

公交车车门开启过程分析与优化设计

王永敢,王永娟,向宇,朱蒙

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:针对公交车车门开启限度及开启平稳性问题,以摇臂滑块式车门机构为研究对象,通过对车门机构理论计算分析及仿真分析获得车门运行过程的运动规律,分析摇臂长度及旋转角度对车门运动过程受力变化及开启限度的影响。以摇臂长度和旋转角度为设计变量,分别求解车门运动过程中最大受力的最小值及车门开启限度的最大值。对滑块位移、车门几何质心加速度进行优化,获取最佳的摇臂长度及旋转角度;为摇臂滑块式公交车车门的设计提供了数据支撑和参考。

关键词:摇臂;开启限度;平稳性;优化;设计

中图分类号:U463.83⁺4 **文献标识码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)06-0142-04

Opening Process Analysis of Bus Door and Its Optimization Design

WANG Yonggan, WANG Yongjuan, XIANG Yu, ZHU Meng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the problem of bus door opening limit and opening smoothness, this paper takes the rocker arm slider door mechanism as research object, obtains the movement rules of the door operation process through theoretical calculation and simulation analysis of the door mechanism, and analyzes the influence of the rocker arm length and rotation angle on the force change and opening limit of the door movement. The length of rocker arm and rotation angle are taken as design variables, the minimum value of the maximum force and the maximum value of the opening limit of the car door during the movement are solved respectively. The displacement of the slider and the acceleration of the car's center of gravity are optimized to obtain the optimal length and rotation angle of the rocker arm. The data support and reference are provided for the design of the rocker arm slider bus door.

Keywords: rocker arm; opening limit; smoothness; optimization; design

0 引言

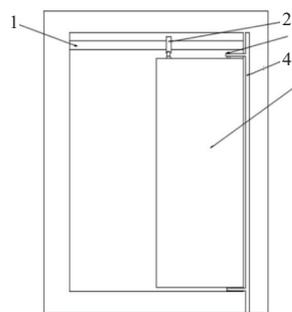
公交车车厢空间有限,在运行高峰期,要求公交车运行过程中能最大限度地开启、关闭车门,以留出最大空间,方便乘客上下车。由于公交车车门系统是刚体结构,其运动过程中必然存在冲击等问题;过高的冲击不仅降低使用寿命,也将威胁乘客的安全,因此公交车车门在设计过程中必须减小冲击。摇臂滑块式车门机构开、关过程中能很好地避免车门附近的人被车门夹到,被广泛用于现代公交车车门系统中。

公交车车门设计中,选取不同的摇臂长度和旋转角度将使得车门的受力及开启限度不同,本文基于此进行车门开启过程分析,通过仿真分析摇臂长度及旋转角度对车门开启限度、门板几何质心加速度(反映车门所受合力的变化)影响规律,并通过优化设计寻找使车门开启过程中受力最小及开启限度最大的摇臂长度及旋转角度。

1 车门开、关工作原理

公交车门结构如图1所示,其主要由导轨1、滑块2、

摇臂3、转轴4、门板5组成。车门的运动基于曲柄滑块结构运动原理,在开、关门时,转轴旋转带动摇臂转动,通过与门板铰接,使门板另外一端的滑块沿着导轨进行平移运动,进而推动车门的开、关。



1—导轨;2—滑块;3—摇臂;4—转轴;5—门板。

图1 车门机构示意图

2 车门开、关过程分析

由于门板与滑块处连接长度相对于摇臂长度或门板

连杆宽度较小,将其忽略不计。因此,车门开、关机构可近似简化为摇杆滑块机构^[1],机构简图如图2所示。

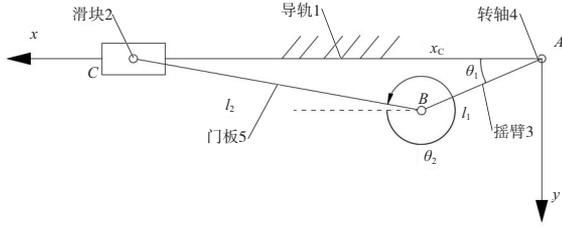


图2 车门开、关机构俯视图

2.1 位置分析

由图2可得关系式:

$$\begin{aligned} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 &= x_c \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中: l_1 为摇臂长度; l_2 为门板宽度; x_c 为车门开、关过程中滑块的位移; θ_1 为摇臂在x方向绕逆时针旋转的夹角; θ_2 为门板在x方向逆时针旋转的夹角。

