

文章编号: 2095-2163(2020)03-0146-04

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

基于 Simulink 的偏置摇杆滑块机构运动仿真分析

曾 鹏, 李永平

(上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201620)

摘要: 针对偏置摇杆滑块机构, 综合利用函数解析法与矢量法对其机构建立运动模型, 在 Simulink 软件环境下建立该方程的运动仿真模型, 并进行运动学仿真分析, 以滑块为主动件, 输入滑块的不同运动状态, 研究其他构件的运动特性, 并得到相关的运动曲线。通过分析各构件的运动特性, 能清晰地掌握其运动规律, 该研究方法及结论为进一步机构设计与控制提供依据。

关键词: 偏置摇杆滑块机构; 运动分析; Simulink 仿真

Motion simulation analysis of offset rocker-slider mechanism based on Simulink

ZENG Peng, LI Yongping

(School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] For the offset rocker-slider mechanism, the function analysis and vector method are used to establish the motion model. The motion simulation model of the equation is established in the Simulink software environment, and the kinematics simulation analysis is performed. The active part inputs the different motion states of the slider to study the motion characteristics of other components and obtain the relevant motion curve. By analyzing the motion characteristics of each component, the motion law can be clearly grasped. The research method and conclusion provide the basis for further mechanism design and control.

[Key words] offset rocker-slider mechanism; motion analysis; Simulink simulation

0 引言

随着工业机械日益发展, 对机构设计则提出更高的要求。平面连杆机构是由若干刚性构件用低副联接而组成, 由于连杆机构具有承载能力强、工作可靠、结构简单、制造方便等优势, 故被广泛应用在各种机械和仪器设备里^[1-3]。偏置摇杆滑块机构是一种特殊的平面四连杆机构, 通过对其构件状态及尺寸进行仿真调整, 并配合相应的运动控制能有效地获得机构各铰链的运动状态, 以解决工程上的实际问题。李献奇等人^[4]、李建平等^[5]等人基于摇杆滑块机构各个构件的几何关系详细地介绍了摇杆滑块机构的定义以及种类和相关特性, 并分析在农业机械领域的相关运用, 为相关机构组合设计提供了思路。周舟等人^[6]利用 Pro/E 软件和 Adams 仿真软件对摇杆滑块及同步带送料机构进行运动学仿真分析, 最终获得理想的输出曲线, 验证其设计的可行性。许海强等人^[7]通过 Matlab 与 SolidWorks 软件建立机构的优化设计数学模型, 并求解最优参数与运动分析。卢全国等人^[8]基于 TRIZ 理论介绍了四杆机构演化仪的创新设计, 并运用复数矢量法对其机构进行运动分析及仿真, 获得

机构的精确运动特性。由于 Matlab 具有先天的参数化特征, 并在 Simulink 环境下建立机构模型, 通过仿真分析可以方便观察机构运动特性的变化, 为后续产品设计提供了一种快速修改参数达到理想物理性能的方案^[9-11]。

由于大量文献都是以曲柄或摇杆为主动件, 对其滑块进行运动仿真分析, 本文在研究目前已有相关文献后, 以滑块为主动件, 通过解析法与矢量法对偏置摇杆滑块建立数学建模, 然后在 Matlab/Simulink 环境下建立机构模型, 研究在滑块匀速或匀加速运动下, 仿真出连杆和摇杆的运动特性, 为后续进一步工程运用研究提供了可靠依据。

1 摇杆滑块机构运动学方程

1.1 摇杆滑块机构的组成

建立摇杆滑块机构分析简图如图 1 所示, 该机构由滑块 A、连杆 AB、摇杆 CB 组成。A、B、C 分别为各铰链中心点, E 为偏置距离, S 为滑块的水平位移, V_x 和 V_y 分别为滑块沿 x 的水平速度分量和沿 y 的垂直速度分量, 加速度分量分别为 α_x 和 α_y 。连杆 AB 的长度为 r_1 , 角位移为 θ_1 (连杆方向与水平面夹

作者简介: 曾 鹏(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 载运工具故障诊断与控制、无人机设计与智能制造; 李永平(1979-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 纤维增强复合材料高性能化、无人机设计与智能制造。

通讯作者: 曾 鹏 Email: 673025731@qq.com

收稿日期: 2019-10-08

角),角速度为 ω_1 ,角加速度为 α_1 。摇杆 CB 的长度为 r_2 ,角位移为 θ_2 (摇杆方向与水平面夹角),角速度为 ω_2 ,角加速度为 α_2 。

