

基于问答驱动迭代的工程车辆仿真设计方法研究

佘翊妮 宁晓斌 林 琼

浙江工业大学,杭州,310014

摘要:为了实现基于问答驱动迭代的复杂产品的仿真设计,提出了一种在过程设计中,将制定问题、行为模型、仿真模型和决策依据作为独立对象来建立过程模型的方法。该方法能确保需求规范的属性与预估产品的属性之间的信息粒度级别,并使其达到对象到对象层面的可追溯性。将该方法应用于大型液压挖掘机工作装置铰接点的优化设计,以工作装置的工作范围最大和在挖掘、举升、平推等典型工况下的工作性能最佳为原则,对按照蒙特卡罗方法生成的 5120 组不同的工作装置铰接点设计方案进行了选优。结果表明,该方法设计的工作装置性能优良,满足设计需求,是进行复杂产品过程建模的一种切实可行的方法。

关键词:问答驱动;优化设计;行为模型;需求规范;仿真

中图分类号:TH122

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.08.020

Research on Simulation Method in Construction Vehicle Design Based on an Iterative Question-answer Driven Process

She Yini Ning Xiaobin Lin Qiong

Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310014

Abstract: In order to support a question-answer driven simulation process, a design process model was introduced, that was capable to describe problem statements, model specifications, simulation models and problem answers as separate objects. This enabled a granularity level of information that allowed traceability on an object-to-object level between the attributes in the requirement specifications and the estimated product properties. A methodology for an iterative question driven simulation process using this design process model was illustrated in a modeling and simulation scenario of an attachment in a large hydraulic excavators. The simulation model produced a number of 5120 different hinge point design programs according to Monte Carlo methods. Based on the principle of the large working range, the best working performance under lifting, digging and horizontal pushing operating conditions, the best hinge point design was chosen. The results demonstrate that it is a practical valid method for process modeling of complex products, and it can meet the design requirements and has excellent performance design program for the hydraulic excavator attachment.

Key words: question-answer driven; optimization design; behavior model; requirement specification; simulation

0 引言

产品的设计开发过程实质上是对客户需求规范寻求解答的迭代过程。产品的最终属性应满足客户需求规范的要求。客户需求在产品的开发设计中占有绝对主导地位,如何正确理解客户需求,分解客户需求,验证产品属性是否满足客户需求决定了产品开发设计的成功与否。为此笔者认为,在建立产品设计过程模型时,应使模型能支持客户的需求管理和需求追溯,确保产品属性能满足客户需求。

国内外众多学者针对产品概念设计过程进行了大量的研究,提出了许多设计过程模型。文献[1-2]提出了一种产品功能、效应、作用原理和结

构方案循环交叉求解的计算机辅助概念设计进程模型,分析了单一功能和复合功能的求解进程,研究了循环求解关键实现技术,建立了由主体特征和接口特征组成的功能特征模型和基于“需求域—功能域—原理解域”循环映射的概念设计模型,开发了支持功能设计和功能求解的复合功能概念设计自动化原型系统。祖耀等^[3]提出了一种有助于机构组合创新和功能与结构之间的优化匹配、基于迭代的“功能—行为—机构—结构”模型,并给出了迭代设计的具体步骤及相应的迭代算法流程。李健等^[4]给出了原理构件和功能联结的概念、定义和特点,用面向对象的方法建立了产品原理结构模型,为功能到结构的映射提供了一种方法。Deng 等^[5]指出了设计评价和设计验证在侧重点上的区别,针对概念设计中的功能验证,提出

收稿日期:2012—12—03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51145015)

了建立在全面功能设计模型(功能→环境→行为→结构)基础上的一般性方法与其相匹配的若干策略。Deng 等^[6]认为:在机械产品概念设计阶段,“行为”的表达方式应由人们熟悉的“输入→输出对象流”向“输入→输出动作流”进行转变,前者是物理层的设计抽象,后者是功能层的设计抽象,更能反映设计意图。Roy 等^[7]尝试为产品全生命周期设计提供一个面向对象的一般性方法,即通过一组一般性的定义,为从始至终地设计综合过程提供一个结构性框架。