将式(1)写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} l_1 & l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

将式(1)的 θ_2 消掉,得滑块运动位移与摇臂长度 l_1 、摇臂旋转角度的 θ_1 的关系式:

$$x_c = \sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2 \theta_1} + l_1 \cos \theta_1 \quad (3)$$

一般公交车车门开启时摇臂的旋转角度在 $90^\circ \sim 110^\circ$ 范围内,由式(3)定性分析知,当摇臂旋转角度 $>90^\circ$ 时,随着摇臂长度 l_1 的增大,车门的开、关限度减小。

2.2 加速度分析

将式(2)两端矩阵对时间 t 求导并整理,得:

$$\begin{bmatrix} l_2 \sin \theta_2 & 1 \\ l_2 \cos \theta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_2 \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -w_1 l_1 \sin \theta_1 \\ -w_1 l_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

车门转动角速度与滑块速度为

$$\begin{bmatrix} w_2 \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2 \sin \theta_2 & 1 \\ l_2 \cos \theta_2 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -w_1 l_1 \sin \theta_1 \\ -w_1 l_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(4)两端矩阵对时间 t 求导并整理,得:

$$\begin{bmatrix} l_2 \sin \theta_2 & 1 \\ l_2 \cos \theta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_2 \\ a_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_2 l_2 \cos \theta_2 & 0 \\ -w_2 l_2 \sin \theta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_2 \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -w_1^2 l_1 \cos \theta_1 \\ w_1^2 l_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\alpha_1 l_1 \sin \theta_1 \\ -\alpha_1 l_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: α_1 为摇杆角加速度; α_2 为车门转动角加速度; a_c 为滑块加速度。

将式(5)代入式(6)得 α_2 、 a_c 与 l_1 、 l_2 、 θ_1 、 θ_2 的关系式,而且 l_2 随 l_1 的变化而变化, θ_2 随 θ_1 的变化而变化。

对车门加速度进行运动学求解得到车门质心加速度为

$$a_{2c} = a_c + \alpha_2 l_2 \tau + \frac{w_2^2 l_2}{2} \mathbf{n} \quad (7)$$

以上计算只能容易地定性分析出车门开启限度 x_c 随摇臂长度变化的关系,而对于车门加速度随摇臂长度、摇

臂旋转角度的变化难以定性分析,因此需结合仿真进行定性分析。

3 车门模型建立及参数化

建立车门机构仿真模型如图3所示。

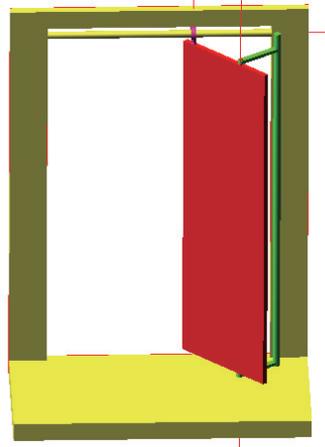


图3 车门机构仿真模型

该模型假设与简化如下^[2]:

- 1) 由于公交车门为左右对称结构,故只对一侧结构建模;
 - 2) 将摇臂端点与车门左边线垂直距离的变化等效为摇臂长度的变化;
 - 3) 各运动副视为理想运动副,忽略其摩擦;
 - 4) 门板质量均匀,门框只起支撑作用,不参与运动。
- 该模型设计变量如图4所示。

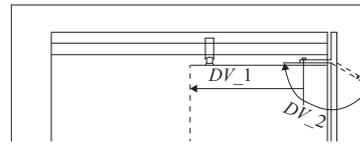


图4 设计变量示意图

为了方便建模,定义摇臂端点与车门左边线垂直距离为设计变量 DV_1 (反映出摇臂长度的变化,随着 DV_1 的增加而减小),单位mm;摇臂的旋转角度为设计变量 DV_2 ,单位($^\circ$);滑块的运动位移最大值为目标函数 X ;车门质心加速度最大值为目标函数 A ;模型为多变量多目标函数约束问题^[3]。驱动函数选用正弦函数^[4-6],数学模型如下:

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & X(DV_1, DV_2) \\ \text{Min} \quad & A(DV_1, DV_2) \\ \text{s. t.} \quad & 410 \leq DV_1 \leq 440 \\ & 90 \leq DV_2 \leq 105 \end{aligned}$$

4 车门开、关过程特性分析

定义滑块到车门左端边线距离为 L 随时间而变化;滑块到车门左边线最大距离为 L_{\max} 。车门的开启限度体现

在 L_{\max} 上,设计变量 DV_1 及 DV_2 的变化将引起 L_{\max} 的变化;仿真时间为 2 s,即车门开启 1 次,再关闭 1 次。

仿真结果如图 5-图 9 所示(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

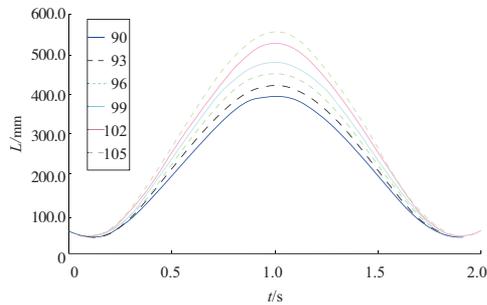


图 5 固定 $DV_1=410$ mm,不同 DV_2 时滑块位移与时间图像

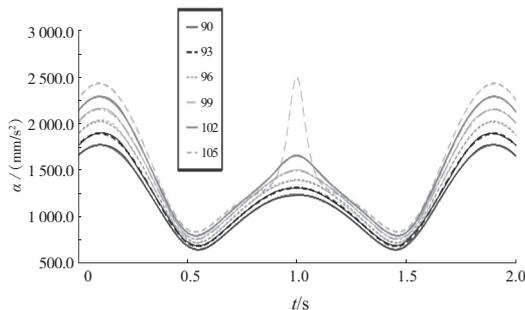


图 6 固定 $DV_1=410$ mm,不同 DV_2 车门几何质心加速度与时间图像

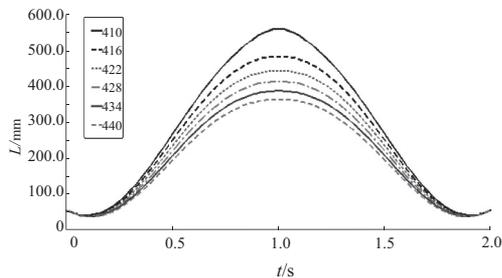


图 7 固定 $DV_2=105^\circ$,不同 DV_1 时滑块位移与时间图像

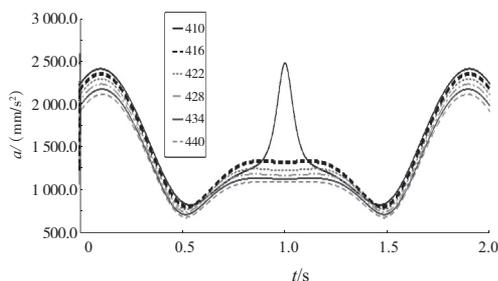


图 8 固定 $DV_2=105^\circ$,不同 DV_1 时车门几何质心加速度与时间图像

由图 5、图 7 可知,车门开启瞬间,滑块位移减小,约

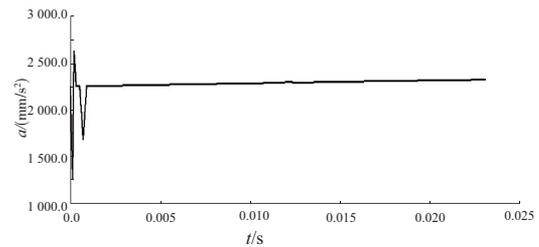


图 9 $DV_1=410$ mm, $DV_2=105^\circ$ 时车门质心瞬时加速度

0.2 s 后增大,这是由于结构原因导致车门开启瞬间使滑块瞬时左移。由图 6、图 8、图 9 可知,车门加速度的峰顶值出现在车门开启和关闭瞬间。此时,车门开启瞬间,加速度很不稳定,反复变化,冲击力最大,严重影响车门连接处零件的疲劳寿命。

