

DOI: 10.3901/JME.2010.11.014

# 操作机主运动机构的解耦性研究\*

童 幸 高 峰 张 勇

(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240)

**摘要:** 巨型重载操作机是极限制造装备技术的重要体现, 为了降低操作机的控制难度, 研究 3 种常见锻造操作机主运动机构的解耦性问题。建立 3 种锻造操作机的运动学模型, 并求解机构的速度输入—输出关系矩阵, 发现在传统的输出参数定义下, 3 种操作机的输入始终处于耦合状态。根据实际工作状态重新定义输出参数, 在此基础上提出一个新的解耦定义方法。分别单独求解每个动作下的速度的输入—输出关系矩阵, 并且利用 Matlab 仿真验证, 发现其中一种操作机的主运动机构是完全解耦的, 而另外两种操作机属于部分解耦。从锻造操作机主运动机构的解耦过程来看, 重新定义输出是一种直观的解耦方法, 该方法为并联机构的解耦提供一种新思路。

**关键词:** 锻造操作机 主运动 解耦 并联机构

**中图分类号:** TP24

## Research on Decoupling Performance of Major-motion Mechanism for Forging Manipulators

TONG Xing GAO Feng ZHANG Yong

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

**Abstract:** Heavy-duty forging manipulators play an important role in the extreme manufacturing. Decoupling performance of major-motion mechanism for three commonly used forging manipulators is studied to simplify the control of manipulators. The kinematics of the forging manipulators are analyzed, and the input-output relationship matrix in terms of velocity shows that all the three types of forging manipulators are coupled according to the definition of conventional output parameters. A new decoupling concept is established, which redefines the output based on the realistic working condition. The input-output relationships are considered independently for each main motion, and the process is simulated in Matlab to validate the results. The major-motion mechanism of one forging manipulator is decoupled, while the other two are partially decoupled. From the viewpoint of decoupling of the main-motion mechanism of forging manipulators, the proposed method is intuitive, which provides a new idea for the decoupling of parallel mechanisms.

**Key words:** Forging manipulator Major-motion Decoupling Parallel mechanism

## 0 前言

锻造操作机是锻造车间实现自动化的重要设备, 其惯性大、承载能力强, 通常用于夹持锻件配合锻造压机完成锻造工艺, 也可以用于坯料的运输和堆放等<sup>[1]</sup>。早在 20 世纪 60 年代以前, 锻造操作机就已经问世<sup>[2-3]</sup>, 70 年代到 80 年代各大厂家比较

关注, 在此期间也发明创造了多种锻造操作机<sup>[4-7]</sup>。近年来, 随着各国对大锻件的数量和质量要求越来越高, 锻造操作机在生产过程中的作用越来越受到重视。文献[8]以螺旋理论、李群、集合论等作为数学工具, 为操作机的设计提出重要的理论依据, 文献[9]提出锻造操作机构型方法及其构型法则, 文献[10]结合锻造工艺, 对锻造操作机系统整体进行运动学分析, 这些都促进了锻造操作机的发展。操作机的主运动包括提升、前进和俯仰, 再加上串联在夹钳上的自转运动, 能够满足锻件绝大多数的工序。目前, 对于操作机主运动机构的研究还比较少, 文

\* 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2006CB705402)、国家自然科学基金重点(60534020)和国家高技术研究发展计划(863 计划, 2009AA044102)资助项目。20091224 收到初稿, 20100203 收到修改稿

献[11]对两种典型操作机主运动机构进行分析，根据俯仰难易程度，选择了使用摆杆机构的操作机。

操作机属于重型装备，一般采用液压驱动，其驱动输入是否解耦直接影响到操作机的控制难易。机构的解耦性一般通过雅可比矩阵进行分析，但对于锻造操作机这样的重型机械，其末端输出轨迹并不严格要求直线，因此可以通过重新定义末端的输出参数来进行研究。本文就目前常见的3种锻造操作机(分别记为I型、II型和III型)的主运动进行运动学分析，首先得到3种操作机在传统输出参数下的解耦关系，其次根据实际工况提出新的输出参数，以此来分析这3种的操作机解耦性状况，并且通过Matlab 仿真进行验证。

