



引用格式:鲁宜文,王东方,郭丽娜.基于近似模型的动车组塞拉门携门架轻量化设计[J].轻工学报,2017,32(5):81-87.

中图分类号:U463.32 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.5.011

文章编号:2096-1553(2017)05-0081-07

基于近似模型的 动车组塞拉门携门架轻量化设计

Lightweight design of door-leaf carrier of EMU sliding plug door based on approximate model

关键词:

动车组;塞拉门系统;
携门架;近似模型;轻
量化设计;组合优化
算法

Key words:

EMU (electric multiple
units); sliding plug
door system; door-leaf
carrier;
approximate model;
lightweight design;
hybrid optimization
algorithm

鲁宜文¹,王东方¹,郭丽娜²

LU Yi-wen, WANG Dong-fang, GUO Li-na

1. 南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211800;

2. 南京康尼机电股份有限公司, 江苏 南京 210038

1. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China;

2. Nanjing Kangni Mechanical and Electrical Co., Ltd., Nanjing 210038, China

摘要:针对动车组塞拉门携门架轻量化设计问题,在有限元分析和参数化携门架的基础上构建基于径向基函数的携门架近似模型,利用多岛遗传算法(MIGA)的全局性和序列二次规划算法(NLPQL)的高效性对近似模型进行组合优化.强度校检结果表明,优化后携门架总质量为11.356 kg,比原结构减轻了10.6%,在3种加载工况下最大应力93 MPa,可满足结构强度的要求.这表明该轻量化设计是合适的.

收稿日期:2017-03-09

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20130941)

作者简介:鲁宜文(1991—),男,山东省枣庄市人,南京工业大学硕士研究生,主要研究方向为机械系统集成设计.

通信作者:王东方(1961—),男,江苏省南京市人,南京工业大学教授,主要研究方向为机械CAD/CAE技术及机械系统集成设计技术.

Abstract: Aiming at the problem of lightweight design of door-leaf carrier of EMU sliding plug door, based on the finite element analysis and parametric articles of door-leaf carrier, the radial basis function was used for an approximate model based on the radical basis function was constructed. Then by combining the global superiority of multi-island genetic algorithm and the high efficiency of NIPQL approximate model was optimized. The strength check results showed that the total weight of the door-leaf carrier was 11.356 kg, decreased by 10.6%, the maximum stress under three working condition was 93 MPa, which satisfied stress requirement. This lightweight design was suitable.

0 引言

与传统城市轨道交通车门不同,动车组列车塞拉门系统是一种应用于速度 ≥ 200 km/h列车的高端产品,需要在解决门系统高安全性、高强度和大跨度带来的承载、驱动、锁闭、门扇结构及其控制等方面特殊技术难题的同时,满足轻量化设计要求。

携门架是塞拉门关键零部件之一,在门系统运动过程中,携门架主要起连接和承载整个门扇的作用。随着塞拉门系统的发展,各种先进技术在零部件的设计过程中得以广泛运用。

在动车组塞拉门携门架的设计阶段,由于未知设计目标与设计变量之间的梯度信息,在设计空间搜索与寻优过程中,如果将数值模拟分析与传统的优化方法相结合,将会产生大量迭代数据,用于对设计空间的搜索,效率极低。

基于近似模型的优化是在构建约束的模型后,用其代替原始模型,然后在此基础上进行优化求解^[1]。这种高效的优化方法已经在航空航天工程、车辆工程等工程领域得到广泛的认可和使用^[2]。杨济匡等^[3]利用径向基函数(RBF)构建了副车架的近似模型,对副车架进行耐撞性多目标优化寻优求解,优化设计后的副车架侧边纵梁能在提高耐撞性能的同时,保持较好的轻量化水平。赵志国等^[4]建立了轮边减速器的优化数学模型,用多岛遗传算法(MIGA)作为优化策略,有效地降低了轮边减速器的外形尺寸。段焰辉等^[5]针对传统型函数方法在翼型后缘表达不足的缺陷进行改进,利用全局优化

算法改进翼型近似模型后缘,提高了型函数对翼型的表达精度。

上述各文献在对目标进行优化设计时,仅考虑全局优化算法或梯度算法,不够全面。本文拟将二者相结合,将基于径向基函数的近似模型引入携门架的优化设计中,利用多岛遗传算法(MIGA)和序列二次规划算法(NLPQL)对近似模型进行组合优化,以期携门架轻量化设计提供一种新的思路。