固定摇臂长度不变,摇臂旋转角度越大,则车门开启限度也越大,但车门质心加速度和冲击也越大。固定摇臂旋转角度时,摇臂长度越大,则车门开启限度越大,但车门质心加速度和冲击也越大。因此车门开启限度和车门运行平稳性是一对矛盾,想要大的车门开启限度,必然要使车门运行平稳性减小,反之亦然。

当摇臂长度最大,旋转角度最大时,车门有最大的开启限度,但也具有最大的质心加速度,平稳性最不佳。随着摇臂长度的减小,对车门开启限度及运行平稳性的影响显著减小;摇臂旋转角度的减小,对车门开启限度及平稳性的影响也显著减小。车门开启与关闭瞬间的质心加速度最大,且显著大于其他位置的质心加速度,对车门运行平稳性影响最大。因此设法减小车门开启与关闭瞬间的质心加速度,能显著地提高车门运行的平稳性。

5 目标函数优化分析

由以上对车门运动学、动力学分析可知,优化的目标函数是相互矛盾的,要获得一种较好的性能必然牺牲另一种性能,而不能同时达到最优,这就需要在各个最优解间进行协调,以获得较好的整体方案^[7-8]。

优化方法常用双响应曲面拟合过程,即一个曲面拟合均值,另一个曲面拟合方差,这是一种循环渐进的过程,各阶段的结果会引导下一步所取方向^[9]。设 u 为响应均值, σ 为响应标准差, $y_{p,q}$ 为实验点 p 的 q 响应,其中 $p=1, 2, 3, \dots, m; q=1, 2, 3, \dots, n$,可得 n 次实验的均值点估计和方差估计为^[10-11]:

$$u = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m y_{p,q} \quad (8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{p=1}^m (y_{p,q} - y_q)^2} \quad (9)$$

利用双响应曲面法对滑块位移与车门质心加速度进行二次响应拟合得到均值响应曲面模型和方差响应曲面模型为^[12]:

$$X = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 \quad (10)$$

$$A = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_1^2 + \alpha_4 x_2^2 + \alpha_5 x_1 x_2 \quad (11)$$

式中: x_1 为摇臂长度变量 DV_1 ; x_2 为摇臂旋转角度变量 DV_2 ; β, γ 为待定系数; X 为滑块的位移; A 为车门质心加速度。

分别选取一定间隔的摇臂长度与旋转角度各 6 组数据进行 RSM 优化实验,共进行 36 次试验,所得数据如表 1 所示。对表 1 数据进行二次曲面拟合,所得拟合多项式如式(12)、式(13)。

$$X = 379.5 - 49.78x_1 + 37.47x_2 + 8.916x_1^2 + 0.4684x_2^2 - 8.213x_1x_2 \quad (12)$$

$$A = 2.075 - 79.08x_1 + 191.1x_2 + 7.288x_1^2 + 2.357x_2^2 - 42.99x_1x_2 \quad (13)$$

表 1 目标实验结果

序号	滑块位移/mm	车门质心加速度/(mm/s ²)	DV_1/mm	DV_2/(°)
1	397.03	1 777.2	410	90
2	424.65	2 060.7	410	93
3	453.45	2 195.8	410	96
4	483.85	2 335.2	410	99
5	517.12	2 292.9	410	102
6	560.56	2 626.9	410	105
7	367.07	1 876.0	416	90
8	390.64	1 854.1	416	93
9	414.35	1 977.9	416	96
10	438.00	2 270.0	416	99
11	461.35	2 409.6	416	102
12	484.07	2 374.1	416	105
13	342.14	1 821.6	422	90
14	363.35	1 807.9	422	93
15	384.48	2 072.5	422	96
16	405.34	2 204.1	422	99
17	425.72	2 339.7	422	102
18	445.35	2 479.4	422	105
19	320.34	1 766.7	428	90
20	339.88	1 761.3	428	93
21	359.30	1 879.0	428	96
22	378.43	2 000.6	428	99
23	397.10	2 126.1	428	102
24	415.11	2 255.6	428	105
25	300.71	1 711.7	434	90
26	318.96	2 714.5	434	93
27	337.08	1 829.1	434	96
28	354.95	2 071.2	434	99
29	372.41	2 198.6	434	102
30	389.31	2 195.9	434	105
31	282.72	1 656.5	440	90
32	299.89	1 768.8	440	93
33	316.96	1 884.8	440	96
34	333.81	2 004.4	440	99
35	350.32	2 013.4	440	102
36	366.36	2 254.8	440	105

