包装机抱合机构参数分析与综合动态优化

韩凌，刘英，张晓
（南京林业大学，南京 210037）

摘要：目的 为了提高食用菌培养基包装机抱合机构的运动平稳性，改善机构的传力性能。**方法** 在ADAMS环境中进行参数化建模、机构动力学仿真和综合优化设计。在优化设计数学模型中，将支承轴最大横向反力$F_{Ox\,max}$，$F_{Jx\,max}$和抱合块最大加速度$a_{pis\,max}$纳入多目标的设计评价函数，将活动构件之间的运动角作为优化设计的约束条件。通过仿真实验筛选出优质参数θ_1和θ_3，并确定其合适的取值范围，剔除低质参数。**结果** 进行对比性的动态综合优化，选取针对对象与目标的优势参数组合（包含θ_1和θ_3的设计参数组合）具有优势；综合动态优化使机构各支承轴上的最大反力下降了30%~40%，末端构件抱合块的最大加速度下降了34.4%。**结论** 耦合效应会掩盖独立参数对仿真结果的影响，设计软件应能进行单参数的独立调整，以保证优化后规范的结构参数值能够直接进入工程应用。

关键词： 包装机；多杆机构；设计参数；动态仿真；综合优化
中图分类号： TB486+.03　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1001-3563(2015)13-0074-06

Parameter Analysis and Dynamic Comprehensive Optimization for Packaging Proper Linkage of Packing Machine

HAN Ling, *LIU Ying*, *ZHANG Xiao*
(Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

ABSTRACT: This research aimed at improving the stability of the packaging proper piece and the force transmission performance of packaging machine institutions of mushroom medium. The model of the machine was parameterized, simulated, and optimized in ADAMS. The maximum horizontal reaction force $F_{Ox\,max}$, $F_{Jx\,max}$ and the maximum acceleration $a_{pis\,max}$ of the packaging proper piece was included in the multi-objective design evaluation function in the optimal designed mathematical model, and the motion angles between components were taken into account as the constraint conditions of optimal design. In simulation, the highly sensitive θ_1 and θ_3 were chosen for optimization and their range were decided to eliminate low-quality parameters. By comparative and comprehensive dynamic optimization, it was advantageous to select a combination of superior parameters (including the combination of the design parameters θ_1 and θ_3) specific to objects and targets. The maximum reaction force on each support shaft was reduced by 30% ~40% and the maximum acceleration of the packaging proper piece was reduced by 34.4%. The simulation experiment showed the influence of the single parameter may be concealed by the coupling effect of the multi-parameter optimization. However, the CAE software allowed independent modification of single parameter, thus ensuring the standardized structure parameters to be directly applied to engineering.

KEY WORDS: packing machine; multi-bar linkage; design parameter; dynamic simulation; comprehensive optimization

将食用菌培养基装袋制作菌棒的包装机抱合机构，在ADAMS环境中进行动态优化设计建模和仿真[1—3]，拟改善机构传力性能，提高效率，降低机构作用在支承轴上的反力，从而减振降噪，减小抱合块

收稿日期： 2014-11-26

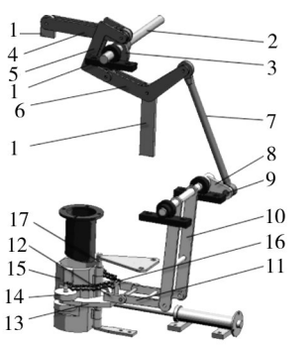
作者简介： 韩凌（1981—），男，江苏南京人，南京林业大学博士生，主攻机电一体化及机械现代设计方法。
通讯作者： 刘英（1963—），女，江苏南京人，博士，南京林业大学教授、博导，主要研究方向为现代设计方法、先进制造技术及其自动化。

运动速度和加速度的最大值及其波动幅度,提高机构的运动平稳性。多杆机构的优化仿真需进行参数化建模[4—5]及参数选择[6—8],孙佩韦[9]将参数分组,逐组试算,直到取得满意结果即止。这里,通过实验仿真和对比性的动态综合优化,筛选针对对象与评价函数的优质参数和参数优势组合,以期取得满意的综合优化结果。