从上述分析可知,当前的研究工作主要侧重于分析如何运用各种方法和工具来实现产品“需求→功能→行为→结构”的映射过程,但对设计过程模型是否支持需求管理,能否实现需求追踪的研究并不多见。本文以 Malmqvist^[8]的研究成果为基础,提出了一种在过程设计中,将制定问题、行为模型、仿真模型和决策依据作为独立对象,建立过程模型的方法。该方法能确保需求规范的属性与预估产品的属性之间的信息粒度级别,并使其达到对象到对象层面的可追溯性。

1 设计过程模型

为了提高需求的可追溯性和可验证性,本文将面向门径管理系统的模型^[9]与通用设计过程模型联系起来,建立了如图 1 所示的复杂产品设计过程模型。图 1 中的信息流显示,在产品概念设计阶段,首先依据 G-3 门径决策制定产品总的需求规范,然后依据设计学对产品功能结构的划分,将总的需求规范分解成若干子需求规范,并在“研究问题”场景中对每一子需求规范加以验证与细化,如图 2 所示。最后将所得决策依据用于下一设计阶段的 G-1 门径决策。

1.1 需求规范验证

需求规范验证的关键是“研究问题”活动(图 2)。“制定问题”以需求规范为输入,主要集中探索产品设计概念特性。此活动的描述越精确就意味着设计者能越准确地定义问题。“创建行为系统”首先根据已知条件求解“制定问题”活动中的问题。然后制作模型规范,阐明需要从模拟中得到什么类型的信息,例如我们是否需要动态或静态属性的产品概念。最后配置系统模型,这个配置需利用存储在建模数据库中且已完成的系统子模型。“模拟行为”是在配置好的系统模型上加载约束,根据模型的工作环境对其进行分析,如可用 ADAMS、ANSYS 等软件对已加载约束的模型进行仿真分析。

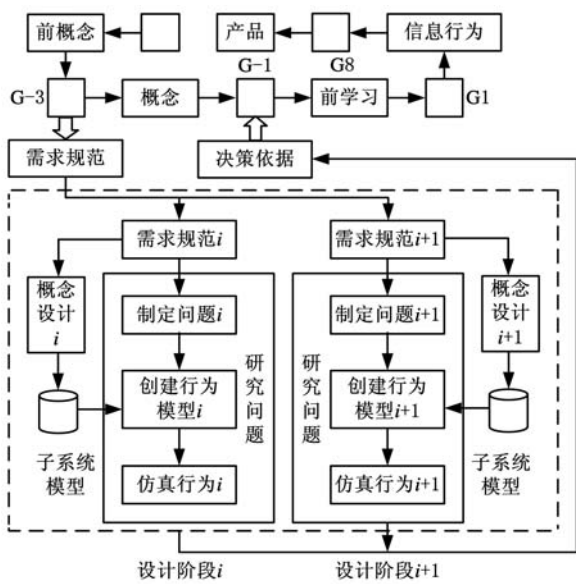


图 1 复杂产品设计过程模型

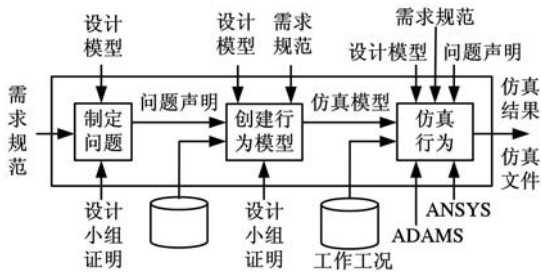


图 2 “研究问题”活动

2 实例分析

现将上述设计过程模型用于液压挖掘机工作装置的建模与运动性能仿真优化设计。该工作的重点是如何应用问答驱动的迭代方法,在需求规范的验证循环过程中,实现工作装置铰接点的优化设计。挖掘机的工作范围,即挖掘轨迹包络图,指的是液压挖掘机在任意正常位置进行工作时,其铲斗齿尖所能达到的极限范围^[10]。它能直观反映工作装置的作业范围和特殊工作尺寸,如最大挖掘半径、最大挖掘深度、最大挖掘高度等,是评价工作装置性能优劣的重要指标。工作装置在举升、挖掘和平推等各种典型工况下的运动性能,如铲斗的姿态是否最佳,机构有无死点等可用来验证挖掘机的工作范围是否合理。因此,实例分析以工作装置的静态最大工作范围和其在举升、挖掘、平推工况下的运动性能为需求属性,完成需求规范的验证及决策依据的制定,实现工作装置铰接点的优化设计,如图 3 所示。在整个需求的验证过程中,产品的设计模型也在不断完善。液压挖掘机工作装置的设计模型如图 4 所示。

