

面向对象的多杆机构多目标多约束优化设计方法

唐敦兵,杨俊,戴敏

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对工程实际中多杆机构多目标多约束优化设计问题,提出了一种基于 Isight 与 ADAMS 集成的面向对象多杆机构的结构优化设计方法。采用面向对象的结构建模方法,借助多体动力学仿真软件 ADAMS,建立多杆机构仿真参数化模型,实现 Isight 内置搜索算法解决多杆机构多目标多约束条件下的结构优化问题。以一种六连杆机构的优化设计为例,实验结果表明,能够通过一次建模可以满足不同约束及优化目标下的结构设计参数优化组合。

关键词:多杆机构;多目标;多约束;结构优化

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2016)04-0001-04

Object-oriented Multiple Poles and Multi-objective Constraint Optimization Design Method

TANG Dunbing, YANG Jun, DAI Ming

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: According to multi-objective and multi-constrained optimization design of multi-bar linkage in engineering practice, an object-oriented structure optimization design method based on integration of Isight and ADAMS is proposed. A parameterized simulation model of rod mechanism is built by using multi-body dynamics simulation software ADAMS based on the object oriented modeling method, and then, the optimization design of multi-bar linkage under multiple poles and multi-objective constraints are solved effectively by using search algorithms built-in Isight. This paper takes the optimization design of a six bar linkage mechanism as an example, the experimental results show that it can meet the requirements of the parameter combination in the different constraints and the optimal structure design.

Keywords: multi-bar linkage; multi-objective; multi-constrained; structure optimization

0 引言

多杆机构可以通过不同杆系的串联组合及对杆系参数的调整实现末端执行机构复杂的运动规律和运动轨迹,从而满足不同机械的结构设计要求,广泛应用于各种机械、仪表和机电一体化产品结构设计中。

多杆机构的传统杆系设计方法主要包括图解法、解析法、图谱法和模型实验法等,尤其是随着数值计算方法的发展,解析法成为各类多杆机构运动设计的一种有效方法。文献[1]针对多杆机构末端执行机构运动存在非线性传递的问题提出了一种基于遗传算法的多杆压力机运动优化方法;文献[2, 3]通过对多杆系统的分级处理,借助杆系设计变量、约束函数和目标函数推导出最终的增广

目标函数,从而计算得到系统的主要参数(运动参数和结构参数);文献[4]通过建立了滑块位移,速度,加速度的数学模型,按滑块在工作行程内速度波动最小的原则建立了优化设计数学模型,最终运用复数矢量法对压力机双曲柄多杆机构进行了运动分析;文献[5]以一种平面八连杆机构为例建立了平面多杆机构的运动分析数学模型,并利用 MATLAB 对其进行了优化设计和仿真分析。上述方法解决多杆机构运动设计问题的核心思想在于依赖建立能够客观反映机构运动学和动力学特性的代数解析方程(组),借助系统耦合矩阵,实现对全系统状态方程的程式化推导,通过探讨方程(组)解的形式以及方程(组)解的存在条件等方式,实现对特定结构,特定参数变化条件下系统动态性能的定性描述与比较。然而,当多杆机构给定的运动设计要求较多或较复杂,难以用数学语言对其进行

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175262);江苏省产学研前瞻项目(SBY201220116);江苏省杰出青年基金资助项目(SBK201210111)

作者简介:唐敦兵(1972-),男,湖北仙桃人,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为计算机辅助产品设计与开发、制造系统建模与优化和现代集成制造技术集成等。目前正在主持国家自然科学基金、江苏省重大科技成果转化资金、回国留学人员启动基金、教育部博士点基金、霍英东教育基金会青年教师基金、教育部新世纪优秀人才计划等多个项目。曾荣获德国洪堡基金奖励;第十一届霍英东青年教师基金奖励,入选 2008 年度教育部新世纪优秀人才计划,入选江苏省六大人才高峰工程,获 2008 年度江苏省科技进步一等奖和 2008 年度教育部科技进步二等奖。发表论文 100 余篇,在科学出版社出版专著 2 部,发表的文章中 SCI/EI 收录 70 多篇,其中在国际高水平期刊上发表第一作者 SCI 论文 20 篇。是多个国际期刊的长期评审专家及多个国际会议的组委会委员。

