

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.06.009

基于 APDL 的大载重集装箱参数化建模与分析

王德浩, 李金华

(辽宁工业大学 机械工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 以某箱厂的大载重集装箱为研究对象, 运用有限元软件 ANSYS 的二次开发工具 (APDL), 实现了用命令流的方式建立大载重集装箱参数化模型。通过采用 APDL 智能化分析方法, 可以通过修改特征参数来建立不同形状、尺寸和属性的三维模型, 减少了设计人员的反复建模, 提高了工作效率。结合实验台, 检测在多种工况下大载重集装箱的位移和应力, 试验结果表明: 各种工况下的位移和应力均符合船检合格标准, 使其满足刚度要求, 缩短了设计周期。

关键词: APDL; 有限元分析; 命令流; 大载重集装箱; ANSYS

中图分类号: TH247

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)06-0051-06

Parametric Modeling and Analysis of Heavy-Duty Containers Based on APDL

WANG Dehao, LI Jinhua

(College of mechanical engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning 121001, China)

Abstract: With heavy-duty containers of a container factory as the research object, a parametric model of heavy-duty containers has thus been established by using the secondary development tool (APDL) of ANSYS of the finite element software ANSYS. By using APDL intelligent analysis method, three-dimensional models of different shapes, sizes and attributes can be established by modifying feature parameters, which reduces the repeated modeling of designers and improves work efficiency. Combined with the test bench, a measurement can be achieved of the displacement and stress of heavy-duty containers under various working conditions. The experimental results show that the displacements and stresses under various working conditions meet the qualified standards of ship inspection, up to the stiffness requirement which helps to shorten the design cycle.

Keywords: APDL; finite element analysis; command flow; heavy-duty container; ANSYS

0 引言

随着物流业的迅速发展, 集装箱因为具有高效率、高效益及高运输质量的特点, 导致人们对集装箱的需求日益增多。虽然目前市场上标准的 40 尺大载重集装箱的最大载质量为 32.5 t, 但是其载质量已很难满足部分客户要求载质量为 40~50 t 的需求, 为了

节省材料和提高集装箱的性能, 急需研发一种新型的集装箱产品以满足客户需求。因此, 本文以 ANSYS 软件的参数化设计语言 (ANSYS parametric design language, APDL) 建立 40 尺大载重集装箱的三维模型, 并对其进行实际试验。结果表明, 采用 APDL 对集装箱建模更为便利, 并以实际试验证明其可行性。

收稿日期: 2017-09-27

作者简介: 王德浩 (1992-), 男, 山东德州人, 辽宁工业大学硕士生, 主要研究方向为现代加工与虚拟制造技术, E-mail: 1260369311@qq.com

通信作者: 李金华 (1978-), 男, 辽宁锦州人, 辽宁工业大学副教授, 博士, 主要从事精密数控车床结构优化与减振隔振方面的研究, E-mail: 63052692@qq.com

ANSYS 是国外研发的一款有限元分析计算软件, 现已被广泛应用于各类工业产品设计和性能分析中, 其分析过程主要包括 3 部分: 1) 建立参数化分析模型; 2) 设置边界条件; 3) 求解计算和结果分析。APDL 是建立参数化模型的基础^[1], 参数化的思想就是用特征参数代替建模过程中的实际数值, 在本研究中, 将大载重集装箱的主要结构面的截面形状用特征参数来代替, 将模型厚度设为变量。利用 ANSYS 对大载重集装箱进行有限元模拟实验, 可在设计阶段检验集装箱的刚度是否满足需求^[2]。

传统的集装箱建模常采用三维软件建模, 然后转变成格式导入 ANSYS 中, 修改时需要进行“三维建模—有限元分析—修改模型—重复建模”的模式, 当遇到复杂建模时, 不仅耗时而且会不断出现干涉^[3]。由于命令流采用文本文件进行交换, 这种方式通用性较强, 而且可在不同版本的 ANSYS 之间通用, 因此非常适用于分析和计算。采用命令流方式建立精确的参数化模型, 在多种工况下对其进行静力学分析, 对大载重集装箱的优化设计具有十分重要的借鉴意义^[4]。鉴于此, 本文使用 APDL 命令流建模的方法, 只需要修改相应的参数即可修改整个模型, 省去了以往建模时繁琐的步骤, 大大减少了修改模型及分析所花费的时间, 提高了建模效率。