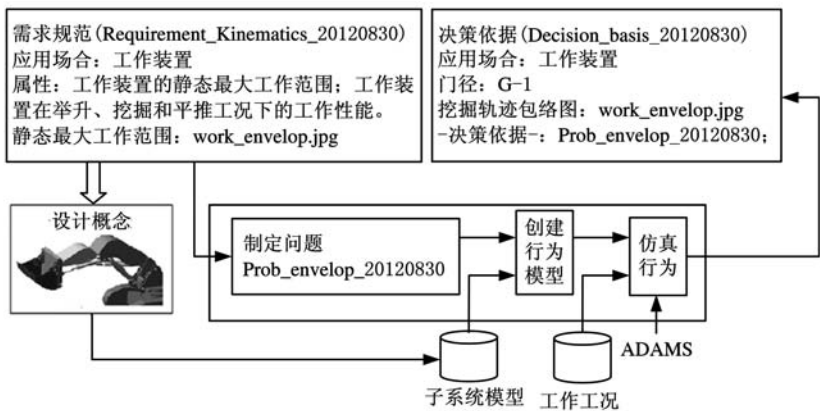


图 3 工作装置的需求规范的验证循环

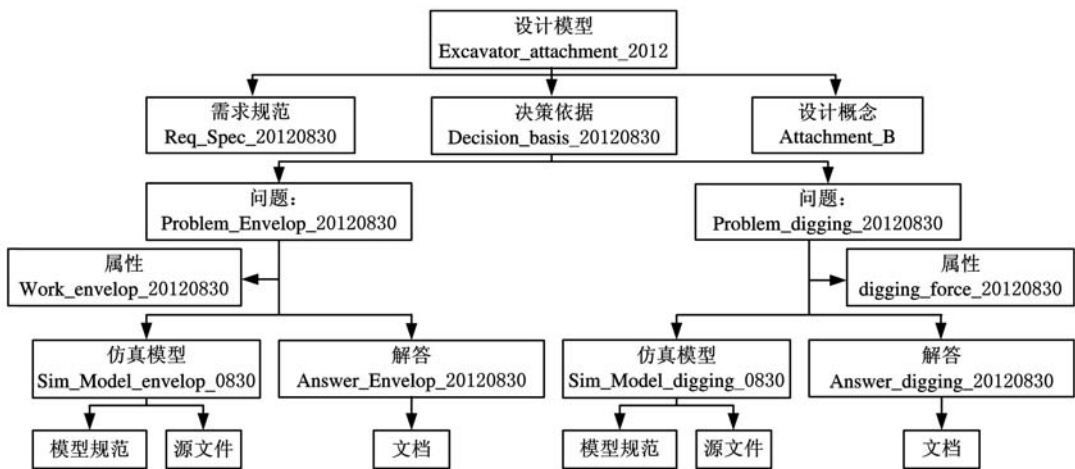


图 4 工作装置的设计模型

2.1 制定问题

制定问题作为需求规范验证的第一步,包含定义对象描述、应用场景、需求属性、仿真模型和问题解答。上述信息都将以问题对象的方式存储,如图 5 所示。其中,需求属性作为对立的对象进行存储,如图 6 所示。

| | |
|------|---------------------------------------|
| 名称 | Prob_envelop_2012830 |
| 应用场景 | 液压挖掘机的工作装置 |
| 对象描述 | 工作装置的静态最大工作范围是多少? 举升、挖掘和平推工况下的工作性能怎样? |
| 通用需求 | Req_kinematics_2012830 |
| 需求属性 | Work_envelop_2012830 |
| 仿真模型 | Simulation_envelop_2012830 |
| 问题解答 | Answer_envelop_2012830 |

图 5 问题对象

| | |
|------|--|
| 名称 | Work_envelop_2012830 |
| 应用场景 | 液压挖掘机的工作装置 |
| 对象描述 | 工作装置的静态最大工作范围, 举升、挖掘和平推工况下的工作性能 |
| 值 | 最大挖掘半径(>15.35m)、最大挖掘高度(>17.85m)、最大挖掘深度(<-3.42m)、动臂油缸力臂最大值(>2.6m)、动臂油缸力臂最小值(>1.24m)、斗杆油缸力臂最大值(>1.54m) |
| 图 | Work_envelop.jpg |
| 仿真模型 | Simulation_envelop_2012830 |
| 问题解答 | Answer_envelop_2012830 |

