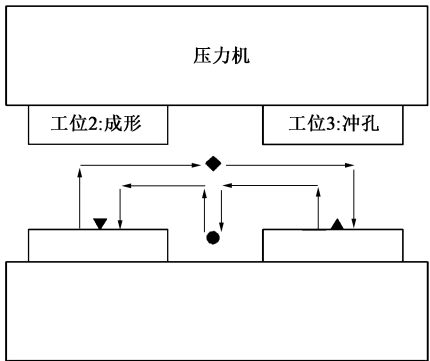


图 5 机械手在成形与冲孔两工位间的运动规划图
Fig. 5 Motion planning diagram of manipulator between forming and punching stations

图 5 的整个输送过程为：压力机冲压完毕（回到最高点）→送料机械手运动原点→送料机械手上升→送料机械手左移→送料机械手下降→抓取工件→送料机械手上升→送料机械手右移→气爪正向转动→送料机械手右移→送料机械手下降→放置工件→送料机械手上升→送料机械手左移→气爪逆向转动→送料机械手下降→回到送料机械手运动原点→压力机开始冲压。在此过程中，为了避开多工位模具的干涉，气爪需要在两工位之间的预留空间内完成旋转动作。

根据销合链链板的生产要求，销合链链板生产节拍需 ≤ 10 s/件。考虑到设备在实际运行过程中的空载现象，最终确定自动送料系统的单个工作周期为 6 s，压力机工作时间为 3 s，即生产节拍为 9 s/件。依据上述自动送料系统的运动规划，对各运动的时序进行划分，如图 6 所示。其中，运动 1 为储料装置中推板在水平方向上的往复运动；运动 2 为自动送料装置中一体化悬臂梁在竖直方向上的往复运动；运动 3 为自动送料装置中一体化悬臂梁在水平方向上的往复运动；运动 4 为自动送料装置中气爪在 180° 范围内的往复转动。

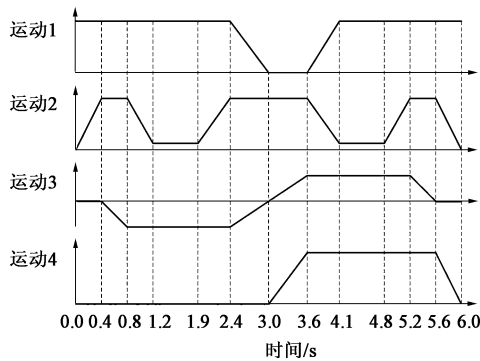


图 6 自动送料系统的各运动时序图

Fig. 6 Timing diagram of each movement for automatic feeding system

3 基于 ADAMS 自动送料系统仿真

3.1 仿真环境设置

在进行运动仿真时，需要将设计好的三维模型进行结构简化，同时，尽可能减小其对分析结果的影响^[15]。建模简化原则：（1）固连的零部件用一个零件表示；（2）忽略对整体受力状况影响较小的零部件。最终，导入至 ADAMS 软件中的仿真模型如图 7 所示。

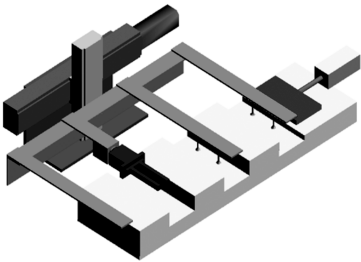


图 7 自动送料系统 ADAMS 仿真模型

Fig. 7 ADAMS simulation model of automatic feeding system

根据自动送料系统的运动规划，在自动送料系统仿真模型的各构件之间定义运动副，添加相应的约束，如表 1 所示。

表 1 自动送料系统各构件之间的约束

Table 1 Constraints between each component of automatic feeding system

类别	约束方式
支座与大地	固定
支座与丝杠模组	固定
储料推板与滑轨	移动副
丝杠模组与气缸	移动副
气缸与悬臂梁支架	移动副
悬臂梁支架与气爪	转动副

根据自动送料系统的运动规划和末端执行机构的尺寸关系，选择 STEP 函数作为驱动约束函数^[16]。根据图 6 中自动送料系统的各运动时序图，可以得出各运动驱动函数表达式 $step(x, x_1, h_1, x_2, h_2)$ 如表 2 所示。其中： x 为自变量，此处为时间 t ； x_1 为时间的开始值； x_2 为时间的结束值； h_1 为 $step$ 函数的初值； h_2 为 $step$ 函数的终值； d 为气爪的转动角度。