### 1 操作机主运动机构的运动学分析

如图1所示，I型操作机主运动机构有3个输入，为提升缸 $O_4F$ 、俯仰缸 $BC$ 和缓冲缸 $O_3G$ ，分

$$\begin{cases} d_{a1} = \sqrt{[l_{O_2F}(1 - \cos \phi)]^2 + (l_{O_2F} \sin \phi + d_{10})^2} \\ d_{a2} = \sqrt{[x - l_{OC} \cos \alpha - (l_{O_2E} \cos \phi - l_{CH})]^2 + (y - l_{OC} \sin \alpha - l_{O_2E} \sin \phi)^2} \\ d_{a3} = \sqrt{\left[ \frac{l_{GH}l_{O_2E}}{l_{EH}} \cos \phi + \frac{l_{EG}}{l_{EH}}(x - l_{OH} \cos \alpha) - (l_{O_2E} - l_{CH}) \right]^2 + \left[ \frac{l_{GH}l_{O_2E}}{l_{EH}} \sin \phi + \frac{l_{EG}}{l_{EH}}(y - l_{OH} \sin \alpha) + l_{EG} \right]^2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\phi = \arctan \left( R \pm \sqrt{R^2 - (P^2 - Q^2)} / P + Q \right) \quad (3)$$

$$\begin{cases} P = (x - l_{OH} \cos \alpha)^2 + (y - l_{OH} \sin \alpha)^2 + l_{O_2E}^2 - l_{EH}^2 \\ Q = 2l_{O_2E}(x - l_{OH} \cos \alpha) \\ R = 2l_{O_2E}(y - l_{OH} \sin \alpha) \end{cases} \quad (4)$$

可以得出I型操作机输入—输出关系为

$$\begin{pmatrix} \dot{d}_{a1} \\ \dot{d}_{a2} \\ \dot{d}_{a3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\alpha} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中， $f_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$ 都是含有 $x$ 、 $y$ 、 $\alpha$ 三个变量的函数。

从传统解耦的角度出发，机构完全解耦的必要条件是3种操作机的雅可比矩阵的矩阵元素须满足

$$f_{ij} \equiv 0 \quad (6)$$

式中， $i, j = 1, 2, 3, i \neq j$ 。

式(2)中可以看出，每一个驱动输入都包含了末端位姿，可见操作机的雅可比矩阵无法满足式(6)，

别用 $d_{a1}$ 、 $d_{a2}$ 和 $d_{a3}$ 表示。 $O_2$ 为坐标系原点，末端位姿为 $(x, y, \alpha)$ 。初始时的 $d_{a1}$ 记为 $d_{10}$ ，同时为了便于比较，令 $\angle EO_2F = 0$ 。

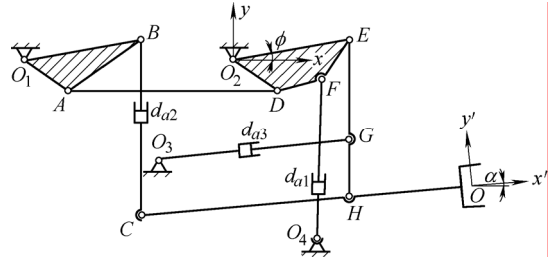


图1 I型操作机主运动机构简图

由约束方程

$$l_{EH}^2 = (x - l_{OH} \cos \alpha - l_{O_2E} \cos \phi)^2 + (y - l_{OH} \sin \alpha - l_{O_2E} \sin \phi)^2 \quad (1)$$

式中， $l_{ij}$ 表示端点为 $i$ 和 $j$ 的杆长(下同)， $\phi$ 为提升臂的转角。

可以求得运动学反解为

因此针对现有输出，I型操作机的输入始终是耦合的。

如图2所示，II型操作机主平面机构有3个输入，为前提升缸 $O_4D$ 、后提升缸 $O_3B$ 和缓冲缸 $HF$ ，分别用 $d_{b1}$ 、 $d_{b2}$ 和 $d_{b3}$ 表示。 $O_2$ 为坐标系原点，末端位姿为 $(x, y, \alpha)$ 。

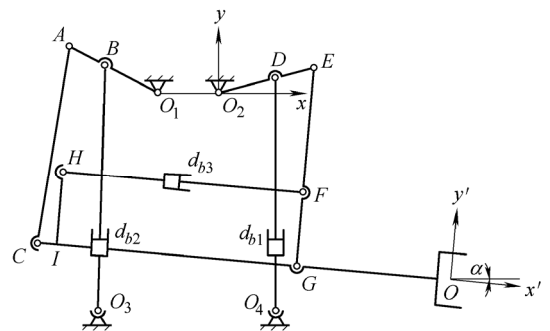


图2 II型操作机主运动机构简图

如图3所示，III型操作机主平面机构有4个输入，但为改善力学性能而增加的后提升缸 $O_3C$ 与前提升缸 $O_4F$ 始终保持同步，因此可以看作仍只有3个输入，为提升缸 $O_4F$ 、俯仰缸 $BG$ 和缓冲缸 $HI$ ，