1 大载重集装箱参数化模型

课题组使用 APDL 命令流建模, 采用由底向上的建模方式。首先设定变量代替结构的参数, 然后确定关键点在坐标系中所处位置。在输入关键点时用变量代替实际关键点, 点连接成直线, 直线生成面, 面拉伸成为体, 直至建模完成。

1.1 确定模型参数

集装箱由许多零件组成, 主要包括底架结构、前后端组件、侧端、顶板组件, 采用 CO₂ 气体保护自动焊接而成。集装箱的八梁四柱由 120 mm × 100 mm × 12 192 mm 顶侧梁钢管 2 根, 45 mm × 120 mm × 12 192 mm 底侧梁槽钢 2 根, 4 根特定形状钢板折弯作为竖直支架焊接而成。

40HC 集装箱的外部尺寸基本参数为: 12 192 mm × 2 438 mm × 2 591 mm, 材质为 Q235, 弹性模量为 2.1×10^{11} Pa, 材料密度为 7 850 kg/m³, 泊松比为 0.3。集装箱规范单位为 mm, 其尺寸制作标准国际通用, 应满足国际化标准组织 ISO/TC—104 技术委员会的要求, 同时符合国际铁路联盟 (International union of rail ways, UIC) 的相关规定。对于大载重集装箱而言, 其最大总质量 R 是 36.4 t, 自身质量 T 为

6.4 t, 最大载质量 P 为 30 t。任何一家集装箱生产厂家都有自己的实验设备, 且在出厂前会对集装箱进行抽样检验, 根据箱型的不同制作试验大纲, 以此保证出厂前特种集装箱的安全性能。

1.2 模型简化

为了便于划分网格和分析计算, 根据大载重集装箱完全对称的结构特点, 对模型进行简化, 即仅建立模型的一半^[5]。在施加边界条件时, 在对称边界上施加轴对称约束。在实际中, 集装箱的侧板由波纹钢板组成, 为了节省计算量和方便划分网格, 采用平板方式进行计算。有限元模拟实验将结果误差范围控制在 5% 左右, 以保证最后结果的准确性。

大载重集装箱参数化模型采用命令流编程的方式, 保存为 txt 格式的文件, 在 ANSYS 界面的菜单路径 Utility Menu>file>Read Input from 导入文件, 即可实现模型的创建。大载重集装箱的有限元简化模型如图 1 所示。

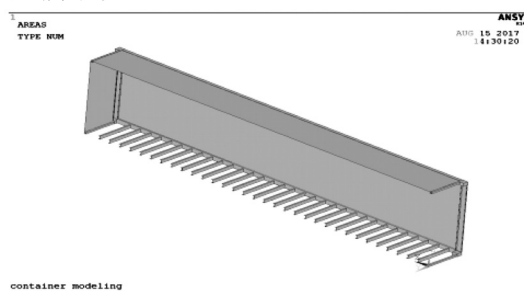


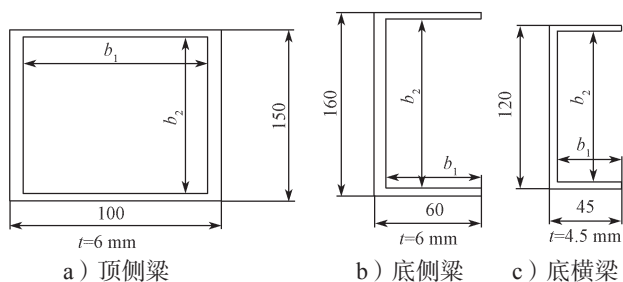
图 1 大载重集装箱有限元简化模型

Fig. 1 A simplified finite element model of heavy-duty containers

1.3 选择单元和截面

集装箱的单元类型主要有梁单元 Beam188^[1]、壳单元 Shell181 以及实体单元 Solid95。其中, Beam188 单元每个节点有 6 或 7 个自由度, Shell181 单元不但具有分析薄膜力学行为与板壳弯曲的功能, 且可以考虑板壳结构的剪切变形, 适用分析中等厚度的壳结构。因此, 本研究选用 Beam188 单元作为集装箱的矩形管顶侧梁, 对于侧板等薄板采用壳单元 Shell81, 其他角件、结构钢等均采用实体单元 Solid95。