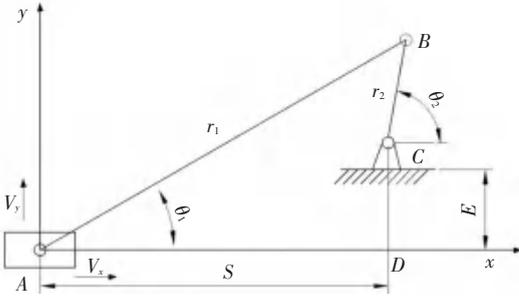


图1 摇杆滑块机构分析简图

Fig. 1 Analysis sketch of rocker-slider mechanism

1.2 建立摇杆滑块机构的运动模型

结合图1所示机构简图,建立偏置摇杆滑块机构的矢量模型,并结合解析法和矢量法构建数学模型。其机构的闭环矢量多边形方程为: $r_1 + r_2 = S + E$, 将其写成向量表达式为:

$$\vec{AB} + \vec{BC} = \vec{AD} + \vec{DC}, \tag{1}$$

其幅值乘以角度的复数形式为:

$$r_1 e^{i\theta_1} - r_2 e^{i\theta_2} = S e^{i0^\circ} + E e^{i90^\circ}, \tag{2}$$

根据欧拉公式 $e^{ix} = \cos x + i \sin x$ 及欧拉恒等

$$\theta_2 = -2 \arctan \cdot \frac{\frac{\partial}{\partial t} E r_2 - \sqrt{(r_1^2 + r_2^2 + 2 r_1 r_2 - E^2 - S^2)} (E^2 - r_1^2 + 2 r_1 r_2 - r_2^2)}{E^2 - r_1^2 + r_2^2 - 2 r_2 S + S^2} \frac{\ddot{\theta}}{\omega}, \tag{8}$$

或

$$\theta_2 = \arcsin \frac{\frac{\partial}{\partial t} r_1 \sin \theta_1 - E \ddot{\theta}}{r_2 \omega}, \tag{9}$$

联立式(4)、(7)、(9)可求得连杆 AB 与摇杆 CB 的角速度为:

$$\omega_1 = \frac{V_x \cos \theta_2 + V_y \sin \theta_2}{r_1 \sin(\theta_1 + \theta_2)}, \tag{10}$$

$$\omega_2 = \frac{V_x \cos \theta_1 + V_y \sin \theta_1}{r_2 \sin(\theta_2 - \theta_1)}, \tag{11}$$

联立式(5)、(7)、(9)、(10)、(11)可求得连杆 AB 与摇杆 CB 的角加速度:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_x \cos \theta_2 + \alpha_y \sin \theta_2 + \omega_1^2 r_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) - \omega_2^2 r_2}{r_1 \sin(\theta_2 - \theta_1)}, \tag{12}$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_x \cos \theta_1 + \alpha_y \sin \theta_1 - \omega_2^2 r_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + \omega_1^2 r_1}{r_2 \sin(\theta_2 - \theta_1)}, \tag{13}$$

为了方便仿真编写函数,将式(4)写成矩阵形式得速度矩阵方程:

式 $e^{i\pi} + 1 = 0$, 令上式各复式实部和虚部分别相等, 即分别投影到 x 、 y 轴上可得:

$$\begin{cases} r_1 \cos \theta_1 - r_2 \cos \theta_2 = S, \\ r_1 \sin \theta_1 - r_2 \sin \theta_2 = E. \end{cases} \tag{3}$$

将式(3)对时间求导,得机构的速度方程:

$$\begin{cases} -\omega_1 r_1 \sin \theta_1 + \omega_2 r_2 \sin \theta_2 = V_x, \\ \omega_1 r_1 \cos \theta_1 - \omega_2 r_2 \cos \theta_2 = V_y. \end{cases} \tag{4}$$

将式(3)对时间求二阶导,得机构的加速度方程:

$$\begin{cases} \alpha_2 r_2 \sin \theta_2 + \omega_2^2 r_2 \cos \theta_2 - \alpha_1 r_1 \sin \theta_1 - \omega_1^2 r_1 \cos \theta_1 = \alpha_x, \\ \alpha_1 r_1 \cos \theta_1 - \omega_1^2 r_1 \sin \theta_1 - \alpha_2 r_2 \cos \theta_2 + \omega_2^2 r_2 \sin \theta_2 = \alpha_y. \end{cases} \tag{5}$$

