

文章编号 1004-924X(2016)01-0160-09

完全解耦式锻造操作机运动机理与动力学

许允斗^{1,2}, 滕志程¹, 梁晶晶¹, 朱为国³, 赵永生^{1,2*}

(1. 燕山大学 河北省并联机器人与机电系统实验室, 河北 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学 先进锻压成型技术与科学教育部重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

3. 淮阴工学院 江苏省数字化制造技术重点建设实验室, 江苏 淮安 223001)

摘要: 为了实现锻造操作机升降运动与水平移动之间的解耦, 提出了一种从结构组成原理上实现解耦的锻造操作机机构, 并对该机构的运动机理和动力学性能进行了研究与实验验证。首先, 基于 Hoekens 四连杆机构介绍了完全解耦式锻造操作机的结构组成原理; 运用螺旋理论工具分析了完全解耦式操作机机构的自由度, 对其升降运动和水平移动之间的解耦机理进行了剖析。然后, 基于虚功原理建立了操作机机构动力学模型, 比较分析了该解耦式操作机机构和典型平行连杆式操作机机构在升降运动和锻造加工过程中的受力性能。最后, 研制了该新型解耦式操作机的比例实验模型, 采用激光跟踪仪测试了钳杆在升降过程中的水平位移变化量。实验结果表明: 在升降运动过程中, 钳杆在水平方向的位移变化量在 1 mm 之内, 基本上验证了该完全解耦式锻造操作机能够实现升降运动与水平移动之间的解耦。

关键词: 锻造操作机; 完全解耦; 自由度; 动力学分析; 虚功原理

中图分类号: TG315 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162401.0160

Mechanism and dynamics of fully decoupled forging manipulator

XU Yun-dou^{1,2}, TENG Zhi-cheng¹, LIANG Jing-jing¹, ZHU Wei-guo³, ZHAO Yong-sheng^{1,2*}

(1. Laboratory of Parallel Robot and Mechatronic System of Hebei Province,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science of the
Ministry of Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

3. Key Building Laboratory of Digital Manufacturing Technology of Jiangsu Province,
Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223001, China)

* Corresponding author, E-mail: yszhao@ysu.edu.cn

Abstract: To achieve the decoupling between the lifting movement and the horizontal movement of a forging manipulator, a kind of manipulator mechanism to achieve the decoupling was presented based on the structural composition principle, and the motion mechanism and the dynamic performance were studied and verified by experiments. Firstly, the composition principle of a fully decoupled forging manipulator was introduced based on the Hoekens four-bar mechanism. The degree of freedom of the fully decoupled forging manipulator was analyzed by using the screw theory, and the decoupling

收稿日期: 2015-07-20; 修订日期: 2015-09-18.

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (No. E2014203255); 江苏省高校自然科学研究重大项目 (No. 14KJA460001)

mechanism between the lifting movement and horizontal movement was also dissected. Then the dynamic model was established by using the principle of virtual work. The mechanical behavior between the new mechanism of forging manipulator and the typical parallel-link one was compared and analyzed in the lifting movement and the forging process. Finally, an experimental model of the new forging manipulator mechanism with ratio 1/20 was developed to verify its decoupling performance. Experimental results indicate that during the lifting movement, the displacement variation of the gripper carrier in the horizontal direction remains within 1 mm, which basically verifies that the fully decoupled forging manipulator mechanism achieves the decoupling between the lifting movement and the horizontal movement.

Key words: forging manipulator; fully decoupled; degree of freedom; dynamic analysis; principle of virtual work

1 引言

作为现代化锻造系统的重要设备之一,锻造操作机用于夹持大型锻件,配合锻造压力机完成锻件的锻造工作。锻造操作机的使用能大大提高锻件的生产效率和生产质量^[1-2]。不仅如此,它还可实现锻造工序的自动化与程序化,从而有效减轻了工人的工作量,同时也使工作环境更加整洁与安全^[3-5]。

目前,使用比较广泛的大吨位操作机有平行连杆式机构^[6-7]和摆动杠杆式机构两种^[8-10]。文献^[11]介绍了一种典型的平行连杆式锻造操作机,该机构属于串并混联式机构,其升降运动由升降缸实现,俯仰运动由俯仰缸实现,升降和俯仰运动是解耦的。通常,平行连杆式锻造操作机在运动解耦性和便于操作控制方面具有优势^[12]。然而,大多数平行连杆式机构在实现升降运动的同时会产生耦合的水平位移量,即在升降运动过程中,钳杆的运动轨迹不是直线,而是在水平方向有一定的偏差,其对锻造机的性能有很大的影响,这是因为当锻造操作机夹持大锻件进行搬运的过程中,需要精确地控制锻件的停放位置。因此,需要开展抑制水平耦合偏差的研究。目前的研究工作主要是通过优化水平缓冲缸的安装尺寸^[13]以减小耦合位移量,但这仅能使锻造操作机钳杆在升降过程中小范围内实现近似直线运动。鉴于上述原因,本文提出了一种从结构组成原理上实现升降运动与水平方向移动完全解耦式锻造操作机机构^[14]。