图 6 需求属性对象

2.2 创建行为系统

创建行为系统的实质就是依据对象描述来定义模型规范,建立仿真模型。液压挖掘机的工作装置由旋转平台、铲斗、斗杆、动臂和各关节臂对应的油缸组成,是一个典型的多体系统。因此,可选用 ADAMS 软件建立工作装置的多刚体运动学参数化仿真模型,如图 7 所示,应用 ADAMS/

Insight 模块中的试验设计功能,研究铰接点设计变量的变化对正铲工作装置工作范围(最大挖掘半径、最大挖掘高度和最大挖掘深度)的影响。图 7 中,9 个关键铰接点的 X 坐标和 Y 坐标定为设计变量 (DV_1~DV_18),其取值范围大约在 0.16~0.2 m 之间(这是根据挖掘机工作装置的结构特点来定的,若超过该取值范围,则工作装置在运动的过程中可能会出现运动死点,产生运动干涉,且尺寸变化太大,失去了优化的意义),如表 1 所示。在进行试验设计时,需要确定试验样本。如果在每个设计变量的变化区间中取 2 个值,18 个设计变量同时发生改变的试验样本就有 2^{18} 个。

如果设计变量的取值再增加,试验样本的数量会呈级数地急剧增大。为了获取最优的设计方案,就要求提供尽可能多的试验样本。这无疑会增加计算的时间和成本。蒙特卡罗方法可以根据随机变量取值的概率分布进行随机抽样,在减少试验样本的同时,提高试验样本的置信度。因此,本文运用蒙特卡罗方法,按正态分布对 18 个设计变量的变化区间进行抽样,最终生成 5120 个工作装置铰接点方案。“创建行为系统”活动中定义的模型规范对象和仿真模型对象如图 8、图 9 所示。

| 表 1 设计变量取值范围 | | | | | | mm |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | DV_1 | DV_2 | DV_3 | DV_4 | DV_5 | DV_6 |
| 最大值 | -0.6 | 6.15 | -3.44 | 6.44 | -2.7 | 3.6 |
| 最小值 | -0.8 | 5.95 | -3.6 | 6.28 | -2.9 | 3.4 |
| | DV_7 | DV_8 | DV_9 | DV_10 | DV_11 | DV_12 |
| 最大值 | -6.42 | 7.84 | -7.28 | 8.10 | -8.30 | 8.39 |
| 最小值 | -6.58 | 7.68 | -7.44 | 7.94 | -8.44 | 8.23 |
| | DV_13 | DV_14 | DV_15 | DV_16 | DV_17 | DV_18 |
| 最大值 | -7.38 | 6.79 | -5.32 | 3.45 | -6.80 | 3.63 |
| 最小值 | -7.54 | 6.63 | -5.52 | 3.25 | -7.00 | 3.43 |

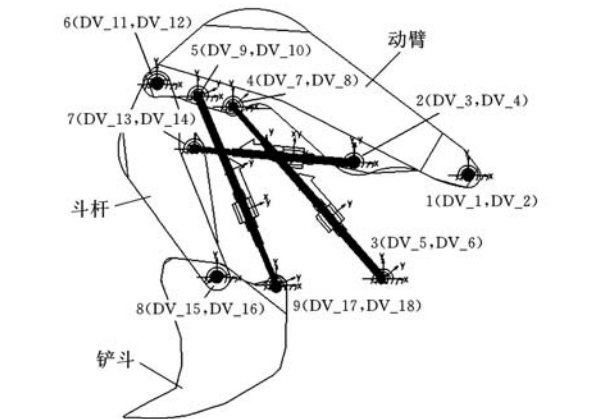


图 7 工作装置各部件和关键铰接点

| | |
|------|-------------------------------|
| 名称 | Model_Specification_2012830 |
| 应用场景 | 液压挖掘机的工作装置 |
| 对象描述 | 计算工作装置的静态最大工作范围 |
| 问题 | Problem_envelop_2012830 |
| 仿真工具 | ADAMS |
| 子模型 | 铲斗机构、斗杆机构、动臂机构、铲斗油缸、斗杆油缸、动臂油缸 |