表 2 各运动的 STEP 函数表达式

Table 2 STEP function expression of each movement

运动类别	STEP 函数表达式
运动 1	$step(t, 2.4, 0, 3, 100) + step(t, 3.6, 0, 4.1, -100)$
运动 2	$step(t, 0, 0, 0.4, 110) + step(t, 0.8, 0, 1.2, -90) + step(t, 1.9, 0, 2.4, 90) + step(t, 3.6, 0, 4.1, -90) + step(t, 4.8, 0, 5.2, 90) + step(t, 5.6, 0, 6, -110)$
运动 3	$step(t, 0.4, 0, 0.8, -120) + step(t, 2.4, 0, 3.6, 240) + step(t, 5.2, 0, 5.6, -120)$
运动 4	$step(t, 3, 0d, 3.6, 180d) + step(t, 5.6, 0d, 6, -180d)$

3.2 仿真结果与分析

设定仿真时间为6 s,步长为800,进行自动送料系统的运动仿真。依据仿真结果,对各运动构件在运动过程中的位移、受力、力矩以及运行状态进行分析。同时,将仿真结果与事先规划的运动过程进行对比分析,以验证运动规划的可靠性。

(1) 运动1:在气缸的驱动下,储料装置中推板在水平方向上往复运动,其运动位移及所受气缸推力随时间的变化曲线如图8所示。

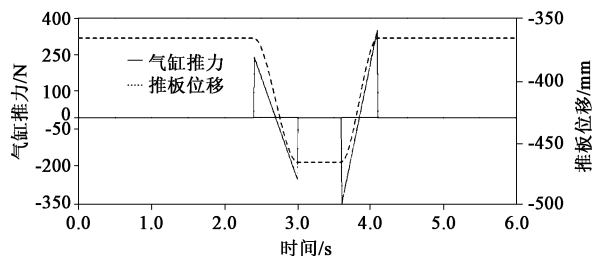


图8 储料装置中推板水平位移及其所受推力曲线

Fig. 8 Curves of horizontal displacement and thrust force for push plate in material storage device

由图8可知,在整个运动过程中,推板的最大位移量为100 mm,能够完成落料工件的运输,与实际动作需求一致。同时可以看出,推板所受到的最大推力约为380 N。

(2) 运动2:在气缸的驱动下,一体化悬臂梁结构在竖直方向上进行往复运动,其运动位移及所受气缸推力随时间的变化曲线如图9所示。

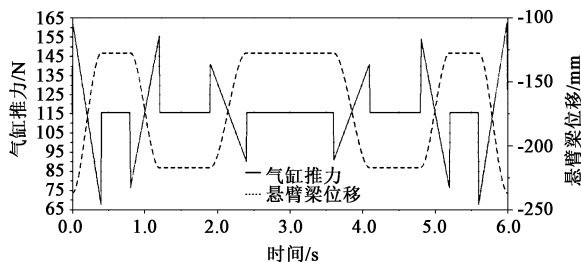


图9 一体化悬臂梁竖直方向位移及其所受推力曲线

Fig. 9 Curves of vertical displacement and thrust force for integrated cantilever beam

由图9可知,在竖直方向上的运动过程中,悬臂梁的最大位移量为110 mm,运输过程中上下往复运动的相对位移量为90 mm,能够完成工件在竖直方向上脱离模具,与实际动作需求一致。同时可以看出,悬臂梁结构所受到的最大推力为165 N。

(3) 运动3:在滚珠丝杠线性模组的驱动下,一体化悬臂梁结构在水平方向上进行往复运动,其运动位移及所受模组推力随时间的变化曲线如

图10所示。

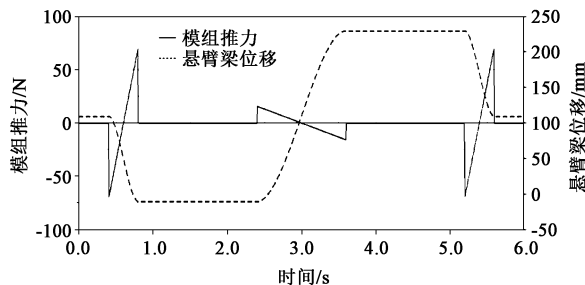


图10 一体化悬臂梁水平方向位移及其所受推力曲线

Fig. 10 Curves of horizontal displacement and thrust force for integrated cantilever beam

