

文章编号:1009-3087(2015)06-0165-07

DOI:10.15961/j.jsuese.2015.06.023

基于 PR-11R III 级复合连杆滚动剪切机构运动学分析

楚志兵,杨彦龙,黄庆学*,马立峰,吕阳阳,魏 栋

(太原科技大学 重型机械教育部工程研究中心,山西 太原 030024)

摘 要:通过对国内外现有的液压板材剪切机结构的原理分析,提出一种新型的单液压缸驱动的液压滚切式板材剪切机,获得 PR-11R III 级杆组的复合连杆机构简化模型。以实现纯滚动剪切为设计前提,利用闭环矢量法对该复合连杆滚切机构进行正运动学建模,给出机构的闭环矢量,推导其运动学方程,借助 MATLAB/Simulink 软件对其进行运动学仿真分析计算,获得上刀台各关键点的运动轨迹及主要衡量指标。以推广应用的某大型机械有限公司 2 000 mm 单液压缸驱动的液压滚切式板材剪切机研发项目为依托,对剪切机构的运动轨迹进行运动学模拟仿真,结果表明上下剪刀重叠量和刀弧水平偏移量的模拟结果均符合实际生产要求,从而更进一步证实了该新型的单液压缸驱动的液压滚切式板材剪切机构设计的合理性与运动学模型的正确性。

关键词:复合连杆机构;运动学分析;闭环矢量法;仿真;重叠量

中图分类号:TG333

文献标志码:A

Kinematical Analysis of PR-11R III Level Composite Rod Linkage Mechanism

CHU Zhibing, YANG Yanlong, HUANG Qingxue*, MA Lifeng, LYU Yangyang, WEI Dong

(Taiyuan Univ. of Sci. and Technol., Heavy Machinery of Eng. Research Center of Ministry of Education, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A new rolling shear mechanism was put forward which was driven by one horizontally positioned hydraulic cylinder by analyzing the present hydraulic shear mechanism at home and abroad. Moreover, based on the linkage, the simplifying model of PR-11R III level composite rod linkage mechanism was obtained. Besides, in order to meet the demand of pure rolling, the kinematical analysis about the rolling shear mechanism was achieved by means of the building of closed loop vector method, and then the kinematical simulation analysis was calculated using the software of MATLAB/Simulink. Finally, depending on the development project on extensive popularization of 2 000 mm rolling shear mechanism driven by one hydraulic cylinder for some large machine company, the simulation of the mechanism motion trajectory was conducted. The result of the simulation and the trajectory showed that the horizontal offset of the shear blade arc and the value of the overlap between the upper and lower shear blade meet the design requirements, which proved the reasonability of the rolling shear mechanism and the correctness of the kinematical analysis.

Key words: composite rod linkage mechanism; kinematical analysis; closed loop vector method; simulation; overlap value

目前国内外传统的液压板材剪切机主要有液压斜刃剪和液压摆式剪 2 种,其中液压斜刃剪大部分采用同步液压缸驱动上剪刀,使之预先倾斜一定的角度对钢板进行剪切,由于上下剪刀重叠量大且不均匀,导致剪切窄条钢板时会产生图 1 所示的“镰刀弯”缺陷;液压摆式剪的工作原理是剪刀围绕着

刀弧的中心点对钢板进行摆动剪切,导致钢板的断面经常会产生图 2 所示的“啃伤”缺陷,剪切效果不理想,严重影响了后续深加工(模锻、冲压)的质量和成材率;此外,液压斜刃剪与液压摆式剪的液压缸在使用过程中均为直驱形式,因此液压缸很容易会受到冲击而损坏,产生图 3 所示的缺陷^[1-4]。针对

收稿日期:2015-02-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21105264);山西省青年科技研究基金资助项目(2015021111);太原科技大学博士基金资助项目(20122017)

作者简介:楚志兵(1981—),男,副教授,博士。研究方向:高精度轧制设备及工艺。E-mail:Chuzhibing@tyust.edu.cn

*通信联系人 E-mail:aoaiyy1@sina.com

上述现象,国内太原科技大学团队于 2007 年自主研发并成功推广了一种双液压缸卧式布置的 PR-8R-PR II 级杆组的复合连杆滚动剪切机构^[5-6],该剪切机构依靠控制卧式布置的双侧液压缸的驱动顺序和匹配速度来实现对钢板的滚动剪切,剪切后的钢板断面良好,可以有效地解决液压斜刃剪和液压摆式剪剪切钢板时造成的“镰刀弯”和“啃伤”以及液压缸损坏等缺陷问题,但该双液压缸驱动液压滚切剪的液压系统需要伺服控制,因此对控制系统的先进性和稳定性要求较高,导致设备造价和后期调试生产的维护成本增加。