为了保证计算结果的准确性, 建模过程中应该选择和实际生产中相同的截面形状, 结构的截面形状如图 2 所示。



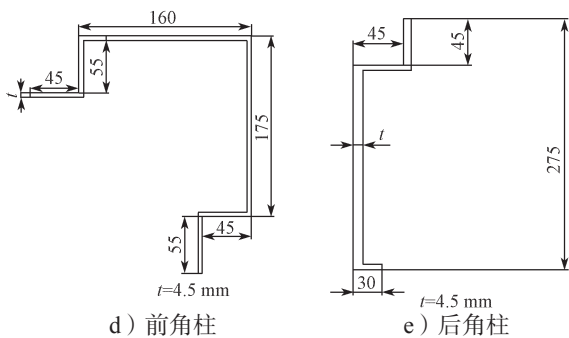


图 2 结构的截面形状

Fig. 2 Cross-section shape of the structure

1.4 接触设置

在建模中, 选择合适的接触方式对模拟分析结果的准确性极为重要, 在本文中, 角柱的上下面与角件的连接处设置成面接触方式、顶底侧梁与角件之间的连接处设置为面接触方式、底横梁与底侧梁之间设置为面接触方式^[6]。集装箱的钢结构实际是由钢板焊接而成, 对于实体之间以 bonded 绑定接触代替焊接的方式。而对于薄板和实体之间的接触采用面和线的方式连接, 接触单元采用 Target170, 目标单元采用 Conta175^[7]。

1.5 网格划分

网格的划分直接影响着模型进行有限元分析结果的准确性, 合理地模型进行网格划分不仅可以使计算方便、节省时间, 更能提高结果的准确性^[8]。集装箱主要是由板和梁结构组成, 板主要包括前端板、侧板以及顶板, 梁包括顶侧梁钢管、底横梁钢管以及底侧梁槽钢。课题组主要采用多重区域网格划分方法, 对梁和板单独进行网格细化, 一共划分为 267 954 个节点, 89 280 个元素。

2 大载重集装箱有限元分析

本次实验样品采用东方国际集装箱(锦州)有限公司生产的 40HC 集装箱。试验台及试验设备如图 3 所示。



a) 试验设备



b) 试验台

图 3 试验设备和试验台

Fig. 3 Experimental equipment and test benches

根据中国船级社《集装箱检验规范》对大载重集装箱的有限元计算指南中的规定, 对其主要进行 6 项基本试验, 分别是: 堆码、吊顶、吊底、拴固和横纵向刚性试验。进行这些试验的目的是准确地模拟在各种工况时集装箱所受到的应力和位移, 在 ANSYS 中把位移和应力作为输出, 可以清晰地显示模型位移和应力效果图。

2.1 堆码试验

2.1.1 堆码试验试验步骤

堆码试验的步骤如下: 液压缸通过顶角件对角柱施加垂直载荷, 持续时间为 5 min。集装箱往上堆积时, 依靠顶角件之间连接受力。集装箱的 4 个角柱承受集中载荷, 底架承受均布载荷。在约束自由度方面, 对底角件的 4 个底面实行固定全约束, 轴对称部分采用对称约束。