图 8 模型规范对象

| | |
|------|--|
| 名称 | Simulation_model_2012830 |
| 应用场景 | 液压挖掘机的工作装置 |
| 对象描述 | 计算工作装置的静态最大工作范围,验证工作装置在举升、挖掘和平推工况下的工作性能。 |
| 模型规范 | Model_Specification_2012830 |
| 仿真文件 | WE_Calculation_2012830 |

图 9 仿真模型对象

2.3 仿真行为

通过对工作装置的仿真模型施加约束,将工

作装置的 9 个铰接点设为转动副,将动臂油缸、斗杆油缸、铲斗油缸与活塞杆之间的约束设为圆柱副,控制 3 个油缸的工作行程,实现工作装置最大工作范围、举升、挖掘和平推工况的运动仿真。

2.3.1 工作装置的最大工作范围的仿真分析

在动臂、斗杆和铲斗液压缸上施加滑移驱动函数(函数曲线如图 10 所示),控制各液压缸的伸长量,可得到 5120 组工作装置的挖掘轨迹包络图。根据问题对象 Problem_envelop_20120830 的需求属性,按照工作装置挖掘力 4 个性能指标(动臂油缸力臂的最大值和最小值、斗杆油缸力臂的最大值和最小值)优先原则,对仿真结果筛选,获取理想工作范围的最优方案,如图 11 所示。

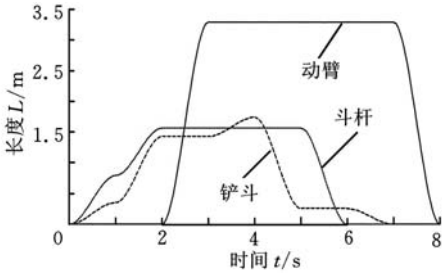


图 10 动臂、斗杆、铲斗液压缸滑移驱动函数曲线

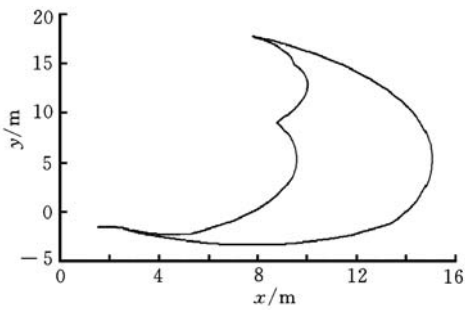


图 11 仿真模型的挖掘包络线

2.3.2 举升工况时工作装置的运动性能仿真分析

工作装置的动臂举升时,要求铲斗—斗杆平行四边形机构能自行调整铲斗角度,使铲斗角度变化较小,以防物料洒落。据此对上述优化方案进行仿真验证,首先将工作装置的动臂油缸置于最小长度,斗杆油缸分别置于表 2 的值,铲斗姿态处于挖掘结束姿态,进行工作装置的举升。通过仿真发现,工作装置举升过程中,当斗杆油缸长度大于 3.83 m 时,铲斗角度变化小于 33°,铲斗物料洒落较少;当斗杆油缸长度小于 3.63 m 时,铲斗角度变化将大于 45°,铲斗会有较多的物料洒落。

表 2 举升工况数据表

| | | | | | | | | | | |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 斗杆长度(m) | 5.03 | 4.83 | 4.63 | 4.43 | 4.23 | 4.03 | 3.83 | 3.63 | 3.43 | 3.23 |
| 铲斗转角(°) | 19.6 | 21.9 | 23.3 | 22.2 | 21.5 | 23.2 | 33.2 | 47.6 | 46.3 | 48.8 |

2.3.3 挖掘工况时工作装置的运动性能仿真分析

正铲挖掘机主要是以斗杆挖掘或复合挖掘为主进行作业。斗杆挖掘工况要求铲斗在整个挖掘区域内能够保持或接近最优后角(铲斗底部轮廓与斗尖轨迹之间的夹角为 5°),铲斗—斗杆平行四边形机构无死点位置。由于动臂油缸的伸长量决定了挖掘的起始高度,故将动臂油缸的行程均分为 10 个区间,对每个区间的起始高度进行挖掘仿真。每个仿真过程中,斗杆油缸总是从最短伸至最长,而铲斗油缸保持不动。结果表明,在挖掘区域内保持或接近最优后角进行斗杆挖掘时,工作装置均能够进行工作,铲斗—斗杆四杆机构无死点。