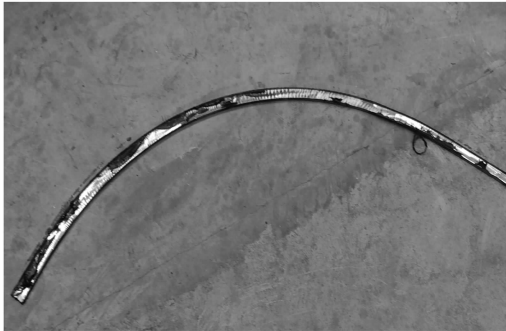


图 1 液压斜刃剪剪切钢板断面的“镰刀弯”缺陷

Fig. 1 Camber defect of the cross-section cut by hydraulic inclined blade shear

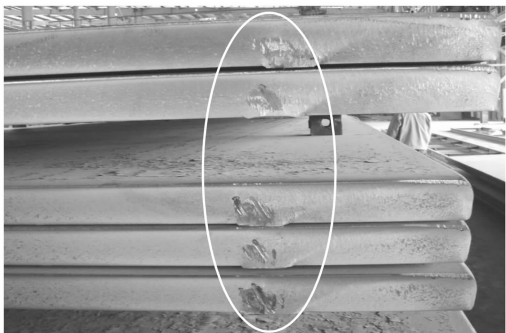


图 2 液压摆式剪剪切钢板断面的“啃伤”缺陷

Fig. 2 Scratch defect of the cross-section cut by hydraulic swing-type plate shears

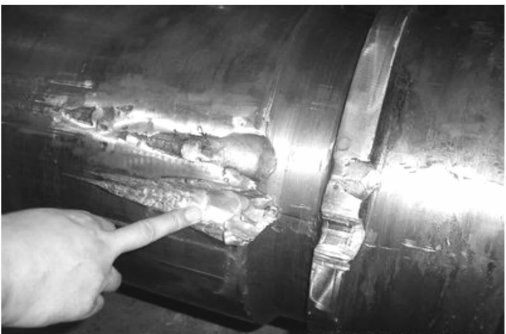


图 3 液压缸受损缺陷

Fig. 3 Hydraulic cylinder damage defect

鉴于此,作者提出一种新型的单液压缸驱动的液压滚切式板材剪切机,该剪切机构仅需一台卧式布置的液压缸驱动同步连杆,进而带动上刀台实现对钢板的滚动剪切,其优点主要表现在:1)剪切机构结构简单,液压系统和控制系统配置要求不高,维护方便;2)连杆之间起到明显的增力效果,符合节能减排要求;3)液压缸的活塞杆在伸出和收缩阶段均可以对钢板进行滚动剪切,极大地提高了剪切效率。作者对该新型液压滚切剪的机构原理、纯滚动剪切原理以及机构的运动学进行了深入的研究,求出机构中各连杆的位置、速度和加速度的正反解,并借助 MATLAB/Simulink 软件^[7]对其进行运动学仿真分析计算,从而获得该滚动剪切机构的运动学特征。

1 复合连杆滚动剪切机构综合分析

1.1 滚动剪切机构原理

通过对该单液压缸驱动的液压滚切式剪切机构的分析,可以将其简化为如图 4 所示的以连杆机构为基础的 PR-11R III 级复合连杆机构模型^[8]。

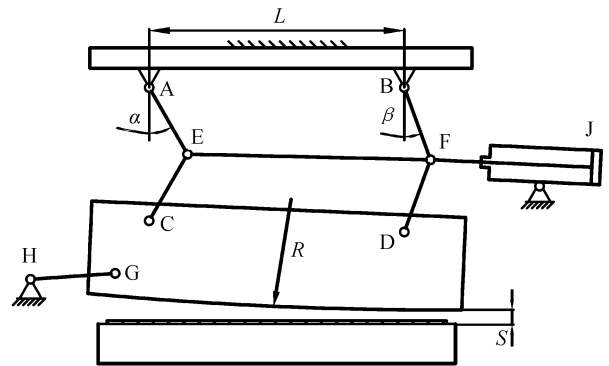


图 4 PR-11R III 级复合连杆机构模型

Fig. 4 Mechanism model of the PR-11R III level composite rod linkage

从图 4 可以看出,该机构由连杆 AE、EC、BF、FD、EF、导向杆 HG、活塞杆 FJ、上刀架 CDG 以及液压缸等 9 个构件组成,图中, R 为刀弧半径, L 为铰接点 A、B 之间的距离, α 为连杆 AE 与竖直方向所成的夹角, β 为连杆 BF 与竖直方向所成的夹角, S 为开口度与重叠量之和。