1 携门架轻量化设计方案

1.1 组合优化策略

优化方法可以分成全局最优化方法和梯度最优化方法两种,全局最优化方法在全局搜索过程中,收敛速度慢,耗时长,但能以较大的概率得到全局最优解^[6]。梯度最优化方法在局部寻优过程中,收敛速度快,优化效果较好,但若存在多个最优解,容易陷入局部最优解^[7]而失去全局最优解。为快速获得高精度的全局最优解,可将全局优化与梯度优化方法相结合。本文选用 ISIGHT 集成参数优化软件中的多岛遗传算法(MIGA)和序列二次优化算法(NLPQL)对动车组塞拉门携门架进行优化设计。

1.2 优化设计流程

图1所示为携门架优化设计流程图。首先借助多学科优化软件 ISIGHT 集成有限元分析 ANSYS;然后根据实验矩阵对携门架建立径向基函数近似模型,借助 ISIGHT 软件已集成的 MIGA 和 NLPQL 算法修改设计变量,ANSYS 可直接与 ISIGHT 中创建的设计变量建立连接和

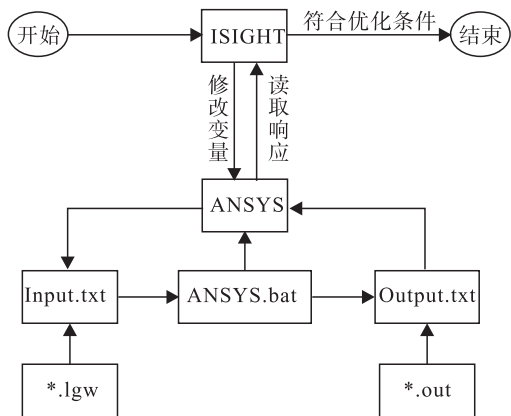


图1 优化设计流程图

Fig.1 Flowchart of optimization process

传递信息,返回分析的输入文件,进行下一步运算;最后将符合优化条件的结果输出^[8].

2 携门架近似模型的构建

2.1 携门架有限元分析

2.1.1 携门架有限元模型 在 ANSYS 软件中,采用 Solid186 单元和 Solid187 单元离散携门架,根据模块化开发要求,携门架原为焊接件,现改为铸钢件。

仅考虑关门状态下主锁保持约束,其他锁失效,此时门系统的垂向(Y向)自由,故对主锁和斜楔约束横向(X向)和纵向(Z向)自由度,携门架上导向轮沿上导轨面 35°法向约束,滑筒施加垂向约束. 根据国家客车车体及其部件的承载标准要求,考虑重力情况,分别进行纵向 5g,垂向 3g,横向 1g 冲击,其中 g 为重力加速度。

其材料参数如下:弹性模量 2.0×10^5 MPa,密度 7800 kg/m^3 ,泊松比 0.3,抗拉强度 500 MPa,屈服强度 270 MPa。

2.1.2 携门架强度分析 根据国家客车车体及其部件承载标准对携门架受力加载,不仅可以分析塞拉门携门架的机械性能,而且可为后续轻量化方向提供参考. 通过有限元软件 ANSYS 的计算分析,3 种加载条件下的携门架应力云图