公交车实际运行中需要更多的是车门开启限度最大,以方便乘客上下车,而车门运行平稳性可以通过其他

方式提高。取车门开启限度 $X(DV_1, DV_2)$ 的权重为 0.9, 平稳性指标 $A(DV_1, DV_2)$ 的权重为 0.1, 得出最优结果为 $DV_1 = 410 \text{ mm}$, $DV_2 = 105^\circ$ 。由表 1 计算结果, 按下式计算车门开启的不平稳性增加率和开启限度提高率:

$$\delta_a = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{a_{\min}} \times 100\%$$

$$\delta_x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\min}} \times 100\%$$

式中: δ_a 、 δ_x 分别为车门开启的不平稳性增加率和开启限度提高率; a_{\max} 、 a_{\min} 分别为车门质心最大加速度与最小加速度; x_{\max} 、 x_{\min} 分别为滑块最大位移与最小位移。

为了得到最大的车门开启限度, 车门开、关的不平稳性将增加 58.6%, 而为了得到最大的平稳性, 车门开启限度将减小 49.6%。所对应的滑块位移和车门几何质心加速度关系如图 10 所示。

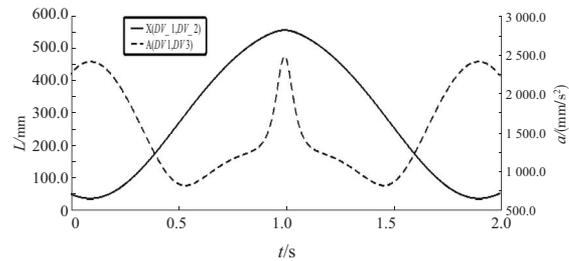


图 10 滑块位移、车门质心加速度关系曲线

6 结语

本文对摇臂滑块式公交车车门机构进行车门开启速度、加速度理论计算、仿真分析, 并对车门机构目标函数进行二次响应曲面优化, 根据实际选取摇臂长度及旋转角度的权重进行目标函数统一, 分析得出如下结论和建议。

1) 车门开启限度随摇臂长度、旋转角度的增大而增大, 车门平稳性随摇臂长度、旋转角度的增加而降低。

2) 当 $DV_1 = 410 \text{ mm}$, $DV_2 = 105^\circ$, 为车门开启限度权重 0.9, 平稳性权重 0.1 的设计最优值, 此时为最大的车门开启限度, 车门的不平稳性也最大。

3) 对于已经设计好的公交车车门, 此时摇臂长度不易改变。对于公交司机, 可通过设置两种不同的摇臂选择角度选项。当运行高峰期时, 选择摇臂旋转角度为 105° , 使车门开启限度最大; 当非高峰期, 选择摇臂旋转角度为 90° , 使车门运行最平稳。

参考文献:

- [1] 周莉. 基于 Matlab/Simulink 的曲柄滑块机构运动学分析及仿真[J]. 机械研究与应用, 2012, 25(4): 62-63.
- [2] 于荣涛, 孙东明, 黄文婷. 基于 ADAMS 的公交车车门动力学分析[J]. 新技术新工艺, 2013(4): 38-39.
- [3] 伊启平, 黄秀琴. 基于 ADAMS 八连杆冲压机构的参数化设计与优化[J]. 常州工学院学报, 2018(1): 27-31.

(下转第 165 页)

世界坐标 $P_w = (x_w, y_w, z_w)$ 。本文将世界坐标系设立在左摄像机的相机坐标系下,则有 $x_1 = x_w, y_1 = y_w, z_1 = z_w$ 。

为验证重建算法的精确性,从实验模板图中选取 10 个特征点进行三维重建,将其重建结果记录下来并进行误差分析,如表 4 所示。

表 4 目标物体三维信息 单位:mm

序号	x 误差	y 误差	z 误差
1	0.769 150	0.345 117	2.635 986
2	0.160 461	0.575 645	3.529 938
3	0.979 012	0.259 350	1.930 695
4	-0.961 449	-0.088 665	0.528 046
5	0.275 917	0.416 946	3.225 800
6	-0.368 401	0.287 922	2.165 497
7	-0.872 383	0.488 945	3.817 474
8	0.961 449	0.088 665	0.528 046
9	0.536 484	-0.046 196	0.179 047
10	-0.092 613	0.059 103	3.648 956