分别用  $d_{c1}$ 、 $d_{c2}$  和  $d_{c3}$  表示。 $O_2$  为坐标系原点，末端位姿为  $(x, y, \alpha)$ 。

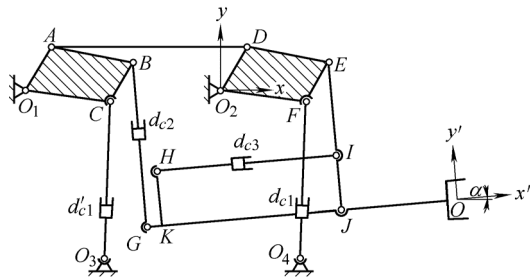


图 3 III型操作机主运动机构简图

经求解，II 型、III 型操作机主运动机构的反解，同样也是每一个输入都包含了末端输出，可见 II 型、III 型操作机的输入同样始终是耦合的。

## 2 操作机主运动的解耦性分析

### 2.1 主运动解耦定义

传统的解耦概念都是相对于绝对坐标系而言，机构的输出由静坐标系下坐标位置以及姿态角表示。而对于像锻造操作机这样的重型装备，实际工作过程中，其末端输出轨迹并不需要严格按照直线行走，而往往是圆弧，因此其末端输出可以通过 3 个主运动来进行表示：机构的提升位置  $T_a$ 、前进位置  $T_b$  以及俯仰转角  $\theta_a$ ，如图 4~6 所示。其中，两个位置变化的轨迹是圆弧，而不是直线。

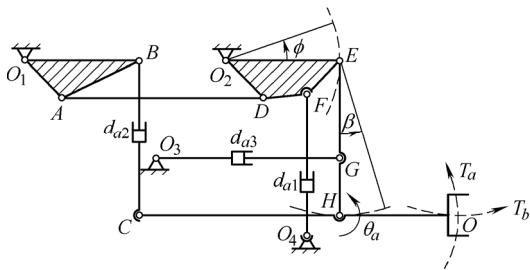


图 4 I 型操作机主运动实际输出机构简图

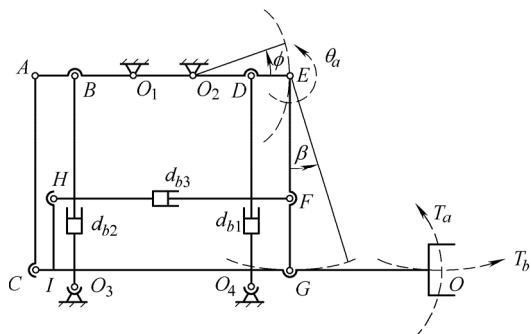


图 5 II 型操作机主运动实际输出机构简图

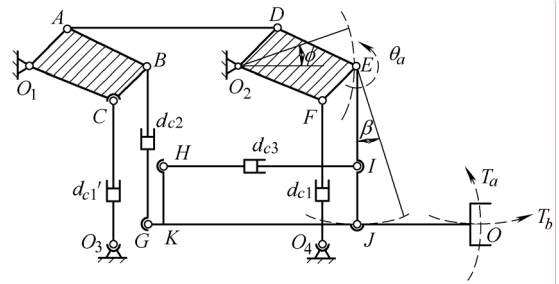


图 6 III型操作机主运动实际输出机构简图

操作机在实际运动中，两个位置变化可以作合成运动，但俯仰转动必须是单独考虑的。为了使结果更为直观，在整个分析过程中末端 3 个动作都是分别单独进行考虑，其具体分析如下。

(1) 操作机末端做提升时，提升位置  $T_a$  改变，它是由提升臂转动引起的，其轨迹与前吊杆在前提升臂上的悬吊点  $E$  轨迹相同，由数学表达式为

$$T_a = S\phi \tag{7}$$

式中， $S$  为提升臂的长度， $\phi$  为前提升臂的转角。

(2) 操作机末端做前进时，前进位置  $T_b$  改变，它是由缓冲缸推动前吊杆绕上悬吊点  $E$  转动引起的，其轨迹与前吊杆和钳杆的铰链点(图 4 中的  $H$  点，图 5 中的  $G$  及图 6 中的  $J$  点)轨迹相同，数学表达式为

$$T_b = l_s\beta \tag{8}$$

式中， $\beta$  为前吊杆绕上悬吊点  $E$  相对于初始位置的转角， $l_s$  为前吊杆的长度。

(3) 操作机末端做俯仰时，俯仰转角  $R_a$  改变，它是由俯仰缸运动引起的。不同的操作机，其旋转中心不尽相同，它可以是平面内任意一点，通常取前吊杆的上悬吊点或者前吊杆和钳杆的铰链点。其表达式为

$$\theta_a = \alpha \tag{9}$$

式中， $\alpha$  为俯仰转角。

式(7)~(9)为机构新定义输出的表达式。由此，可以给出机构解耦新的定义：对于主运动机构的输入变量  $(d_1, d_2, d_3)$ ，如果每个新定义的输出变量  $T_a$ 、 $T_b$  或  $\theta_a$ ，都只与输入量中的一个元素有关，则称之为完全解耦，否则为部分解耦或者耦合。