常用的多自由度系统动力学研究方法有 4 种:牛顿欧拉法、拉格朗日法、凯恩法和虚功原理。基于牛顿力学的基本定律的牛顿欧拉法建模过程清晰简单,可以分析各关节的受力情况,计算效率比较高,但是对于复杂的机构需要联立大量的方程,推导过程十分繁琐^[15]。拉格朗日法^[16]通过建立广义能量方程得到系统动力学模型,这种解析式计算效率高,非常有利于机构的实时控制,但是对于复杂机构而言,其解析表达式不易获得,且计算量大。凯恩法^[17]是现在比较通用的一种动力学建模方法,其以广义速率的形式描述系统的运动。由于该方法建立的能量方程不考虑系统约束力及内力,因此得到的动力学方程比较简单,但其能量方程涉及的动力学参数较多,整理过程比较繁琐。虚功原理^[18]是将机构作为一个整体考虑,不计算机构的内力,得到的动力学方程简单整齐,是目前公认的比较简单的动力学建模方法,尤其是在并联机构中。综合考虑几种方法的优缺点,本文将采用虚功原理对完全解耦式操作机主运动机构进行动力学建模,来研究机构驱动力与运动参数间的关系,并与典型平行连杆式操作机的动力学性能进行比较分析。

2 完全解耦式锻造操作机自由度与解耦机理分析

2.1 完全解耦式锻造操作机介绍

图 1 所示为一种新型平行连杆式操作机,该机构将 Hoekens 四杆机构(见图 2)输出端直接与钳杆中部通过铰链相连,并在 HG 杆中间添加水平缓冲缸,构成水平缓冲机构。Hoekens 四杆机

构各连杆长度的比值为 $l_1 : l_2 : l_3 : l_4 = 1 : 2 : 2.5 : 2.5$ 。

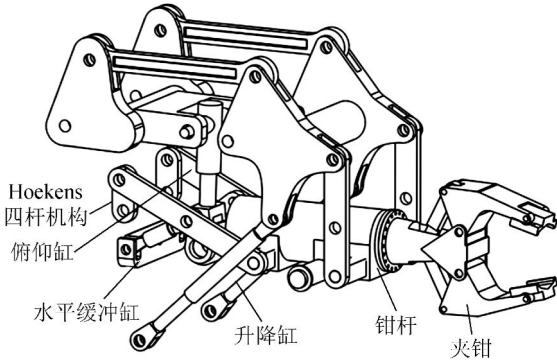


图 1 新型平行连杆式操作机构

Fig. 1 Novel mechanism of parallel-link forging manipulator

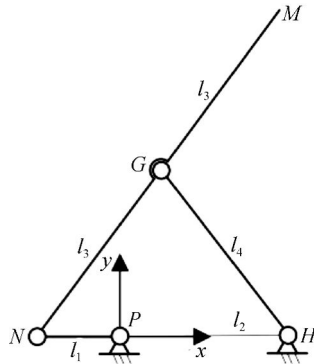


图 2 Hoekens 四杆机构

Fig. 2 Hoekens four-bar mechanism

2.2 完全解耦式锻造操作机自由度分析

为了便于分析,本文采用完全解耦式锻造操作机的机构简图进行分析(如图 3 所示),该机构由平面四杆机构 AKLB(见图 4)和由两个分支组成的并联机构(见图 5)串联而成。

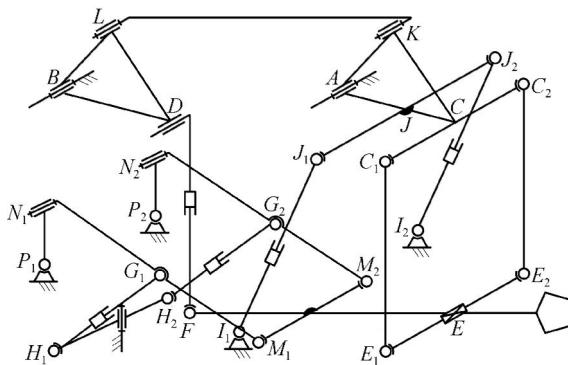


图 3 完全解耦式锻造操作机简图

Fig. 3 Schematic diagram of fully decoupled forging manipulator

从图 4 可以看出,平面四杆机构 AKLB 只有升降运动这一个自由度,它是靠一对对称布置的升降驱动液压缸 I_1J_1 和 I_2J_2 来实现的,即当两个升降驱动液压缸运动时,通过铰链 A 驱动前提升臂 ACK 转动。下面采用螺旋理论工具^[19]分析如图 5 所示的二分支并联机构的自由度。