根据几何关系及余弦定理有:

$$r_2^2 = r_1^2 + (S^2 + E^2) - 2 r_1 \sqrt{S^2 + E^2} \cos(\theta_1 - \arctan \frac{E}{S}), \tag{6}$$

利用解析法进一步化简,联立式(3)与式(4)可求得连杆 AB 与摇杆 CB 的角位移:

$$\theta_1 = \arccos \frac{\frac{\partial}{\partial t} (r_1^2 + r_2^2 - S^2 - E^2)}{2 r_1 \sqrt{S^2 + E^2}} \frac{\ddot{\theta}}{\omega} + \arctan \frac{E}{S}, \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 & \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 & -\dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \dot{\omega}_1 \\ r_2 \dot{\omega}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \end{bmatrix}, \tag{14}$$

将式(5)写成矩阵形式得加速度矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} r_1 \cos \theta_1 & -r_2 \cos \theta_2 \\ -r_1 \sin \theta_1 & r_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dot{\alpha}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x + \omega_1^2 r_1 \sin \theta_1 - \omega_2^2 r_2 \sin \theta_2 \\ \alpha_y + \omega_1^2 r_1 \cos \theta_1 - \omega_2^2 r_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \tag{15}$$

由以上运动模型能发现,当已知滑块的运动轨迹状态以及各杆长,能获得连杆与摇杆的运动特性,即在工程领域,为了得到预期的机构运动轨迹,可以在相应铰链处施加特定运动规律的电机。

2 Simulink 仿真模型的建立与分析

2.1 滑块匀速度运动时仿真模型建立

在摇杆滑块机构中,已知滑块以 $V_x = V_y = 1\ 000$ mm/s 作匀速运动,研究连杆 AB 和摇杆 CB 的运动变化规律。在 Simulink 中建立该机构的运动仿真模型,如图2所示,该模块输入4个变量:连杆角位移 θ_1 、摇杆角位移 θ_2 、滑块水平速度 V_x 、滑块竖直

速度 V_y ; 输出 2 个变量: 连杆角速度 ω_1 和摇杆角速度 ω_2 。仿真初始条件为: $\theta_1 = 0.5236 \text{ rad}$, $\theta_2 = 1.3963 \text{ rad}$ 。模型中相关参数全部采用字符串代替, 其中 θ 表示 θ , ω 表示 ω , α 表示 α 。其中, 在 Matlab Function 模块里添加由式 (14) 编写的函数, 部分源程序如下:

```

compvel.m
function [y] = compv(u)
% u(1) = theta - 1
% u(2) = theta - 2
% u(3) = V_x
% u(4) = V_y
r1 = 500; r2 = 120;
a = [ - r1 * sin(u(1))   r2 * sin(u(2)) ;
      r1 * cos(u(1))   - r2 * cos(u(2)) ];
b = [ V_x; V_y ];
y = inv(a) * b;
    
```

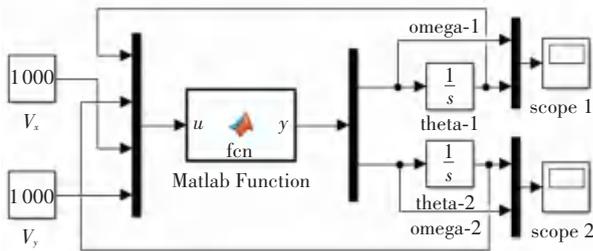


图 2 滑块匀速运动时 Simulink 仿真模型

Fig. 2 Simulink simulation model for uniform motion of slider

2.2 滑块匀加速度运动时仿真模型建立

当滑块做匀加速度运动时, 仿真模型和匀速时相似, 在原来模型基础上多增加 2 个积分器, 如图 3 所示。该模块输入 6 个变量: 连杆角位移 θ_1 、角速度 ω_1 、摇杆角位移 θ_2 、角速度 ω_2 、滑块水平加速度 α_x 、滑块竖直加速度 α_y ; 输出 2 个变量: 连杆角加速度 α_1 和摇杆角加速度 α_2 。其中, 在 Matlab Function 模块里添加由式 (15) 编写的函数。仿真初始条件: $\omega_1 = 0 \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 0 \text{ rad/s}$ 。假设滑块的加速度 $\alpha_x = \alpha_y = 200 \text{ mm/s}^2$, 仿真时间为 0.14 s 。