模型表达时,上述多杆结构优化设计方法表现出明显的建模周期长,模型可靠性差,模型重用性差等缺点,延长了产品的设计周期,增加了产品的设计成本。

自 20 世纪 80 年代以来,诸多学者提出从系统工程角度将计算机辅助设计优化技术应用于复杂产品研发,借助多种计算机辅助设计软件实现了不同领域仿真物理模型自动向数学模型的转化,并通过综合使用数值仿真技术、优化技术、统计技术、计算机和网络技术,最终实现多目标多约束条件下,产品综合性能和整体质量的改进,极大地提高了产品的设计效率,缩短了产品的设计周期^[6,7]。

1 多杆机构优化设计问题

具有不等式约束的多杆机构优化设计问题的数学表达模型可以概括为:

$$\min/\max f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$s.t. R_j(x) = g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad (j=1, 2, \dots, m)$$

即在满足 m 个不等式约束 $g_j(x) \leq 0$ 的限制条件下,求使目标函数 $f(x)$ 趋于最小或最大的设计变量向量 $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, ($x \in R^n$, R^n 为设计变量可行域)。其中目标函数 $f(x)$ 可以是给定的滑块运动要求,也可以是机构整体的动力学输出特性要求。当给定的运动要求较多或杆系较复杂时,针对多杆机构结构优化设计可以归纳为典型的多目标多约束优化问题。

1.1 双曲柄滑块机构

以一种由双曲柄机构与曲柄滑块机构串联组成的六连杆机构,即双曲柄滑块机构的优化设计问题为例。图 1 (a) 为双曲柄滑块机构运动原理图,相对图 1 (b) 所示的传统曲柄滑块机构,由于双曲柄机构 $ABCD$ 的存在,双曲柄滑块机构的滑块运动输出特性得到了有效改善。在恒速驱动条件下,两种机构滑块运动输出特性对比如图 2 所示。在相同滑块负载条件下,两种机构驱动电机扭矩对比如图 3 所示。

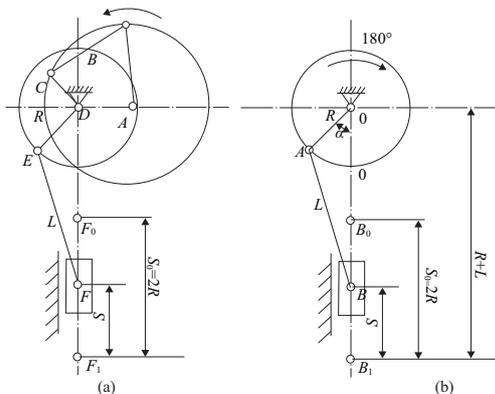


图 1 双曲柄滑块机构与曲柄滑块机构运动原理图

从图 2 可以看出,在相同驱动条件下,双曲柄滑块机构与传统曲柄滑块机构相比,两者具有相同的工作周期,且在图示工作行程内,双曲柄滑块机构滑块运动速度趋于平稳,而传统曲柄滑块机构则表现出明显的速度波动。当

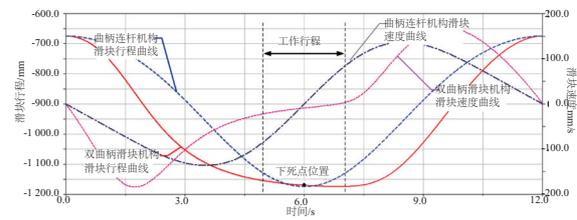


图 2 两种机构滑块运动学输出特性对比

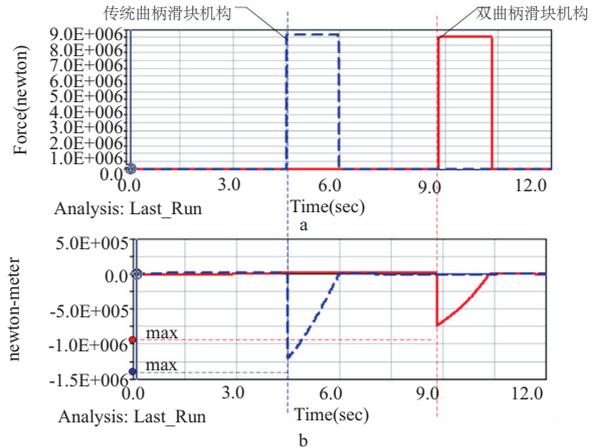


图 3 相同负载条件下驱动扭矩对比

上述机构应用于锻压机械传动系统,尤其是进行拉伸工艺操作时,传统曲柄滑块机构的上述运动特性极易造成拉伸件的拉裂,加剧模具的磨损。

从图 3 可以看出,在相同滑块负载条件下,双曲柄滑块机构与传统曲柄滑块机构相比,在图示负载作用周期内,双曲柄滑块机构驱动扭矩最大值明显小于传统曲柄滑块机构。双曲柄滑块机构上述动力学特性使其更适于作为需要实现大增力比的大型机械传动系统。