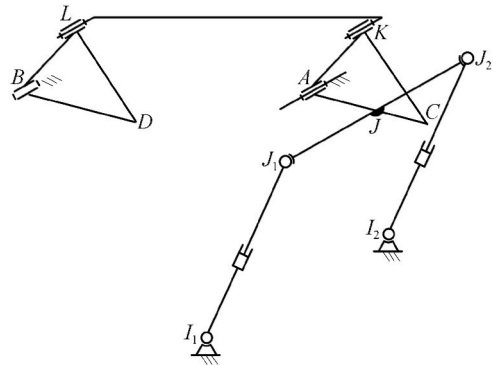


图 4 平面四杆机构 AKLB

Fig. 4 Parallel four-bar mechanism AKLB

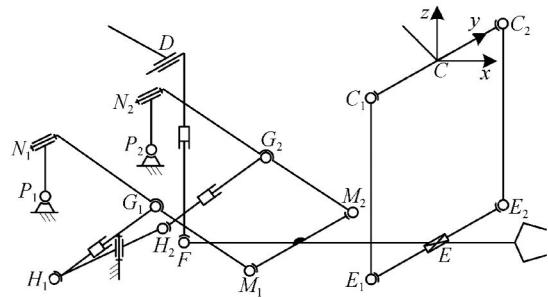


图 5 二分支并联机构

Fig. 5 Parallel mechanism with two branches

$P_1N_1M_1$ 和 $P_2N_2M_2$ 均为满自由度运动链,且由于水平液压缓冲缸 H_1G_1 和 H_2G_2 中间通过轴线竖直方向布置的协调杆相连接,所以整个水平缓冲装置,即 Hoekens 四连杆机构不会对机构的整体自由度产生影响。因此,如图 5 所示的机构可视为由前分支 $C(C_1E_1C_2E_2)$ 和后分支 DF 两个分支组成的并联机构。后分支 DF 从基座到钳杆的运动副分别为圆柱副、移动副和球副,为满自由度运动支链,也不会对钳杆的运动产生约束。为便于分析前分支施加给钳杆的约束力螺旋系,在前分支 C 处建立坐标系 $C-xyz$,其中 z 轴竖直向上, x 轴水平向右。

由文献[20]分析可知,前分支中的平行 4S(S 表示球副)闭环 $C_1E_1C_2E_2$ 的等效运动螺旋系在坐标系 $C-xyz$ 下可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{1,1} = [0 \ 1 \ 0 \ z_c \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{S}_{1,2} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{S}_{1,3} = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{S}_{1,4} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T \end{cases}, \quad (1)$$

式中: z_c 表示 C 点在坐标系 C-xyz 下的 z 分量坐标。

前分支与钳杆相连的移动副的运动螺旋在坐标系 C-xyz 下可表示为:

$$\mathbf{S}_{1,5} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T, \quad (2)$$

求解上述前分支的运动螺旋系 ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 的反螺旋, 其约束力螺旋在坐标系 C-xyz 下表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{1,1}^m = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{S}_{1,2}^m = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T \end{cases}. \quad (3)$$

然后, 求解上述约束力螺旋系的反螺旋可得二分支并联机构的运动螺旋系在坐标系 C-xyz 下为:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_1^m = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{S}_2^m = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T \\ \mathbf{S}_3^m = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{S}_4^m = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{cases}. \quad (4)$$

由上述分析可以看出, 该二分支并联机构能够实现沿 x 轴和 y 轴的移动以及绕 z 轴和 y 轴的转动, 分别对应钳杆的水平缓冲运动、侧移、侧摆和俯仰运动。

综上, 完全解耦式锻造操作机能够实现锻造操作机所需要的全部锻造动作要求, 即升降、俯仰、水平缓冲运动、侧移和侧摆 5 个运动。

2.3 升降与水平方向移动解耦机理分析

锻造操作机机构是复杂的空间混联机构, 但是操作机最主要的运动 (升降、俯仰和水平方向移动) 是由其主运动机构实现的, 下面主要对锻造操作机的主运动机构进行分析, 完全解耦式锻造操作机的主运动机构如图 6 所示。

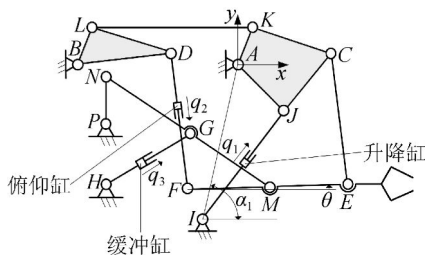


图 6 完全解耦式锻造操作机主运动机构

Fig. 6 Main motion mechanism of fully decoupled forging manipulator

当钳杆只做升降运动时, 水平缓冲缸 HG 和俯仰液压缸 DF 均锁死, 此时水平缓冲相当于 Hoekens 近直线输出机构, 即其输出点 M 的轨迹为一近似直线^[21]。此外, 由于点 D、F、E 和 C 形成了一个平行四边形, 所以钳杆 FE 做的是平行移动, 因此钳杆末端 E 点的轨迹和 M 点的轨迹相同, 为一近似直线, 这就是该完全解耦式操作机构升降运动与水平方向移动解耦的内部机理。下面将通过建立该操作机主运动机构位置的正反解模型, 来验证升降运动与水平方向移动是否确实解耦。

