

# 机械压力机低速锻冲机构的遗传算法优化设计

何予鹏, 赵升吨, 杨 辉, 袁建华

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 采用斯蒂芬森六连杆作为机械压力机的工作机构, 用 12 个设计变量建立了滑块的运动方程, 建立了以滑块在工作阶段的速度波动、最大速度和工作压力角均为最小的优化设计数学模型. 以 JH23-63 型机械压力机的技术参数为依据, 采用遗传优化算法进行求解, 设计的斯蒂芬森六连杆压力机在公称压力行程范围内, 滑块的最大工作速度仅为 94 mm/s, 工作行程与行程速比系数为 2.461 5, 并且具有平均速度为 99 mm/s 的平台. 该新压力机在要求低速锻冲的板料拉延工艺等实际应用中, 与原普通型机械压力机相比, 其工作性能有明显的提高.

**关键词:** 机械压力机; 斯蒂芬森链; 速度; 优化; 遗传算法

**中图分类号:** TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)05-0490-04

## Optimum Design of the Mechanical Press with Low-Speed and Stamping-Punch Mechanism Based on Genetic Algorithm

He Yupeng, Zhao Shengdun, Yang Hui, Yuan Jianhua

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The Stephenson's chain is used as the working mechanism of the mechanical press. The kinematical equations are established with 12 design variables, and the mathematical mold of optimum design is also set up according to the minimum of the fluctuating for which velocity, the maximum velocity, and the pressure angular in the stamping-punch stage. On the basis of the key technical parameters of JH23-63 type mechanical press, the Stephenson six-bar linkage mechanical press is designed by means of genetic optimal algorithm, velocity of the slide in the nominal pressure stroke is 94 mm/s, proportion of for which forging-stamping stroke time to return time is 2.461 5, and there is an obvious speed flatness of 99 mm/s in the speed curve of the mechanism. It is shown that the working characteristics of this mechanical press are much better than the conventionally common mechanical press in the low-speed stamping-punch and drawing technology application.

**Keywords:** *mechanical press; Stephenson's chain; speed; optimum; genetic algorithm*

机械压力机在使工件产生塑性变形过程中, 往往要求滑块有较低的工作速度, 这样可以防止由于过高的变形速度使工件产生裂纹而失效, 并且较低的锻冲工作速度还可以提高模具的使用寿命, 大大降低锻冲时的冲击振动和噪声, 特别在板料拉延时, 对滑块拉深阶段的低速性要求更严格, 以至于需要结构复杂的专用拉延压力机才能满足此要求. 通用

型的机械压力机一般用对心曲柄滑块机构作为工作机构, 该机构滑块的速度呈现正弦变化规律, 且在滑块上下运动中具有对称性, 即滑块的工作行程和回程具有同样的工作速度变化规律. 由于该机构的滑块在工件锻冲塑性变形区工作速度较高, 因此不能满足板料拉延的加工要求. 实现机械压力机低速锻冲的方法很多, 其中多连杆机构具有结构简单、制造

成本低、工作可靠等优点,但目前的多连杆式低速锻冲机构<sup>[1,2]</sup>仍存在着结构复杂、设计理论不完善和性能不高等需要解决的问题。

文献[3]利用遗传算法,通过对铰链四杆机构连杆曲线的拟合,设计出了满足给定条件的四杆机构,并证明了遗传算法在机构设计中具有收敛速度快、实施起来容易等优点。文献[4]采用了模糊与遗传相结合的算法,对铰链四杆机构的连杆曲线拟合问题进行了研究,证明该方法比单纯的遗传算法具有更好的计算精度。文献[5]对瓦特链六杆机构压力机进行了优化设计,使得该压力机可以满足精拉延工艺的要求。由于斯蒂芬森链的滑块运动受制于连杆曲线,因此在用综合分析法求解时,往往不能得到满足一定要求的结果。本文采用遗传算法,对具有低速锻冲特性的斯蒂芬森链的机械压力机利用遗传优化算法进行求解,获得了具有良好低速锻冲特性的六连杆机构。