1 抱合机构工作原理与参数化建模

1.1 工作原理

食用菌培养基为碎屑类散料,采用圆柱形塑料袋进行物料装填。菌棒包装机主要实现定位装料、抱合(防止破袋)、压实和工位转换等功能[10]。其中,抱合机构是成功装袋的关键工作机构,能实现从主轴到抱合块的远距离运动传递,在冲头压实物料时进行抱合以防破袋,以及配合转盘的工位转换完成工作头的抱合与复位。抱合机构的三维模型见图1。抱合机构的驱动系统是凸轮连杆复合机构:主轴(轴)上的凸轮及从动杆为凸轮机构,凸轮从动杆、轮轭连杆、V型摆杆和机架组成四杆机构,轮轭连杆将凸轮规定的运动传递给V型摆杆,实现抱合机构的驱动;V型摆杆通过连杆带动固结在轴上的曲柄;与曲柄固结的长臂、连杆、抱合块和机架组成滑块四杆机构。抱合工作头由联接片、抱合臂、滚轮、抱合块和回拉链条组成,由见图1右下角的圆柱形滑块作运动导向。图1中进料口是固联在工位转盘(图中未画出)上,塑料袋套在上面以便装填物料。



1.机架 2.轴 3.共轭凸轮 4.凸轮从动杆 5.轮轭连杆 6.V型摆杆 7.连杆 18.曲柄 9.轴支承 10.长臂 11.连杆2 12.联接片 13.抱合臂 14.滚轮 15.抱合块 16.复位链条 17.进料口

图1 抱合机构的三维模型

Fig.1 The 3D model of packaging proper linkage

凸轮驱动多杆机构完成抱合机构的往复运动。抱合机构的推程应当快速平稳,有效防止破袋;回程也要快速平稳,以便出袋和工位转盘旋转换位。

1.2 参数化建模

在ADAMS环境中的进行参数化建模。抱合机构由凸轮驱动,为深入探讨结构和运动参数对机构动力学性能的影响,这里设固连在轴上的V型摆动杆为初始构件,抱合机构简化成双四杆串联的多杆机构。

1.2.1 设计变量确定与机构参数化建模

抱合机构简图见图2。实现给定运动规律的平面双四杆串联机构可以有10个独立的设计变量[11—12]。菌棒自动生产线的总体布局完成后,配料箱、水箱、输送带的位置与高度根据初步设计已经确定,J轴和工作头(抱合滑块)相对于O轴的Y向位置(高度位置)都不宜再变,滑块杆长为0。机构学意义上的独立参数是7个。以O轴位置为机构的坐标原点,设计变量可以从杆长L_1,L_2,L_3,L_4和L_5,结构角α_{o1}和α_{34},以及相关杆的运动角初始位置θ_1,θ_2和θ_5中选取。

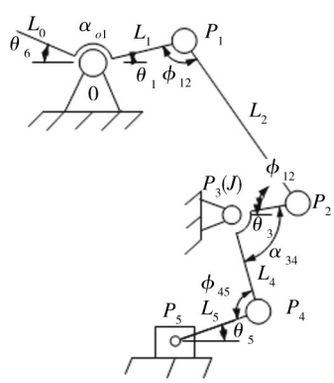


图2 抱合机构简图

Fig 2 Schematic of the packaging proper linkage

运动副的相对位置决定构件的结构尺寸[13]。在ADAMS环境中的参数化建模,是用设计变量描述运动副的绝对坐标,改变模型运动副的初始位置,就完成了机构结构参数的调整[14—15]。为了计算方便,将沿杆长按比例地移动运动副,或者按有序地转动运动副,调整运动副的初始位置[16]。改变连杆上的运动副,至少要改变2个杆长结构参数。

1.2.2 对机构模型施加驱动

在ADAMS环境中对机构模型施加驱动,包装机生产菌棒的速度为25个/min,这样主轴转动速度为1.685 rad/s。根据整机运动配合要求,由凸轮驱动的V型摆杆摆动角为0.288 rad,运动规律取5次多项式为[13,17]:

$$\theta_1 = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 + c_5 t^5$$

设机构运动初始位移，以及初始和运动终结时的速度、角速度为0，解得：

$$\theta_1 = -5.5801t^3 + 10.4348t^4 - 5.2035t^5$$

2 设计目标与设计约束建立

优化设计要解决的主要问题有3个：改善机构传力性能，以提高机械效率；降低机构作用在轴上的反力，以减振降噪；减小抱合块运动速度和加速度的最大值及其波动幅度，以提高机构运动平稳性，降低包装破袋率。综合考虑上述各项动态性能，建立多目标的设计评价函数与设计约束[18—20]。