该滚动剪切机构的运动原理为:剪切机构开始剪切钢板时,由液压缸驱动复合连杆机构 BFD-FE-AEC-CDG-GH 运动,此时上刀架右侧首先进入切入阶段,直至与下剪刀达到理论重叠量,即达到理论剪切线;随着液压缸的活塞杆 FJ 继续向外伸出,上刀架依次进入滚切阶段和切出阶段;当活塞杆运动到设定的极限位置时,剪切机构完成第 1 次剪切动作;

此后,当液压缸活塞杆 FJ 回程时,由液压缸驱动复合连杆机构 AEC-EF-BFD-CDG-GH 运动,此时上刀架左侧首先进入切入阶段,直至与下剪刀达到理论重叠量;随着液压缸的活塞杆 FJ 继续回程到初始位置时,上刀架依次完成滚切阶段及切出阶段,即剪切机构完成第 2 次剪切动作,此时,剪切机构所处的位置状态和初始位置状态一致,所述过程为 1 次剪切周期实现 2 次剪切动作。

1.2 滚动剪切机构自由度的计算

通过对该剪切机构的模型分析可以得出,该复合连杆滚动剪切机构由 12 个转动副(R)和 1 个移动副(P)组成,如图 5 所示。

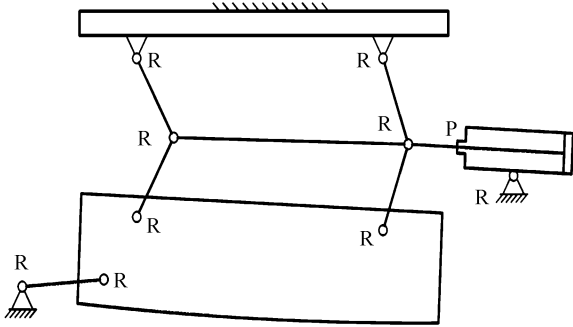


图 5 机构的自由度模型

Fig. 5 Degree freedom model of the mechanism

根据契贝谢夫-克鲁伯(Grübler-Kutzbach)准则,该滚动剪切机构的自由度为:

$$F = 3n - (2p_L + p_H - p') - F' = 3 \times 9 - (2 \times 13 + 0 - 0) - 0 = 1$$

式中, n 为构件数, p_L 为低副数, p_H 为高副数, p' 为局部自由度数, F' 为虚约束数。

自由度的计算结果表明:机构的自由度数和原动件数相等,证实了上刀架在右侧单液压缸的驱动及导向杆的约束下具有确定的运动轨迹^[5]。

2 滚动剪切机构运动学分析

2.1 滚切方程的建立

定义该滚切剪机构摆动到最高位置,即开口度最大时,把圆弧最低点 M 设为坐标原点。在图 6 中令 $S = S_1 + S_2$, 式中, S_1 为上剪刀圆弧最低点到平行下剪刀的距离, S_2 为上下剪刀重叠量。则滚切剪发生纯滚动剪切的位置在 $y = -S$ 的直线上。设半径为 R 的任一段圆弧在 $y = -S$ 轴上滚动,初始位置为圆弧最低点 M 与直角坐标系中 $(0, -S)$ 点重合。

根据滚切剪纯滚动的设计要求,当圆弧滚动 1 个 θ_p 角度,使 P 点位于 $y = -S$ 横坐标轴上时,并且在导向杆 HG 的约束下假设圆弧最低点 M 水平位移

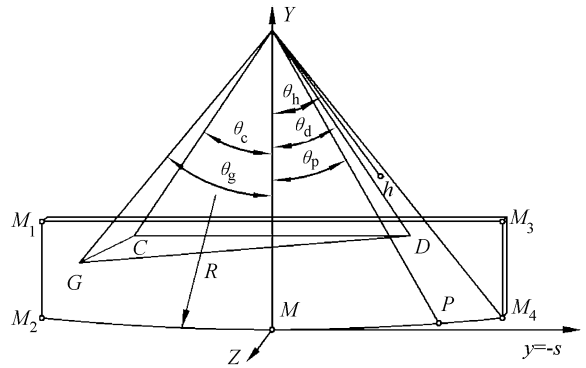


图 6 滚切剪滚切段内任一点坐标的确定

Fig. 6 Coordinate determination of the points in the rolling-cut arc

为零,所以将整个刀片沿水平方向反向移动 1 个水平距离 x_M ,力求 M 点始终位于上 $(0, -S)$ 点上。此时,刀片内任一点 h 在滚切时的坐标为^[9-11]:

$$\begin{cases} X_h = R_h \times \sin(\theta_h - \theta_p) + R \times \sin \theta_p, \\ Y_h = R - R_h \times \cos(\theta_h - \theta_p) - S. \end{cases}$$