## 1 对机械压力机低速锻冲机构性能的要求

机械压力机的低速锻冲机构应满足以下要求。

(1)机械压力机在工件塑性变形阶段应该具有较低的速度。经过对现有不同规格的机械压力机、特别是双动拉延压力机的工件变形速度的比较和统计,本文确定机械压力机在低速锻冲工作时的速度应该小于 100 mm/s。

(2)机械压力机在锻冲工件时要有一定的位移量。机械压力机在锻冲工件时要对工件做功,以使其塑性变形,因此机械压力机所能提供的滑块位移量应大于工件塑性变形工艺要求的高度,否则无法完成加工。可以将该变形高度转化为相应的曲柄转角 $\varphi_1$ ,鉴于机械压力机的工件变形角通常都小于 $45^\circ$ ,而通用机械压力机的公称压力角都小于 $35^\circ$ ,从保守角度考虑,机械压力机低速锻冲阶段的许用变形角 $[\alpha]=45^\circ$ 。

(3)该机构不应降低滑块每分钟的锻冲次数,即要求滑块在锻冲阶段具备低速特性,而在回程时应具有急回特性。

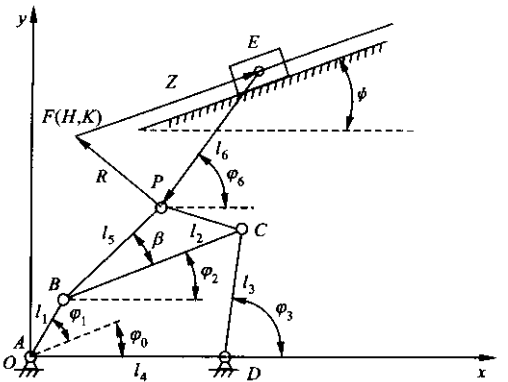
## 2 机构的组成及其设计变量

为实现低速锻冲要求,本文采用了如图 1 所示的斯蒂芬森六杆机构作为机械压力机的工作机构。该机构可以看成是由铰链四杆机构和一个二级杆组

合而成,因此滑块的运动规律主要受到 2 个因素的制约:①铰链四杆机构 ABCD 各杆的长度和连杆 BC 上 P 点的位置,它们决定了连杆曲线的形状;②滑块 E 导轨相对四杆机构 ABCD 的位置决定了滑块的某些运动规律。因此,滑块的运动由图 1 中的 $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, \beta, H, K, \psi, \varphi_1, \varphi_0$  决定,而且在这 12 个变量中,任何一个的变化都将对滑块运动产生影响。该机构除去以上几个设计变量外,还有非独立变量 $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_6$ ,但这 3 个变量是中间变量,不作为设计变量对待。

## 3 运动方程的建立

对机构的运动分析主要包括求解滑块以及其他活动构件的位移、速度和加速度。对机构进行运动分析的方法有很多,其中矢量分析法应用得较为普遍<sup>[6]</sup>。由图 1 可知,铰链四杆机构 ABCD 环形回路



$l_1 \sim l_6$ : 杆的长度;  $\varphi_0$ : 曲柄 AB 的初始转角;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_6$ : 对应构件任意位置的转角;  $Z$ : 滑块的位移;  $\beta: l_2$  与  $l_5$  的夹角;  $\psi: i$  滑块导轨的方向角;  $H, K$ : 滑块 F 的原点坐标;  $A, B, C, D, E, P$ : 各转动副的铰链中心。

图 1 斯蒂芬森六杆机构的工作原理和运动参数

的矢量方程为

$$\mathbf{I}_{AB} + \mathbf{I}_{BC} - \mathbf{I}_{CD} - \mathbf{I}_{DA} = 0 \quad (1)$$

将式(1)中的各矢量分别对图 1 中的  $x, y$  坐标轴投影,这样式(1)可转化为

$$l_1 \cos(\varphi_1 + \varphi_0) + l_2 \cos\varphi_2 - l_3 \cos\varphi_3 - l_4 = 0 \quad (2)$$

$$l_1 \sin(\varphi_1 + \varphi_0) + l_2 \sin\varphi_2 - l_3 \sin\varphi_3 = 0 \quad (3)$$