2.1 建立仿真结果测量

在ADAMS环境中，机构动态仿真可以通过建立测量来考察机构运动学和动力性能[21]。这里建立的测量有O轴和J轴的横向反力，滑块质心运动的速度和加速度。

为考察机构的传力性能，还建立了各连架杆相对于水平轴的运动角θ_1，θ_3和θ_5的测量，以及构件间相对运动角φ_{12}和φ_{23}的测量。

2.2 建立设计目标

建立评价函数来考查结构参数对机构动态性能的影响。这里的评价函数主要考察抱合块的运动平稳性及机构传递给机架的横向作用力。由于横向激振的减振比较困难，设计中应设法减小。优化设计目标涉及的各项，将从仿真过程测量中获取：O轴最大横向反力$F_{Ox\max}$最小；J轴最大横向反力$F_{Jx\max}$最小；从动件的质心最大加速度$a_{\text{pis}\max}$最小。

优化设计中同时考察2轴的横向作用力（权重系数分别取0.2），以及滑块的最大加速度（权重系数取0.6），建立对机构设计方案进行评价的多目标方程为：

$$0.2F_{Ox\max}+0.2F_{Jx\max}+0.6a_{\text{pis}\max}$$

2.3 建立设计约束

在ADAMS环境中进行机构的仿真优化设计时，数学建模要求建立关于设计的约束条件。在这里，设计约束主要考虑传力效果，对构件间的相对运动角φ_{12}和φ_{23}进行限位，保证压力角满足要求[13,22]。

1）L_1和L_2间的运动角φ_{12}限位在$\frac{\pi}{2}\pm\frac{\pi}{4}$，即$\left|\varphi_{12}-\frac{\pi}{2}\right|\leqslant\frac{\pi}{4}$，得约束条件1；

2）L_2与L_3之间的运动角φ_{23}不宜小于$\frac{\pi}{6}$，即$\varphi_{23}\geqslant\frac{\pi}{6}$，得约束条件2；

3）滑块行程在190~290 mm之间，即$190\leqslant S_{\text{pis}}\leqslant 290$，得约束条件3。

滑块行程为240 mm，为搜索出较好的设计方案，滑块行程作为约束条件给出了一定的可行域。在兼顾凸轮连杆复合驱动机构整体设计时，滑块行程的控制可以得到补偿。

3 基于ADAMS的机构动力学实验仿真与参数分析

在实验仿真中，各参数在一定范围内分别取5~7个水平值[21]。独立变动各个运动副的初始位置，变动L_1，θ_3时，O轴横向反力及其最大值的仿真结果见图3。由图3可以看出：若沿L_1的杆长方向变动点P_1的位置，即改变L_1的长度，当杆长系数在0.95~1.05取值时，O轴最大横向反力值随变量的改变是单调下降的（图3a）；在仿真过程中O轴横向反力的波动幅度、力的均值都呈下降趋势（图3b）；L_1长度系数的取值范围可以右移，比如取1~1.15。若改变L_3运动角θ_3的初始值，轴的最大横向反力出现驻点（图3c），其波动幅度及均值见图3d，可见，L_3运动角的合理位置已出现在取值范围内。

由图3可知，L_1的长度越长，O轴的横向反力最大值越小，O轴横向反力的波动也越小。在保证机构能够正常运行的基础上，将θ_3的变化范围设为（–PI / 2）~0.0121，将θ_3在该范围内均分为5个水平，对机构进行仿真。图3c为在5个水平上对应的机构运行过程中J轴横向反力的最大值；图3d为在5个水平上J轴横向反力随时间的变化关系。由图3可见，在第3水平上，J轴横向反力的最大值最小。

实验仿真结果表明，各参数对滑块最大加速度的影响是不一致的，须通过综合优化进行统筹，见图4。

这里分别变动了图2中点P_i（i=1，2，4，5）的初始位置进行动态仿真，将运动副两两组合进行实验仿真。在仿真中考察了O轴最大横向反力和J轴的最大横向反力，以及连接抱合块的滑块运动加速度等指标。