由实验结果得知,本文所采用的算法精度较高,深度信息误差在 0 mm~4 mm 之间,满足精度要求。其中,在物体倾斜、遮挡的情况下误差较大。

4 结语

本文搭建了标准的双目视觉系统,采用张正友标定法对视觉系统进行标定,消除镜头畸变,获得相机的内部参数以及左、右相机的相对位姿。

采用改进后的 ORB+RANSAN 特征点匹配算法对工件进行识别。实验结果表明,该算法对旋转、遮挡、倾斜以及复杂背景等各种条件下的物体均能快速、准确地进行识别。

本文采用特征匹配算法,对同一场景对应的两幅图像进行了立体匹配,获得视差值,结合标定结果对特征点进行了三维重建。

参考文献:

- [1] 韩博. 基于双目立体视觉的工件识别与定位关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [2] 董峰,孙立宁,汝长海. 基于双目视觉的医疗机器人摆位系统测量方法[J]. 光电子·激光,2014(5):1027-1034.
- [3] 吕家国,蒋晓瑜,张鹏炜,等. 医疗机器人双目视觉硬件系统设计与实现[J]. 中国光学,2014,7(2):307-314.
- [4] 蒋萌,王尧尧,陈柏. 基于双目视觉的目标识别与定位研究[J]. 机电工程,2018,35(4):414-419.
- [5] KOCH T, BREIER M, LI W. Heightmap generation for printed circuit boards (PCB) using laser triangulation for pre-processing optimization in industrial recycling applications [C]. Bochum: IEEE International Conference on Industrial Informatics, IEEE, 2013.
- [6] GUEHRING J. Dense 3D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 43(9):220-231.
- [7] RUBLEE E, RABAUD V, KONOLIGE K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF [C]. Washington: Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, 2011: 2564-2571.
- [8] 高强,潘俊. 基于 ORB 的图像特征提取与匹配研究[J]. 福建电脑,2019,35(1):21-22.
- [9] 岳陈平,孟丽娅. 基于 SAD 算法的立体匹配的实现[J]. 微型机与应用,2013,32(6):41-43.

收稿日期:2019-11-07

(上接第 145 页)

- [4] 胡伟,徐勇,张善平. 基于 ADAMS 的六足机器人腿机构优化设计与仿真[J]. 机械制造,2014,52(10):11-14.
- [5] 陈志稳,陈少克. 基于 ADAMS 四自由度抓取机器人运动学分析及仿真[J]. 机电工程技术,2018(12):68-71.
- [6] LIU Yamei, LIU Jing, BIAN Yahui, et al. Kinematics simulation of six degrees freedom robot car skylight detection based on ADAMS [C]. Yin Chuan: Proceedings of 2015 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Systems(ICMEIS 2015). Computer Science and Electronic Technology International Society, 2015: 326-332.
- [7] 李瑜婷,赵治国,章桐. 基于 ADAMS 的双横臂悬架性能多目标优化研究[J]. 中国制造业信息化,2009(17):30-34.
- [8] 李文胜. 基于 ADAMS 的汽车悬架系统多目标优化设计[J].

长春工业大学学报(自然科学版),2011(2):125-130.

- [9] SONG Jie, HUA Hongliang, LIAO Zhenqiang, et al. Combined size and shape optimization of structures with DOE, RSM and GA [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2018, 27(2): 267-275.
- [10] 刘城,潘鑫,闫清东,等. 基于 DOE 及 RSM 的液力变矩器叶片数对性能的影响及优化[J]. 北京理工大学学报,2012, 32(7):689-693.
- [11] 王涛,陶薇. 重型载货汽车悬架参数的多目标优化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术,2008(11):29-32.
- [12] 刘月云,刘碧俊. 基于 DOE, RSM 及 PSO 的大尺寸板类塑件的翘曲优化[J]. 中料,2018,32(10):99-104.

收稿日期:2019-09-05