式(2)、式(3)是关于  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  的非线性方程组,为此在给定  $l_1, l_2, l_3, l_4$  以及  $\varphi_0, \varphi_1$  时,可以利用 Matlab 软件直接求出未知量  $\varphi_2, \varphi_3$  的数值解。

求解连杆上 P 点的坐标时,将  $\mathbf{I}_{AB}, \mathbf{I}_{BP}$  分别向  $x, y$  坐标投影,可得 P 点的  $x, y$  坐标为

$$P_x = l_1 \cos(\varphi_1 + \varphi_0) + l_5 \cos(\varphi_2 + \beta) \quad (4)$$

$$P_y = l_1 \sin(\varphi_1 + \varphi_0) + l_5 \sin(\varphi_2 + \beta) \quad (5)$$

当由式(2)和式(3)求出在  $360^\circ$  范围内不同  $\varphi_1$  下的  $\varphi_2, \varphi_3$  后, 式(4)和式(5)中各个参数均为已知量, 这样就可以求出  $P$  点的  $x, y$  坐标值, 并绘出  $P$  点的轨迹曲线(连杆曲线)。

为了求解如图 1 所示的  $Z$ , 利用环形回路的矢量三角形  $FEP$ , 得到的矢量方程为

$$\mathbf{I}_{FE} + \mathbf{I}_{EP} + \mathbf{I}_{PF} = 0 \quad (6)$$

将式(6)中的各个矢量向  $x, y$  坐标轴投影后, 得到

$$Z \cos \psi - l_6 \cos \varphi_6 + R_x = 0 \quad (7)$$

$$Z \sin \psi - l_6 \sin \varphi_6 + R_y = 0 \quad (8)$$

式中:  $R_x$  和  $R_y$  是矢量在  $x, y$  方向的分量, 由  $F$  点和  $E$  点的坐标决定. 这样由图 1 得到

$$R_x = H - P_x \quad (9)$$

$$R_y = K - P_y \quad (10)$$

$P_x, P_y$  由式(4)、式(5)求出, 式(7)~式(10)中的  $Z, \varphi_6$  和  $R_x, R_y$  还可用 Matlab 软件进行求解, 这样就可获得  $Z$  的结果, 而由式(7)、式(8)解出的  $Z$  是由  $F$  点指向  $E$  点. 同样, 对以上各式求导, 并采用类似的计算方法, 可以求出滑块的速度  $\dot{Z}$  和加速度  $\ddot{Z}$ .

## 4 遗传算法优化设计

通过上述对斯蒂芬森六连杆机构组成的分析可知, 决定其滑块运动规律的变量有 12 个, 因此该机构优化设计的变量可取为

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}]^T = (l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, \varphi_1, \varphi_0, \beta, \psi, H, K)^T \quad (11)$$

为了保证机械压力机具有低速锻冲的特性, 取滑块在锻冲阶段的速度波动、最大速度和传动角为多目标函数

$$f(\mathbf{X}) = W_1 \Delta v + W_2 v_{\max} + W_3 |90 - \gamma_1| + W_4 |90 - \gamma_2| \quad (12)$$

式中:  $\Delta v$  为滑块在锻冲阶段的速度波动;  $v_{\max}$  为在锻冲阶段的速度最大值;  $\gamma_1, \gamma_2$  为滑块在锻冲阶段  $C$  点和  $E$  点的传动角;  $W_1, W_2, W_3$  和  $W_4$  为加权系数.

在优化过程中, 取  $W_1 = 0.5, W_2 = 0.3, W_3 = 0.1, W_4 = 0.1$ .