位置正解: 在操作机抓取阶段, 钳杆完成升降和俯仰运动, 即给定升降缸和俯仰缸的输入位移 q_1 和 q_2 , 求解钳杆末端 E 点位置坐标 $(x_E \ y_E)^T$ 和姿态角 θ ; 位置反解: 在锻造加工时, 即给定钳杆末端 E 点高度的变化, 求解升降缸的输入位移 q_1 。

如图 6 所示, 在前提升臂 A 点建立固定直角坐标系 A-xyz, 根据机构几何约束关系可以得到驱动缸输入位移与钳杆输出位移和姿态之间的关系式, 具体细节请参照文献[14], 这里不再赘述。

在升降运动过程中, 即已知升降缸输入 q_1 , 俯仰缸输入 q_2 和水平缓冲缸输入 q_3 为零, 根据位置正解模型可求得钳杆末端 E 点的位置坐标, 如图 7 所示 (给定锻造操作机的结构参数如表 1 所示)。

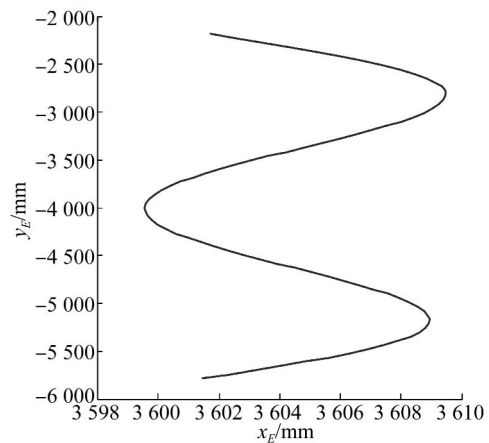


图 7 升降运动中的耦合水平位移量

Fig. 7 Coupling horizontal displacement in lifting movement

表 1 结构参数

Tab. 1 Structural parameters

结构类别	尺寸数值	结构类别	尺寸数值
l_{AC}/mm	3 600	$\angle CAK/(\circ)$	70
l_{AI}/mm	8 189.7	l_{CE}/mm	4 000.7
l_{AJ}/mm	3 200	l_{AB}/mm	5 500
l_{U0}/mm	7 538.7	l_{PN}/mm	990
$\angle CAJ/(\circ)$	45	l_{EF}/mm	5 500
$\alpha/(\circ)$	68	l_{AK}/mm	2 300

从图 7 可以看出,该机构在水平方向产生的耦合位移量在 $\pm 10 \text{ mm}$ 内,在锻件加工误差范围之内,能够满足锻造加工要求,表明该机构能够实现升降与水平方向移动的解耦。

3 动力学分析

在上述求解驱动缸输入位移与钳杆输出变化之间的关系时,可以求出机构各个铰接点的位置,进而通过杆长约束条件求出各构件姿态角和驱动缸的位移。在动力学建模过程中,不仅需要考虑各构件的重力,还需要考虑其惯性力以及惯性力矩所做的功,所以还需要对构件的质心位置和姿态角求一阶导数和二阶导数,以得到各构件的质心速度、角速度、质心加速度和角加速度。鉴于篇幅限制,具体求解过程不再详细列出。

虚功原理是考虑机构各构件所受外力在虚位移上所做的功总和为零,所受外力主要是各构件的重力,惯性力,惯性力矩,驱动力以及外载荷。

$$F_j = \sum_{i=1}^{13} \left[m_i \frac{\partial^2 x_{ci}}{\partial t^2} \frac{\partial x_{ci}}{\partial q_j} + m_i \left(\frac{\partial^2 y_{ci}}{\partial t^2} + g \right) \frac{\partial y_{ci}}{\partial q_j} + J_i \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial t^2} \frac{\partial \theta_i}{\partial q_j} \right] - \left[\frac{G}{g} \frac{\partial^2 x_Q}{\partial t^2} \delta x_{C1} + \left(G + \frac{G}{g} \frac{\partial^2 y_Q}{\partial t^2} \right) \delta y_{C1} \right]. \quad (10)$$

至此,便可以求出主运动机构各驱动缸的驱动力。下面以升降过程中升降缸的驱动力为例来验证利用虚功原理建立的动力学模型的正确性。

通过 Solidworks 软件建模,可以直接测量出机构各个构件的质量及转动惯量(如表 2 所示),代入式(10)即可求得各驱动缸的驱动力大小。然后将操作机三维模型导入 ADAMS 动力学仿真