4 基于ADAMS的机构动态优化设计

依据实验仿真提示，θ_1和θ_3的改变对优化结果的影响最为显著。初步选取L_1，L_3，X_J，θ_1和θ_3等5个参数进行综合优化设计。设计评价函数设为：

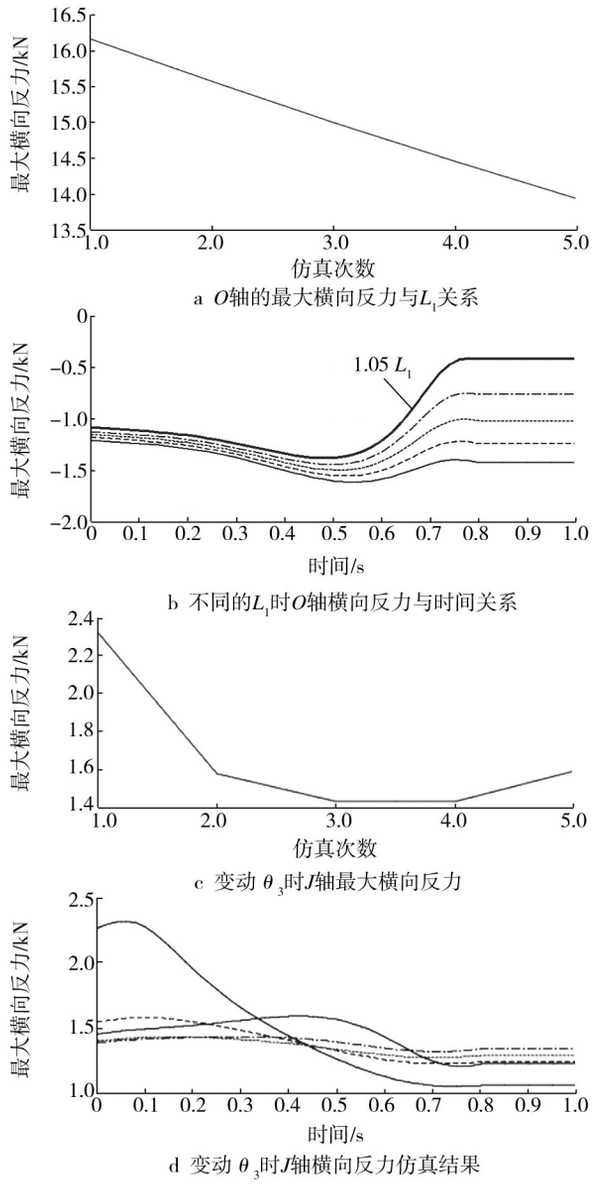


图3　变动L_1, θ_3时O轴横向反力及其最大值仿真结果

Fig.3 The horizontal reaction force of O axis and its maximum stimulated value changing with L_1 and θ_3

$$F_{object}=0.3|F_{Ox}|+0.3|F_{Jx}|+0.4|a_{pis}|$$

其中,评价函数F_{object}是一个无量纲的量。

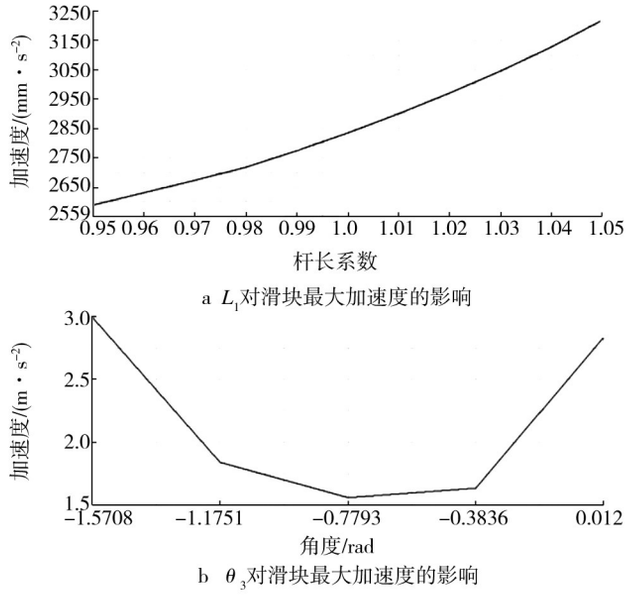


图4　抱合块加速度最大值$a_{pis\,max}$随L_1, θ_3变动的仿真结果

Fig.4 The maximum acceleration of the packaging proper piece $a_{pis\,max}$ changing with L_1 and θ_3 on 5 levels