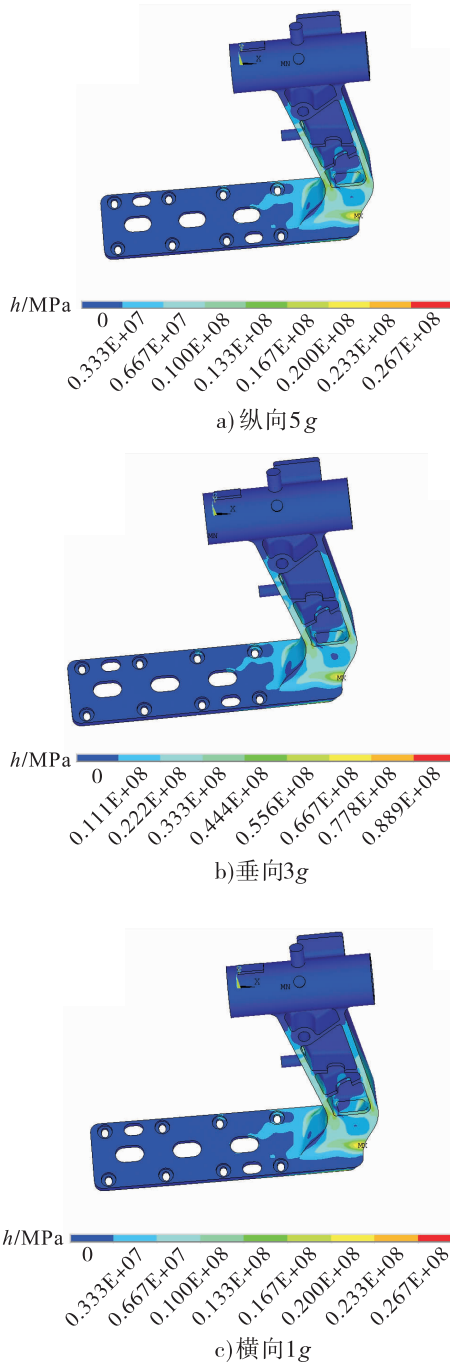


图2 3种加载条件下的应力云图

Fig.2 Stress contour under three working conditions

如图2所示. 由图2可知,3种承载条件的最大应力分别为: $h_{\text{portrait}}(x) = 27 \text{ MPa}$, $h_{\text{vertical}}(x) = 78 \text{ MPa}$, $h_{\text{crosswise}}(x) = 23 \text{ MPa}$,都远远小于材料的屈服强度 270 MPa。

2.2 携门架参数化模型建立

在优化设计过程中,利用 ISIGHT 软件建立

携门架参数化模型,选取7个厚度尺寸 T_1-T_7 , 2个长度尺寸 L_1 和 L_2 作为变量,如图3所示。尺寸设计变量上下限设为原始尺寸的 $\pm 20\%$ 。利用 ISIGHT 可将设计变量与有限元处理软件 ANSYS 连接并进行数据传输,ISIGHT 会根据已选择的试验设计矩阵调用 ANSYS 进行求解计算。

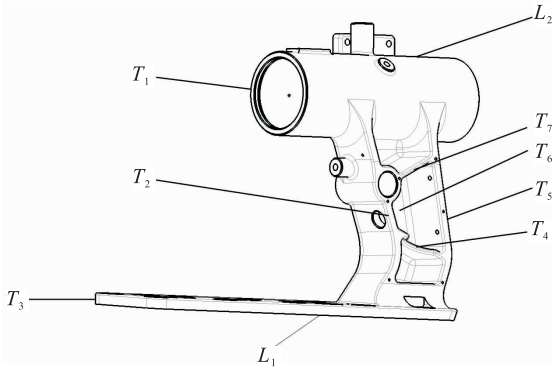


图3 携门架参数化模型

Fig. 3 The parametric model of door-leaf carrier

2.3 携门架近似模型构建

2.3.1 携门架近似模型 构建近似模型前,通常需要利用试验设计方法选择一组有代表性的样本点^[2]。常用的试验设计方法有全因子设计、部分因子设计、中心复合设计、Box-Behnken 设计、拉丁超立方和最优拉丁超立方(Opt LHD)等^[8]。每种试验设计方法的优缺点不同,需要根据实际问题灵活选择。本文采用9因子2水平 Opt LHD 方法进行采样分析^[2]。

针对2因子 m 水平的试验次数

$$n = \frac{(2+m)(1+m)}{2} \quad (1)$$

携门架共9个设计变量,由式①可知最少需要55次试验设计。

径向基函数不仅结构简单,无需数学假设,而且能够较好地处理高阶非线性问题^[3],其模型的基本形式如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n_s} \lambda_i \varphi(r^i) = \boldsymbol{\lambda}^T \boldsymbol{\varphi}(\tilde{x}_i - x_i)$$

式中, n_s 为样本点数, $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_{n_s})^T$ 为权系数向量, $\varphi(r^i)$ 为径向函数, r^i 为预测点。