前面已经求出了机构各构件的质心加速度和姿态角加速度,首先求连杆 i 由于惯性力、惯性力矩及重力在虚位移上所做的功 W_{Ai} :

$$\begin{aligned} W_{Ai} = & -m_i \dot{v}_{Ci} \delta x_{Ci} + m_i g \delta y_{Ci} - J_{Ci} \ddot{\theta}_i \delta \theta_i = \\ & -m_i \dot{v}_{Cxi} \delta x_{Ci} - m_i (\dot{v}_{Cyi} + g) \delta y_{Ci} - J_{Ci} \ddot{\theta}_i \delta \theta_i = \\ & -m_i \frac{\partial^2 x_{Ci}}{\partial t^2} \delta x_{Ci} - m_i \left(\frac{\partial^2 y_{Ci}}{\partial t^2} + g \right) \delta y_{Ci} - J_{Ci} \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial t^2} \delta \theta_i, \end{aligned} \quad (5)$$

其中: m_i 为第 i 个连杆的质量; J_{Ci} 为第 i 个连杆相对质心的转动惯量; $i=1 \sim 13$ 。

对于 3 个驱动液压缸,其驱动力 $F_j (j=1, 2, 3)$ 在虚位移上所做的功为:

$$W_{Bj} = F_j \delta q_j. \quad (6)$$

除了重力、驱动力之外,在升降过程中还有作用于钳杆末端的重力(作用点为 Q),其在虚位移上所做的功为:

$$W_C = \frac{G}{g} \frac{\partial^2 x_Q}{\partial t^2} \delta x_{C1} + \left(G + \frac{G}{g} \frac{\partial^2 y_Q}{\partial t^2} \right) \delta y_{C1}. \quad (7)$$

所以由虚功原理得:

$$\sum_{i=1}^{13} W_{Ai} + \sum_{j=1}^3 W_{Bj} + W_C = 0. \quad (8)$$

根据前面机构运动学分析有:

$$\begin{bmatrix} \delta x_{ci} \\ \delta y_{ci} \\ \delta \theta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{ci}}{\partial q_1} & \frac{\partial x_{ci}}{\partial q_2} & \frac{\partial x_{ci}}{\partial q_3} \\ \frac{\partial y_{ci}}{\partial q_1} & \frac{\partial y_{ci}}{\partial q_2} & \frac{\partial y_{ci}}{\partial q_3} \\ \frac{\partial \theta_i}{\partial q_1} & \frac{\partial \theta_i}{\partial q_2} & \frac{\partial \theta_i}{\partial q_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta q_1 \\ \delta q_2 \\ \delta q_3 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

将式(9)代入式(8),从而可得到第 j 个驱动关节的驱动力为:

软件中建立动力学仿真模型,从而可测量出升降过程中各驱动缸的驱动力大小。将上述两种计算结果进行对比,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,在升降运动过程中采用虚功原理建立的动力学模型和 ADAMS 仿真模型的最大误差只有 0.3%,验证了前面建立的动力学模型的正确性。

表 2 各构件质量与转动惯量

Tab. 2 Mass and rotational inertia of each link

序号	质量/kg	转动惯量 /kg·m ²	序号	质量/kg	转动惯量 /kg·m ²
1	2 475	3 000	8	81	100
2	454.5	500	9	81	100
3	2 702.2	3 000	10	767.52	800
4	261	300	11	3 417.3	4 000
5	97.2	100	12	50	65
6	125	150	13	454.5	500
7	125	150			

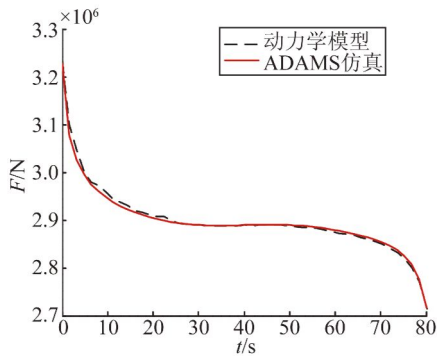


图 8 升降缸驱动力对比

Fig. 8 Comparison of driving forces for lifting cylinder

完全解耦式锻造操作机实现了锻造操作机升降运动与水平方向移动的解耦。为了测试该操作机其它性能的好坏,将其与典型平行连杆式操作机进行动力学性能比较。典型平行连杆式操作机主运动机构如图 9 所示,该机构除了缓冲缸安装尺寸给定 $l_{CG}=2\ 200\text{ mm}$, $x_H=-3\ 979.3\text{ mm}$ 和 $y_H=-2\ 195.5\text{ mm}$ 外,其他尺寸与解耦式操作机完全相同。

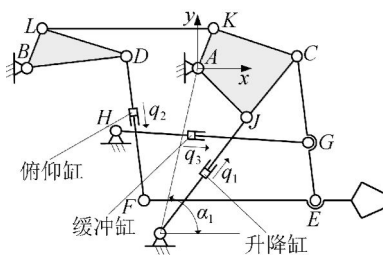
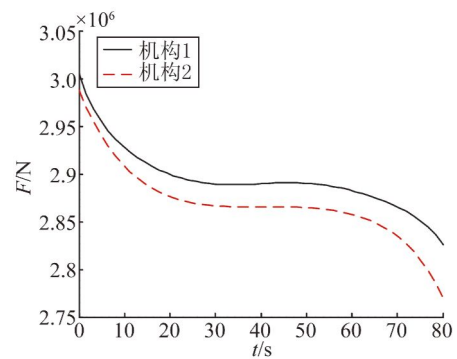