由于双曲柄滑块机构的上述特性,该机构被广泛应用于不同功能机床的传动系统,最典型的应用包括多连杆压力机的传动机构和插齿机传动机构,前者利用双曲柄滑块机构滑块加工工作行程内速度变化平稳的优点,相对传统锻压机械在相同加工效率的条件下,能够显著提高拉深工件的成形质量,同时降低模具的磨损;后者则利用相同负载条件下,双曲柄机构的加入能够显著降低系统对于驱动电机容量要求的特点,在不影响加工效率的前提下达到显著的增力效果,最大限度地提高相关加工设备的加工能力。

1.2 多杆机构多目标多约束问题描述

以上述双曲柄滑块机构为例,作为多连杆压力机传动系统为适应不同加工工艺操作,不同加工材料,不同材料加工厚度对滑块加工运动轨迹的不同要求,往往需要针对特性的滑块运动轨迹对杆系结构参数进行优化设计;而作为插齿机传动机构,由于要综合考虑结构强度,齿刀寿命等因素,也需针对不同的结构增力要求对其结构参数进行优化。

如何针对不同加工应用领域,不同的功能设计要求,

对同一多杆机构的尺寸参数进行优化,使其更合理地规划末端执行机构的运动学和动力学输出特性是多杆机构优化设计的核心问题。显然,上述双曲柄滑块机构针对不同加工应用领域,其优化目标侧重点不同,当双曲柄滑块机构应用于多连杆压力机时,其优化目标可以概括为:求使滑块运动输出满足特定曲线要求的连杆参数优化组合,侧重于对滑块运动学特性的优化;当双曲柄滑块机构应用于插齿机时,其优化目标则更侧重于提高双曲柄机构的增力效果,即求能够使机构输出扭矩最大化的杆系参数优化组合。

上述双曲柄滑块机构优化设计问题总结如表 1。

表 1 双曲柄机构优化设计

应用场合	多连杆压力机	插齿机
优化参数	$L_{oa}, L_{ab}, L_{bc}, L_{oc}, \gamma$	$L_{oa}, L_{ab}, L_{bc}, L_{oc}$
约束条件	$(L_{oa}, L_{ab}, L_{bc}, L_{oc}) \in M; \gamma \in [0, \pi]$ 双曲柄机构成立条件	$(L_{oa}, L_{ab}, L_{bc}, L_{oc}) \in M$ 双曲柄机构成立条件
优化目标	满足特定的滑块运动轨迹	增力效果最大化

其中, M 代表变量 $L_{oa}, L_{ab}, L_{bc}, L_{oc}$ 的可行域, 双曲柄机构成立条件可以表述为: 取最短杆为机架, 且最短构件与最长构件长度之和小于或等于其他两构件长度之和, 即:

$$\begin{aligned}
 &L_{oc} < L_{oa} \\
 &L_{oc} < L_{ab} \\
 &L_{oc} < L_{bc} \\
 &L_{oa} + L_{ab} + L_{bc} - L_{oc} - 2\max(L_{oa}, L_{ab}, L_{bc}, L_{oc}) \leq 0
 \end{aligned}$$

2 基于 Isight 与 ADAMS 面向对象的多杆机构优化设计

通过 Isight 对用户建立的 ADAMS 参数化仿真模型的仿真分析流程进行集成和管理, 借助 Isight 提供的多种优化搜索策略对多杆机构的多目标多约束优化问题进行求解, 从而获得满足设计要求的整体优化结果, 其优化设计流程如图 4 所示。