2.3 运动学仿真结果及分析

当滑块做匀速运动时, 运行图 2 的仿真模型, 得到连杆的角位移、角速度和摇杆的角位移、角速度曲线, 分别如图 4、图 5 所示。当滑块做匀加速度运动时, 运行图 3 的仿真模型, 得到连杆的角位移、角速度、角加速度和摇杆的角位移、角速度、角加速度曲线, 分别如图 6~图 9 所示。

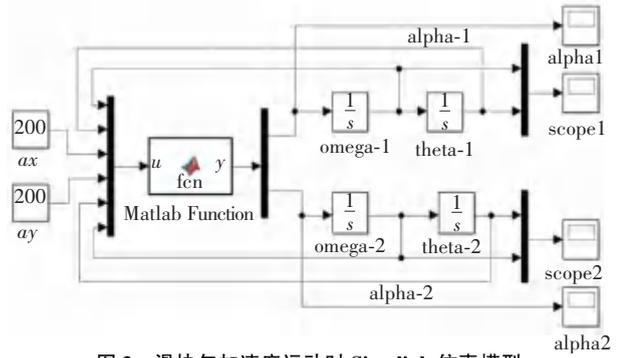


图 3 滑块匀加速度运动时 Simulink 仿真模型

Fig. 3 Simulink simulation model for uniform acceleration motion of slider

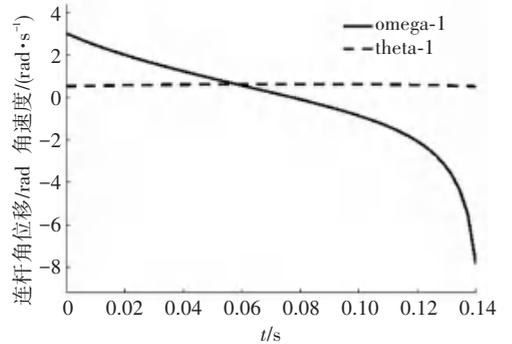


图 4 滑块匀速时连杆角位移角速度曲线

Fig. 4 Angular displacement and angular velocity curve of link at constant slider speed

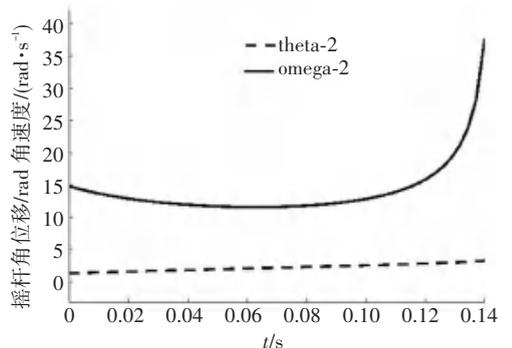


图 5 滑块匀速时摇杆角位移角速度曲线

Fig. 5 Angular displacement and angular velocity curve of rocker at constant slider speed

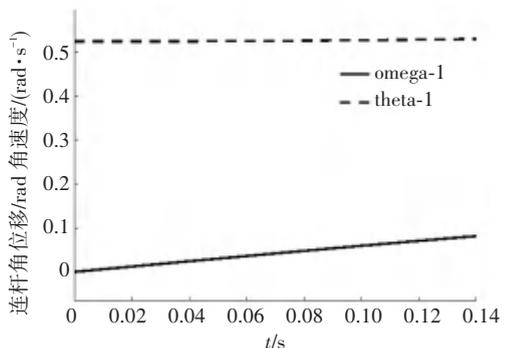


图 6 滑块匀加速度连杆角位移角速度曲线

Fig. 6 Angular displacement and angular velocity curve of link with uniform acceleration of slider

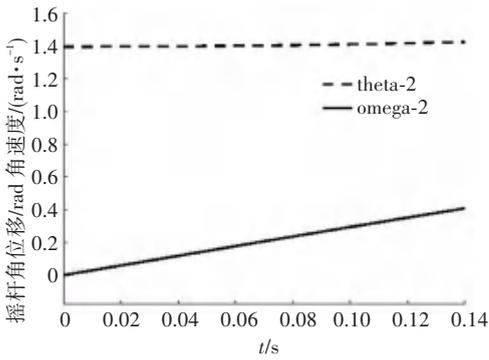


图7 滑块匀加速度摇杆角位移角速度曲线

Fig. 7 Angular displacement and angular velocity curve of rocker with uniform acceleration of slider