2.1.2 堆码试验理论计算

根据集装箱设计规定试验模拟施加如下载荷。

箱内均布载荷: $1.8R-T=504\ 347\ \text{N}$ 。

液压缸截面积: $615.44\ \text{cm}^2$ 。

试验载荷: $802\ 620\ \text{N}$ / 每根角柱。

所需压强: $802\ 620\ \text{N}/615.44\ \text{cm}^2=13.04\ \text{MPa}$ 。

2.1.3 堆码试验有限元分析

堆码工况下的结构应力云图如图 4 所示。

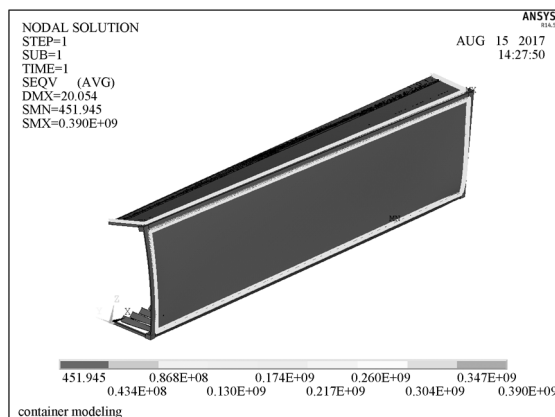


图 4 堆码工况下的结构应力云图

Fig. 4 Structural stress nephogram under stacking condition

分析图4所示结果可知:在堆码试验工况下,大载重集装箱的最大应力为390 MPa,最大位移为20.05 mm,最大应力和最大位移出现的位置均为底横梁。

2.2 吊顶试验

2.2.1 吊顶试验步骤

吊顶试验步骤如下:通过对顶角件垂直起吊,持续时间为5 min。集装箱有时候搬运时会对其进行起吊工作,该试验用来模拟起吊时受到的最大位移和应力,约束自由度方面为顶角件固定全约束,轴对称部分采用对称约束。

2.2.2 吊顶试验理论计算

吊顶试验理论计算中,设箱内均布载荷: $2R-T=17\ 628\text{ N}$ 。

2.2.3 吊顶试验有限元分析

吊顶工况下的结构应力云图如图5所示。

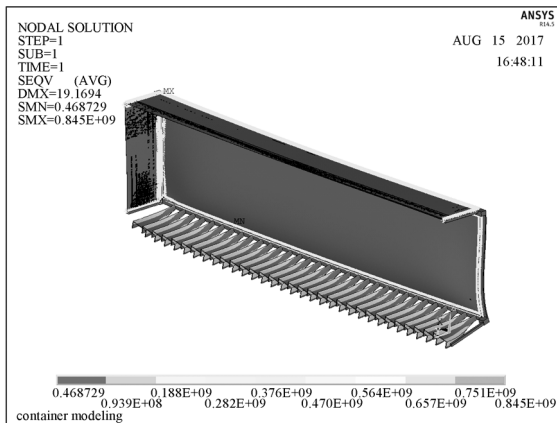


图5 吊顶工况下的结构应力云图

Fig. 5 Structural stress nephogram under loading condition

由图5所示的分析结果可知:在吊顶试验工况下,大载重集装箱的最大应力为845 MPa,最大位移为19.16 mm,最大应力和最大位移出现的位置均为底横梁。

2.3 吊底试验

2.3.1 吊底试验步骤

吊底试验步骤如下:对底角件和水平线成 30° 起吊,该试验用来模拟满载时整箱托起时承受的力,持续时间为5 min。试验中,约束自由度方面采用远程约束的方式,对底角件施加 45° 斜约束,轴对称部分采用对称约束。