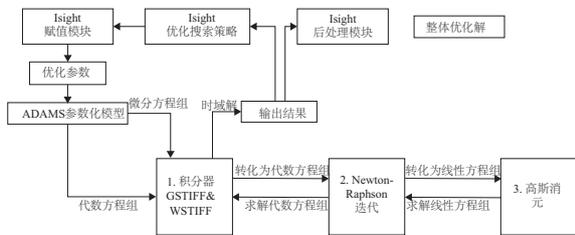


图 4 基于 Isight 与 ADAMS 的集成优化流程

2.1 ADAMS 参数化模型的建立

取双曲柄滑块机构从动曲柄水平位置为建模参考位置, 按照如表 2 所示利用优化参数对模型坐标点进行参数化, 从而建立双曲柄滑块机构的仿真参数化模型。最终建立由杆系几何参数约束的 ADAMS 参数化模型如图 5 所示。

表 2 双曲柄滑块机构参数化坐标列表

坐标点	x 坐标	y 坐标
0	0	0
A	$-L_{oa}$	0
B	$-L_{oa} - L_{ab} \cdot \cos(\alpha + \beta)$	$-L_{oc} - L_{bc} \cdot \cos\alpha$
C	0	L_{oc}
D	$-R \cdot \cos\gamma$	$R \cdot \sin\gamma$

其中: $\alpha = \cos\left(\frac{L_{ab}^2 + L_{oa}^2 + L_{oc}^2 - L_{bc}^2}{2L_{oa}\sqrt{L_{oa}^2 + L_{oc}^2}}\right)$, $\beta = \text{atan}\left(\frac{L_{oc}}{L_{oa}}\right)$ 。

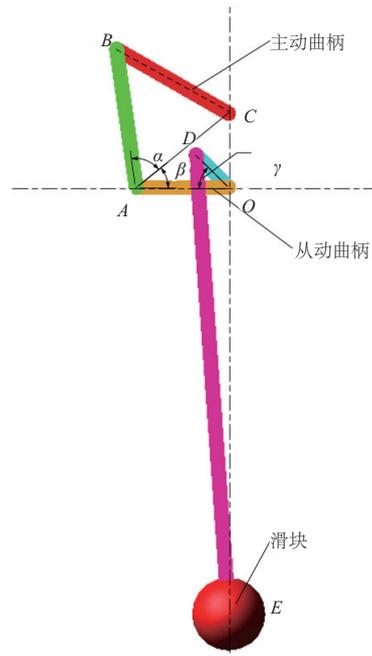


图 5 ADAMS 参数化模型

2.2 双曲柄滑块机构优化

Isight 具备试验设计方法 (design of experiment), 梯度优化算法 (gradient optimization), 直接搜索方法 (direct search), 全局优化算法 (global optimization) 等多个优化求解模块, 考虑到上述双曲柄滑块机构设计参数不多, 以梯度优化算法中的 NLPQL 算法为例, 对双曲柄滑块相关目标函数的优化问题进行求解。

NLPQL 算法将目标函数以二阶泰勒级数展开, 并通过把约束条件线性化的方式二次规划得到下一个设计点, 然后根据两个可供选择的优化函数执行一次线性搜索, 其中 Hessian 矩阵由 BFGS 公式更新, 该算法具有运行稳定, 数据收敛速度快的特点^[8]。

3 仿真结果分析

在 Isight 中设置好设计变量, 约束条件和优化目标后调用 ADAMS 模型进行批处理运算, 计算过程中对每个样本点进行迭代, 以双曲柄滑块机构增力特性优化流程结果为例, 各变量历史取值如图 6 所示。