由图10可知,在水平方向上的运动过程中,悬臂梁的最大位移量为240 mm,能够完成工件在工位间水平方向上的运输,与实际动作需求一致。同时可以看出,在送料过程中一体化悬臂梁所受到的最大推力为70 N,为后续伺服电机选型提供数据参考。

(4) 运动4:在摆台气缸的驱动下,气爪沿摆台气缸转动轴线180°范围内往复转动,其转动角度及所受转矩随时间的变化曲线如图11所示。由图11可知,在整个运动过程中,气爪最大转动角度为180°,能够完成工件在成形与冲孔两工位之间的姿态转换,与实际动作需求一致。同时可以看出,气爪所受到的最大转矩约为125 N·mm,即0.125 N·m。

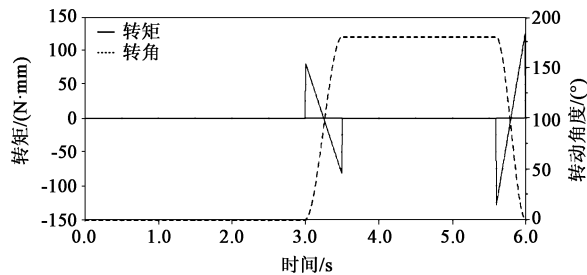


图11 气爪所受转矩及其转动角度曲线

Fig. 11 Curves of torque and rotation angle for gripper

3.3 末端执行器速度与加速度分析

末端执行器在水平、竖直方向上的速度与加速度如图12和图13所示。在空载未吸附工件时,不考虑工件脱落,为了提高工作效率,缩短其运行时间,从而具有较大的速度与加速度;吸附工件时,速度与加速度过高会导致吸附工件的稳定性不足,因此,在吸附工件时,末端执行器的速度与加速度较小。通过设计空载与吸附工件两阶段不同的速度与加速度,实现6 s内完成送料动作,且保证吸附工件的稳定性。

在完成加工平台搭建、控制系统调试和运动部件性能检测等步骤之后，进行销合链链板多工位冲压自动化加工平台样机的试运行，以验证自动送料系统加工效率是否满足设计要求和设备运

行状况是否满足工作要求。在样机运行过程中，通过气源处理器中稳定调压功能和伺服驱动器中调速功能分别调整自动送料系统中气体压强和伺服电机转速，同时，根据动作时序规划结果对设备进行参数调整，详细记录自动送料系统的生产效率和设备的运行状况。在样机试运行的 4 h 中，生产销合链链板共计 245 件，记录的实验结果如表 3 所示。

表 3 样机实验数据结果
Table 3 Results of experimental data for prototype

气源压强/ MPa	电机转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	生产效率/ ($\text{件} \cdot \text{min}^{-1}$)	设备运行状况
0.40	400	3.0	储料推板出现卡壳现象；真空吸盘吸取工件时，出现吸力不足现象；在运动过程中，真空吸盘所吸附工件因振动出现脱落现象；气爪所抓取工件因振动出现位置偏移现象
	800	4.0	
	1200	6.0	
	1600	7.0	
0.45	400	3.0	工件抓取状态良好，设备运行正常。当选择 $1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速时，执行末端抓取机构出现微弱抖动
	800	4.5	
	1200	6.0	
	1600	7.0	
0.50	400	4.0	工件抓取状态良好，设备运行正常。当选择 $1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速时，执行末端抓取机构出现微弱抖动
	800	5.0	
	1200	6.5	
	1600	7.0	
0.55	400	4.0	工件抓取状态良好，设备运行正常。气缸启停过程出现明显撞击，执行末端抓取机构出现明显抖动；当选择 $1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速时，执行末端抓取机构抖动更加明显
	800	5.0	
	1200	6.5	
	1600	8.0	