通过 Opt LHD 试验设计,获得设计变量和响应值(质量、3种加载条件下的最大应力)的55组样本点后,运用径向基函数构建近似模型。本文选取的径向基函数 $\varphi(r)$ 为逆二次项函数,携门架近似模型数学表达式为

$$\varphi(r, c) = (r^2 + c^2)^{-\frac{1}{2}}$$

式中,正实数 $c = 1 \times 10^{-5}$ 。

2.3.2 携门架近似模型校检 在进行近似模型优化前,精度校验是必不可少的阶段,它能够评估近似模型的正确性,判断近似模型是否可以取代原始物理模型。通常用拟合优度(R^2)、相对平均绝对误差(RAAE)和相对绝对误差(RMAE)进行精度校验。其中 $0 < R^2 < 1$,若 $R^2 > 0.9$,则近似模型拟合程度较好,可替代原物理模型;RAAE为局部考察指标,其数值越大代表局部越不稳定^[7]。 R^2 ,RMAE和RAAE的计算公式分别为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{n_j} (f_j - \tilde{f}_j)^2}{\sum_{j=1}^{n_j} (f_j - \bar{f}_j)^2}$$

$$RMAE = \frac{\max(|f_1 - \tilde{f}_1|, |f_2 - \tilde{f}_2|, \dots, |f_{n_j} - \tilde{f}_{n_j}|)}{\sqrt{\frac{1}{n_j - 1} \sum_{j=1}^{n_j} (f_j - \tilde{f}_j)^2}}$$

$$RAAE = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} |f_j - \tilde{f}_j|}{n_j \times \sqrt{\frac{1}{n_j - 1} \sum_{j=1}^{n_j} (f_j - \tilde{f}_j)^2}}$$

式中, f_j 为检测点数值, \tilde{f}_j 为近似模型检测点的近似值, \bar{f}_j 为检测点的平均值, n_j 为检测点的个数。

图4分别为质量、最大应力近似模型的误差分析图;表1为近似模型 RAAE, RMAE 和 R^2 的精度检验结果。由表1可知,误差分析指标均

符合精度要求,使用该近似模型能够代替原物理模型进行后续优化设计.

3 基于近似模型的携门架轻量化设计

3.1 携门架近似模型优化问题描述

在塞拉门携门架近似模型优化过程中,以携门架的结构强度和尺寸变量的上下限为约束条件,寻求质量最小的目标函数,进行优化设

计.携门架的优化问题可描述为

目标函数为

$$\min(m)$$

约束条件为

$$h_i = c_{i1} - x_i \leq 0 \quad i = 1, 2 \dots, 9$$

$$h_i = x_i - c_{i2} \leq 0 \quad i = 1, 2 \dots, 9$$

$$\sigma - [\sigma] \leq 0$$

式中, m 为质量, x_i 为变量值, c_{i1} 和 c_{i2} 分别对应设计变量的上、下限, σ 为携门架的最大等效应力值, $[\sigma]$ 为携门架的许用应力值.

3.2 应用组合优化策略求解近似模型

本文首先利用 MIGA 算法^[9]进行全局搜索,再利用 NLPQL 算法进行局部寻优.图 5 和图 6 分别为采用 MIGA 与 NLPQL 算法时携门架的质量优化历程.

由图 5 可知,运用 MIGA 算法经过 40 次迭代,获得携门架质量最优解为 12.056 kg,并以此最优解作为初始值,利用 NLPQL 算法进行局部寻优.

由图 6 可知,运用 NLPQL 算法经过 40 次迭代优化,获得携门架质量最优解为 11.356 kg.

根据机械产品设计原则和机械设计手册可知,将优化设计结果取舍,精简尺寸选为可加工的尺寸,通过多次迭代最终优化结果如表 2 所示,优化后动车组塞拉门携门架总质量由 12.705 kg

