

履带起重机臂架结构可靠性分析

李金平^{1,2}, 焦生杰^{1,2}, 彭继文³, 徐信芯^{1,2}, 张 军^{1,2}, 顾海荣^{1,2}

(1. 长安大学 公路养护装备国家工程实验室, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 3. 浙江三一装备有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘 要:为了预测履带起重机臂架结构的可靠度,将履带起重机臂架的几何尺寸、材料特性参数和作用载荷视为随机变量,建立了以臂架强度、刚度、整体稳定性和压弯杆件稳定性为失效模式的可靠性分析模型,利用响应面法将各隐式功能函数转化为显式表达式,再结合验算点法求得各功能函数的可靠性指标。对现有某型号履带起重机臂架主臂工况进行了可靠性分析。研究结果表明:臂架可靠度随载荷增大而减小,呈非线性变化趋势;相对而言,短臂工况时压弯杆件的稳定性和臂架强度的可靠度较低,臂架倾向于发生压弯杆件失稳和臂架强度失效;长臂工况时臂架整体稳定性的可靠度较低,易发生整体屈曲失效。该研究为臂架的安全程度度量提供了一种基于可靠度的概率评价方法,也为其他大型复杂工程机械产品的可靠性分析与设计提供参考。

关键词:机械工程;履带起重机;响应面法;臂架;可靠性分析;失效模式

中图分类号:TU311.2

文献标志码:A

Structural reliability analysis of crawler crane's boom

LI Jin-ping^{1,2}, JIAO Sheng-jie^{1,2}, PENG Ji-wen³, XU Xin-xin^{1,2}, ZHANG Jun^{1,2}, GU Hai-rong^{1,2}

(1. National Engineering Laboratory for Highway Maintenance Equipment, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Zhejiang Sanyi Equipment Co. Ltd., Huzhou 313000, Zhejiang, China)

Abstract: In order to predict the reliability of crawler crane's boom, the geometrical dimensions, material properties and applied loads of crawler crane's boom system were regarded as random variables. The reliability analysis models of strength, stiffness, global stability and compressive-bending members' stability were established. Explicit expression of implicit performance function was obtained by using response surface method (RSM), and then the reliability index was solved by design point method. The reliability of a certain existing crawler crane's main boom was calculated. The results show that the reliability of crawler crane's boom reduces as the applied load increases, and takes on nonlinear tendency. Comparatively speaking, for the short boom case, the reliability of compressive-bending members' stability and strength are lower, and the boom is prone to occur compressive-bending member's buckling and strength failure. For the long boom case, the reliability of global stability is lower, and the boom is prone to occur buckling

收稿日期:2015-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51408046);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310825151042, CHD2009JC152, 2013G3254015, 2013G1251030)

作者简介:李金平(1981-),男,重庆巫山人,讲师,工学博士,E-mail:lijp@chd.edu.cn。

failure. The research provides a probabilistic assessment method for safety assessment of lattice boom, and a reference for reliability analysis and design of other large complicated engineering machinery manufactures. 4 tabs, 5 figs, 20 refs.

Key words: mechanical engineering; crawler crane; response surface method (RSM); boom; reliability analysis; failure model

0 引言

履带起重机作为特种起重设备,具有起吊重量大、带载行走、接地比压小等优点,在核电建设、桥梁施工、风电吊装以及石油化工等行业中被广泛使用。而臂架是履带起重机的主要作业部件之一,承担着起吊重物的重任,其强度、刚度以及稳定性与整机起升性能和可靠性密切相关。因此,臂架的设计与分析受到研发者的高度重视。