由表 3 可知，在气源压强较低的状态下，自动送料系统易出现工件抓取力不足等现象，尤其在高速运动状态下，工件易出现脱落现象，影响设备的正常生产；在气源压强过高的状态下，自动送料系统运行过程中，会出现明显的冲击和抖动，同样影响设备的正常生产。

在设备运行调试过程中，可以通过适当调整气缸的调速阀来改变气缸的运行速度和通过改变电机

转速来调整丝杠模组的运行速度，进而改变销合链链板的生产效率。由表 3 可知，当气源压强选择 0.45 和 0.50 MPa 时，工件抓取状态良好，设备运行较为稳定；当伺服电机转速选择 $1200 \sim 1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，销合链链板的生产效率可以达到 $6 \sim 7 \text{ 件} \cdot \text{min}^{-1}$ ，即生产节拍可以达到 $8.57 \sim 10.00 \text{ s/件}$ ，满足销合链链板生产节拍 $\leq 10 \text{ s/件}$ 的要求。

5 结论

(1) 根据运动规划结果，当自动送料系统的单个工作周期为 6 s，压力机工作时间为 3 s，即生产节拍为 9 s/件时，各运动的时序划分满足自动送料系统的工作需求。

(2) 根据样机实验结果，当气源压强选择 0.45 和 0.50 MPa 时，工件抓取状态良好，设备运行较为稳定；当伺服电机转速选择 $1200 \sim 1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，销合链链板的生产效率可以达到 $6 \sim 7 \text{ 件} \cdot \text{min}^{-1}$ ，即生产节拍可以达到 $8.57 \sim 10.00 \text{ s/件}$ ，满足销合链链板生产需求 $\leq 10 \text{ s/件}$ 的要求。

参考文献：

[1] 吴志鹏, 赵安安, 郑炜, 等. 面向复杂大部件装配的多机器人制造系统运动规划研究进展 [J]. 机械科学与技术, 2021, 40 (6): 969-978.
Wu Z P, Zhao A A, Zheng W, et al. Reserach of motion planning of multi-robot manufacturing system for assembly of flexible large components [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40 (6): 969-978.

[2] 徐晓慧, 张金龙. 代价函数引导的机械臂运动规划算法 [J]. 机械科学与技术, 2020, 39 (1): 62-67.
Xu X H, Zhang J L. A robot arm motion planning algorithm guided by cost function [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39 (1): 62-67.

[3] 段现银, 张灿, 朱泽润, 等. 逆解多目标优化的六自由度机械手轨迹规划 [J]. 系统仿真学报, 2021, 33 (9): 2128-2137.
Duan X Y, Zhang C, Zhu Z R, et al. Trajectory planning of 6-DOF manipulator based on inverse multi-objective optimization [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33 (9): 2128-2137.

[4] Samaneh H S, Hugh L, Michael E, et al. Multi-agent motion planning for dense and dynamic environments via deep reinforcement learning [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5 (2): 3221-3226.

[5] 沈桐, 宋成利, 徐兆红. 新型混联腹腔镜手术机器人的运动学建模与优化 [J]. 机械科学与技术, 2016, 35 (1): 56-62.