2.3.2 吊底试验理论计算

吊底试验理论计算时,设箱内均布载荷: $2R-T=17\ 628\text{ N}$ 。

2.3.3 吊底试验有限元分析

吊底工况下的结构应力云图如图6所示。

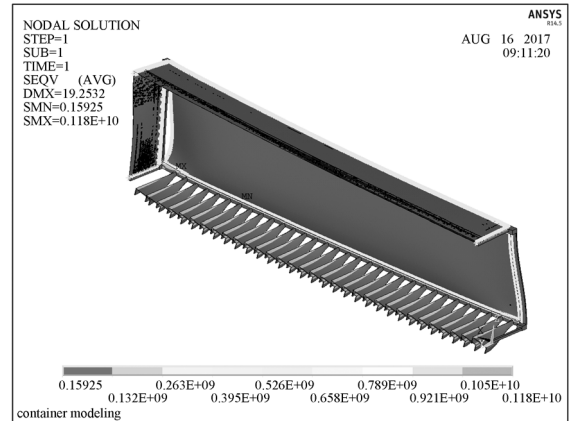


图6 吊底工况下的结构应力云图

Fig. 6 Structural stress nephogram under suspension bottom condition

由图6所示的分析结果可知:在吊底试验工况下,大载重集装箱的最大应力为1 180 MPa,最大位移为19.25 mm,最大应力和最大位移出现的位置均为前后角柱。

2.4 横向刚性试验

2.4.1 横向刚性试验步骤

横向刚性试验步骤如下:液压缸通过顶角件沿其前顶梁和门楣同时施加水平载荷,压载和拉载各一次,持续时间为5 min,用来模拟集装箱在受到横向推拉的稳定性。约束自由度方面为底角件的全约束,轴对称部分采用对称约束。

2.4.2 横向刚性试验理论计算

试验载荷:149 352 N/每侧。

压载下液压缸有效截面积:153.86 cm^2 。

拉载下液压缸有效截面积:115.395 cm^2 。

压载:149 352 N/153.86 $\text{cm}^2=9.71\text{ MPa}$ 。

拉载:149 352 N/115.395 $\text{cm}^2=12.94\text{ MPa}$ 。

2.4.3 横向刚性试验有限元分析

在横向刚性工况下的结构应力云图如图7所示。

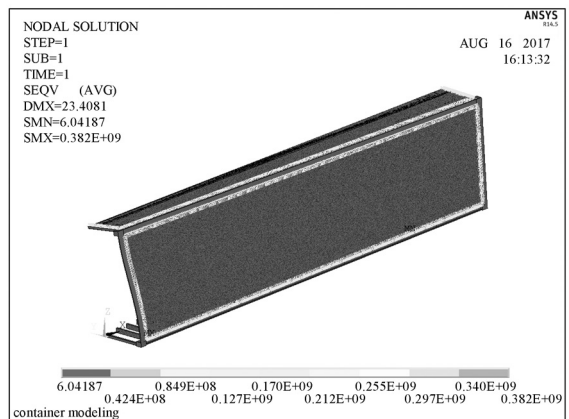


图7 横向刚性工况下的结构应力云图

Fig. 7 Structural stress nephogram under transverse rigid condition

由图 7 所示的分析结果可知：在横向刚性试验工况下，大载重集装箱的最大应力为 382 MPa，最大位移为 23.40 mm，最大应力和最大位移出现的位置均为前后角柱。

2.5 栓固试验

2.5.1 栓固试验步骤

栓固试验步骤如下：液压缸通过底角件向底侧梁先施加压力载荷，然后再施加拉力载荷，持续时间为 5 min。对两侧顶角件外面施加自由度方面的约束，轴对称部分采用对称约束。