图 9 典型平行连杆式操作机

Fig. 9 Typical mechanism of parallel-link manipulator

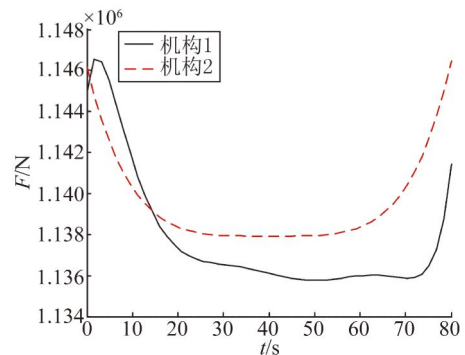
下面结合锻造操作机的实际工况,主要从抓取升降运动(只有升降缸运动,令俯仰缸和缓冲缸输入为零)和锻造加工两个阶段进行比较分析。

首先对比抓取升降运动过程中 3 个液压缸的驱动力,已知钳杆末端 E 点的升降高度为 $-1\ 800 \sim 1\ 800\text{ mm}$,即 $y_E = -1\ 800 + 45t$,在该过程中两机构 3 个液压缸的受力分别如图 10(a)~(c) 所示,图中机构 1 和机构 2 分别表示完全解耦和典型平行连杆式操作机。



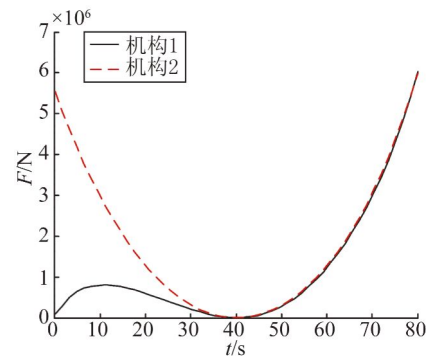
(a) 升降缸

(a) Lifting cylinder



(b) 俯仰缸

(b) Pitching cylinder



(c) 水平缓冲缸

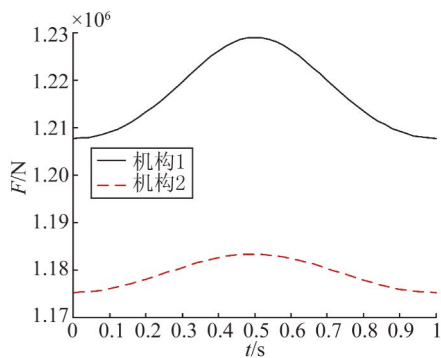
(c) Horizontal buffer cylinder

图 10 升降运动动力学分析

Fig. 10 Dynamic analysis in lifting movement

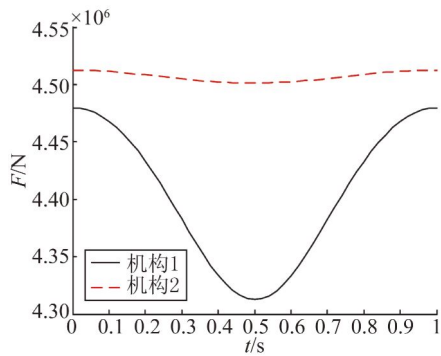
从图 10 可以发现升降运动中,机构 1 升降缸的驱动力比机构 2 的大,但是它们的差值的数量级与受力相比非常小,而机构 1 的俯仰缸和水平缓冲缸的受力都比较小,所以在升降运动中,机构 1 的受力相对较小。

在锻造加工阶段,操作机受到由工件的弹塑性变形引起的冲击载荷作用,假设水平方向和垂直方向的冲击载荷分别为 $F_{px} = 80 \text{ t}$ 和 $F_{py} = 100 \text{ t}$,则在锻造加工阶段两机构的 3 个液压缸的受力分别如图 11(a)~(c)所示。



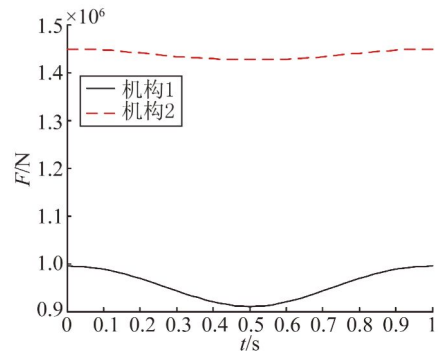
(a) 升降缸

(a) Lifting cylinder



(b) 俯仰缸

(b) Pitching cylinder



(c) 水平缓冲缸

(c) Horizontal buffer cylinder

图 11 锻造加工过程动力学分析

Fig. 11 Dynamic analysis in forging process

在锻造加工过程中同样,机构 1 升降缸的驱动力也比机构 2 的大,但是其差值的数量级与受力相比较小,而机构 1 的俯仰缸和水平缓冲缸的受力都比较小,所以在锻造加工过程中,机构 1 的受力性能也比较好。

