

基于交互式决策算法的桁架式门机结构系统动态优化设计*

INTERACTIVE DECISION-MAKING ALGORITHM BASED DYNAMIC OPTIMIZATION DESIGN OF TRUSS GANTRY CRANE STRUCTURE

李少鹏** 于兰峰*** 王平平 韩伟

(西南交通大学 机械工程学院 机械工程研究所, 成都 610031)

LI ShaoPeng YU LanFeng WANG PingPing HAN Wei

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

摘要 提出了一种基于交互式决策算法的桁架式门机结构系统动态优化设计方法。通过模态分析及谐响应分析确定影响结构动态性能的关键模态固有频率。将结构总质量、杆件静强度、结构静刚度以及关键固有频率作为目标,对结构设计参数进行灵敏度分析,筛选出对桁架门机结构性能影响较大的设计参数。以结构总质量为最终优化目标,同时以固有频率、结构静强度、静刚度、满意度等作为约束条件。利用交互式决策算法结合有限元分析软件对桁架式门机结构进行优化计算,实现了决策者与系统模型之间信息的反复交换,使优化结果不断向决策者要求靠近。通过此种动态优化方法,不仅使结构质量减少 10.9%,还提升了 5.98% 的结构动态性能,节约了制造成本。

关键词 有限元法 灵敏度分析 固有频率 交互式决策算法 动态优化 桁架式门机

中图分类号 TH21

Abstract Presents a crane optimization method based on interactive decision-making algorithm. Sensitivity analysis was done for all structural parameters to decide the dynamic optimum design variables. Mass of the structure was taken as the optimization objective. The restraints to the model include harmonic response analysis, static strengths, static stiffness, satisfactory degree and key modal frequency which was determined based on modal analysis etc. Information was exchanged between decision-makers and the systematic model through the interactive decision-making algorithm which make the result more satisfactory. A design case shows that the dynamic performance is increased by 5.98% with a decrease in mass by 10.9%.

Key words Finite element; Sensitivity analysis; Nature frequency; Interactive decision-making algorithm; Dynamic optimization; Truss gantry crane

Corresponding author: LI ShaoPeng, E-mail: liseanh@163.com

The project supported by the Fundamental research Funds for the Central Universities Funded (No. 2010ZT03).

Manuscript received 20131224, in revised form 20140122

引言

桁架式门机工作时各个机构的启制动会引起结构的冲击及振动,对司机的舒适度、工作效率以及结构件的疲劳寿命都会产生一定的影响。在广泛使用高强度钢材的今天,结构的静强度及稳定性已不难满足,结构的静、动刚度则成为了主要的制约因素^[1]。对桥、门式起重机,在驾驶室不采用隔振装置情况下,小车满载位于跨中时垂直方向固有频率 f 应在 2 Hz ~ 4 Hz。由于国标中对此没有严格要求,该项往往被忽略,淡漠了结构的动态性能^[2]。

对桁架门机进行优化时,由于既要考虑结构的动态性能,又要考虑结构质量最轻,同时还要满足结构的

静刚度、强度等多项指标,本文引入了交互式多目标决策算法^[3-4]。该算法往往被用于经济规划、土地规划、公司决策等相关领域,在起重机结构优化等工程项目中极少涉及。利用满意度及整体协调度来定量描述非劣解对应目标的理想程度,通过对满意度的修正来实现人机交互决策,在避免目标权重系数人为确定的同时减轻了决策人负担^[5-6]。本文在此基础上与有限元优化分析软件相结合对桁架门机结构进行动态优化设计^[7],为工程应用提供了一种新的优化设计方法。

1 结构动力学模型及动力学特性分析

结构系统的动力学有限元方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (1)$$

* 20131224 收到初稿, 20140122 收到修改稿。中央高校基本科研业务费专项资金 (2010ZT03) 资助

** 李少鹏, 1988 年 3 月生, 男, 河北邯郸人, 汉族, 西南交大机械工程学院硕士研究生, 主要研究方向为结构设计。

*** 于兰峰, 1964 年 1 月生, 女, 山东人, 教授, 博士, 主要研究方向为现代设计理论及方法。

式中, M 、 C 、 K 分别为结构系统的质量、阻尼和刚度矩阵; x 、 $\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$ 、 F 分别为结构系统的位移、速度、加速度和节点载荷列阵。对方程求解, 可得到振动系统的固有特征参数以及动力响应参数。