这里,共选取5组参数进行综合优化设计。Ⅰ号方案为初始方案;Ⅱ号方案取设计参数组(θ_1, θ_3),仿真结果见图5;Ⅲ号方案取设计参数组(L_1, θ_1, θ_3);Ⅳ号方案取设计参数组(L_3, θ_1, θ_3);Ⅴ号方案取设计参数组(X_J, θ_1, θ_3);Ⅵ号方案取设计参数组(L_1,L_3, θ_1, θ_3)。对于支承轴的最大反力、抱合块的最大运动加速度等指标的优化结果见表1。

以Ⅲ号方案(θ_1, θ_3,L_1)参数组合为例(见图5),作为设计目标的O轴和J轴的最大横向反力分别下降了29.9%和21.7%,支承轴的最大纵向反力下降了近37%。反力峰值的降低会减小运动副中的磨损,提高机器的使用寿命。从仿真结果曲线(图5)还可以观察到,支承反力的波动幅值也明显下降,有效减小了机器的振动和噪音。工作构件抱合滑块的最大加速度下降了38.2%,抱合块运动平稳性的提高有利于降低

表1　各参数组优化后的各支承轴最大反力与滑块最大加速度

Tab.1 The maximum reaction force on each support shaft and the maximum acceleration of the sliding block after parameter optimization

方案号	$F_{Ox\,max}$/N	$F_{Oy\,max}$/N	$F_{Jx\,max}$/N	$F_{Jy\,max}$/N	$a_{pis\,max}$/(mm·s^{-2})	F_{object}
Ⅰ	−1499.730	2979.759	1992.805	−2947.860	2834.926	2098.8
Ⅱ	1063.070	1796.240	1570.821	1876.955	1756.707	1457.96
Ⅲ	−1050.853	1770.508	1561.351	−1856.937	1750.606	1454
Ⅳ	−1059.300	1805.660	1564.385	−1878.656	1773.490	1446.71
Ⅴ	−1074.054	1806.508	1582.619	−1886.19	1769.938	1456.87
Ⅵ	−946.420	1675.919	1454.174	−1750.820	1785.229	1364.01