### 2.2 I 型操作机的解耦性分析

图 4 给出了 I 型操作机末端输出轨迹，其机构尺寸与图 1 机构尺寸相同。

(1) I 型操作机作提升时，其驱动输入变化分别为

$$\begin{cases} d_{a1} = \sqrt{[S(1 - \cos\phi)]^2 + (S\sin\phi + d_{10})^2} \\ d_{a2} = l_{EH} \\ d_{a3} = \sqrt{[l_{CH} - S(1 - \cos\phi)]^2 + (S\sin\phi)^2} \end{cases} \tag{10}$$

令  $d_{a1} = F_{11}(\phi)$ ,  $d_{a3} = F_{31}(\phi)$ , 由  $\dot{T}_a = S\dot{\phi}$ , 可得到

$$\begin{cases} \dot{d}_{a1} = F'_{11}(\phi)\dot{\phi} = \frac{1}{S}F'_{11}\left(\frac{T_a}{S}\right)\dot{T}_a \\ \dot{d}_{a2} = 0 \\ \dot{d}_{a3} = F'_{31}(\phi)\dot{\phi} = \frac{1}{S}F'_{31}\left(\frac{T_a}{S}\right)\dot{T}_a \end{cases} \quad (11)$$

(2) I型操作机作前进时, 其驱动输入变化为

$$\begin{cases} d_{a1} = d_{10} \\ d_{a2} = l_S \\ d_{a3} = \left\{ l_{CH}^2 + 2l_{EG}^2 - 2l_{EG}\sqrt{l_{CH}^2 + l_{EG}^2} \times \right. \\ \left. \cos[\beta + \arctan(l_{CH}/l_{EG})] \right\}^{1/2} \end{cases} \quad (12)$$

令  $d_{a3} = F_{32}(\beta)$ , 由  $\dot{T}_b = l_S\dot{\beta}$ , 可以得到

$$\begin{cases} \dot{d}_{a1} = \dot{d}_{a2} = 0 \\ \dot{d}_{a3} = F'_{32}(\beta)\dot{\beta} = \frac{1}{l_S}F'_{32}\left(\frac{T_b}{l_S}\right)\dot{T}_b \end{cases} \quad (13)$$

(3) I型操作机的旋转中心取在前吊杆的下铰链点, 此时驱动输入变化分别为

$$\begin{cases} d_{a1} = d_{10} \\ d_{a2} = \left\{ 2l_{CH}^2 + l_{EH}^2 - 2l_{CH}\sqrt{l_{CH}^2 + l_{EH}^2} \times \right. \\ \left. \cos[\alpha + \arctan(l_{EH}/l_{CH})] \right\}^{1/2} \\ d_{a3} = l_{CH} \end{cases} \quad (14)$$

令  $d_{a2} = F_{23}(\alpha)$ , 由  $\dot{\theta}_\alpha = \dot{\alpha}$ , 可以得到

$$\begin{cases} \dot{d}_{a1} = \dot{d}_{a3} = 0 \\ \dot{d}_{a2} = F'_{23}(\alpha)\dot{\alpha} = F'_{23}(\theta_\alpha)\dot{\theta}_\alpha \end{cases} \quad (15)$$

可以得出 I 型操作机新的输入—输出关系为

$$\begin{pmatrix} \dot{d}_{a1} \\ \dot{d}_{a2} \\ \dot{d}_{a3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{S}F'_{11}\left(\frac{T_a}{S}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F'_{23}(\theta_\alpha) \\ \frac{1}{S}F'_{31}\left(\frac{T_a}{S}\right) & \frac{1}{l_S}F'_{32}\left(\frac{T_b}{l_S}\right) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{T}_a \\ \dot{T}_b \\ \dot{\theta}_\alpha \end{pmatrix} \quad (16)$$