综上所述,完全解耦式操作机比典型平行连杆式操作机的动力学性能好。

4 解耦性实验验证

为了验证完全解耦式操作机能够实现升降运动和水平方向移动的解耦,本文研制了完全解耦式锻造操作机主运动机构的实验模型,因为主运动机构能够实现升降和水平方向移动。图 12 所示为完全解耦式操作机主运动机构按 1/20 比例缩小的实验模型,即将机构尺度在前述理论计算值的基础上缩小 20 倍。



图 12 完全解耦式锻造操作机的 1/20 比例实验模型

Fig. 12 Experimental model with ratio 1/20 of fully decoupled forging manipulator

该实验模型中升降缸和俯仰缸都采用电动推杆实现,而水平缓冲缸则由气弹簧代替。操作机控制系统需要控制两个直流电动推杆,每一个直流电动推杆都分为自动操作和手动操作两个部分。自动操作部分包括单片机和电机驱动板,手动部分是由一个带 PWM 调速功能和正反转控制功能的直流电机驱动板构成。

为了验证操作机的运动解耦性,即测量钳杆升降过程中在水平方向的位移变化量,本文采用 Leica 绝对激光跟踪仪进行测量,它是工业测量系统中高精度的大尺寸测量仪器。将反射球置于钳

杆末端,通过激光追踪测量反射球的运动路径来记录钳杆末端的位移变化,最终搭建的实验平台如图13所示。



图13 基于激光跟踪仪的实验平台

Fig. 13 Experimental platform based on laser tracker

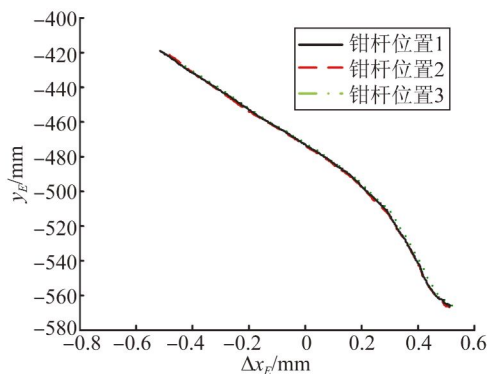


图14 升降过程中钳杆在 x 方向的位移变化量

Fig. 14 Displacement changes of gripper carrier along x axis in lifting movement

令升降直线电动推杆从最低点运动到最高

参考文献:

- [1] 余发国,高峰,郭为忠,等. 锻造操作机的回顾与展望[J]. 机械设计与研究, 2007(专刊):12-15.
YU F G, GAO F, GUO W ZH, *et al.*. Review and prospect of forging manipulator [J]. *Machine Design and Research*, 2007(Suppl):12-15. (in Chinese)
- [2] 高峰,郭为忠,宋清玉,等. 重型制造装备国内外研究与发展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 92-107.
GAO F, GUO W ZH, SONG Q Y, *et al.*. Current development of heavy-duty manufacturing equipment [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(19): 92-107. (in Chinese)
- [3] 张营杰,卫凌云,牛勇,等. 锻造操作机发展现状与研究方向[J]. 锻压装备与制造技术, 2012(2):

11-13.
ZHANG Y J, WEI L Y, NIU Y, *et al.*. Developing status and trend of forging manipulator [J]. *China Metalforming Equipment and Manufacturing Technology*, 2012(2): 11-13. (in Chinese)

点,然后再从最高点返回到最低点,并记录反射球的运动轨迹,重复3次,输出运动过程中钳杆末端的三维坐标,其中水平方向的偏移量与 y 轴坐标变化之间的关系如图14所示。

从图14可以看出,在升降运动过程中,钳杆在 x 方向的位移变化量基本在 ± 0.5 mm 之内。前面理论计算得到的值为 ± 10 mm,其恰好是 ± 0.5 mm 的20倍,这与实验模型是理论计算模型的1/20相吻合,这进一步表明了该完全解耦式锻造操作机确实能够实现升降运动与水平方向移动的解耦。

5 结 论

本文提出了一种完全解耦式操作机,该操作机能够实现包括升降、俯仰、水平缓冲、侧移和侧摆5个自由度的锻造动作,而且能够实现升降运动与水平方向移动的解耦。然后,基于虚功原理建立了完全解耦式操作机的动力学模型,且对比分析了该完全解耦式操作机机构与典型平行连杆式操作机机构在升降运动和锻造加工过程中的动力学性能,结果表明完全解耦式操作机具有较好的动力学性能。最后,自行研制了解耦式操作机的1/20的等比例缩小的实验模型,搭建了实验平台以验证其运动解耦性,利用激光跟踪仪器测量钳杆在升降过程中水平方向的偏移量,实验结果表明:在升降运动过程中,钳杆在 x 方向的位移变化量在 ± 0.5 mm 之内,验证了完全解耦式操作机机构确实能够实现升降运动与水平方向移动的解耦。