目前,臂架研究主要集中在 CAE 建模、强度、刚度、动力分析、整体稳定性以及传统优化设计等方面^[1-11],这些分析模型均是确定性的,忽略了不确定性因素的影响。实际上,履带起重机臂架结构在设计、加工制造和使用中存在许多影响结构性能的不确定性因素,如材料特性参数、杆件几何尺寸以及作用载荷等均具有或大或小的随机性。因此,臂架设计分析时不应完全忽略这些不确定性因素的影响,应从概率统计观点出发利用结构可靠性理论进行可靠性研究。周海浪等利用随机有限元法分析了架桥机主臂的强度可靠性^[12];里超等利用 Monte Carlo 模拟法对卸船机臂架各主要构件的强度、刚度和稳定性的可靠性进行了研究^[13];赵鑫等则将故障树法与 Monte Carlo 法相结合对桥式起重机主梁的可靠性进行了研究^[14];李金平等利用响应面法对履带起重机臂架压弯杆件稳定性的可靠性进行了分析^[15]。可见,针对履带起重机臂架结构可靠性的研究文献不多见,展开这方面的研究势在必行。为此,本文考虑履带起重机臂架杆件几何尺寸、材料特性参数以及作用载荷的随机性,利用响应面法建立履带起重机臂架结构的强度、刚度、稳定性以及压弯杆件稳定性的可靠性分析模型,借助 APDL(ansys parametric design language)实现臂架参数化建模和臂架可靠性分析的响应面法程序,为臂架的安全程度度量提供一种基于可靠度的评价方法。

1 履带起重机臂架结构可靠性分析

1.1 履带起重机臂架的功能函数

从履带起重机臂架的强度、刚度、整体稳定性以

及单根压弯杆件的稳定性方面考虑臂架结构的失效模式,只要其中 1 个因素超过规定值,就认为结构失效。虽然履带起重机臂架是超静定结构,但考虑到其为特种作业设备,必须保证高可靠性,故可认为任一杆件(特别是主弦杆)失效则臂架失效。臂架杆件失效可分为拉弯强度失效和压弯失稳两大类。其中,杆件拉弯强度失效可归为强度问题,而压弯杆件由于稳定性不足会发生失稳。因此,臂架的功能函数 $g_k(\mathbf{X})$ 有

(1)强度功能函数

$$g_1(\mathbf{X})=\sigma_s-\sigma_{\max} \tag{1}$$

(2)刚度功能函数

$$g_2(\mathbf{X})=0.02H_L-U_x \tag{2}$$

(3)整体稳定性功能函数

$$g_3(\mathbf{X})=F_{cr}-F \tag{3}$$

(4)压弯杆件功能函数

$$g_4(\mathbf{X})=\sigma_s-\frac{N}{A\varphi\phi}+\frac{1}{1-N/N_{Er}}\frac{C_0M}{W} \tag{4}$$

式中: $g_k(\mathbf{X})$ 为臂架第 $k(k=1,2,3,4)$ 个功能函数, $\mathbf{X}=(x_1,x_2,\dots,x_n)^T$ 为基本随机变量向量,主要由结构载荷、材料物理特性参数和结构几何尺寸等参数组成; σ_s 为材料的屈服极限; σ_{\max} 为某一材料杆件的最大 Von-mises 应力; U_x 为臂架的最大侧向位移; H_L 为臂架长度; F_{cr} 为臂架第 1 阶线性屈曲临界载荷; F 为实际作用载荷; N 为杆件轴向压力; A 为杆件横截面积; φ,ϕ 分别为轴压稳定系数和稳定系数的修正系数; $N_{Er}=\frac{\pi^2EA}{\lambda^2}$ 为欧拉临界力, λ 为杆件长细比, E 为材料弹性模量; M,W 分别为弯矩和抗弯模量; C_0 为杆件端部弯矩不等的折减系数。

稳定系数 φ 的计算式为

$$\varphi=\begin{cases} 1-a_1\lambda_n^2 & \lambda_n\leqslant 0.215 \\ \frac{a_2+a_3\lambda_n+\lambda_n^2-\sqrt{(a_2+a_3\lambda_n+\lambda_n^2)^2-4\lambda_n^2}}{2\lambda_n^2} & \lambda_n>0.215 \end{cases} \tag{5}$$