式(16)中可以看出, 矩阵的第 2 列和第 3 列都只有一个非零元素, 即 I 型操作机在前进和俯仰时输入是解耦的; 矩阵的第 1 列有两个非零元素, 即 I 型操作机在提升时输入是耦合的。因此 I 型操作机主运动机构属于部分解耦。根据给定的操作机机构参数(表 1), 可以得到 I 型操作机在 3 种动作过程中各个驱动缸的轨迹, 如图 7~9 所示。

表 1 I 型操作机机构几何参数 mm

| 参数                      | 数值    |
|-------------------------|-------|
| $O_2E$ 杆长 $l_{O_2E}$    | 2 700 |
| $OH$ 杆长 $l_{OH}$        | 5 550 |
| $CH$ 杆长 $l_{CH}$        | 7 400 |
| $GH$ 杆长 $l_{GH}$        | 2 250 |
| $EG$ 杆长 $l_{EG}$        | 3 100 |
| $O_2F$ 杆长 $l_{O_2F}$    | 1 800 |
| $d_{a1}$ 的初始杆长 $d_{10}$ | 5 600 |

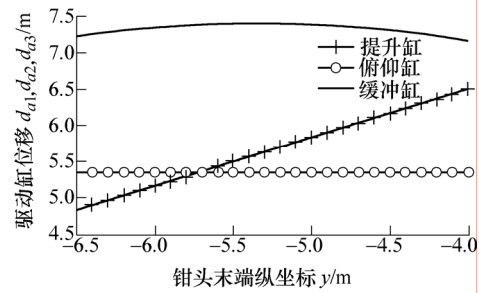


图 7 I 型操作机提升时各驱动轨迹

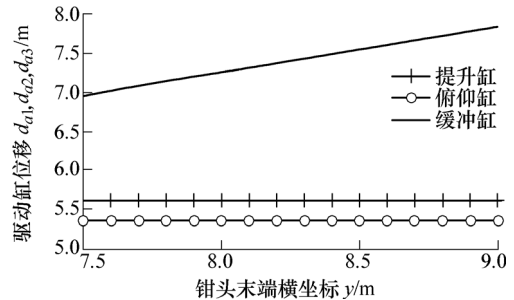


图 8 I 型操作机前进时各驱动轨迹

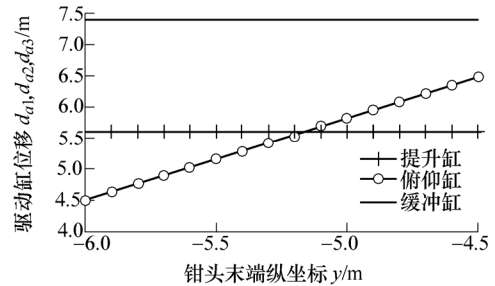


图 9 I 型操作机俯仰时各驱动轨迹

### 2.3 II 型操作机的解耦性分析

图 5 给出了 II 型操作机末端输出轨迹, 同样其机构尺寸与图 2 机构尺寸相同。

(1) II 型操作机作提升时, 其驱动输入变化分别为

$$\begin{cases} d_{b1} = \sqrt{[S(1 - \cos\phi)]^2 + (S\sin\phi + d_{10})^2} \\ d_{b2} = \sqrt{(d_{20}^2 + l_{O_1A}\sin\phi_2)^2 + [l_{O_1A}(1 + \cos\phi_2)]^2} \\ d_{b3} = l_{CG} \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $d_{20}$  为后提升缸初始长度,  $\phi_2$  为后提升臂

倾角。

提升过程中， $\phi_2$  只由前提升臂转角  $\phi$  确定，同样令  $d_{b1} = G_{11}(\phi)$ ， $d_{b2} = G_{21}(\phi)$ ，则由  $\dot{T}_a = S\dot{\phi}$ ，可以得到

$$\begin{cases} \dot{d}_{b1} = G'_{11}(\phi)\dot{\phi} = \frac{1}{S}G'_{11}\left(\frac{T_a}{S}\right)\dot{T}_a \\ \dot{d}_{b2} = G'_{21}(\phi)\dot{\phi} = \frac{1}{S}G'_{21}\left(\frac{T_a}{S}\right)\dot{T}_a \\ \dot{d}_{b3} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

(2) II 型操作机作前进时，驱动输入变化为

$$\begin{cases} d_{b1} = d_{b2} = d_{10} \\ d_{b3} = \sqrt{l_{CG}^2 + l_{EF}^2 - 2l_{CG}l_{EF}\sin\beta} \end{cases} \quad (19)$$

令  $d_{b3} = G_{32}(\beta)$ ，由  $\dot{T}_b = l_S\dot{\beta}$ ，可以得到

$$\begin{cases} \dot{d}_{b1} = \dot{d}_{b2} = 0 \\ \dot{d}_{b3} = G'_{32}(\beta)\dot{\beta} = \frac{1}{l_S}G'_{32}\left(\frac{T_b}{l_S}\right)\dot{T}_b \end{cases} \quad (20)$$