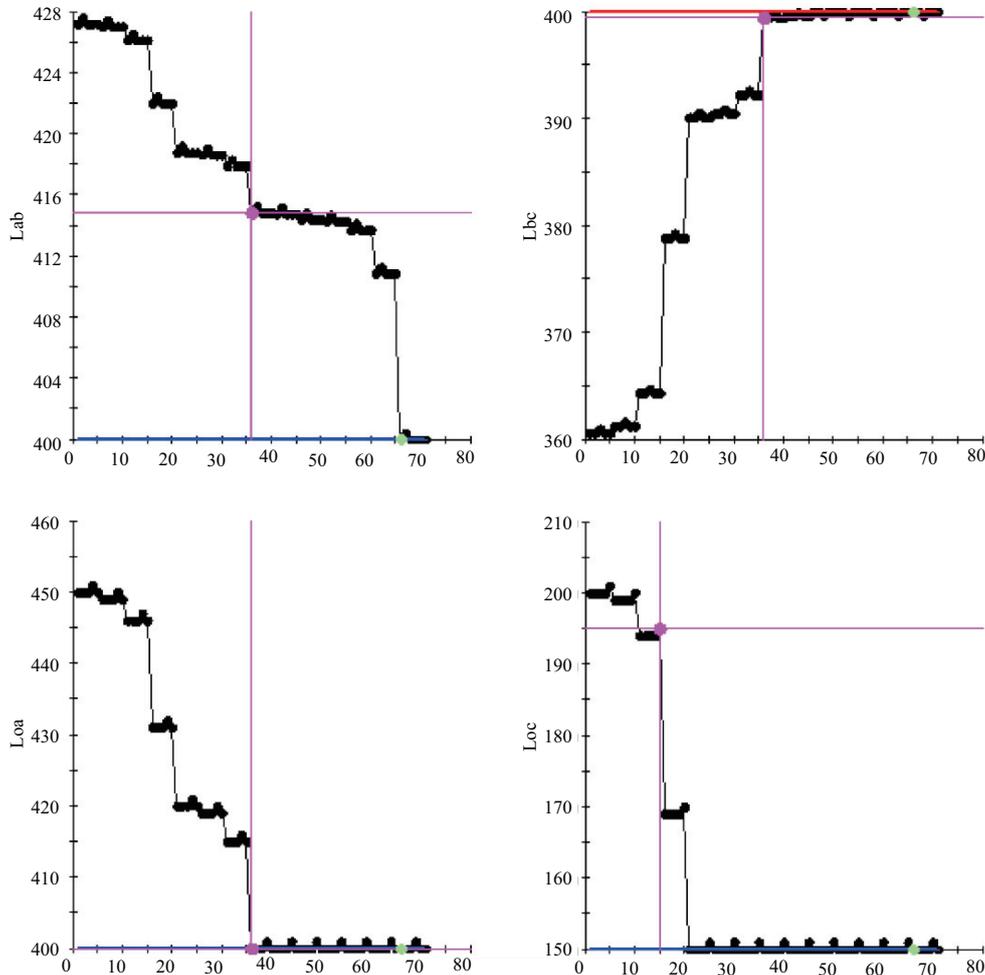


图6 设计变量优化历史取值

从图6可以看出在,在NLPQL算法作用下,设计变量在所定义的变化限制范围内逐步收敛得到所限制范围内的局部最优解。

双曲柄滑块机构动力学特性优化结果对比如表4。

表4 双曲柄滑块机构动力学优化结果对比

	变量 L_{oa}	变量 L_{ab}	变量 L_{bc}	变量 L_{oc}	驱动扭矩
优化前	450	427.2	360.6	200	36 833.72
优化后	400	350	450	200	23 970.85

从表4可以看出,相同负载条件下,优化后的驱动扭矩较优化之前降低了35%,达到了良好的优化效果。

4 结语

本文提出了一种基于Isight与ADAMS集成的面向对象的解决多杆机构多目标多约束条件下的优化设计方法,并以一种六连杆机构为例对上述方法进行了验证。与传统解析法解决类似问题相比,上述集成优化方法能够借助计算机软件将仿真物理模型自动转化为数学模型,并通过仿真模型参数及分析结果的有效管理,达到解决多杆机构多目标多约束问题的目的。从而使工程设计人员从繁

琐的数学模型建模和求解流程中解放出来,将精力集中在设计方案的选取和评价方面,能够显著提高产品的设计效率,缩短产品设计周期。

参考文献:

- [1] 林伟庆,李振石,李建平.基于遗传算法的多连杆压力机运动优化方法[J].锻压技术,2011(5):81-84.
- [2] 李洪忠.平面多杆机构的尺度优化综合[J].中国科技信息,2005(11):126-128.
- [3] 陈述云,张崇甫.多指标综合评价方法及其优化选择研究[J].数理统计与管理,1994;3(13):18-21.
- [4] 余载强,张艳冬.压力机双曲柄多杆机构运动分析和优化设计[J].锻压机械,1998,1(33):3-6.
- [5] 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(2):40-42.
- [6] 陈柏鸿.机械产品多学科综合优化设计中的建模、规划及求解策略[D].武汉:华中科技大学,2001.
- [7] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J, HAFTKA R T. multidisciplinary aerospace design optimization: survey of recent developments[J]. structural optimization, 1997, 14(1): 1-23.
- [8] 徐晓宏,赵万忠,王春燕.基于nlpql算法的电动轮汽车差速助力转向参数优化[J].中南大学学报(自然科学版),2012(9):18-24.

收稿日期:2014-12-11