2.3.4 平推工况时工作装置的运动性能仿真分析

工作装置进行水平推压时,要求在整个水平推压区域内,铲斗能够保持后角基本不变,工作装置机构无死点。为此,在停机水平面上,对工作装置的优化模型进行水平推压仿真验证。仿真过程如图 12 所示,将铲斗斗尖依次移动到与停机水平面高 0 m、2 m 和 4 m,靠近挖掘机的极限位置处,分别向外水平推压时,可实现的最大平推距离分别为 5.80 m、4.94 m 和 5.94 m。



图 12 铲斗平推过程仿真

上述分析表明,工作装置的最优铰接点设计方案满足工作装置在斗杆挖掘、动臂举升、平推挖掘等典型工况的运动性能需求。在完成行为仿真后,以文档的形式阐述仿真结果(包括仿真分析得到的图和表),对提出的问题给予解答。

2.4 决策依据

产品的设计开发过程实质是对客户需求规范寻求解答的迭代过程。需求规范在每个设计开发阶段都通过问答驱动的迭代方法,在“研究问题”活动中加以验证。决策依据将上述迭代过程中的各种重要信息加以记录,如图 13 所示。其中,每个问题对象的解答结果都填入了决策依据对应的每项属性中。

| | |
|-----------------|------------------------|
| 名称 | Decision_basis_2012830 |
| 定义 | 工作装置优化设计的决策依据 |
| 性能属性 | |
| 最大挖掘半径 | 15.392[m] |
| 最大挖掘深度 | -3.427[m] |
| 最大挖掘高度 | 17.921[m] |
| 动臂油缸力臂最大值 | 2.601[m] |
| 动臂油缸力臂最小值 | 1.561[m] |
| 斗杆油缸力臂最大值 | 0~33° |
| 举升工况,铲斗角度变化 | 5° |
| 挖掘工况,铲斗后角 | 5.51[m] |
| 铲斗后角保持不变的最远平推距离 | 液压挖掘机的工作装置 |
| 决策依据 | Prob_envelop_2012830 |
| 制造属性 | 液压挖掘机的工作装置 |

图 13 决策依据对象

3 结论

(1)在产品的问答驱动仿真设计过程中,将制定问题、模型规范、仿真模型和决策依据作为独立对象的建模方法,能确保需求追踪的粒度级别是对象到对象层面的,避免了需求分解为子系统需求时文档的不一致。

(2)该设计方法实现了需求到仿真模型的转换,为研究需求改变对产品性能的影响提供了可能;需求改变时,部分仿真模型与结果还可重用,减少了重复的建模工作。

(3)将问答驱动的仿真设计方法用于液压挖掘机工作装置的设计过程中,仿真分析工作装置的工作范围及典型工况下的运动性能,通过问答驱动求解出挖掘机工作装置的最优铰接点位置,为下一阶段的门径决策提供依据。工作装置动力性能的仿真分析也可参照该方法进行。

参考文献:

[1] 冯培恩,张帅,潘双夏,等. 复合功能产品概念设计循环求解过程及其实现[J]. 机械工程学报,2005,41(3):135-141.
Feng Peieng, Zhang Shuai, Pan Shuangxia, et al. Cycle Solving Process and Realization for Conceptual Design of Complex Function Product[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(3): 135-141.
[2] 张帅,冯培恩,潘双夏,等. 基于循环映射模型的概念设计自动化策略研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(3):491-497.
Zhang Shuai, Feng Peieng, Pan Shuangxia, et al. Study on Automatic Conceptual Design Strategy Based on Cyclic Mapping Model[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(3): 491-497.