(3) II 型操作机的旋转中心取在前吊杆的下铰链点，此时驱动输入变化分别为

$$\begin{cases} d_{b1} = d_{10} \\ d_{b2} = \sqrt{(d_{20}^2 + l_{O_1A} \sin\phi_2)^2 + [l_{O_1A}(1 + \cos\phi_2)]^2} \\ d_{b3} = l_2 \end{cases} \quad (21)$$

同样， $\phi_2$  也只由  $\phi$  确定，令  $d_{b2} = G_{23}(\phi)$ ，由  $\dot{\theta}_\alpha = \dot{\alpha}$ ，可以得到

$$\begin{cases} \dot{d}_{b1} = \dot{d}_{b3} = 0 \\ \dot{d}_{b2} = G'_{23}(\alpha)\dot{\alpha} = G'_{23}(\theta_\alpha)\dot{\theta}_\alpha \end{cases} \quad (22)$$

可以得出 II 型操作机新的输入—输出关系为

$$\begin{pmatrix} \dot{d}_{b1} \\ \dot{d}_{b2} \\ \dot{d}_{b3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{S}G'_{11}\left(\frac{T_a}{S}\right) & 0 & 0 \\ \frac{1}{S}G'_{21}\left(\frac{T_a}{S}\right) & 0 & G'_{23}(\theta_\alpha) \\ 0 & \frac{1}{l_S}G'_{32}\left(\frac{T_b}{l_S}\right) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{T}_a \\ \dot{T}_b \\ \dot{\theta}_\alpha \end{pmatrix} \quad (23)$$

式(23)中，矩阵的第 2 列和第 3 列都只有一个非零元素，即 II 型操作机的前进和俯仰时输入是解耦的；矩阵的第 1 列有两个非零元素，同样 II 型操作机的提升时输入是耦合的，与 I 型操作机不同点在于 I 型操作机是提升缸与缓冲缸耦合，而 II 型操作机是前后两个提升缸耦合。可见，II 型操作机主运动机构属于部分解耦。如表 2 所示，根据给定的操作机机构参数，可以得到 II 型操作机在 3 种动作过程中

各个驱动缸的轨迹，如图 10~12 所示。

| 参数                      | 数值    |
|-------------------------|-------|
| $O_2E$ 杆长 $l_{O_2E}$    | 2 700 |
| $OG$ 杆长 $l_{OG}$        | 5 550 |
| $CG$ 杆长 $l_{CG}$        | 7 400 |
| $FG$ 杆长 $l_{FG}$        | 2 250 |
| $EF$ 杆长 $l_{EF}$        | 3 100 |
| $O_2D$ 杆长 $l_{O_2D}$    | 1 800 |
| $d_{b1}$ 的初始杆长 $d_{10}$ | 5 600 |

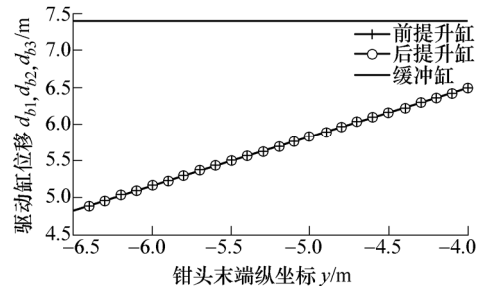


图 10 II 型操作机提升时各驱动缸轨迹

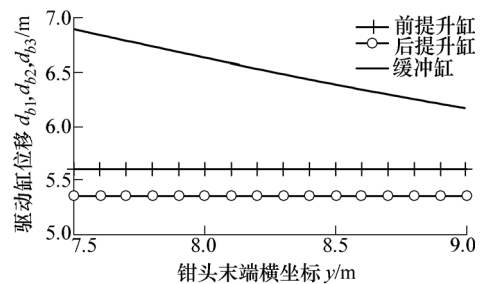


图 11 II 型操作机前进时各驱动缸轨迹

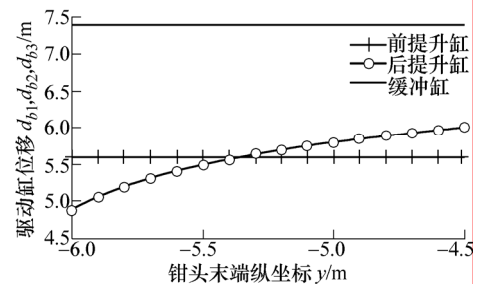


图 12 II 型操作机俯仰时各驱动缸轨迹

### 2.4 III 型操作机的解耦性分析

图 6 给出了 III 型操作机末端输出轨迹，同样其机构尺寸与图 3 机构尺寸相同。

(1) III 型操作机作提升时，其驱动输入变化分别为

$$\begin{cases} d_{c1} = \sqrt{[S(1 - \cos\phi)]^2 + (S\sin\phi + d_{10})^2} \\ d_{c2} = l_{EJ} \\ d_{c3} = l_{GJ} \end{cases} \quad (24)$$