式中: $\lambda_n=\frac{\lambda}{\pi}\sqrt{\frac{\sigma_s}{E}}$ 为正则长细比;系数 a_1,a_2,a_3 由杆件截面类型确定^[16]。

当功能函数 $g_k(\mathbf{X}) > 0$ 时,表明结构满足该功能要求,处于可靠状态,其可靠度为随机事件 $g_k(\mathbf{X}) > 0$ 的概率 P_{rk} ,即

$$P_{rk} = P(g_k(\mathbf{X}) > 0) \quad (6)$$

由式(1)~式(4)可知,各功能函数与基本随机变量之间为隐式函数表达式,臂架结构的各响应值只能借助结构有限元分析软件获得,在这种情况下,响应面法被广泛推荐求解此类问题的可靠性。

1.2 基于响应面法的臂架可靠性分析

响应面法的思想是^[17-19]:利用响应面函数来构造隐式功能函数的近似显式表达式。

对 n 个随机变量 $x_i (i=1, \dots, n)$ 情况,响应面一般取不含交叉项的二次多项式形式 $\hat{g}_k(\mathbf{X})$ 来近似真实的隐式功能函数 $g_k(\mathbf{X})$,即

$$\hat{g}_k(\mathbf{X}) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 \quad (7)$$

其中, $a, b_i, c_i (i=1, \dots, n)$ 为 $(2n+1)$ 个待定系数,至少需要 $(2n+1)$ 个方程来确定这些系数。求出待定系数后,即可用 $\hat{g}_k(\mathbf{X})$ 来代替隐式功能函数 $g_k(\mathbf{X})$,传统的可靠性求解方法便可实施。由于响应面法得到的功能函数是近似的,需进行迭代求解。

响应面法可靠性分析的基本步骤如下所述。

(1)确定中心试验点 \mathbf{X}_M 和 $(2n+1)$ 组试验点,以确定式(7)中的 $(2n+1)$ 个待定系数。

$$\begin{cases} \bar{x}_1 = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n), & j=1 \\ \bar{x}_j = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_i + f\sigma_i, \dots, \mu_n), & (j=2, \dots, (n+1); i=j-1) \\ \bar{x}_j = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_i + f\sigma_i, \dots, \mu_n), & (j=(n+2), \dots, (2n+1); i=j-(n+1)) \end{cases} \quad (8)$$

式中:试验点 \bar{x}_1 是中心试验点 \mathbf{X}_M ,第1次迭代取为基本随机向量的均值向量 $\bar{x}_\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$,即 $\mathbf{X}_M = \bar{x}_\mu$;其他周围试验点 $\bar{x}_j (j=2, 3, \dots, 2n+1)$ 是在中心试验点附近沿各坐标轴的正、负方向偏离 $f\sigma_i$ 而形成; f 为偏离系数,常取 $1 \sim 3$,第1次迭代 $f=3$,其余迭代 $f=1$; σ_i 为第 i 个随机变量的均方差。

(2)求各试验点处的响应值。在 $(2n+1)$ 组试验点处分别进行结构有限元分析,求出对应的响应值 $g_k(\bar{x}_j)$ 。

(3)求解待定系数。将 $(2n+1)$ 组试验点和对响应值代入式(7),即可求出待定系数 $a, b_i,$

$c_i (i=1, \dots, n)$ 。

(4)确定验算点 P^* 初始值 $x_i^* (i=1, \dots, n)$,一般取为随机变量的均值,即 $x_i^* = \bar{x}_\mu$ 。利用式(9)求方向余弦 η_i

$$\eta_i = \cos(\theta_i) = \frac{-(\partial \hat{g}_k / \partial x_i |_{P^*}) \sigma_i}{[\sum_{l=1}^n (\partial \hat{g}_k / \partial x_l |_{P^*})^2 \sigma_l^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