以某桁架式门机结构为例, 通过有限元法对其进行模态分析和谐响应分析计算其模态及响应。该门机结构的主要参数: 起重量 32 t, 跨度 30 m。建立有限元模型时所有弦杆用空间梁单元模拟, 所有腹杆用杆单元模拟。驾驶室等集中质量用质量单元模拟。图 1 为该桁架门机结构系统有限元模型。

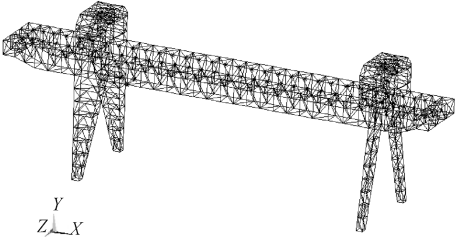


图1 桁架门机结构系统有限元模型
Fig.1 Finite element modal for the truss gantry crane structure system

对该模型进行模态分析, 得到系统前 10 阶固有频率如表 1 所示。第 1 阶固有频率对应的主振型为结构沿大车行驶方向的水平振动。第 2 阶固有频率对应的主振型反映了结构沿主梁方向的水平振动。第 3、第 5、第 6、第 7、第 10 阶的主振型反映了结构在水平面的扭转振动。第 4 阶的主振型反映了主梁的垂直振动。第 8、9 阶的主振型反映了沿主梁方向的扭转振动。前 2 阶固有频率及振型主要取决于支腿的扭转及弯曲刚度, 后 8 阶固有频率及振型主要取决于主梁的扭转及弯曲刚度。

表 1 桁架式门机结构前 10 阶固有频率

Tab.1 The first ten natural frequencies of crane

阶数 Order	频率 Frequency/Hz
1	1.677 3
2	1.951 4
3	2.718 5
4	2.965 9
5	3.733 3
6	3.874 5
7	4.489 3
8	5.513 3
9	5.513 3
10	5.740 4

利用谐响应分析找出对该结构动态性能影响最大的振动频率, 在不同激振频率的动载荷作用下, 主梁跨中及有效悬臂处节点垂直方向的位移响应最大峰值均出现在第 4 阶模态 (如图 2), 故第 4 阶模态最易引起该结构的共振。对于桥、门式起重机, 小车满载位于跨

中时垂直方向固有频率 f 推荐值为 $(2 \sim 4)$ Hz。本例门机结构在垂直方向的固有频率为 2.965 9 Hz, 满足要求, 但富余量较大, 可以对其进行优化。

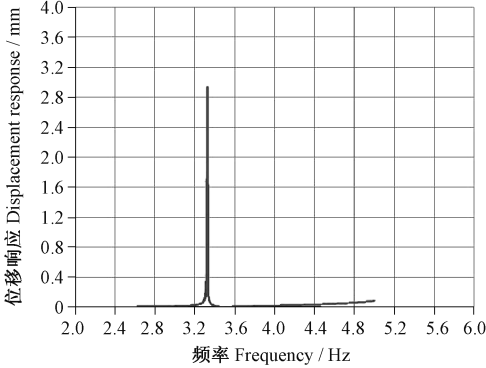


图2 主梁跨中节点垂直方向位移响应
Fig.2 Vertical displacement response of girder's mid-span node

2 灵敏度分析

本文采用 Monte Carlo 法对结构进行灵敏度分析, 以第 4 阶固有频率、结构总质量、静强度以及静刚度为目标, 对桁架式门机结构优化设计中的 58 个初始变量进行测度, 通过 10 000 次循环, 筛选出对结构静、动态性能影响较大的变量, 以提高分析效率。分析结果如图 3 ~ 图 6 所示。

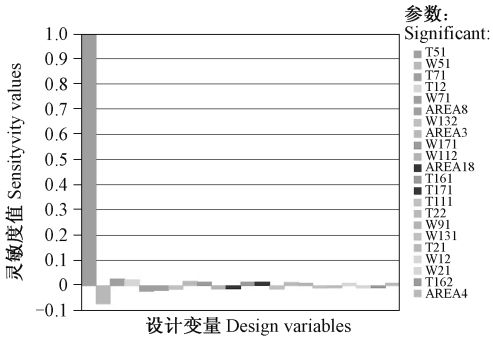


图3 结构设计参数对第 4 阶固有频率的灵敏度
Fig.3 Sensitivity of design parameters to the fourth natural frequency