在求解目标函数时, 还要考虑约束条件, 使滑块在工作阶段的平均速度不应超过  $100 \text{ mm/s}$ , 即

$$g(x) = 100 - v_m \geq 0 \quad (13)$$

在优化过程中, 目标函数  $f(\mathbf{X})$  获得的最小值为最优, 但是在用遗传算法优化时, 适应度函数取得的最大值为最优, 因此取适应度函数为

$$L(\mathbf{X}) = \frac{1}{f(\mathbf{X}) + 1} \quad (14)$$

## 5 计算实例

以 JH23-63 型公称压力为  $630 \text{ kN}$  的机械压力机为工程背景来设计斯蒂芬森六连杆机械压力机. 该机械压力机的技术参数为每分钟行程次数  $60$  次, 滑块行程  $100 \text{ mm}$ , 滑块的公称压力角为  $29^\circ$ .

设计要求在满足以上  $630 \text{ kN}$  机械压力机基本技术参数的前提下, 还应满足使滑块在工作行程等于  $8 \text{ mm}$  范围内的工作速度小于  $100 \text{ mm/s}$  的低速锻冲要求.

在用遗传算法进行优化时, 选择二进制编码, 种群中的个体数目为  $80$ , 交叉概率为  $0.95$ , 变异概率<sup>[7]</sup>为  $0.08$ . 考虑到机械压力机的结构尺寸限制, 取变量的可行域为

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12})^T \in [40 \ 80; 40 \ 90; 40 \ 120; 40 \ 120; 20 \ 60; 100 \ 160; 0 \ 2\pi; 0 \ 2\pi; -\pi \ \pi; 0 \ 2\pi; -20 \ 20; 40 \ 80]$$

经过  $984$  次遗传迭代, 得到了最优结果. 对优化计算结果进行圆整, 可以得到斯蒂芬森六连杆机构的主要参数为  $l_1 = 50 \text{ mm}, l_2 = 71 \text{ mm}, l_3 = l_4 = 94 \text{ mm}, l_5 = 24 \text{ mm}, l_6 = 144 \text{ mm}, H = 0, K = 76 \text{ mm}, \beta = 0^\circ, \psi = 180^\circ, \varphi_0 = 46^\circ$ .

图 2 和图 3 给出了斯蒂芬森六连杆压力机和原有的 JH23-63 型通用机械压力机滑块的位移和速度曲线. 从图 2 中可以看出, 当滑块下行时, 对应的

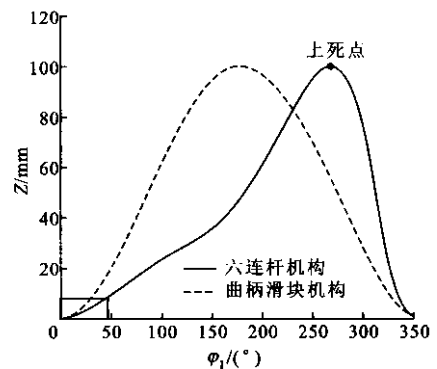


图 2 2 种机械压力机位移曲线的比较

曲柄转角为  $256^\circ$ , 当滑块上行时, 对应的曲柄转角为  $104^\circ$ , 其行程速比系数  $k = 2.4615$ , 这说明该机械压力机有明显的急回特性. 从图 3 中可以看出, 滑块在  $\varphi_1 = 0^\circ \sim 47^\circ$  内的最大速度为  $94 \text{ mm/s}$ , 比原有的 JH23-63 型机械压力机滑块在该曲柄转角范围内的最大速度 ( $221 \text{ mm/s}$ ) 有了大幅度的降低. 另外, 对应  $\varphi_1 = 50^\circ \sim 100^\circ$  时, 斯蒂芬森六连杆压力机滑块的速度出现了一个  $99 \text{ mm/s}$  的平台, 这个速度平台可

以用来满足机械压力机对多种工艺加工的要求,特别是拉延工艺等.原有的 JH23-63 型机械压力机滑块不仅没有速度平台,而且还在锻冲阶段使滑块的速度过高.由此可见,斯蒂芬森六连杆机构压力机与原有的 JH23-63 型机械压力机相比,其速度特性有了明显的提高,因此该机构在工业实际中值得推广应用.