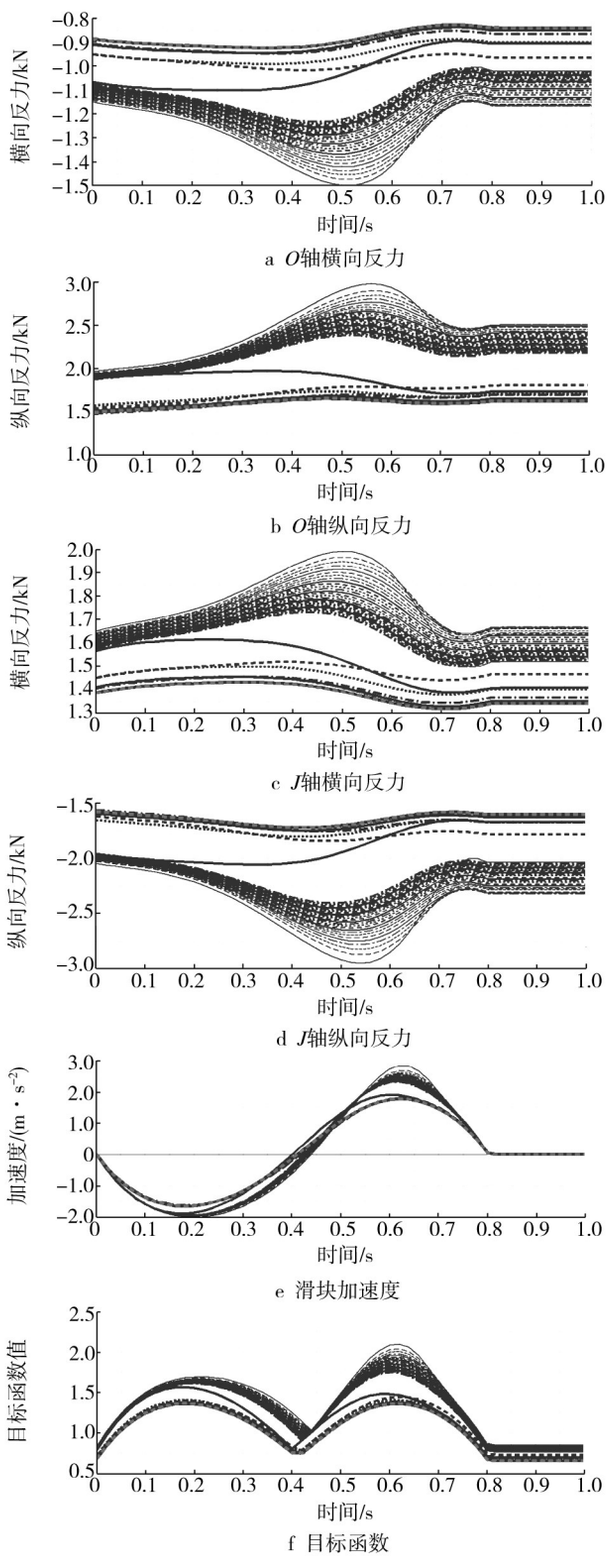


图5 Ⅲ号方案中目标函数及其各组成部分的优化仿真曲线

Fig.5 The simulation curves of the objective function and each component in the scheme Ⅲ

破袋率。

与仿真试验结论一致，参数 θ_1，θ_3对机构动力学性能指标更为敏感，成为综合优化的关键指标。实际上，设计参数组（θ_1，θ_3）Ⅱ号方案的优化结果，与Ⅲ，Ⅳ，Ⅴ号方案的优化结果非常接近，即L_1，L_3，X_J这3个参数对优化指示的贡献是有限的。在仿真试验中观察到X_J变动很小，对目标函数值的影响微弱，这里在Ⅵ号方案中省略了X_J，并得到了较其他方案更优的结果。

5 结语

1）综合动态优化取得较为满意的设计结果，说明在机械设计中完成实现功能要求的机构型综合后，进行旨在改善机构动力学性能的动态综合优化设计是有效的。

2）建立多目标函数时，避免了重复出现相关的、联动的指标。在建立多目标综合优化的评价函数时，仅考虑了支承轴的最大横向反力，综合优化结果，其最大纵向反力也得到了很好的改善。

3）在多杆机构动态综合优化中，参数及其组合的选择是关键。通过有序实验抓出优质参数 θ_1，θ_3，剔除对目标函数影响不大的劣质参数；筛选出参数的优势组合（θ_1，θ_3）具有明显优势。仿真实验表明，进行参数筛选的试算及参数取值范围分析是必要的。

4）在ADAMS环境下，通过变动运动副的初始位置实现参数调整，动1个点的位置涉及若干个设计参数的调整。这种调整方式会带来一些问题：理论分析难以观察到独立参数的实际作用，而观察到的只是若干参数同时改变后的耦合结果；独立参数往往是独立加工制造的零件或构件，经常只是需要某一构件参数变动，而不是每次都要变动一批构件参数；特别地，这种参数调整方式不能保证优化后的各构件尺寸参数是圆整的，设计结果不能为工程直接采用。因此，设计软件需寻求进行独立参数调整的方式，增加能够进行参数独立调整的前处理程序。

参考文献：

[1] 贺兵. 基于虚拟样机技术的包装机械系统仿真研究[J]. 包装工程，2008，29(2)：47—49.
HE Bing. Simulation Study of Packaging Machine Based on Virtual Prototyping[J]. Packaging Engineering，2008，29(2)：47—49.

[2] ZHANG H W，LIAO A H，WU C H. Numerical Simulation of ContacT Problems in Vane Machinery by a Parametric Quadratic Programming Method[J]. Archive of Applied Mechanics，2007，77(6)：421—437.

[3] 曾庆良，刘文，韩虎. 基于虚拟样机技术的新型机器人弹射装置的参数化仿真分析[J]. 中国工程机械学报，2006，4

(2):187—191.
ZENG Qing-liang, LIU Wen, HAN Hu. Parametric Simulation of an Original Ejection Mechanism on a Robot Based on Virtual Prototype[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2006,4(2):187—191.

[4] 陈科,钟智攀,龚子彬,等. 基于ADAMS轿车天窗运动执行机构的仿真分析和优化设计[J]. 石河子大学学报,2008,26(6):754—758
CHEN Ke, ZHONG Zhi-pan, GONG Zi-bing, et al. Simulation Analysis of Motion Mechanism of Automobile Sunroof Basedon ADAMS[J]. Journal of Shihezi University, 2008, 26(6):754—758.

[5] 许小侠,赵静斌,韩英淳. 基于虚拟样机的轿车天窗运动机构的设计[J]. 机械工程学报,2008,44(9):225—229.
XU Xiao-xia, ZHAO Jing-bing, HAN Ying-chun. Automotive Sunroof Motion Mechanism Design Based on Virtual Prototype [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 225—229.