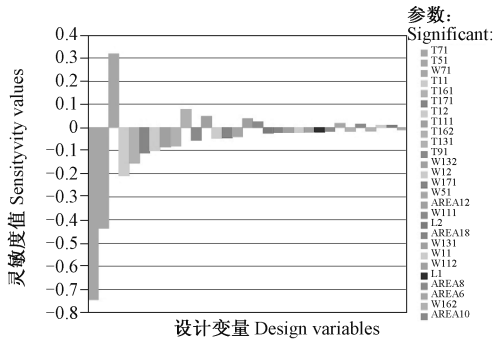


图4 结构设计参数对静强度的灵敏度
Fig.4 Sensitivity of design parameters to the static strengths

根据灵敏度分析,同时考虑型钢规格等限制因素,筛选出 27 个参数作为设计变量,如表 2 所示。

表 2 主要设计变量表
Tab.2 Main design variables

设计参数 Design variables	参数含义 Parameters meaning
A_4	主桁架斜腹杆截面面积 Sectional area of tilted belly poles in main truss
A_{12}	支腿腹杆截面面积 Sectional area of tilted belly poles in outrigger
H_2	主梁高度 Height of main girder
L_2	主梁宽度 Width of main girder
L_3	支腿与主梁连接宽度 Width of joint with outrigger and main girder
T_{11}	主桁架下弦杆(T形)翼缘厚 Thickness of bottom chord bar flange (T section) in main truss
T_{12}	主桁架下弦杆(T形)腹板厚 Thickness of bottom chord bar tilted belly poles (T section) in main truss
T_{21}	主桁架上弦杆(T形)翼缘厚 Thickness of top chord bar flange (T section) in main truss
T_{22}	主桁架上弦杆(T形)腹板厚 Thickness of top chord bar tilted belly poles (T section) in main truss
T_{51}	副桁架弦杆肢厚(等边角钢) Chord bar limb thickness (equal angle) in secondary truss
T_{71}	水平桁架弦杆肢厚(等边角钢) Chord bar limb thickness (equal angle) in horizontal truss
T_{91}	端梁斜撑杆肢厚(等边角钢) Slant beams limb thickness in end beam
T_{111}	端梁水平弦杆厚度 Horizontal chord bar thickness in end beam
T_{131}	马鞍弦杆肢厚 Chord bar limb thickness in saddle
T_{161}	马鞍弦杆(T形)翼缘厚 Thickness of chord bar flange (T section) in saddle
T_{162}	马鞍弦杆(T形)腹板厚 Thickness of chord bar (T section) tilted belly poles in saddle
T_{171}	支腿弦杆肢厚(等边角钢) Chord bar limb thickness (equal angle) in outrigger
W_{12}	主桁架下弦杆(T形)腹板高 Height of bottom chord bar tilted belly poles (T section) in main truss
W_{21}	主桁架上弦杆(T形)翼缘宽 Width of top chord bar flange (T section) in main truss
W_{22}	主桁架上弦杆(T形)腹板高 Height of top chord bar tilted belly poles (T section) in main truss
W_{51}	副桁架弦杆肢长(等边角钢) Chord bar limb length (T section) in secondary truss
W_{71}	水平桁架弦杆肢长(等边角钢) Chord bar limb length (equal angle) in horizontal truss
W_{111}	端梁水平弦杆宽度 Width of horizontal chord bar in end beam
W_{131}	马鞍弦杆肢长(水平方向) Chord bar limb length (horizontal direction) in saddle
W_{161}	马鞍弦杆(T形)翼缘板宽 Width of chord bar flange (T section) in saddle
W_{162}	马鞍弦杆(T形)腹板高 Height of chord bar tilted belly poles (T section) in saddle
W_{171}	支腿弦杆肢长(等边角钢) Chord bar limb length (equal angle) in outrigger

