

平面六杆机构优化设计与运动仿真

龚小平

(空军工程大学理学院,陕西西安,710051)

摘要 以平面六杆机构中的滑块在工作行程时的速度波动最小为追求目标,以机构存在曲柄及良好的传力特性为约束条件,建立优化设计数学模型,并应用约束变尺度优化算法进行优化设计计算,获得机构的尺寸参数。在 SolidWorks 软件中建立机构的装配体模型,并运用 COSMOSMotion 插件进行运动仿真,输出机构运动动画视频、图线等运动信息,为平面连杆机构的优化设计提供了一种可视化途径,以此检验或判断机构优化设计数学模型、程序设计及计算结果的正确性和合理性,也为其它机构的仿真设计提供了借鉴。

关键词 平面六杆机构;优化设计;SolidWorks;COSMOSMotion;运动仿真

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.06.015

中图分类号 TH132 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2012)06-0071-04

连杆机构又称为低副机构,其运动副元素为面接触,承载能力较大,压力较小,润滑好,磨损小,相对容易加工,改变构件尺寸可以实现不同的运动规律和连杆轨迹,在机械、仪表或装备等多个领域得到广泛的应用。平面多杆机构相对于平面四杆机构而言,又可以克服平面四杆机构的运用局限性,达到更多的应用目的,如:可获得较小的运动占有空间;取得有利的传动角;获得较大的机械利益;改变从动件的运动特性;实现从动件停歇运动;扩大从动件的工作行程;使从动件的行程可调;实现特定条件下的平面导引^{[1]139-144}。但多杆机构其尺寸参数较多,运动要求多样而复杂,故设计较为困难,多数情况下只能得到近似解,目前以优化设计的方法解题较多^[2-4]。冲床为工程上常用的机械设备,工作中要求冲头在工作行程尽量匀速,回程有明显的急回特性,且又具有良好的传力特性。本文用优化设计方法及可视化技术解决冲床主机机构的设计和仿真问题。

1 建立平面六杆机构优化设计数学模型

冲床的主机构为平面六杆机构,图1为其平面六杆机构运动示意图,该机构由铰链四杆机构和曲柄滑块机构组合而成。此六杆机构由主动件杆1以角速度 ω 等速转动,通过铰链四杆机构和偏置曲柄滑块机构带动滑块作往复移动。要求滑块在工作行程尽量作匀速运动,回程有急回特性,并具有良好的传力特性。

1.1 确定设计变量

影响滑块运动特性的主要因素包括构件长度尺寸分别为 $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$, 位置角 ϕ, θ , 以及偏距 e 9 个可变参数,取设计变量为:

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9]^T = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4 \ l_5 \ l_6 \ \phi \ \theta \ e]^T \quad (1)$$

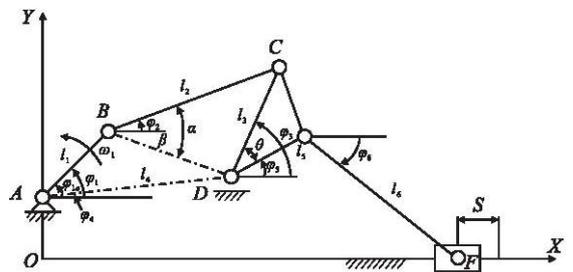


图1 平面六杆机构运动示意图

Fig.1 Schematic diagram of planar six-bar mechanism

收稿日期:2012-03-22

作者简介:龚小平(1957-),男,陕西城固人,教授,主要从事工程图学与现代机械设计方法方面的研究。

E-mail:xiaoping-gong@tom.com

1.2 建立目标函数

根据设计要求,滑块在工作行程中的速度应尽量保持匀速,即要求滑块在相应位置上的速度波动尽可能小。按滑块 F 工作行程速度的均方偏差为最小建立目标函数,即:

$$F(X) = \frac{\int_{\phi_b}^{\phi_a} [v_F(\phi) - v_{Fm}]^2 d\phi}{\phi_a - \phi_b} \quad (2)$$