(5)将 $x_i^* = \sigma_i \beta \eta_i + \mu_i$ 代入近似极限状态方程式(10),得到关于可靠性指标 β 的一元二次方程

$$\hat{g}_k(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0 \quad (10)$$

(6)求解式(10)获得可靠性指标 β ,并代入式(11),求出新的验算点 x_i^*

$$x_i^* = \sigma_i \beta \eta_i + \mu_i \quad (11)$$

(7)确定新的中心试验点 \mathbf{X}_M 。为保证响应面法计算精度,需进行迭代求解,按式(12)更新中心试验点 \mathbf{X}_M ,以 \mathbf{X}_M 替代式(8)中的中心试验点。 \mathbf{X}^* 为设计验算点向量。

$$\mathbf{X}_M = \bar{x}_\mu + (\mathbf{X}^* - \bar{x}_\mu) \frac{g_k(\bar{x}_\mu)}{g_k(\bar{x}_\mu) - g_k(\mathbf{X}^*)} \quad (12)$$

(8)迭代终止判断。当可靠性指标满足 $|\beta_m - \beta_{m-1}| \leq \epsilon$ (ϵ 取 0.001) 时,停止迭代。否则返回步骤(1)进行迭代,直至收敛。

第(6)步中求出可靠性指标 β 后,可利用式(13)计算可靠度 P_r

$$P_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta} \exp(-\frac{x^2}{2}) dx \quad (13)$$

2 履带起重机臂架可靠性分析

下页图1为三一重工 50 t 履带起重机最短主臂示意图。现对其主臂工况进行可靠性分析。

该机型臂架的上下臂节为变截面,中间标准臂节的横截面为正方形,边长为 1.3 m。臂架主弦管材料屈服强度为 770 MPa,腹管的屈服强度为 245 MPa,密度均为 7 860 kg/m³,弹性模量为 2.06×10^{11} Pa,泊松比 0.3,变幅平面作用载荷为 F ,侧向载荷为 $2\%F$,地面坡度为 0.57° 。使臂架处于最不利情况,考虑自重作用,利用管单元 PIPE16 进行离散,分析工况如下所示。

工况 1:主臂 13 m,工作半径 3.7 m,作用载荷均值 55 t;

工况 2:主臂 52 m,工作半径 12 m,作用载荷均值 11 t。

有限元模型如下页图 2、图 3 所示。考虑的基本随机参数分别为材料特性参数、几何尺寸和作用



图 1 50 t 主臂工况
Fig. 1 Main boom case of 50 t

载荷 3 类,各随机参数均为正态分布,变异系数(均方差与均值之比)通过参阅相关规范、标准和商务采购协议确定^[20],即各参数具有波动性,具体数值见表 1。

表 1 基本随机变量的均值与变异系数

Tab. 1 Mean values and variation coefficients of basic random variables

随机变量	均值	变异系数	随机变量	均值	变异系数	随机变量	均值	变异系数
密度/(kg·m ⁻³)	7 860	0.020	上下臂节主弦杆壁厚/m	0.006 5	0.034	上下臂节垂向腹管壁厚/m	0.005	0.04
弹性模量/Pa	2.06×10 ¹¹	0.040	中间基本臂节主弦杆壁厚/m	0.005 5	0.034	下臂节斜向腹管外径/m	0.048	0.04
腹管屈服强度/MPa	245	0.070	中间基本臂节、上臂节斜向和垂向腹管外径/m	0.042 0	0.040	下臂节斜向腹管壁厚/m	0.004	0.04
主弦杆屈服强度/MPa	770	0.070	中间基本臂节、上臂节斜向和垂向腹管壁厚/m	0.003 0	0.050	额定载荷/t		0.20
主弦杆外径/m	0.076	0.035	上下臂节垂向腹管外径/m	0.050 0	0.040			