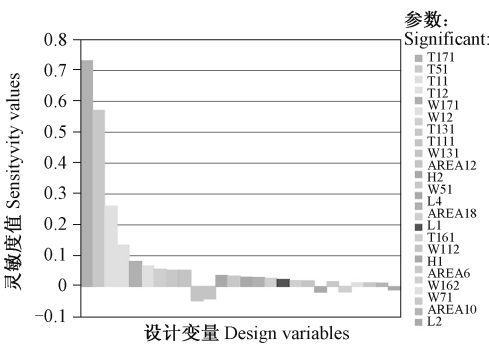


图 5 结构设计参数对静刚度的灵敏度

Fig.5 Sensitivity of design parameters to the static stiffness

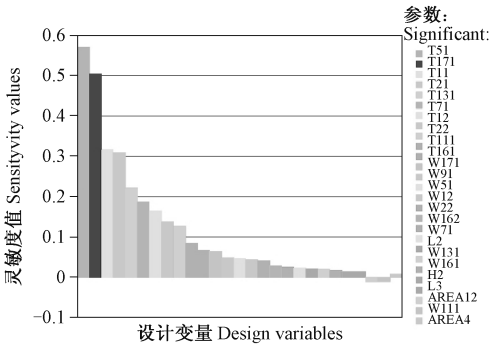


图 6 结构设计参数对质量的灵敏度

Fig.6 Sensitivity of design parameters to the mass

3 动态优化设计的数学模型

根据灵敏度分析结果,将参数 $B = [A_4, A_{12}, H_2, L_2, L_3, T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}, T_{51}, T_{71}, T_{91}, T_{111}, T_{131}, T_{161}, T_{162}, T_{171}, W_{12}, W_{21}, W_{22}, W_{51}, W_{71}, W_{111}, W_{131}, W_{161}, W_{162}, W_{171}]$ 作为设计变量,即

Find $X = B^T$ (2)

以结构质量最小作为优化目标,即

min $M(x)$ (3)

考虑到实际工况,桁架式门机结构系统约束条件如下:

(1) 静强度约束条件

$\sigma_{\max} < [\sigma]$ (4)

式中, $[\sigma]$ 为材料的许用应力, $\sigma_{\max}$ 为构件的最大计算应力。所用材料为 Q235 钢。

(2) 静刚度约束条件

小车位于主梁跨中时,跨中最大垂直静位移 $\delta_{\max}$ 应满足

$\delta_{\max} \leq \frac{L}{800}$ (5)

式中, L 为主梁跨度。

小车位于悬臂端时,悬臂端有效工作长度处最大

垂直静位移 $\delta_{\max}$ 应满足

$$\delta_{\max} \leq \frac{L'}{350} \quad (6)$$

式中, L' 为悬臂端有效工作长度。

(3) 杆件刚度约束条件

$$\lambda_i = \frac{l_i}{r_i} \leq [\lambda], i = 1, 2, \dots, 70 \quad (7)$$

式中, λ_i 为杆件长细比; l_i 为杆件计算长度; r_i 为杆件截面惯性半径; $[\lambda]$ 为许用长细比; i 为相同截面及长度的结构杆件数量。

(4) 稳定性约束条件

$$\frac{N}{\varphi A} + \sigma_{My} + \sigma_{Mx} \leq [\sigma] \quad (8)$$

式中, N 为杆件轴向压力; A 为杆件截面面积; φ 为轴心压杆稳定系数; σ_{My} 和 σ_{Mx} 分别为截面绕 y 轴和 x 轴的弯矩引起的应力。

(5) 结构动态性能约束条件

$$\alpha \leq f'(x) \leq \beta \quad (9)$$

式中, $f'(x)$ 为结构第 4 阶固有频率, α 、 β 对应许用范围, α 初始值为 2 Hz, β 初始值为 4 Hz。

4 优化方法

由于本例在以质量为最小的优化前提下还要考虑提升结构动态性能等特性, 为多目标规划问题, 将采用交互式决策与 Ansys 零阶/一阶优化相结合的方法对结构系统进行优化计算。

4.1 满意度

考虑到工程实际, 在满足结构的强度、刚度、稳定性等前提下, 不仅要使结构的质量最小、提升其动态性能, 还要物尽其用, 即使整体结构系统尽量受力均衡。利用满意度的概念来分别衡量各个参数性能, 用整体协调度来衡量系统总体性能。其满意度目标参考函数如下:

(1) 以结构质量最小为目标的参考函数

$$\min M(x) \quad (10)$$

(2) 以结构杆件静强度标准差最小为目标的参考函数

$$\min \sigma_F(x) \quad (11)$$

(3) 以主梁垂直静刚度最小为目标的参考函数

$$\min D(x) = \min |D'(x)| \quad (12)$$

式中, $D'(x)$ 为由软件提取的主梁最大垂直静挠度。

(4) 以结构第 4 阶固有频率与许用值上限的最小差值为目标的参考函数

$$\min f(x) = \min |f'(x) - 4| \quad (13)$$

对于满意度参考函数其目标满意度为

$$U_A = \frac{A_{\max} - A(x)}{A_{\max} - A_{\min}} \quad (14)$$

式中, $A_{\max}$ 为参考函数最大值, $A_{\min}$ 为其理想值, $A(x)$ 为实际值。显然各个实际值越接近理想值, 其满意度越大, 表示决策者的满意度越高。

4.2 总体协调度

由于需要进行多目标决策, 有必要对模型的各个单项目标值与相应理想值进行比较, 分析确定规划值与理想值之间的接近程度。本模型中优化时采用基于欧氏距离判断目标之间的接近程度。目标总体协调度函数为

$$\lambda(d) = \frac{d_1 + d_2}{d_1 + d_3} \quad (15)$$

式中, d_1 为规划值与理想值之间的欧氏距离, 表示为 $d_1 = [(M(x) - M_{\min})^2 + (\sigma(x) - \sigma_{\min})^2 + (f(x) - f_{\min})^2 + (D(x) - D_{\min})^2]^{\frac{1}{2}}$, d_2 为规划值与上下限值间的欧氏距离, 表示为 $d_2 = [(M(x) - M_{\max})^2 + (\sigma(x) - \sigma_{\max})^2 + (f(x) - f_{\max})^2 + (D(x) - D_{\max})^2]^{\frac{1}{2}}$, d_3 为理想值与上下限值间的欧氏距离, 表示为 $d_3 = [(M_{\max} - M_{\min})^2 + (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})^2 + (f_{\max} - f_{\min})^2 + (D_{\max} - D_{\min})^2]^{\frac{1}{2}}$, $\lambda(d)$ 值域在 0.5 ~ 1 之间。当各项目目标只达到目标上限的时候, 决策者可接受但满意度不高, $\lambda(d) = 0.5$; 当各个目标值都达到理想值时, 满意度最高, $\lambda(d) = 1$ 。目标总体协调度能够很好地度量目标的整体满意度。对所建立的数学模型进行交互式决策优化, 首先把选取的 27 个优化变量利用 Ansys 零阶/一阶优化法进行优化, 计算各个目标的满意度及总体协调度。决策者判断结果是否满意, 如果不满意可将满意度作为约束条件, 构造数学模型 2 再次对结构进行优化计算, 直到得到决策者满意解为止。

5 优化过程及结果分析

本文在第一次优化后, 满意度及总体协调度见表 3, 假设决策者对结构系统动态性能即第 4 阶固有频率的优化结果以及杆件的应力分布不太满意, 而对总体质量的满意度可做适当让步。将第 4 阶固有频率的满意度下限设为 0.5, 由满意度公式计算可得新的固有频率即 $f'(x) \geq 3$; 将应力标准差的满意度下限设为 0.74, 由公式可得新的应力标准差即 $\sigma_F \leq 22.75$, 以此作为新的约束条件建立优化数学模型 2 再次进行优化。所得结果见表 4。如果决策者对优化结果仍不满意, 可继续修改各个目标满意度的上下限值, 直到达到决策者要求为止。

表 3 第一次优化满意度及总体协调度

Tab.3 Satisfaction and comprehensive degree for the first time

	总质量 Total mass/kg	最大应力 Maximum stress/MPa/ 标准差 Standard deviation
优化前 Before optimization	52 500.643	-122.16/19.272 34
优化后 After optimization	46 443.897	149.92/22.756 81
满意度 Satisfaction degree	0.115 4	0.739 9
	$\delta_{\max}/[\delta]$	$f'(x)/ f'(x)-4 $
优化前 Before optimization	15.097/17.2	2.965 9/1.034 1
优化后 After optimization	17.1/17.2	2.258 4/1.741 6
满意度 Satisfaction degree	0.011 56	0.129 2
总体协调度 Comprehensive degree	0.530 609 905	

注：表中 $\delta_{\max}$ 为最大静位移， $[\delta]$ 为许用静位移，衡量应力分布的满意度是通过标准差计算所得。

Note: $\delta_{\max}$ is the largest static displacement, $[\delta]$ is permissible static displacement, satisfaction which is a measure of the stress distribution is calculated by the standard deviation.