式中, R 为圆弧刀片半径, R_h 为刀弧内任一点 h 的半径, θ_h 为刀片内任一点 h 径向与垂向的夹角, θ_p 为刀片内任一点 p 径向与垂向的夹角。

2.2 基于闭环矢量法的滚剪切机构的运动学数学模型的建立

利用闭环矢量法进行机构的运动学仿真是指利用仿真软件求解机构的运动学方程,主要获得机构中某些构件的位移、角速度和角加速度,以及某些点的轨迹、速度和加速度。它是机械设计及其评价机械运动和动力性能的基础,也是分析现有机械优化综合新机械的基本手段。闭环矢量法的运动学仿真框形图如图 7 所示。

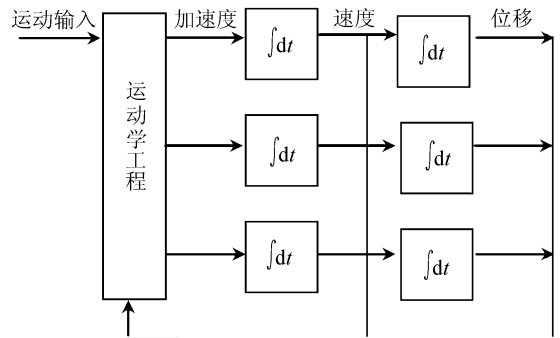


图 7 闭环矢量法的运动仿真框图

Fig. 7 Simulation block diagram of the closed loop vector method

图中“运动学方程”模块主要用于求解机构各构件的加速度关系的运动学方程,即需要根据构件的角加速度来计算构件的角速度和位移,这里运动

学方程的建立是通过闭环矢量方程求导获得的^[12-15]。

基于闭环矢量法的机构运动学分析时,将机构中每一根连杆都表示为1个位移矢量,矢量的起点就是连杆的一端,终点是连杆的另一端。利用机构学原理对该单液压缸驱动滚切剪机构进行简化,如图8所示。其中连杆 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_6 、 L_7 、 L_8 、 L_9 和 L_{10} 为各连杆的长度, L_5 、 L_{11} 、 L_{12} 为铰接点的距离, θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 和 θ_7 为各个连杆与X轴方向的夹角。

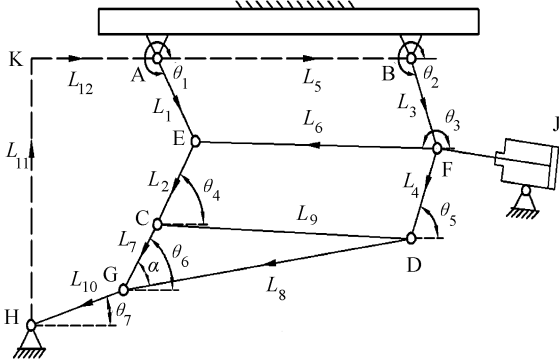


图8 PR-11RⅢ级复合连杆机构矢量环的建立

Fig.8 Establishment of the vector loop of the PR-11R III level composite rod linkage mechanism

根据封闭矢量环画法的基本原则,该滚动剪切机构共有14个已知量(连杆长度 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_6 、 L_7 、 L_8 、 L_9 、 L_{10} 和铰接点之间的距离 L_5 、 L_{11} 、 L_{12} 及上连杆的角度变化值 θ_1 、 θ_2)和5个未知量(θ_3 、 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 、 θ_7),对该机构建立3个封闭矢量环 $HKAECGH$ 、 $HKABFDGH$ 和 $ABFEA$,如图8所示,并对每一个闭环列出矢量方程。

1) 矢量环 $HKAECGH$

$$HK + KA + AE + EC + CG + GH = 0 \quad (1)$$

将式(1)投影在固定坐标系的2个坐标轴上得:

$$\begin{cases} L_{12} + L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_4 + L_7 \cos \theta_6 + L_{10} \cos \theta_7 = 0, \\ L_{11} + L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_4 + L_7 \sin \theta_6 + L_{10} \sin \theta_7 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