[6] 黎育红,聂凌霄. 基于ADAMS虚拟样机的多体系统动力学仿真[J]. 武汉大学学报:工学版,2010,43(6):758—761
LI Yu-hong, NIE Ling-xiao.ADAMS Virtual Prototype-based Multi-body System Dynamics Simulation[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(6):758—761.

[7] 孙伟,李朝峰,刘杰. 面向复杂机构设计的参数化仿真技术研究[J]. 东北大学学报:自然科学版,2008,29(9):1318—1321 .
SUN Wei, LI Chao-feng, LIU Jie, et al. Study on Parameterized Simulation Process for Complicated Mechanism Design [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2008, 29(9):1318—1321.

[8] 张杨,区颖刚,牟向伟. 基于ADAMS的拨指链式扶蔗装置的虚拟试验[J]. 农业工程学报,2009,25(7):88—93.
ZHANG Yang, OU Ying-gang, MOU Xiang-wei. Virtual Test on the Finger-chain Type Sugarcane-lifter Based on ADAMS [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7):88—93.

[9] 侯亮,潘勇军,郭涛,等. 装载机八杆机构工作装置多目标优化与仿真[J]. 中国机械工程学报, 2009,7(3):258—264.
HOU Liang, PAN Yong-jun, GUO Tao, et al. Multi-objective Optimization and Simulation on8-rod-mechanism Working Device of Loaders[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2009,7(3):258—264.

[10] 孙佩韦. 桑枝食用菌培养基自动化生产线的优化设计[D]. 南京:南京林业大学, 2007.
SUN Pei-wei. Optimization Design for Edible Fungus Culture Medium of Mulberry Branches Automatic Production Line[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007,

[11] 白师贤. 高等机构学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1988.
BAI Shi-xian.Advanced Mechanisms[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1988.

[12] 沈世德. 实用机构学[M]. 上海. 中国纺织出版社,1997.
SHEN Shi-de. Practical Mechanisms[M]. Shanghai: China Textile & Apparel Press, 1997.

[13] 郑文纬,吴克坚. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社, 2010.
ZHENG Wen-wei, WU Ke-jian. Principle of Machinery[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.

[14] 石博强,申焱华,宁晓斌,等. ADAMS基础与工程范例教程[M]. 北京:中国铁道出版社,2007.
SHI Bo-qiang, SHEN Yan-ha, NING Xiao-bin, et al. ADAMS Foundation Tutorial And Engineering Examples[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.

[15] 范成建,熊光明,周明飞. 虚拟样机软件MSC.ADAMS应用与提高[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
FAN Cheng-jian, XIONG Guang-min, ZHOU Min-fei. Virtual Prototyping Software—MSC.ADAMS Applications and Improve[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

[16] 陈立平,张云清,任卫群,等. 机械系统动力学分析及ADAMS应用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
CHEN Li-ping, ZHANG Yun-qing, REN Wei-qun, et al.Mechanical System Dynamics Analysis and ADAMS Application Tutorials[M]. Beijing: Tsinghua University Press. 2005.

[17] 丁丽娟,程杞元. 数值计算方法[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.
DING Li-juan, CHENG Qi-yuan. Numerical Calculation Method[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005.

[18] 魏锋涛,宋俐,李言,等. 基于模糊理论的机械多目标优化设计[J]. 工程图学学报,2010(2):9—12
WEI Feng-tao, SONG Li, LI Yan, et al. Mechanical Multi-Object Optimization Design Based on Fuzzy Theory[J]. Journal of Engineering Graphics, 2010(2):9—12.

[19] 代丽,朱爱华,赵匀. 应用层次分析法计算分插机构优化目标的权重[J]. 农业工程学报,2013,29(2):60 —65.
DAI Li, ZHU Ai-hua, ZHAO Yun. Using AHP to Calculate Optimization Objective Weights of Transplanting Mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(2):60 —65.

[20] 郑加强. 林业机械现代设计学[M]. 北京:中国林业出版社, 1998.
ZHENG Jia-qiang. Modern Forestry Machinery Design[M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 1998.

[21] 邢俊文,陶永忠. MSC.ADAMS/View高级培训教程[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
XING Jun-wen, TAO Yong-zhong. MSC.ADAMS/View Advanced Training Tutorial[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[22] 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 Hui-ping, JI Ying-yu. Optimization Design of Six-bar Linkage Punch MEchanism Based on ADAM S[J]. Light Industry Machinery, 2009, 27(2):47—50.