- [3] 祖耀,肖人彬,刘勇. 具有迭代特征的复杂机械产品概念设计模型[J]. 机械工程学报,2006,42(12):197-205.
- Zhu Yao, Xiao Renbin, Liu Yong. New Iteration-based Conceptual Design Model of Complex Mechanical Products[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2006,42(12):197-205.
- [4] 李健,邓家祺. 产品原理结构设计模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2002,14(7):637-645.
- Li Jian, Deng Jiati. Product Principle Structure Design Model[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics,2002,14(7):637-645.
- [5] Deng Y M, Britton G A, Tor S B. Constraint-based Functional Design Verification for Conceptual Design[J]. Computer-Aided Design,2000,32(14):889-899.
- [6] Deng Y M, Tor S B, Britton G A. Abstracting and Exploring Functional Design Information for Conceptual Mechanical Product Design[J]. Engineering with Computers,2000,16(1):36-52.
- [7] Roy U, Pramanik N, Sudarsan R, et al. Function-to-form Mapping: Model, Representation and Applications in Design Synthesis[J]. Computer-Aided Design,2001,33(10):699-719.
- [8] Malmqvist J. Implementing Requirements Management- A Task for Specialized Software Tools or PDM Systems [J]. Systems Engineering, 2001, 4(1):49-57.
- [9] 罗伯特 G K. 新产品开发流程管理[M]. 刘崇献,刘延,译. 3 版. 北京:机械工业出版社,2010.
- [10] 林慕义,史青录. 单斗液压挖掘机构造与设计[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- Wen Guilin, Cui Zhong, Peng Keli. Structural Optimization for High Speed Grinder's Components Based on the Approximate Model[J]. China Mechanical Engineering,2009,20(8):906-910.
- [6] 胡朝辉,成艾国,王国春,等. 多学科优化设计在拼焊板车门轻量化中的应用[J]. 中国机械工程,2010,21(4):495-499.
- Hu Zhaohui, Cheng Aiguo, Wang Guochun, et al. Research on Application of Multidisciplinary Design Optimization to TWB Door Lightweight[J]. China Mechanical Engineering,2010,21(4):495-499.
- [7] Perdahcoglu D A, Geijselaers H J M, Ellenbroek M H M, et al. Dynamic Substructuring and Reanalysis Methods in a Surrogate-based Design Optimization Environment[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,2012,45:129-138.
- [8] Becerra R L, Coello C A C. A Cultural Algorithm with Differential Evolution to Solve Constrained Optimization Problems[C]//Proceedings of Advances in Artificial Intelligence-IBERAMIA 2004. Puebla, Mexico,2004:881-890.
- [9] Coello C A C, Becerra R L. Efficient Evolutionary Optimization through the Use of a Cultural Algorithm[J]. Engineering Optimization, 2004, 36(1):219-236.
- [10] 天津工程机械研究所. GB9141-88 液压挖掘机结构强度试验方法[S]. 北京:国家标准局,1988.
- [11] 张书俊,任钧国,田四朋. 固体火箭发动机粘弹性药柱结构可靠性分析[J]. 固体火箭技术,2006,29(3):183-189.
- Zhang Shujun, Ren Junguo, Tian Sipeng. Analysis on Structure Reliability of Solid Rocketmotor Viscoelastic Grains[J]. Journal of Solid Rocket Technology,2006,29(3):183-189.
- [12] Kazhdan M, Funkhouser T, Rusinkiewicz S. Rotation Invariant Spherical Harmonic Representation of 3D Shape Descriptors[C]//Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing. Geneve, Switzerland, 2003:156-164.
- [13] Kazhdan M, Funkhouser T, Rusinkiewicz S. Shape Matching and Anisotropy[J]. ACM Transactions on Graphics,2004,23(3):623-629.

(编辑 张 洋)

作者简介:余翊妮,女,1978年生。浙江工业大学机械工程学院讲师、博士。主要研究方向为工程车辆仿真优化设计。发表论文15篇。宁晓斌,男,1965年生。浙江工业大学机械工程学院副教授、博士。林 琼,女,1982年生。浙江工业大学机械工程学院讲师、博士。

(上接第1091页)

- [4] 于兰峰,王金诺. 基于遗传算法和神经网络的塔机结构动态优化设计[J]. 中国机械工程,2008,19(1):61-63.
- Yu Lanfeng, Wang Jinnuo. Dynamic Optimum Design of Tower Crane Based on Neural Networks and Genetic Algorithms[J]. China Mechanical Engineering,2008,19(1):61-63.
- [5] 文桂林,崔中,彭克立. 基于近似模型的高速磨床零部件结构优化设计研究[J]. 中国机械工程,2009,20(8):906-910.

作者简介:花海燕,女,1981年生。福州大学机械工程及自动化学院博士研究生。主要研究方向为智能优化设计方法、机械装备及其自动化。林述温(通讯作者),男,1962年生。福州大学机械工程及自动化学院教授、博士研究生导师。沈振辉,男,1985年生。福建江夏学院工程学院讲师。

(编辑 张 洋)