2) 闭环 $HKABFDGH$

$$HK + KA + AB + BF + FD + DG + GH = 0 \quad (3)$$

将式(3)投影在固定坐标系的2个坐标轴上得:

$$\begin{cases} L_{12} + L_5 + L_3 \cos \theta_2 + L_4 \cos \theta_5 + L_8 \cos(\theta_6 - \alpha) + L_{10} \cos \theta_7 = 0, \\ L_{11} + L_3 \sin \theta_2 + L_4 \sin \theta_5 + L_8 \sin(\theta_6 - \alpha) + L_{10} \sin \theta_7 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

3) 闭环 $ABFEA$

$$AB + BF + FE + EA = 0 \quad (5)$$

将式(5)投影在固定坐标系的2个坐标轴上得:

$$\begin{cases} L_5 + L_3 \cos \theta_2 + L_6 \cos \theta_3 - L_1 \cos \theta_1 = 0, \\ L_3 \sin \theta_2 + L_6 \sin \theta_3 - L_1 \sin \theta_1 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中,在 $\triangle CDG$ 中,由三角关系可得:

$$\cos \alpha = \frac{CG^2 + DG^2 - CD^2}{2 \times CG \times DG} = \frac{L_7^2 + L_8^2 - L_9^2}{2 \times L_7 \times L_8} \quad (7)$$

分别将上述方程组(2)、(4)、(6)对时间 t 求导,得出滚切剪机构的速度方程如下:

$$\begin{cases} L_1 \omega_1 \sin \theta_1 + L_2 \omega_4 \sin \theta_4 + L_7 \omega_6 \sin \theta_6 + L_{10} \omega_7 \sin \theta_7 = 0, \\ L_1 \omega_1 \cos \theta_1 + L_2 \omega_4 \cos \theta_4 + L_7 \omega_6 \cos \theta_6 + L_{10} \omega_7 \cos \theta_7 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} L_3 \omega_2 \sin \theta_2 + L_4 \omega_5 \sin \theta_5 + L_8 \omega_6 \sin(\theta_6 - \alpha) + L_{10} \omega_7 \sin \theta_7 = 0, \\ L_3 \omega_2 \cos \theta_2 + L_4 \omega_5 \cos \theta_5 + L_8 \omega_6 \cos(\theta_6 - \alpha) + L_{10} \omega_7 \cos \theta_7 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} -L_3 \omega_2 \sin \theta_2 - L_6 \omega_3 \sin \theta_3 + L_1 \omega_1 \sin \theta_1 = 0, \\ L_3 \omega_2 \cos \theta_2 + L_6 \omega_3 \cos \theta_3 - L_1 \omega_1 \cos \theta_1 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

分别将机构速度方程组(8)、(9)、(10)对时间 t 求导,得出滚切剪机构的加速度方程如下:

$$\begin{cases} L_1 \alpha_1 \sin \theta_1 + L_1 \omega_1^2 \cos \theta_1 + L_2 \alpha_4 \sin \theta_4 + L_2 \omega_4^2 \cos \theta_4 + L_7 \alpha_6 \sin \theta_6 + L_7 \omega_6^2 \cos \theta_6 + L_{10} \alpha_7 \sin \theta_7 + L_{10} \omega_7^2 \cos \theta_7 = 0, \\ L_1 \alpha_1 \cos \theta_1 - L_1 \omega_1^2 \sin \theta_1 + L_2 \alpha_4 \cos \theta_4 - L_2 \omega_4^2 \sin \theta_4 + L_7 \alpha_6 \cos \theta_6 - L_7 \omega_6^2 \sin \theta_6 + L_{10} \alpha_7 \cos \theta_7 - L_{10} \omega_7^2 \sin \theta_7 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} L_3 \alpha_2 \sin \theta_2 + L_3 \omega_2^2 \cos \theta_2 + L_4 \alpha_5 \sin \theta_5 + L_4 \omega_5^2 \cos \theta_5 + L_8 \alpha_6 \sin(\theta_6 - \alpha) + L_8 \omega_6^2 \cos(\theta_6 - \alpha) + L_{10} \alpha_7 \sin \theta_7 + L_{10} \omega_7^2 \cos \theta_7 = 0, \\ L_3 \alpha_2 \cos \theta_2 - L_3 \omega_2^2 \sin \theta_2 + L_4 \alpha_5 \cos \theta_5 - L_4 \omega_5^2 \sin \theta_5 + L_8 \alpha_6 \cos(\theta_6 - \alpha) - L_8 \omega_6^2 \sin(\theta_6 - \alpha) + L_{10} \alpha_7 \cos \theta_7 - L_{10} \omega_7^2 \sin \theta_7 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} -L_3 \alpha_2 \sin \theta_2 - L_3 \omega_2^2 \cos \theta_2 - L_6 \alpha_3 \sin \theta_3 - L_6 \omega_3^2 \cos \theta_3 + L_1 \alpha_1 \sin \theta_1 + L_1 \omega_1^2 \cos \theta_1 = 0, \\ L_3 \alpha_2 \cos \theta_2 - L_3 \omega_2^2 \sin \theta_2 + L_6 \alpha_3 \cos \theta_3 - L_6 \omega_3^2 \sin \theta_3 - L_1 \alpha_1 \cos \theta_1 + L_1 \omega_1^2 \sin \theta_1 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