式中: $v_F(\phi)$ 为滑块在工作行程任意位置的瞬时速度; v_{Fm} 为滑块在工作行程的平均速度; v_{Fm} 的计算式为:

$$v_{Fm} = \frac{\int_{\phi_b}^{\phi_a} v_F(\phi) d\phi}{\phi_a - \phi_b} \quad (3)$$

若将滑块在工作行程的运动时间离散化,则目标函数可改写为:

$$F(X) = \frac{\sum_{i=1}^n [v_F(\phi_i) - v_{Fm}]^2 \Delta\phi}{\phi_a - \phi_b}; \phi_i = \phi_{i-1} + \Delta\phi \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\Delta\phi = \frac{\phi_a - \phi_b}{n}; v_{Fm} = \frac{\sum_{i=1}^n v_F(\phi_i) \Delta\phi}{\phi_a - \phi_b} \quad (5)$$

滑块速度 V_F 的计算过程如下:

$$B_x = l \cos \phi, B_y = l \sin \phi + e, D_x = l \cos \phi, D_y = e + l \sin \phi, \overline{BD} = d = \sqrt{(B_x - D_x)^2 + (B_y - D_y)^2}, \alpha = \arccos\left(\frac{l^2 + d^2 - l^2}{2ld}\right),$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{D_y - B_y}{D_x - B_x}\right), \phi = \alpha \pm \beta (\text{“}\pm\text{”由装配条件确定,本例取“+”号}),$$

$$C_x = B_x + l \cos \phi, C_y = B_y + l \sin \phi, \phi = \arctan\left(\frac{C_y - D_y}{C_x - D_x}\right), \phi = \phi - \theta, \\ \phi = -\arcsin[(e + l \sin \phi + l \sin \phi)/l], x_F = l \cos \phi + l \cos \phi + l \cos \phi, \\ s_F = l \cos \phi + \sqrt{(l_5 + l_6)^2 - (e + l \sin \phi)^2} - x_F, \omega = \omega = \frac{l \omega \sin(\phi - \phi)}{l_3 \sin(\phi - \phi)}, \quad (6)$$

$$\omega = -\frac{l \omega \sin(\phi - \phi)}{l \sin(\phi - \phi)}, \omega = -\frac{l_5 \omega \cos \phi}{l_6 \cos \phi} = -\frac{l_5 \omega \cos(\phi - \theta)}{l_6 \cos \phi},$$

$$v_F = \frac{ds_F}{dt} = -\frac{dx_F}{dt} = l_5 \omega \sin \phi + l_6 \omega \sin \phi$$

1.3 规定约束条件

1.3.1 曲柄存在条件

为保证双曲柄机构及曲柄滑块机构存在曲柄,铰链四杆机构存在双曲柄的条件为:

$$g_1(X) = l_1 + l_1 - l_2 - l_3 \leq 0 \quad (7) \quad g_2(X) = l_1 + l_2 - l_1 - l_3 \leq 0 \quad (8) \quad g_3(X) = l_1 + l_2 \leq l_1 + l_2 \leq 0 \quad (9)$$

曲柄滑块机构存在曲柄的条件为:

$$g_4(X) = l_5 + l_1 \sin \phi + e - l_6 \leq 0 \quad (10)$$

1.3.2 传力条件

为使该机构具有良好的传力特性,应使该机构运动的传动角满足 $\gamma \leq \gamma \leq \gamma$,根据推导可得传力约束条件为:

$$g_5(X) = l^2 + b^2 - (l - l)^2 - 2lb \cos \gamma \leq 0 \quad (11) \quad g_6(X) = -l^2 - b^2 + (l + l)^2 + 2lb \cos \gamma \leq 0 \quad (12)$$

$$g_7(X) = -l \cos \gamma + (l + l \sin \phi + e) \leq 0 \quad (13) \quad g_8(X) = l \cos \gamma - [l - (l \sin \phi + e)] \leq 0 \quad (14)$$