表 2 臂架可靠性计算结果

Tab. 2 Reliability results of boom

工况	吊重/t	可靠指标	臂架强度		臂架刚度	臂架稳定性	压弯杆件稳定性
			腹管	主弦杆			
工况 1	55	β	5.314	7.047	20.024	7.133	4.455
		P_r	0.9746	≈1	≈1	≈1	0.9 ⁵ 58
工况 2	11	β	9.209	9.718	9.016	6.015	9.466
		P_r	≈1	≈1	≈1	0.9 ⁹ 10	≈1

由表 2 计算结果可知,对于短臂工况(工况 1),臂架的刚度和整体稳定性的可靠度非常高,特别是刚度可靠性指标非常大,可以不考虑刚度失效,即只要臂架满足其他可靠性指标,刚度可靠性指标就自然满足要求。相对而言,压弯杆件的稳定性可靠性指标最小,臂架强度可靠性指标次之。因此该工况下应注意压弯杆件稳定性和结构强度的校核。对于

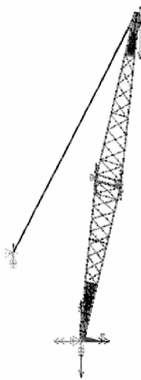


图 2 工况 1
Fig. 2 Case 1



图 3 工况 2
Fig. 3 Case 2

臂架臂头和根部进行了加强设计,在进行压弯杆件稳定性可靠性分析时,不考虑加强部分的杆件失效,认为是安全的。表 2 列出了利用文中方法求解工况 1 和工况 2 下臂架的强度、刚度、稳定性和压弯杆件稳定性的可靠度结果。当 $\beta=6$ 时,可靠度 $P_r=0.999\ 999\ 999\ 01$,记为 0.9⁹01,下同。因此,当可靠性指标 $\beta>6$ 时其可靠度可近似为 1。

长臂工况(工况 2),臂架强度、刚度以及压弯杆件稳定性的可靠度很高,而整体稳定性的可靠度相对较低,臂架容易发生整体失稳,该工况下应注意臂架整体稳定性的校核。此外,长主臂大工作半径工况下,起重载荷主要由整机的倾翻稳定性决定,而不是强度决定的。

为了研究压弯杆件稳定性的可靠度与载荷均值的关系,保持载荷变异系数不变,改变载荷均值。下页表 3 列出了臂架在工况 1 时不同载荷均值作用下压弯杆件稳定性的可靠度,下页图 4 为压弯杆件稳定性的可靠度与载荷均值的变化曲线。可知,该机工况 1 载荷为 60 t 时,压弯杆件的失效概率为 0.000 056;载荷为 50 t 时,失效概率已经非常小。实际工作中该机该工况的额定载荷为 50 t,可见,臂

表 3 工况 1 不同载荷下压弯杆件稳定性可靠度

Tab. 3 Reliability of compressive-bending members' stability under different loads for case 1

载荷/t	β	可靠度 P_r
50.0	5.114	0.9 ⁶ 84
52.5	4.775	0.9 ⁶ 10
55.0	4.455	0.9 ⁵ 58
57.5	4.152	0.9 ⁴ 84
60.0	3.864	0.9 ⁴ 44
62.5	3.591	0.9 ³ 84

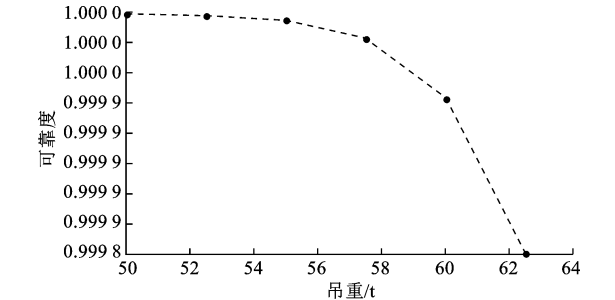


图 4 工况 1 压弯杆件可靠度随载荷变化趋势
Fig. 4 Trend of reliability of compressive-bending members' stability under different loads for case 1