3 剪切机构运动轨迹分析

3.1 工程开发设计实例

所开发的剪切机构的基本工艺参数见表1,表中, h 为钢板厚度。

表1 剪切设备的基本工艺参数

Tab.1 Technical parameters of the rolling shear

剪切带材厚度/mm	宽度/mm	理论剪切次数/min	开口度/mm	重叠量/mm
0~12	1 500~2 200	15	50	5±2

根据以上工艺参数的要求,开发设计的单液压缸驱动液压滚切剪机构的参数如表2所示。

表2 滚切剪主要结构参数

Tab.2 Structural parameters of the rolling shear

刀弧半径 R/mm	铰接点距离 L_{AB}/mm	连杆长度 $(L_{AE}, L_{EC}, L_{BF}, L_{FD})/\text{mm}$	导向杆长度/mm
50 000	1 500	750	650
初始相位角 $\theta_1/(\text{°})$	初始相位角 $\theta_2/(\text{°})$	导向杆相位角 $\theta_7/(\text{°})$	
20	15	5	

3.2 仿真结果分析

3.2.1 关键点轨迹的分析

由分析可知,该复合连杆滚动剪切机构的滚切精度以及运动轨迹的正确与否取决于关键铰接点C、D及刀弧最低点M在滚切阶段的滚切轨迹精度。

借助 MATLAB/Simulink 软件模拟计算得到如图9、10和11所示的关键铰接点C、D及M的运动轨迹曲线。从图中可以看出,在切入阶段和切出阶段,该滚切剪的剪切运动轨迹均为具有拐点的曲线,这是由于在实际运动中导向杆的约束所致,在滚切阶段时运动轨迹曲线均为圆弧形,满足滚切阶段滚动剪切的要求。