1.3.3 急回条件

要保证该机构有急回特性,只要保证主动曲柄工作行程运动转角 $\phi_a - \phi_b > 180^\circ$ 即可。

1.3.4 其它约束条件

对设计变量的取值范围要有一定的限制,规定设计变量的上、下界,取 $X_L \leq X \leq X_U$ 。

1.4 平面六杆机构优化设计数学模型

经整理,该平面六杆机构优化设计数学模型为:

$$\begin{cases} \min F(X) & X \in E^0 \\ g_u(X) \leq 0 & u=1,2,\dots,8 \\ X_L \leq X \leq X_U \end{cases} \quad (15)$$

2 平面六杆机构优化设计解算

取 $X_L = [30 \ 30 \ 30 \ 20 \ 20 \ 60 \ -30^\circ \ -90^\circ \ -20]^\top$, $X_U = [100 \ 100 \ 100 \ 100 \ 100 \ 100 \ 30^\circ \ 90^\circ \ 20]^\top$, $\phi_1 = 60^\circ$, $\phi_2 = -180^\circ$, $\gamma = 45^\circ$, $\gamma_2 = 135^\circ$, $\omega = 10 \text{ rad/s}$ 。应用约束变尺度优化算法^[5-7],经运算所得结果如表 1 所示,可根据需要将构件长度尺寸按比例放大或缩小。

表 1 优化设计结果

Tab.1 Results of optimization design

变量	l_1/mm	l_2/mm	l_3/mm	l_4/mm	l_5/mm	l_6/mm	$\phi_1/(\text{^\circ})$	$\theta/(\text{^\circ})$	e/mm
运算值	48.78	39.45	34.97	20	20	60	30	-78	-2.4

3 平面六杆机构运动仿真

SolidWorks 是基于 Windows 环境的三维机械设计软件,其中的 COSMOSMotion 是多功能的运动仿真插件,可以对机构进行运动学和动力学仿真,得到各构件的运动情况,如位移、速度、加速度等运动学和动力学信息,并能以动画、曲线、图表等形式输出^[8-10]。设计者可根据输出信息,判断设计结果是否正确、合理。

首先进入 SolidWorks 零件设计环境,逐一按各构件的运动尺寸进行造型,然后进入装配环境进行装配。在装配体完成后,直接进入 COSMOSMotion 仿真环境,并使构件 4(机架)和导路为静止零部件,其余构件为运动零部件。仿真之前,要对仿真的运动参数进行设置,如仿真时间、仿真帧数、仿真画面时间间隔、主动件绕机架的角速度等,使机构刚好完成一个运动循环,然后就可以进行运动仿真了。仿真过程中,输出滑块的速度曲线(也可以按需要输出位移和加速度曲线等),根据速度曲线的变,设计者可依据经验判断设计是否正确、合理。本例所设计的平面六杆机构的运动仿真时间为 1 s,仿真帧数为 50 帧,运动仿真截图见图 2 所示。根据动画及速度线图,可以看出在工作行程中,0.3~0.65 s 期间,滑块基本上作匀速运动,而回程具有明显的急回效应,该机构的优化设计结果基本令人满意。

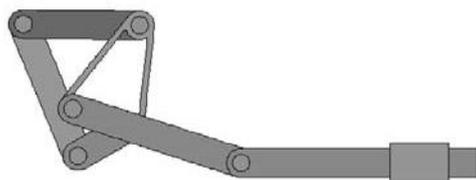
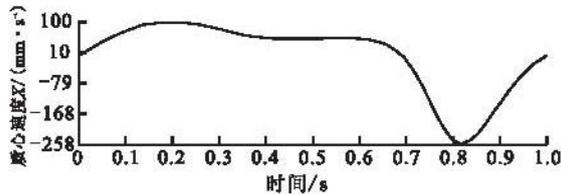


图 2 运动仿真截图

Fig.2 Motion simulation screenshot

4 结束语

本文将传统机械优化设计与计算机辅助设计技术结合起来,在传统机械优化设计的基础上,对优化设计结果用机械设计软件进行三维造型和运动仿真,实现设计结果的可视化,以此判断优化设计数学模型或程序设计是否正确、合理,使设计的可信度大大提高。在运动学仿真的基础上,还可以对机构进行动力学仿真及进行有限元分析。

参考文献(References):

[1] 孙桓,陈作模,葛文杰.机械原理[M].北京:高等教育出版社,2009.