- [4] 梁音,赵绪平,王驰,等. 大型锻造操作机研究进展[J]. 科技成果纵横, 2010(2): 55-57.
LIANG Y, ZHAO X P, WANG CH, *et al.*. Research progress of large forging manipulator [J]. *Scientific and Technological Achievements*, 2010(2): 55-57. (in Chinese)
- [5] 李阔强,江兵,周斌,等. 20T 锻造操作机液压控制系统[J]. 农业机械学报, 2015, 45(1): 352-358.
LI G Q, JIANG B, ZHOU B, *et al.*. Hydraulic control system of 20T forging manipulator [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machin-*

- ery, 2015, 45(1): 352-358. (in Chinese)
- [6] DANGO, DIENENTHAL M. Schmiedemanipulator, DE: DE20108277 [P]. 2001-09-06.
- [7] XU Y D, YAO J T, ZHAO Y S. Type synthesis of spatial mechanisms for forging manipulators [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2012, 226(9): 2320-2330.
- [8] 余发国, 高峰, 史巧硕. 基于 GF 集的锻造操作机构型方法 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44(11): 152-159.
- YU F G, GAO F, SHI Q SH. Configuration method of forging manipulator mechanism based on GF set [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(11): 152-159. (in Chinese)
- [9] GE H, GAO F. Type design for heavy-payload forging manipulators [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 25(2): 197-205.
- [10] YAN C Y, GAO F, ZHANG Y. Kinematic modeling of a serial-parallel forging manipulator with application to heavy-duty manipulations [J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2010, 38(1): 105-129.
- [11] XU Y D, ZHAO Y SH. Comparative analysis of two typical mechanisms of forging manipulator [C]. 2010 *International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, Wuhan, China: IEEE, 2010: 2314-2317.
- [12] 许允斗, 赵永生. 三种锻造操作机主运动机构受力比较分析 [J]. *机械设计*, 2012, 29(7): 38-42.
- XU Y D, ZHAO Y SH. Comparative analysis of the force of the main motion of three kinds of forging manipulator mechanisms [J]. *Journal of Machine Design*, 2012, 29(7): 38-42. (in Chinese)
- [13] XU Y D, LIANG S P, LU L, *et al.*. Force capabilities analysis of a typical mechanism of forging manipulator using a modified scaling factor method [J]. *International Journal of Mechanism and Robotic Systems*, 2013, 1(3): 152-169.
- [14] 许允斗, 梁晶晶, 杨彦东, 等. 一种完全解耦式锻造操作机机构 [J]. *机械设计*, 2015, 32(6): 18-21.
- XU Y D, LIANG J J, YANG Y D, *et al.*. A completely decoupled forging manipulator mechanism [J]. *Journal of Machine Design*, 2015, 32(6): 18-21. (in Chinese)
- [15] 姜晓, 李铁民, 王立平. 过约束并联机构动力学建模方法 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(17): 213-219.
- JIANG Y, LI T M, WANG L P. Dynamic modeling method for overconstrained parallel mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(17): 213-219. (in Chinese)
- [16] 陈斌, 宗光华, 于靖军, 等. 一种 2-DOF 类球面并联转台的动力学建模及分析 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(13): 24-30.
- CHEN B, ZONG G H, YU J J, *et al.*. Modeling and analysis of a 2-DOF spherical parallel turntable [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(13): 24-30. (in Chinese)
- [17] ZHAO Y J, GAO F. Inverse dynamics of the 6-DOF out-parallel manipulator by means of the principle of virtual work [J]. *Robotica*, 2009, 27(2): 259-268.
- [18] WANG SH CH, HIROMITSU HIKITA, HIROSHI KUBO, *et al.*. Kinematics and dynamics of a 6 degree-of-freedom fully parallel manipulator with elastic joints [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2003, 38(5): 439-461.
- [19] HUANG ZH, LI Q C. General methodology for type synthesis of lower-mobility symmetrical parallel manipulators and several novel manipulators [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2002, 21(2): 131-146.
- [20] ZHAO T SH, DAI J S, HUANG ZH. Geometric analysis of overconstrained parallel manipulators with three and four degrees of freedom [J]. *JSME International Journal-Series C*, 2002, 45(3), 730-740.
- [21] LU S N, ZLATANOV D, DING X, *et al.*. A novel prism deployable mechanism based on straight-line mechanism [C]. *2nd IFToMM Symposium on Mechanism Design for Robotics*, Beijing, China: 2012.

作者简介:



许允斗 (1985—), 男, 浙江温州人, 博士, 副教授, 2007 年、2012 年于燕山大学分别获得学士和博士学位, 主要从事并联机构学理论及其应用技术的研究。
E-mail: ydxu@ysu.edu.cn



赵永生 (1962—), 男, 吉林龙井人, 教授, 博士生导师, 1983 年、1987 年、1999 年分别于东北重型机械学院、燕山大学分别获得学士、硕士、博士学位, 主要研究方向为机构学理论及其应用技术。
E-mail: yszhao@ysu.edu.cn