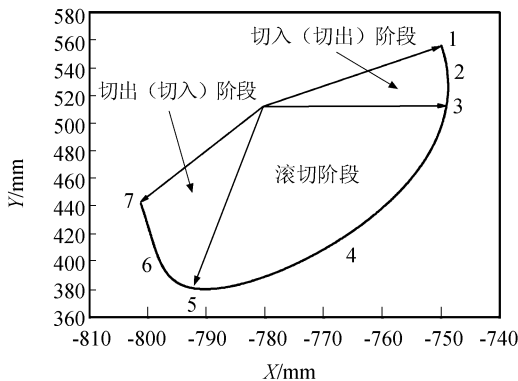


图9 铰接点C运动轨迹曲线

Fig.9 Trajectory of key point C

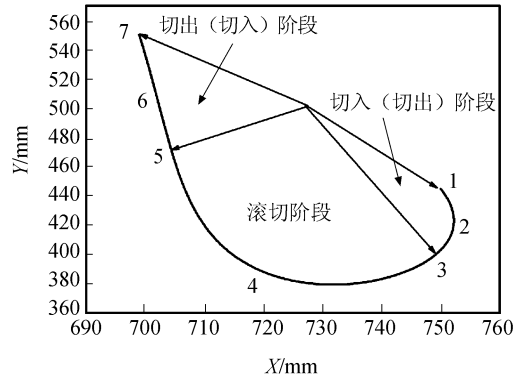


图10 铰接点D运动轨迹曲线

Fig.10 Trajectory of key point D

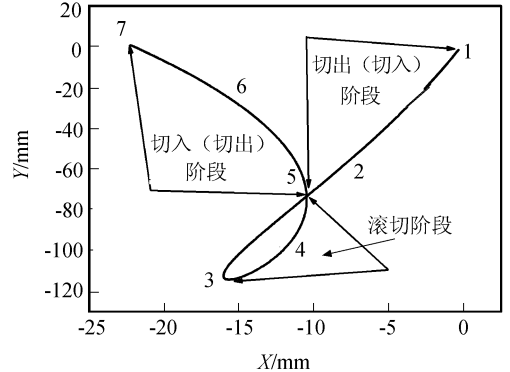


图11 M点运动轨迹曲线

Fig.11 Trajectory of key point M

从图8~11中关键点运动轨迹可以看出,由1~3所处区域为滚动剪切切入阶段,此时机构在液压缸的推动下,铰接点F向前运动,带动角AEC逐渐变大,因此,轨迹曲线从点1到点3的纵坐标逐渐下移,又因为在导向杆HG的约束下,导致点1到点3处的轨迹曲线会发生横移;由3~5所处区域为滚动剪切的滚切,连杆AE和CE逐渐变成垂直状态也就是轨迹曲线逐渐向下运动,并相应地伴随着横向运动,其中点4处为上刀台水平滚切状态;由5~7所处区域为为滚动剪切的切出阶段,随着液压缸活塞杆的继续伸出,连杆AE和CE从垂直状态逐渐变为与初始状态相反方向的角度,因此,轨迹曲线会向上运动并同时产生横向移动,综上所述,图9、10、11中关键点轨迹的运动规律与实际分析基本吻合,说明采用闭环矢量研究PR-11RⅢ级复合连杆的方法是可行的,更进一步证明本机构可以实现滚动剪切。

3.2.2 刀弧水平偏移量及剪刀重叠量分析

图12所示为上刀弧中心点M的水平偏移量,其值为-3.1 mm,刀弧中心点H的综合水平越小,意味在剪切过程中,上剪刀相对于钢板切面的相对滑移量就越小,所以能够保证钢板断面整齐、无台阶和无变形,提高了剪切质量而且减小了刀片的划

伤和磨损,提高了刀片的使用寿命^[10]。

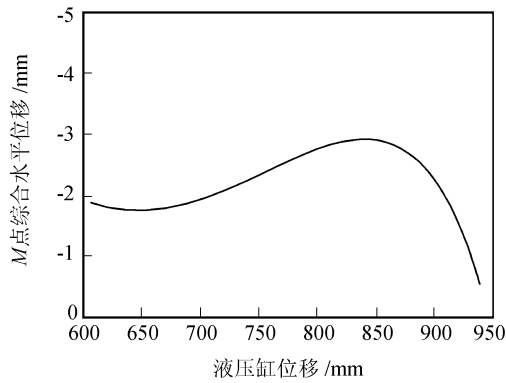


图 12 剪刀中心点水平坐标

Fig. 12 Horizontal coordinate of the center point of the shear blade

衡量滚切剪剪切机构是否合理的一个重要参数是上下剪刀的重叠量。滚切剪在剪切过程中,如果重叠量不均匀或者比较大,那么在剪切力矩及摩擦力矩的共同作用将导致钢板断面发生弯曲变形,极大降低钢板的剪切质量。从图 13 中可以看出,上下剪刀的重叠量在 4.5 mm ~ 6.2 mm 范围内,满足重叠量(5 ± 2) mm 的理论设计指标要求,证实了剪切机构参数的正确性^[11]。

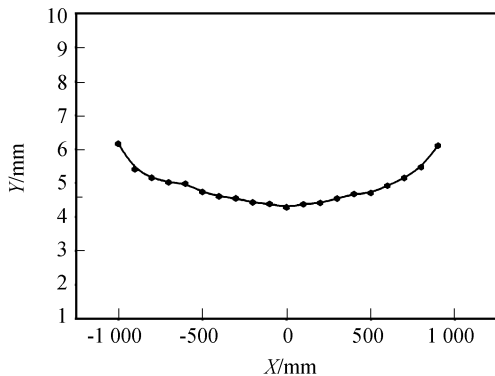


图 13 上下剪刀重叠量曲线

Fig. 13 Overlap value between the upper and lower shear

3 结 论

1)在对国内外现有的液压剪切机构进行分析的基础上,提出一种新型的单液压缸驱动复合连杆滚动剪切机构。通过分析该滚切剪机构滚动的原理,建立了该剪切机构的空间机构模型,通过计算机机构的空间自由度,证实了滚切剪机构有确定的运动轨迹。

2)在简化机构模型的基础上,通过建立封闭矢量环对机构进行运动学理论分析,推导出了剪切机构各个连杆在任意时刻的位移、角速度和角加速度方程,进而通过在 MATLAB/Simulink 软件编程得出