令  $d_{c1} = H_{11}(\phi)$ ，由  $\dot{T}_a = S\dot{\phi}$ ，可以得到



$$\begin{cases} \dot{d}_{c1} = H'_{11}(\phi)\dot{\phi} = \frac{1}{S}H'_{11}\left(\frac{T_a}{S}\right)\dot{T}_a \\ \dot{d}_{c2} = \dot{d}_{c3} = 0 \end{cases} \quad (25)$$

(2) III型操作机作前进时，驱动输入变化为

$$\begin{cases} d_{c1} = d_{10} \\ d_{c2} = l_{EJ} \\ d_{c3} = \sqrt{(l_{GJ} - l_{EI} \sin \beta)^2 + (l_{EI} \cos \beta - l_{EI})^2} \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} d_{c1} = d_{10} \\ d_{c2} = \sqrt{\left[l_{GJ} - \sqrt{l_{GJ}^2 + l_{EJ}^2} \sin(\theta_0 - \alpha)\right]^2 + \left[\sqrt{l_{GJ}^2 + l_{EJ}^2} \cos(\theta_0 - \alpha)\right]^2} \\ d_{c3} = l_{EJ} \end{cases} \quad (28)$$

式中， $\theta_0 = \arctan(l_{GJ}/l_{EJ})$ 。

令  $d_{c2} = H_{23}(\alpha)$ ，由  $\dot{\theta}_\alpha = \dot{\alpha}$ ，可以得到

$$\begin{cases} \dot{d}_{c1} = \dot{d}_{c3} = 0 \\ \dot{d}_{c2} = H'_{23}(\alpha)\dot{\alpha} = H'_{23}(\theta_\alpha)\dot{\theta}_\alpha \end{cases} \quad (29)$$

可以得出III型操作机新的输入—输出关系为

$$\begin{pmatrix} \dot{d}_{c1} \\ \dot{d}_{c2} \\ \dot{d}_{c3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{S}H'_{11}\left(\frac{T_a}{S}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H'_{23}(\theta_\alpha) \\ 0 & \frac{1}{l_S}H'_{32}\left(\frac{T_b}{l_S}\right) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{T}_a \\ \dot{T}_b \\ \dot{\theta}_\alpha \end{pmatrix} \quad (30)$$

式(30)中，矩阵的每一列和每一行都只有一个非零元素，可见不同于前两种操作机，III型操作机的输入是完全解耦的。

给定操作机的机构参数，可以得到III型操作机在3种动作过程中各个驱动缸的轨迹。根据给定的操作机机构参数(表3)，可以得到III型操作机在3种动作过程中各个驱动缸的轨迹，如图13~15所示。

表3 III型操作机机构几何参数 mm

| 参数                      | 数值    |
|-------------------------|-------|
| $O_2E$ 杆长 $l_{O_2E}$    | 2 700 |
| $OJ$ 杆长 $l_{OJ}$        | 5 550 |
| $GJ$ 杆长 $l_{GJ}$        | 7 400 |
| $IJ$ 杆长 $l_{IJ}$        | 2 250 |
| $EI$ 杆长 $l_{EI}$        | 3 100 |
| $O_2F$ 杆长 $l_{O_2F}$    | 1 800 |
| $d_{c1}$ 的初始杆长 $d_{10}$ | 5 600 |

综上可以得出在新的解耦概念下，3种操作机的解耦情况，如表4所示。

令  $d_{c3} = H_{32}(\beta)$ ，由  $\dot{T}_b = l_S \dot{\beta}$ ，可以得到

$$\begin{cases} \dot{d}_{c1} = \dot{d}_{c2} = 0 \\ \dot{d}_{c3} = H'_{32}(\beta)\dot{\beta} = \frac{1}{l_S}H'_{32}\left(\frac{T_b}{l_S}\right)\dot{T}_b \end{cases} \quad (27)$$