- SUN Huan, CHEN Zuomo, GE Wenjie. Theory of machines and mechanisms[M]. Beijing: High educational press, 2009. (in Chinese)
- [2] 谢慧萍, 季英瑜. 基于 ADAMS 软件的六连杆冲压机构的优化设计[J]. 轻工机械, 2009, 27(2): 47-50.
XIE Huiping, JI Yingyu. Optimization design of six-bar linkage punch mechanism based on ADAMS[J]. Light industry machinery, 2009, 27(2): 47-50. (in Chinese)
- [3] 王汝慧, 李瑞琴. 混合驱动六杆机构的轨迹特征及优化设计[J]. 机械设计与研究, 2009, 25(2): 40-44.
WANG Ruhui, LI Ruiqin. Path-properties and optimal design of hybrid-driven six-bar mechanism[J]. Machine design and research, 2009, 25(2): 40-44. (in Chinese)
- [4] 崔利杰, 龚小平. 基于 MATLAB 运动仿真的平面多连杆机构优化设计[J]. 机械设计与制造, 2007, 45(2): 40-42.
CUI Lijie, GONG Xiaoping. Planar multi-linkage optimization design based on MATLAB movement simulation [J]. Machinery design and manufacture, 2007, 45(2): 40-42. (in Chinese)
- [5] Han S P. A globally convergent method for nonlinear programming[J]. Journal of optimization theory and application, 1977, 22(3): 297-309.
- [6] 贺国平. 一个新的约束变尺度算法[J]. 系统科学与数学, 1990, 10(2): 57-70.
HE Guoping. A new variable metric method for constrained optimization [J]. Journal of systems science and mathematical sciences, 1990, 10(1): 57-70. (in Chinese)
- [7] 孙靖民, 梁迎春. 机械优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
SUN Jingmin, LIANG Yingchun. Optimal design of machine[M]. Beijing: China machine press, 2007. (in Chinese)
- [8] 张乐乐, 郭北苑, 胡仁喜. SolidWorks 应用教程[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2007.
ZHANG Lele, GUO Beiyuan, HU Renxi. SolidWorks application tutorial [M]. Beijing: Beijing jiaotong university press, 2007. (in Chinese)
- [9] 张晋西, 郭学琴. SolidWorks 及 COSMOSMotion 机械仿真设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
ZHANG Jinxi, GUO Xueqin. SolidWorks and COSMOSMotion mechanical simulation design [M]. Beijing: Tsinghua university press, 2007. (in Chinese)
- [10] SolidWorks ins. COSMOSMotion user's guide[M]. Waltham; SolidWorks ins, 2004.

(编辑: 徐楠楠)

Optimization Design of Planar Six-bar Linkage and Motion Simulation

GONG Xiao-ping

(Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Taking that the slide block in planar six-bar linkage is at the minimum rate fluctuation in working stroke for the pursuit of goals, and taking the existence of the crank and good transmission property for constraint conditions, a mathematical model of optimal design is set up and optimization design calculation is done by the application of the constrained variable metric optimization algorithm to obtain the mechanism size parameters. In Solid-Works software the three-dimensional model of assembly for the mechanism is built, and by using COSMOS-Motion plug-ins the motion simulation is done to put out the kinematic animation video, lines and other sports information, which provide a visual way for the optimal design of planar linkage. Simultaneously the above can be used to test or to determine the mathematical model of the mechanism optimum design, the correctness and rationality of the program design and the calculation results, and also provide a reference for the simulation design of other mechanisms.

Key words: planar six-bar linkage; optimization design; Solid-Works; COSMOS-Motion; motion simulation