- Shen T, Song C L, Xu Z H. Kinematics modeling and optimization of a hybrid robotic manipulator for laparoscopic surgery [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35 (1): 56-62.
- [6] 孙朝阳, 李贵, 刘耀东, 等. 激光拼焊板翻转机械夹持器结构设计及仿真分析 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (5): 140-146.
- Sun C Y, Li G, Liu Y D, et al. Structural design and simulation analysis on mechanical gripper for welding tailored blank overturning [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (5): 140-146.
- [7] 张忠雷, 金振林, 张金柱. 新型送料机械手及其工作空间分析 [J]. 中国机械工程, 2016, 27 (13): 1743-1747.
- Zhang Z L, Jin Z L, Zhang J Z. Workspace analysis of a novel feeding manipulator [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27 (13): 1743-1747.
- [8] Di Y P, Wu H T, Liu H B. Dynamic simulation of automatic feeding punch mechanism based on ADAMS [J]. Advanced Materials Research, 2013, 655-657: 253-256.
- [9] 于涛, 邓增阁, 郭涛, 等. 大型闭式压力机单机自动化上下料机械手机械结构设计及仿真 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (3): 109-113.
- Yu T, Deng Z G, Guo T, et al. Mechanical structure design and simulation of single-machine automatic loading and unloading manipulator for large closed press [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (3): 109-113.
- [10] 朱仁森, 唐敦兵, 徐亮亮, 等. 大型压力机电液伺服三坐标多工位送料系统研发 [J]. 中国机械工程, 2011, 22 (24): 2970-2976.
- Zhu R M, Tang D B, Xu L L, et al. Research and development of electronic servo tri-axis multi-position transfer system for large-scale press [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22 (24): 2970-2976.
- [11] Luo L, Wei Z C, Jin A M, et al. The design of automatic loading-and-unloading material manipulator for telescopic punch [J]. Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing, 2016, 26 (2): 58-62.
- [12] 侯雨雷, 张志强, 谭候金, 等. 冲压自动线机器人与压力机动作协调及其运动仿真 [J]. 中国机械工程, 2013, 24 (23): 3186-3190.
- Hou Y L, Zhang Z Q, Tan H J, et al. Motor coordination and motion simulation of robot and press in a press line [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24 (23): 3186-3190.
- [13] 郑方圆, 张扬, 申琨凡, 等. 无人机机械臂抓取动作的协调运动规划 [J]. 机械设计, 2022, 39 (2): 24-29.
- Zheng F Y, Zhang Y, Shen K F, et al. Coordinated motion planning of unmanned aerial vehicle's manipulator in the process of grasping manoeuvre [J]. Journal of Machine Design, 2022, 39 (2): 24-29.
- [14] 张志刚, 刘战强, 李志强, 等. 基于冲压运动仿真的汽车外覆盖件冲压线运动规划 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26 (3): 688-696.
- Zhang Z G, Liu Z Q, Li Z Q, et al. Motion planning and simulation of auto body panels stamping line based on PLS [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26 (3): 688-696.
- [15] 顾以进. 钣金冲压自动上下料机械手的研究与开发 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- Gu Y J. The Research and Development of Automatic Loading and Unloading Robot for Sheet Metal Stamping [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [16] 周玉明. 冲压生产线自动送料装置设计与仿真分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- Zhou Y M. Design and Simulation of the Automated Feeding Device for a Press Line [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

(上接第 120 页)

- Editing Group of Stamping Die Design Manual. Handbook of Die Design [M]. Beijing: China Machine Press, 1988.
- [5] GB/T 3621—2007, 钛及钛合金板材 [S].
- GB/T 3621—2007, Titanium and titanium alloy sheet and plate [S].
- [6] Романовский В П. Справочник по холодной штамповке [M]. Ленинград: Машиностроение, 1973.
- Romanovsky V P. Handbook on Cold Stamping Leningrad [M]. Leningrad: Machine Press, 1973.
- [7] 阎昱, 易海佳, 莫梨花, 等. TA2 纯钛板的成形极限 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 43-49.
- Yan Y, Yi H J, Mo L H, et al. Forming limit on TA2 titanium sheet [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 43-49.
- [8] 大连理工大学工程图学教研室. 画法几何学 [M]. 7 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- Department of Engineering Graphics, Dalian University of Technology. Drawing Geometry [M]. 7th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [9] 詹从堃, 陈志永, 唐林. 退火纯钛板压缩力学性能的各向异性 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43 (11): 4253-4258.
- Zhan C K, Chen Z Y, Tang L. Anisotropy of compressive mechanical properties of annealed pure titanium sheet [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43 (11): 4253-4258.
- [10] 刑秋丽, 彭湃, 张嫦娟, 等. 钛及钛合金板材拉深成形的影响因素与技术进步 [J]. 钛工业进展, 2015, 32 (4): 1-7.
- Xing Q L, Peng P, Zhang C J, et al. Influencing factors and technology advances of titanium alloy plate in deep drawing [J]. Titanium Industry Progress, 2015, 32 (4): 1-7.
- [11] Ohwue T, Kobayashi Y. Analysis of earing in circular-shell deep-drawing of bcc and hcp sheet metals [J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 887-892.
- [12] Marciniak K, Kuczyński K. Limit strain in the processes of stretch-forming sheet metal [J]. International Journal Mechanical Sciences, 1967, 9 (9): 609-612.