了上刀架各关键点的运动轨迹,为剪切机构的运动规划和轨迹控制提供了理论基础。

3)通过对模拟的结果分析,该剪切机构能够完成预定的运动轨迹,而且证明刀弧水平偏移量、剪刀重叠量均匀度达到了设计精度要求,验证了该 PR - 11R III 级杆组复合连杆滚动剪切机构尺寸综合及运动学分析求解的正确性,为新型滚切剪机的设计提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Murakawa M, Lu Y. Precision cutting of sheets by means of a new shear based on rolling motion[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 66(1/2/3): 232 - 239.
- [2] Belobrov Y N, Bondar Y G, Plotnikov V A. Reconstruction of the 5000 plate mill at reversals[J]. Metallurgist, 2003, 47(9/10): 364 - 368.
- [3] Zyryanov V V, Ivanov A M, Gaitanov I Yu. Use of the shears with a "Rolling Cut"[J]. Metallurgist, 2004, 48(3/4): 126 - 128.
- [4] Han Heyong, Huang Qingxue, Ma Lifeng, et al. Research on the hydraulic system of hydraulic rolling shear[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(3): 239 - 243. [韩贺永, 黄庆学, 马立峰, 等. 液压滚切剪液压系统的研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(3): 239 - 243.]
- [5] Ma Lifeng, Wang Gang, Huang Qingxue, et al. Research on properties of compound linkage recapitulation rolling trace [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(7): 877 - 881. [马立峰, 王刚, 黄庆学, 等. 复合连杆机构复演滚动轨迹的特性研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(7): 877 - 881.]
- [6] Ma Lifeng, Huang Qingxue, Han Heyong, et al. Characteristics of hydraulic control system for using driving the composite connecting rod mechanism rolling[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(11): 1601 - 1607. [马立峰, 黄庆学, 韩贺永, 等. 驱动复合连杆机构滚动的液压控制系统特性[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(11): 1601 - 1607.]
- [7] 曲秀全. 基 MATLAB/Simulink 平面连杆机构的动态仿真

- [M]. 哈尔滨. 哈尔滨工业大学出版社,2007.
- [8] Chu Zhibin, Huang Qingxue, Ma Lifeng, et al. Experimental study and simulation of kinetics on linkage structure of rolling-cut bilateral shear[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(1): 247 - 252. [楚志兵, 黄庆学, 马立峰, 等. 滚切式双边剪连杆机构的动力学仿真及实验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(1): 247 - 252.]
- [9] Ma Lifeng, Huang Qingxue, Li Yin, et al. Establishment and application of mathematical model on spatial shear mechanism optimization of new-type steel rolling shear [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(2): 170 - 174. [马立峰, 黄庆学, 李颖, 等. 新型滚切剪空间剪切机构优化数学模型的建立及应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(2): 170 - 174.]
- [10] Huang Qingxue, Ma Lifeng, Li Jinbao, et al. Principle of asymmetric crank mechanism of new-type rolling shear [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5): 119 - 123. [黄庆学, 马立峰, 李进宝, 等. 新型滚切剪非对称曲柄机构原理[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 119 - 123.]
- [11] Ma Lifeng, Huang Qingxue, Li Yin, et al. Analysis on kinematics simulation of new-type steel rolling shear [J]. Journal of Engineering Design, 2007, 14(5): 395 - 399. [马立峰, 黄庆学, 李颖, 等. 新型钢板滚切剪剪切机构运动学分析[J]. 工程设计学报, 2007, 14(5): 395 - 399.]
- [12] Zhang Xiaochao, Dong Yuhong, Zhang Lixun. Kinematics modeling and simulation of a five-bar robot by using closed loop vector method [J]. Techniques of Automation and Application, 2006, 25(5): 16 - 17. [张晓超, 董玉红, 张立勋. 基于闭环矢量法的五杆合作机器人运动学建模及仿真[J]. 自动化技术与应用, 2006, 25(5): 16 - 17.]
- [13] Ye Wei, Fang Yuefa, Guo Shen, et al. Bifurcated motion and kinematics of novel parallel mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13): 8 - 16. [叶伟, 方跃法, 郭盛, 等. 一种新型并联机构的运动分岔特性及运动学分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(13): 8 - 16.]
- [14] Huang Yuchuan, Qu Daokui, Xu Fang. Study of FROG-LEG vacuum manipulators' dynamics control [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2013, 45(3): 158 - 163. [黄玉钊, 曲道奎, 徐方. FROG-LEG型真空机械手的动力学控制研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, 45(3): 158 - 163.]
- [15] Liu Yajun, Huang Tian. Inverse kinematics and trajectory planning of 6R serial manipulators [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 9 - 15. [刘亚军, 黄田. 6R操作臂逆运动学分析与轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 9 - 15.]

(编辑 黄小川)