(3) 与II型操作机一样，III型操作机的旋转中心同样取在前吊杆的下铰链点，驱动输入变化为

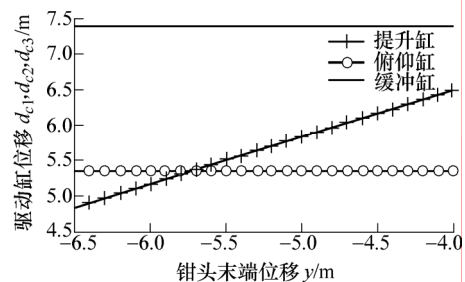


图13 III型操作机提升时各驱动轨迹

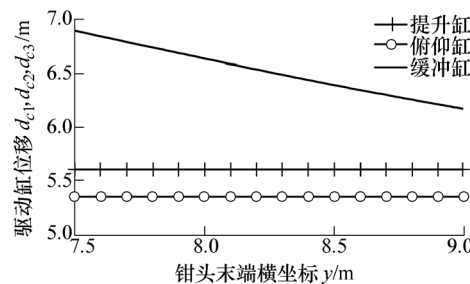


图14 III型操作机前进时各驱动轨迹

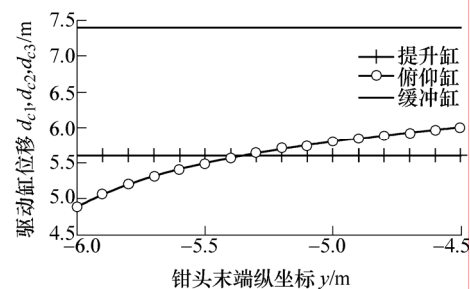


图15 III型操作机俯仰时各驱动轨迹

表4 三种操作机解耦情况

|    | I型 | II型 | III型 |
|----|----|-----|------|
| 提升 | 耦合 | 耦合  | 解耦   |
| 俯仰 | 解耦 | 解耦  | 解耦   |
| 倾斜 | 解耦 | 解耦  | 解耦   |

### 3 结 论

(1) 根据操作机在车间内的实际工作情况归纳出三种基本的输出运动,并以此为基础进行解耦性的研究,发现 I 型操作机和 II 型操作机是部分解耦的,而 III 型操作机是完全解耦的。

(2) I 型和 II 型操作机都是在提升过程中有耦合,前者相耦合的是提升缸和缓冲缸,而后者则是前后提升缸。相比于另外两种操作机,III 型操作机的三个输出运动都是解耦的,这样可以使其控制策略简单,并提高工作中的可靠性。

#### 参 考 文 献

- [1] 王凤喜. 锻造液压机与操作机的发展[J]. 重型机械, 1998(6): 3-5.  
WANG Fengxi. Development of forging hydraulic press and forging manipulator[J]. Heavy Machinery, 1998(6): 3-5.
- [2] 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(增刊): 12-15.  
YU Faguo, GAO Feng, GUO Weizhong, et al. Review and expectation of forging manipulators[J]. Machine Design and Research, 2007(Suppl.): 12-15.
- [3] LILLY K W, MELLIGERI A S. Dynamic simulation and neural network compliance control of an intelligent forging center[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 1996, 17(1): 81-99.
- [4] WILSON W. Manipulators: US, 3568497[P]. 1971-03-09.
- [5] HARRISON R H. Forging manipulator: US, 3696651[P]. 1972-10-10.
- [6] ERWIN K, WERNER F. Gripper feed and gripper resilience cylinders on forging manipulators: US, 4420287[P]. 1983-12-13.
- [7] SCHUBERT P. Forging manipulator: US, 4796458[P]. 1989-01-10.
- [8] 高峰. 机构学研究现状与发展趋势的思考[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 3-17.  
GAO Feng. Reflection on the current status and development strategy of mechanism research[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 3-17.
- [9] 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(2): 230.  
YU Faguo, GAO Feng, SHI Qiaoshuo. Type synthesis for forging manipulators based on GF set[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 230.
- [10] YAN Changya, GAO Feng, GUO Weizhong. Coordinated kinematic modeling for motion planning of heavy-duty manipulators in an integrated open-die forging centre[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(10): 1 299-1 313.
- [11] REN Yunpeng, LU Chongshao, HAN Qingkai, et al. Simulated comparison on kinematics properties of two typical mechanisms of forging manipulator[C]// ICMIT 2007: Mechatronics, MEMS, and Smart Materials, December 5-6, 2007, Gifu, Japan: Proceedings of the SPIE, 2007.

作者简介: 童幸(通信作者), 男, 1985 年出生。主要研究方向为并联机器人及应用。

E-mail: nestatong@gmail.com

高峰, 男, 1956 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为并联机器人理论及应用。

E-mail: fengg@sytu.edu.cn