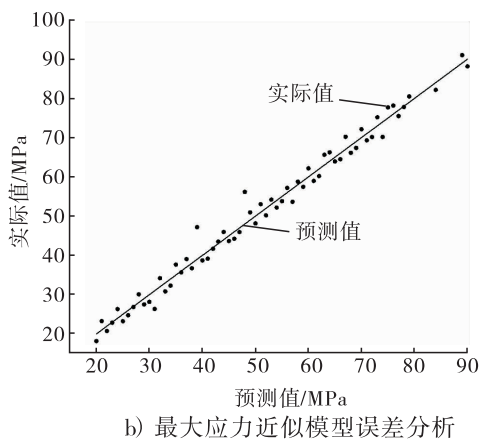
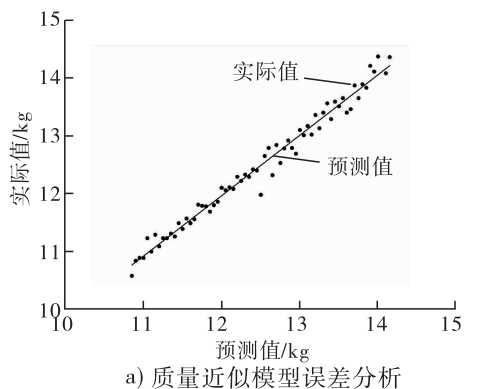


图 4 近似模型误差分析

Fig. 4 Error analysis of surrogate model

表 1 近似模型 RAAE, RMAE 和 R² 的精度检验结果

Table 1 Accuracy test results of RAAE, RMAE and R² of surrogate model

响应	RAAE	RMAE	R ²
接受水平	≤30	≤20	≥90
质量	8.62	4.05	97.90
最大应力	17.38	5.35	95.13

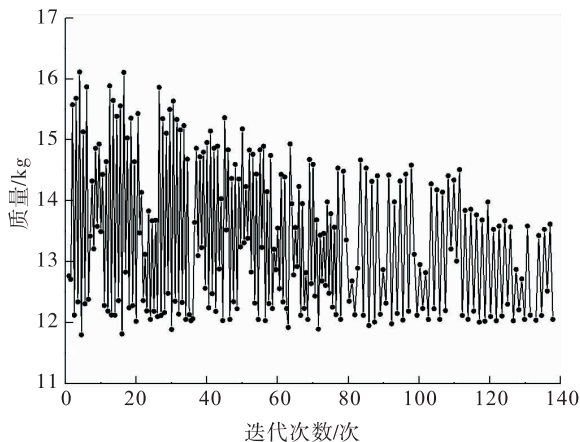


图 5 MIGA 质量优化历程

Fig. 5 Mass optimization process based on MIGA

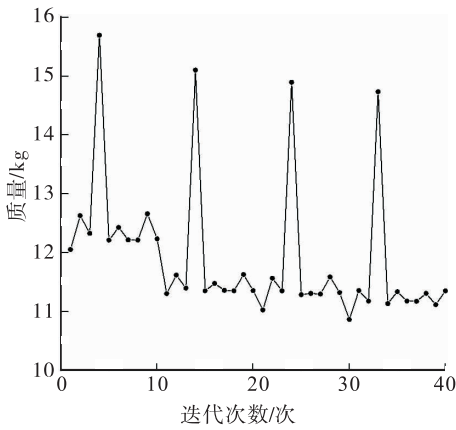


图6 NLPQL 质量优化历程

Fig. 6 Mass optimization process based on NLPQL

表2 轻量化设计结果

Table 2 Result of lightweight design mm

设计变量	初始值	计算值	圆整值
T_1	16	14.24	14
T_2	14	11.28	11
T_3	13	11.86	12
T_4	5	6.32	6
T_5	14	11.13	11
T_6	14	11.30	11
T_7	5	6.07	6
L_1	450	420.40	420
L_2	260	250.50	250
总质量/kg	12.705	—	11.356

减为 11.356 kg,从而实现了轻量化的目标.

3.3 优化后携门架强度校验

经过轻量化设计后,按边界条件对携门架结构重新进行强度校核,结果如图7所示.由图7可知,3种加载条件最大应力值分别为 $h_{\text{portrait}}(x) = 36 \text{ MPa}$, $h_{\text{vertical}}(x) = 93 \text{ MPa}$, $h_{\text{crosswise}}(x) = 31 \text{ MPa}$,均小于材料屈服极限 270 MPa.在轻量化设计过程中,由于携门架厚度和长度变量尺寸的减小,在3种同样加载条件下,携门架承受的最大应力均增加,但仍小于材料屈服极限,证明携门架轻量化设计是合适的.