表 4 第二次优化满意度及总体协调度

Tab.4 Satisfaction and comprehensive degree for the second time

	总质量 Total mass/kg	最大应力 Maximum stress/MPa/ 标准差 Standard deviation
优化前 Before optimization	525 00.643	-122.16/19.272 34
优化后 After optimization	46 787.413	-97.003/22.558 15
满意度 Satisfaction degree	0.108 822 096	0.742 192 571
	$\delta_{\max}/[\delta]$	$f'(x)/ f'(x)-4 $
优化前 Before optimization	15.097/17.2	2.965 9/1.034 1
优化后 After optimization	17.2/17.2	3.143 4/0.856 6
满意度 Satisfaction degree	0	0.571 7
总体协调度 Comprehensive degree	0.528 774 339	

通过本次优化,由表 3、表 4 数据可知,在牺牲总体质量满意度的前提下,静刚度满意度最低(达到下限,成为优化的主要限制条件);应力满意度有所提升,使杆件受力更加均衡,减少了受力不均杆件出现的概率;结构固有频率有所提升,提高了结构的动态性能。第二次优化的总体协调度之所以小于第一次优化值,是由于总体质量是本次优化的首要目标,牺牲总体质量来达到提高系统动态性能的方案势必会降低总体协调度。整体上看,本次优化使结构质量减轻了

5.71t,比原设计节约了 10.9% 的钢材,大大节约了制造成本。第 4 阶固有频率比原设计提升了 5.98%,增强了主梁垂直方向的动刚度,提高了系统的动态性能。

6 结论

提出了基于交互式决策算法的桁架式门机动态优化方法。利用灵敏度分析筛选设计变量,以模态分析、谐响应分析提取对结构动态性能影响最大的固有频率,并以此协同静强度、静刚度等作为约束函数,利用满意度、总体协调度等参数结合有限元法建立交互式决策模型对桁架式门机进行结构优化。这种优化方法可根据设计者要求对其进行反馈式优化,使优化方向不断向设计者意图方向靠近。通过对本文中所建立的模型进行优化,极大地满足了设计者的要求。

参考文献 (References)

[1] 于兰峰,王金诺. 塔式起重机结构系统动态优化设计[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(2): 206-210.
YU LanFeng, WANG JinNuo. Dynamic optimum design of tower crane structures [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(2): 206-210 (In Chinese).

[2] 陈官顺,刘艳斌,叶 星. 龙门起重机结构动态优化设计[J]. 现代制造工程, 2010 (008): 149-152.
CHEN GuanShun, LIU YanBin, YE Xing. Structural dynamic optimization design for gantry crane [J]. Modern Manufacturing Engineering 2010 (008): 149-152 (In Chinese).

[3] 刘远东,尹益辉,余绍蓉. 螺栓-法兰连接结构的多目标优化设计研究[J]. 机械强度, 2010, 32(4): 656-659.
LIU YuanDong, YIN YiHui, YU ShaoRong. Structural optimization of a bolt-flange structure based on multi-objective optimization method[J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(4): 656-659 (In Chinese).

[4] 郭惠听,张龙庭,罗佑新,等. 多目标模糊优化设计的理想点法[J]. 机械设计, 2001, 8: 004.
GUO HuiXin, ZHANG LongTing, LUO YouXin, et al. The ideal point method of multi-target fuzzy optimal design[J]. Mechanical Design, 2001, 8: 004 (In Chinese).

[5] 刘仁云,侯树范,张义民. 基于多目标优化策略的螺旋弹簧可靠性稳健优化设计[J]. 机械强度, 2012, 34(2): 214-218.
LIU RenYun, HOU ShuFan, ZHANG YiMin. Robust optimization design for reliability for coil spring based on multi-objective decision making methods[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(2): 214-218. (In Chinese)

[6] Stewart T. A critical survey on the status of multiple criteria decision-making: theory and practice. Omega, 1992, 20(5): 569-586.

[7] 张文正,蒋伟康. 大型岸桥结构的轻量化技术研究及应用[J]. 机械强度, 2012, 34(4): 615-620.
ZHANG WenZheng, JiANG WeiKang. Optimal design for lightweight of structure of quayside container crane[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(4): 615-620 (In Chinese).