架可靠度非常高。

为了研究臂架整体稳定性的可靠度与载荷均值的变化趋势,表 4 列出了工况 2 在载荷变异系数不变,载荷均值变化时臂架整体稳定性的可靠度,整体稳定性可靠度随载荷均值的变化趋势如图 5 所示。可知,该机工况 2 载荷为 13 t 时,臂架发生整体失稳的概率为 0.000 001 5,载荷为 11 t 时,整体失稳概率接近于 0。实际工作中该工况的额定载荷为 9.8 t,安全程度非常高,有进一步的优化空间。

表 4 工况 2 不同载荷下臂架整体稳定性可靠度

Tab. 4 Reliability of global stability under different loads for case 2

载荷/t	β	可靠度 P_r
10	6.809	0.9 ¹¹ 51
11	6.015	0.9 ⁹ 10
12	5.295	0.9 ⁷ 41
13	4.675	0.9 ⁵ 85
14	4.120	0.9 ⁴ 81
15	3.614	0.9 ³ 85

由图 4 和图 5 知,当仅改变载荷均值大小时,臂架压弯杆件稳定性的可靠度和整体稳定性的可靠度随载荷均值不断变化。当载荷均值增大,臂架可靠度以非线性趋势迅速降低,对应的失效概率将大为增加。建议该产品可靠度不应低于 0.9⁵1。

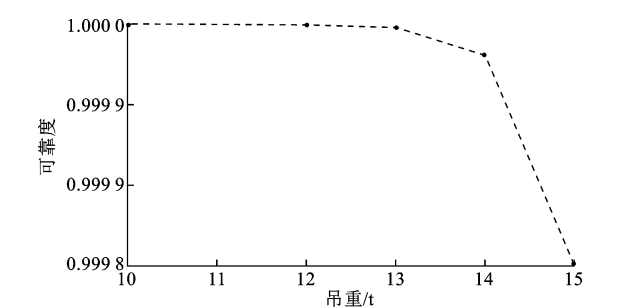


图 5 工况 2 整体稳定性可靠度随载荷变化趋势
Fig. 5 Trend of reliability of global stability under different loads for case 2

3 结 语

(1)基于概率论将履带起重机臂架结构的几何尺寸、材料参数和载荷视为随机变量,建立了臂架强度、刚度、整体稳定性和压弯杆件稳定性 4 个方面的可靠性分析模型,并利用响应面法求解该模型,实现了臂架安全程度的概率度量。该方法可为履带起重机臂架以及其他大型复杂工程机械产品的可靠性分析与设计提供参考。

(2)50 t 履带起重机臂架可靠性分析结果表明,短臂工况下压弯杆件稳定性的可靠度和臂架强度可靠度相对较低,易发生压弯杆件稳定性失效和臂架强度失效;长臂工况下臂架整体稳定性可靠度相对较低,整体失稳是臂架的主要失效模式;该机臂架在额定载荷下的可靠度非常高,存在优化空间。此外,当载荷变异系数不变,且均值增大时,臂架可靠度以非线性趋势降低。

(3)本文从履带起重机臂架的各失效模式方面建立了可靠性分析模型,下一步研究建议同时考虑整机稳定性的可靠性问题,从而能更全面地衡量臂架的可靠性。

参考文献:
References:

[1] 李 响. 履带起重机臂架系统有限元参数化方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2007.
LI Xiang. Researches on parametric finite element analysis of crawler crane boom systems[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2007. (in Chinese)
[2] Wu D, Zhang J, Gao S D, et al. Modeling method of crawler crane based on open source engines[J]. Advanced Materials Research,2010,97-101:2832-2835.
[3] Lian J, Li J. Crane basic boom static analysis based on ANSYS[J]. Advanced Materials Research,2014,871:

- 64-68.
- [4] Ma L Z, Liu J, Diao X L, et al. The elastic dynamic analysis of crawler crane boom system[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 482-484: 1138-1141.
 - [5] Xu G N, Yang J B, Liu J S. Mode analysis of lattice main boom for crawler crane based on ANSYS _ WORKBENCH [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 712-715: 1439-1443.
 - [6] Li W J, Zhao J, Jiang Z, et al. A numerical study of the overall stability of flexible giant crane booms [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 105 (2): 12-27.
 - [7] Wang G, Qi Z H, Kong X C. Geometrical nonlinear and stability analysis for slender frame structures of crawler cranes[J]. *Engineering Structures*, 2015, 83(1): 209-222.
 - [8] 李玉梅. 履带起重机塔式臂架的整体稳定性分析方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
LI Yu-mei. Research on the overall stability of crawler crane's lattice jib with main and vice-jib structure [D]. Jinan: Shandong University, 2008. (in Chinese)
 - [9] 张 静. 履带起重机臂架稳定性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
ZHANG Jing. Stability analysis of crawler crane boom [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
 - [10] 巫 越. 起重机桁架式臂架优化设计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
WU Yue. Optimization design research on truss boom of crane [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
 - [11] 张玉星. 履带起重机臂架结构优化设计及有限元分析 [D]. 太原: 太原科技大学, 2013.
ZHANG Yu-xing. Optimization and finite element analysis of crawler crane jib structure [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2013. (in Chinese).
 - [12] 周海浪, 曾庆元. 用随机有限元法计算架桥机机臂的可靠性[J]. *起重运输机械*, 2001(9): 4-6.
ZHOU Hai-lang, ZENG Qing-yuan. The stochastic finite element method for calculating the reliability of the arm of bridge-erecting machine [J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2001(9): 4-6. (in Chinese)
 - [13] 里 超, 于兰峰, 杨 帆, 等. 基于随机有限元法的卸船机臂架结构可靠性分析[J]. *起重运输机械*, 2010 (11): 54-57.
LI Chao, YU Lan-feng, YANG Fan, et al. The reliability analysis for the continuous ship unloader structure based on stochastic finite element method [J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2010(11): 54-57. (in Chinese)
 - [14] 赵 鑫, 杨 强, 张 磊, 等. 故障树与蒙特卡罗法在起重机主梁可靠性分析中的应用[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2011, 32(6): 843-845.
ZHAO Xin, YANG Qiang, ZHANG Lei, et al. Application of Monte Carlo simulation and fault tree analysis to the reliability calculation of the crane girder [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2011, 32(6): 843-845. (in Chinese)
 - [15] 李金平, 王建明, 焦生杰, 等. 基于响应面法的履带起重机桁架臂压弯构件稳定性的可靠性分析[J]. *机械科学与技术*, 2012, 31(12): 1959-1962.
LI Jin-ping, WANG Jian-ming, JIAO Sheng-jie, et al. Reliability analysis of stability for compressive-bending member of crawler crane's boom based on response surface method [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(12): 1959-1962. (in Chinese)
 - [16] GB/T 3811—2008, 起重机设计规范[S].
GB/T 3811—2008, Design rules for cranes [S]. (in Chinese)
 - [17] 邬晓光, 李冀弘, 宋伟伟. 基于改进响应面法的在役 PC 桥梁承载力可靠性[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2012, 32(3): 53-57.
WU Xiao-guang, LI Ji-hong, SONG Wei-wei. Reliability of existing PC bridge based on improved response surface method [J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2012, 32(3): 53-57. (in Chinese)
 - [18] Yoo K S, Eom Y S, Park J Y, et al. Reliability-based topology optimization using successive standard response surface method [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2011, 47(7): 843-849.
 - [19] Basağ H B, Bayraktar A, Kaymaz I. An improved response surface method for reliability analysis of structures [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2012, 42(2): 175-189.
 - [20] GB/T 8162—2008, 结构用无缝钢管[S].
GB/T 8162—2008, Seamless steel tubes for structural purposes [S]. (in Chinese)