4 结论

本文基于近似模型对动车组塞拉门携门架

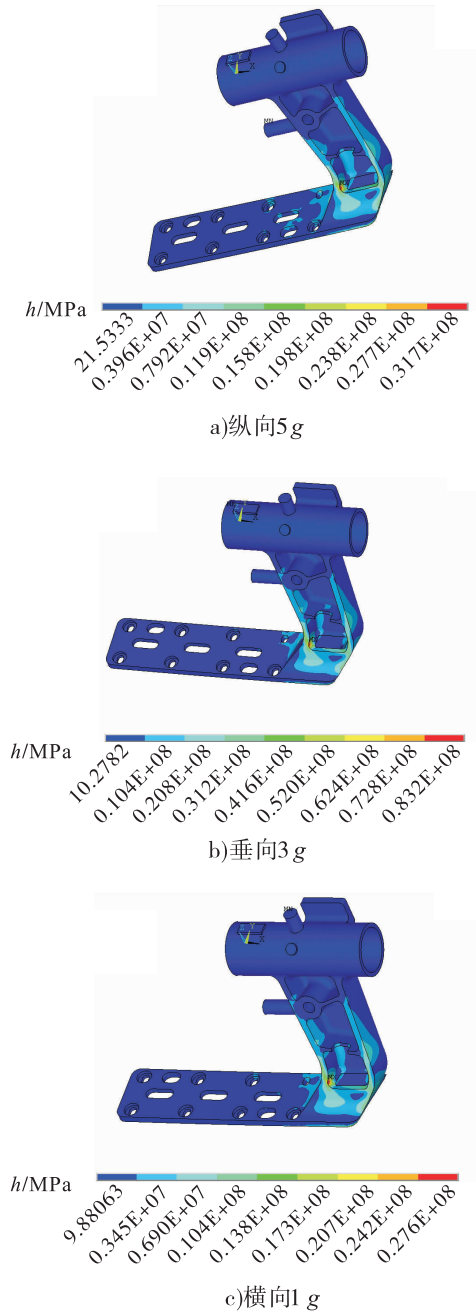


图7 优化后3种承载条件下的应力图

Fig. 7 Optimized stress contour under three working conditions

轻量化设计问题进行研究,在有限元分析和参数化携门架的基础上,利用径向基函数构建近似模型,通过精度校证明其可代替原物理模型进行优化设计.

在模型求解过程中,先利用 MIGA 算法进行全局寻优,再利用 NLPQL 算法进行局部寻

优,对近似模型的组合优化有效提高了优化收敛速度.

优化后的携门架总质量为 11.356 kg,比原结构质量(12.705 kg)减少了 10.6%.在携门架厚度和长度尺寸均减小的情况下,3种加载工况下最大应力为 93 MPa,小于材料屈服极限 270 MPa,可满足结构强度的要求.这表明该设计是合适的,为携门架轻量化设计提供了一种简单快捷的方法.

参考文献:

- [1] GIUNTA A A. Aircraft multidisciplinary design optimization using design of experiments theory and response surface modeling methods [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute, 1997.
- [2] 彭磊,刘莉,龙腾. 基于动态径向基函数代理模型的优化策略[J]. 机械工程学报, 2011, 47(7): 407.
- [3] 杨济匡,华长星,肖志. 副车架侧边纵梁耐撞性优化设计[J]. 中国机械工程, 2015, 26(1): 124.
- [4] 赵志国,司传胜. 基于多岛遗传算法的铰接车轮边减速器优化设计[J]. 机械设计与制造, 2010, 12(12): 213.
- [5] 段焰辉,蔡晋生,刘秋宏. 基于代理模型方法的翼型优化设计[J]. 航空学报, 2011, 25(4): 617.
- [6] 王晓鹏. 遗传算法及其在气动优化设计中的应用研究[D]. 西安:西北工业大学, 2000.
- [7] GILL P E, WONG E. Sequential quadratic programming methods [J]. The IMA Volumes in Mathematics and its Applications, 2012, 154: 147.
- [8] 王卫,王东方,缪小冬. 基于代理模型的副车架多目标优化设计[J]. 南京工业大学学报, 2016, 38(4): 130.
- [9] 丁庆新,崔璨,丁祎. 集成软件平台下的挖掘机动臂优化设计[J]. 矿山机械, 2014, 42(1): 25.