2.5.2 栓固试验理论计算

箱内均布载荷： $R-T=29\ 400\text{ N}$ 。

试验载荷： $R/\text{每边}=356\ 720\text{ N}$ 。

压载下液压缸有效截面积： 314.00 cm^2 。

拉载下液压缸有效截面积： 227.45 cm^2 。

压载： $356\ 720\text{ N}/314\text{ cm}^2=11.36\text{ MPa}$ 。

拉载： $356\ 720\text{ N}/227.45\text{ cm}^2=15.68\text{ MPa}$ 。

2.5.3 栓固试验有限元分析

栓固工况下的结构应力云图如图 8 所示。

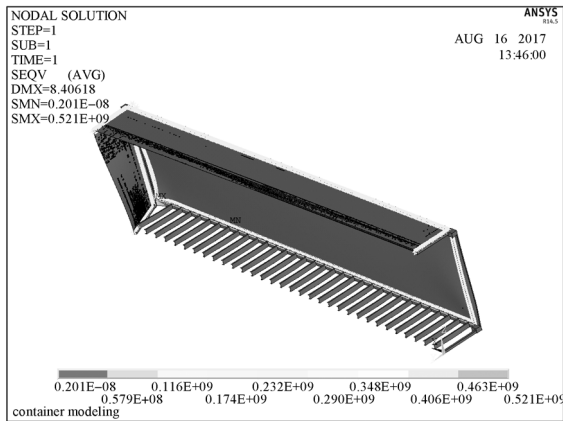


图 8 栓固工况下的结构应力云图

Fig. 8 Structural stress nephogram under bolting condition

由图 8 所示的分析结果可知：在栓固试验工况下，大载重集装箱的最大应力为 521 MPa，最大位移为 8.40 mm，最大应力和最大位移出现的位置均为门槛门楣。

2.6 纵向刚性试验

2.6.1 纵向刚性试验步骤

纵向刚性试验时，液压缸通过顶角件沿顶侧梁同时施加水平载荷，压载和拉载各一次，持续时间为 5 min。对两侧顶角件外面施加自由度方面的约束，轴对称部分采用对称约束。

2.6.2 纵向刚性试验理论计算

试验载荷： $74\ 676\text{ N}/\text{每侧}$ 。

压载下液压缸有效截面积： 153.86 cm^2 。

拉载下液压缸有效截面积： 115.395 cm^2 。

压载： $74\ 676\text{ N}/153.86\text{ cm}^2=4.85\text{ MPa}$ 。

拉载： $74\ 676\text{ N}/113.395\text{ cm}^2=7.69\text{ MPa}$ 。

2.6.3 纵向刚性试验有限元分析

在纵向刚性工况下的结构应力云图如图 9 所示。

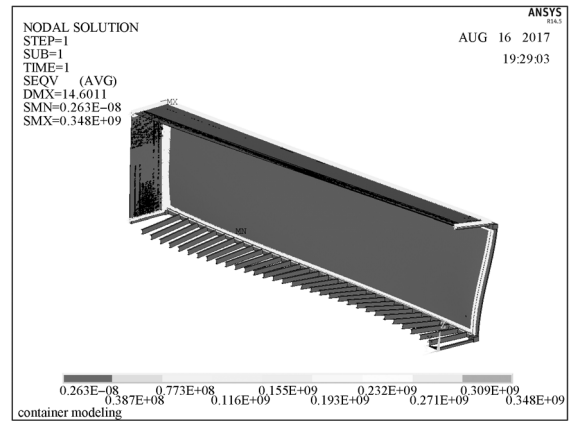


图 9 纵向刚性工况下的结构应力云图

Fig. 9 Structural stress nephogram under longitudinal rigid condition

由图 9 所示分析结果可知：在纵向刚性试验工况下，大载重集装箱的最大应力为 348 MPa，最大位移为 14.60 mm，最大应力和最大位移出现的位置均为底横梁。

2.7 有限元分析试验对比

课题组将从试验台收集来的测量数据和有限元软件模拟结果进行对比，结果如表 1 所示。

表 1 ANSYS 模拟结果和实测数据对比

Table 1 Comparison of ANSYS simulation results and measured data

试验	集装箱实测数据	有限元分析结果	相对误差 /
	最大位移 /mm	最大位移 /mm	%
堆码试验	19.0	20.05	5.0
吊底试验	22.4	19.25	14.0
吊顶试验	21.0	19.16	8.7
横向刚性试验	17.8	23.40	31.0
纵向栓固试验	8.8	8.40	4.5
纵向刚度试验	11.6	14.60	25.8

根据船检标准 ISO1496 可以得知，在堆码工况下，横向偏移在 25.4 mm 以内，纵向偏移在 38 mm 以内；在吊底工况下的位移在 38 mm 以内；在吊顶工况下，吊顶位移在 21 mm 以内；横向刚性的位移在 28 mm 以内、纵向刚性的位移在 24 mm 以内，栓固试验时的位移在 10 mm 以内，即为合格。本次试验采用有限元软件 ANSYS 进行模拟，得到的最大误差为 31%，且符合船检标准。由这一结果可知，本有限元模拟试验基本符合实际数据，说明该有限元模拟试验成功。