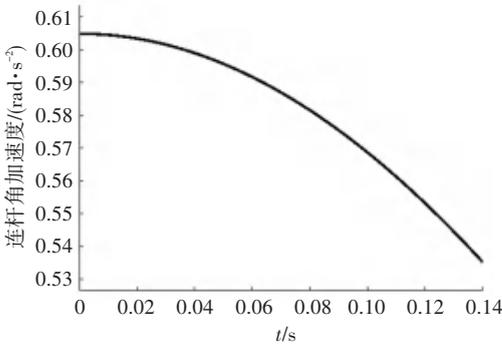


图8 滑块匀加速度连杆角加速度曲线

Fig. 8 Angular acceleration curve of link with uniform acceleration of slider

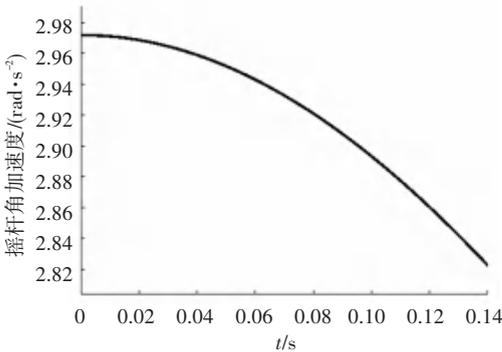


图9 滑块匀加速度摇杆角加速度曲线

Fig. 9 Angular acceleration curve of rocker with uniform acceleration of slider

分析仿真结果曲线可以看出,当滑块输入状态不同时,仿真曲线具有较大的差异。连杆和摇杆的角位移曲线变化趋势相近,而角加速度曲线相差较大,当滑块匀加速度时,其他构件的角速度变化趋势都比较平稳且相似,而当滑块匀速时,连杆与摇杆的

角速度曲线呈现互补的状态,但从两者的角速度曲线不难发现,其变化率大致相同,即加速度相似。从图6~图9各曲线可以看出,各构件的运动特性都比较吻合,说明当控制滑块匀加速度时,整个机构更容易达到稳态,也更方便控制,可为工程领域里提供有效的参考基础。

3 结束语

本文通过对偏置摇杆滑块机构进行运动学建模与 Simulink 仿真分析,得到相应的函数模型及各构件在滑块不同状态输入下的运动特性。基于仿真软件强大的参数化与矩阵计算能力,该方法只需修改参数和函数模块,就能得到各参数间的相互关系,精度效率高。通过分析各构件的运动特性,能清晰地掌握其运动规律,可以在模型里调节各参数来达到预期的运动轨迹,为机构设计与控制提供依据,并将结论运用到工程领域里,解决实际问题。

参考文献

- [1] 孙桓,陈作模,葛文杰. 机械原理[M]. 8版. 北京:高等教育出版社,2013.
- [2] HAN S S, KAWAI T, NISHIKAWA A, et al. Spherical-coordinate manipulator with circular telescopic rail driven by slider-rocker mechanism [J]. The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec), 2017, 2017.
- [3] NAEENI I P, KESHAVARZI A, FATTAHI I. Parametric study on the geometric and kinetic aspects of the slider-crank mechanism [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 2019, 43(3):405.
- [4] 李献奇,刘维维,高连兴. 摇杆滑块机构及其在农业机械上的应用研究[J]. 农业科技与装备, 2014(1):20.
- [5] 李建平,刘俊峰,刘洪杰,等. 基于摇杆滑块机构的割草机割茬高度机构设计[J]. 农机化研究, 2013, 35(4):96.
- [6] 周舟,王志明,蔡正龙,等. 摇杆滑块及同步带送料机构仿真分析[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(12):76.
- [7] 许海强,唐海平. 曲柄滑块机构的 MATLAB 优化设计与 SolidWorks 运动仿真[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2019, 39(2):63.
- [8] 卢全国,段年嵩,聂勤,等. 四杆机构演化仪的设计与运动分析[J]. 机械设计与制造, 2018(4):206.
- [9] 蔡玉强,朱东升,吴楠. 基于 Matlab/Simulink 的高速压力机曲柄滑块机构的动力学研究[J]. 机械设计与制造, 2018(1):192.
- [10] 刘勇,王卫华,李志刚,等. 基于 Simulink 的偏置曲柄滑块机构运动学和动力学分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(1):186.
- [11] 陈江义,刘竹丽,王迎佳. SIMULINK 环境下双曲柄滑块机构的运动学分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2009, 30(3):79.