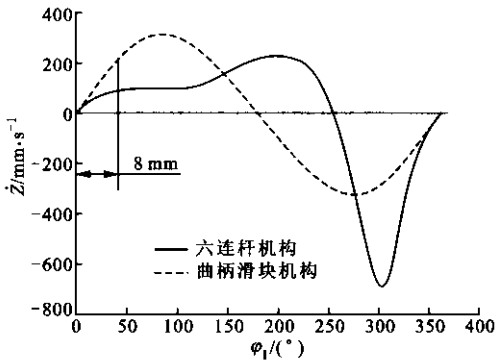


图3 2种机械压力机速度曲线的比较

## 6 结 论

(1)对于机械压力机中使用的低速锻冲急回机构,在低速锻冲阶段滑块的速度应不大于 100 mm/s,且滑块应具备足够的行程(通常应大于工件变形高度,或 $[\alpha]=45^\circ$ ).

(2)由于斯蒂芬森六连杆机构适合于机械压力机低速锻冲急回之用,因此本文建立了适合 Matlab 语言使用的斯蒂芬森机构的运动方程.

(3)使用遗传算法对斯蒂芬森六连杆机构的参

数进行优化设计,得到的多目标函数应使滑块在锻冲阶段的速度波动最小、滑块速度尽可能小和传动角尽可能大,并且使滑块速度在该阶段内不超过 100 mm/s.

(4)本文设计的斯蒂芬森六连杆机械压力机在公称压力位置滑块的工作速度为 94 mm/s,行程速比系数为 2.461 5,速度平台的平均速度为 99 mm/s.

## 参考文献:

- [1] 何德誉. 曲柄压力机[M]. 北京:机械工业出版社, 1981. 8-10.
- [2] 赵升吨,何予鹏,王 军. 机械压力机低速锻冲急回机构运动特性的研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2004, 38(3): 24-32.
- [3] Laribi M A, A combined genetic algorithm-fuzzy logic method (GA-FL) in mechanism synthesis [J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(7): 717-735.
- [4] Cabrera J A, Optimal synthesis of mechanisms with genetic algorithms [J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(12): 1 165-1 177.
- [5] Hwang W M. A drag-ink drive of mechanical presses for precision drawing [J]. Int J Mach Tools Manufact, 1995, 35(10): 1 425-1 433.
- [6] 华大年. 连杆机构设计[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1995. 66-94.
- [7] 王小平,曹立明. 遗传算法理论应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2003. 104-122.

(编辑 管咏梅)

## 《机械科学与技术》2004 年第 6 期目录

1. 记忆合金柔性机械手研究 ..... 杨 凯,辜承林(634)
2. 双轮驱动足球机器人动态性能分析 ..... 程 福,赵 臣,甄宗雷(640)
3. 产品设计重用技术支持体系研究 ..... 王 玉(643)
4. 多功能结构的支撑技术 ..... 侯悦民,季林红,金德闻(658)
5. 数控弯管中芯棒对管壁厚减薄作用的有限元分析 ..... 詹 梅,杨 合,李 镇(669)
6. 基于神经网络的空间 7R 机器人模型辨识及其实验研究 ..... 姜春福,余跃庆,刘迎春(671)
7. 基于实例的飞机钣金工艺设计 ..... 王俊彪,盛 威(675)
8. 三维编织复合材料拉伸性能试验研究 ..... 郑锡涛,叶天麒,郭稳学(681)
9. 表面电机的不同结构的性能分析 ..... 刘学鹏,梅雪松,马 腾,吴序堂(699)
10. 漂浮基带滑移铰空间机器人相对轨迹运动的变结构鲁棒控制 ..... 陈 力(705)
11. 平面双稳态柔性微机构的优化设计 ..... 李团结,曹 炎,李世俊,周小勇(709)
12. 光固化零件的变形理论研究 ..... 杨继全,侯丽雅(723)
13. 基于网络的机器人仿真及控制技术 ..... 于艳秋,廖启征,张 勇(728)