3 结论

1) 采用 APDL 语言编写命令流文件, 成功地建立了大载重集装箱参数化的三维模型, 具有良好的实用性, 为后续有限元分析提供了高效的建模方法^[9]。

2) 采用 APDL 参数化建模方法, 只需修改特征参数就可修改整个模型, 缩短了设计和制造周期。

3) 通过对大载重集装箱进行 APDL 参数化建模并用 ANSYS 模拟试验, 可知计算结果与实际试验相似, 说明用 APDL 建模的方法可行并具有时效性, 为以后企业的实际操作提供了借鉴意义^[10]。

在对比分析结果时发现与试验数据存在误差, 通过分析可知原因如下:

1) 在参数化建模时, 为了方便计算, 对模型进行了简化, 导致试验数据与实际模型有一定误差。

2) 在 ANSYS 网格划分、参数设置、选择单元过程中没有做到与实际完全相同。

通过分析可知, 要想获得更加精确的实验结果, 应进一步深化网格细化和设置更接近实际情况的边界条件, 并收集更加真实的试验数据做进一步的分析 and 计算。

参考文献:

- [1] 王其雷, 何 瑛, 何国旗, 等. 基于 ANSYS Workbench 的面齿轮传动固有特性分析 [J]. 湖南工业大学, 2016, 30(1): 1-5.
WANG Qilei, HE Ying, HE Guoqi, et al. Analysis on Natural Vibration Characteristics of Face-Gear Drive Based on ANSYS Workbench[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(1): 1-5.
- [2] 陈绍远. 起重机械金属结构的计算机优化设计 [J]. 株洲工学院学报, 1996, 10(2): 49-56.
CHEN Shaoyuan. The Most Choiceable Design for Metal Structure of Lifting Machinery[J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 1996, 10(2): 49-56.
- [3] 何长江. 基于 ANSYS 的干货集装箱力学性能分析及优化设计 [D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
HE Changjiang. Analysis and Optimization Design of Dry Cargo Container Mechanics Based on ANSYS[D].

Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010.

- [4] 周德高, 卫家骏, 杨小军. 基于 ANSYS-PDS 模块的集装箱结构可靠性分析 [J]. 物流科技, 2014, 37(3): 67-88.
ZHOU Degao, WEI Jiajun, YANG Xiaojun. Reliability Analysis of Container Structure Based on ANSYS-PDS[J]. Logistics Technology, 2014, 37(3): 67-88.
- [5] 陶珍军, 林德浩, 刘 旺, 等. 集装箱刚度试验的有限元模拟 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 1994, 22(5): 45-56.
TAO Zhenjun, LIN Dehao, LIU Wang, et al. Finite Element Simulations of Cargo Container Rigidity Tests[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 1994, 22(5): 45-56.
- [6] 宿艳彩. 基于 ANSYS 软件的桥架结构参数化有限元分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
SU Yancai. The Analysis of the Finite Element Analysis of Bridge Frame Structure Based on ANSYS Software[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [7] 刘 峻, 高建和. 基于 ANSYS 的集装箱底架槽钢优化设计 [J]. 机械工程及自动化, 2013(1): 67-68.
LIU Jun, GAO Jianhe. Optimization Design of Container Base Channel Based on ANSYS[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2013(1): 67-68.
- [8] 范利格. 门式起重机金属结构分析及优化设计 [D]. 郑州: 郑州大学, 2009.
FAN Lige. Analysis and Optimization Design of Metal Structure of Gate Crane[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2009.
- [9] 赵长勇, 张系斌, 翟晓鹏. 基于 ANSYS 参数化语言 APDL 的结构优化设计 [J]. 山西建筑, 2008, 15(3): 1-2.
ZHAO Changyong, ZHANG Xibin, ZHAI Xiaopeng. The Structure Optimizing Design of APDL Based on ANSYS Parameter Language[J]. Shanxi Architecture, 2008, 15(3): 1-2.
- [10] 易 日. 使用 ANSYS 6.1 进行结构力学分析 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2002: 350-380.
YI Ri. Structural Mechanics Analysis Using ANSYS 6.1[M]. Beijing: Peking University Press, 2002: 350-380.

(责任编辑: 申 剑)