

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.07.008

登高消防车臂架的有限元分析与优化研究^{*}

伍财生¹,袁清珂¹,吴强¹,耿丽²,谢水东²

(1. 广东工业大学机电工程学院,广东广州510006;2. 广东永强奥林宝国际消防汽车有限公司,广东东莞523407)

摘要:针对传统力学方法校核登高消防车臂架的强度和刚度计算繁琐且精度低、臂架设计过厚、登高消防车上装系统笨重、在使用过程中容易出现倾翻等问题,对臂架的静动态特性和臂架的截面参数化优化进行了研究,提出了将有限元法应用到臂架的静力学分析和模态分析中,快速精确地计算臂架在两种极限恶劣工况下的强度和臂架的前4阶固有频率及其对应的振型;将参数化有限元法与多约束非线性二次规划法有机结合应用到臂架的截面参数化优化中,让优化迭代算法融入有限元分析的全过程,快速搜索全局的最优解。研究表明,臂架截面参数化优化后最大等效应力减少了7.3 MPa,臂架体积减少了16.5%,实现了臂架的轻量化。

关键词:登高消防车;臂架;静力学分析;模态分析;优化设计

中图分类号:TH122;TU998.13⁺1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)07-0730-06

Finite element analysis and optimization of the boom of aerial fire truck

WU Cai-sheng¹, YUAN Qing-ke¹, WU Qiang¹, GENG Li², XIE Shui-dong²

(1. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Yongqiang Olin Treasure International Fire Automobile Co., Ltd., Dongguan 523407, China)

Abstract: Aiming at the complicated calculation and low precision of traditional mechanical methods for checking up the strength and stiffness, the too thick design of the boom system, the heavy fire truck mounted system, easy tilting and other issues in the process of using of the aerial fire truck, the static and dynamic characteristics of the boom and the parametric optimization of the boom were studied and the finite element method was applied to the static analysis and modal analysis of the boom, so it can fleetly and accurately calculate the strength and the first 4 natural frequencies of the boom and the corresponding vibration modes of the boom under the two limiting conditions. The parametric finite element method was combined with the multi constrained nonlinear quadratic programming method to optimize the parameters of the boom. The optimization iteration algorithm was integrated into the whole process of finite element analysis, fast search for global optimal solution. The results show that the maximum equivalent stress reduces by 7.3 MPa, and arm frame volume decreases by 16.5% after the optimization of the boom section, which achieve the goal of the lightweight of the arm frame.

Key words: aerial fire truck; boom; static analysis; modal analysis; optimization.

0 引言

近年来,我国的城市楼房向着高层化发展,城市消防救援日趋严峻,因此登高消防车成为了城市消防救援的主力。目前,消防车行业还没有统一的标准,没有

合理科学的理论依据,大都采用起重机行业的标准,臂架的设计也是采用相似设计,为了保证臂架的强度和刚度,在臂架的设计中往往把臂架设计的过厚,使登高消防车的上装系统笨重、浪费材料,增加液压驱动的受力,并容易使登高消防车在使用过程中倾翻^[1]。吴香

收稿日期:2016-12-05

基金项目:广东省产学研专项资助项目(2012B091000033);广东省数控一代专项资助项目(2012B011300009)

作者简介:伍财生(1990-),男,广东韶关人,硕士研究生,主要从事机械设计及优化、CAE分析及优化方面的研究。E-mail:853565131@qq.com

明等^[2]对登高消防车臂架的研究主要是对臂架的强度校核,在臂架满足强度和刚度条件下没有对臂架进行截面参数化优化,臂架的截面过厚,不仅浪费材料,增加成本,还使登高消防车不能轻便灵活地参与消防救援。为了使登高消防车轻便灵活、安全可靠地参与消防救援,应使臂架轻量化,在满足臂架的强度和刚度的条件下,减小臂架的厚度,从而减小臂架的重量,降低登高消防车的重心,使登高消防车不易倾翻,保证消防车的稳定性。

采用传统力学方法校核臂架的强度和刚度计算繁琐且精度低,为此,本研究首先采用 SolidWorks 对臂架进行快速建模,然后利用有限元法对臂架进行静力学分析,校核臂架的强度;再次对臂架进行模态分析,研究臂架的动态特性,为登高消防车在使用中避免发生共振提供理论依据。最后对臂架截面进行参数化优化,并对优化前后结果进行对比,实现登高消防车臂架的优化设计。

1 臂架的设计与三维建模

DG30 登高消防车的臂架是由转台、三节折叠臂、3 个液压缸和连杆组成的,臂架的截面形式对臂架的重量和力学性能有着重要的影响。矩形截面形式简单,制造成本低,并且有着良好的抗弯扭性能,因此臂架采用矩形截面形式,矩形截面如图 1 所示。

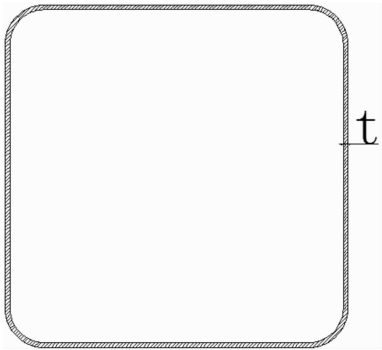


图1 臂架截面

为了便于臂架的静力学分析,在三维建模过程中需要将结构复杂的臂架进行简化。臂架简化后的模型如图 2 所示。

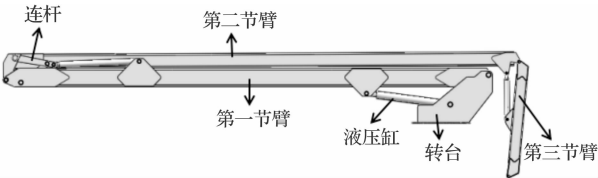


图2 臂架的三维模型

2 静力学分析

静力学分析是研究结构在受到约束和载荷作用下结构的应力和应变情况,校核所设计结构的强度和刚度^[3]。结构的静力学分析是不考虑随时间变化的载荷,忽略惯性力和阻尼的影响,静力学分析的有限元方程是^[4]:

[K]{x} = {F} (1)

式中:[K]—刚度矩阵,{x}—节点位移量,{F}—静力载荷。

对于静力学分析,材料的破坏形式主要表现为脆性断裂和塑性屈服^[5],为了保证结构能安全可靠的工作,最大许用应力要小于规定的材料极限值^[6]。

2.1 有限元模型的建立

臂架的有限元模型网格单元是四面体单元,模型的单元数和节点数分别为 31 122 和 83 785。臂架的材料是 Q690,其材料性质如表 1 所示。

表1 Q690 材料的性质

屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	泊松比	密度· /(kg·m ⁻³)
690	770	210 000	0.3	7 850

2.2 臂架的工况及载荷的施加

登高消防车臂架的工作情况很多,其工作情况要根据火灾救援的情况而变,因而臂架的运动位置很多,千变万化。臂架的最恶劣工况是臂架的两个极限位置:(1) 工况一,臂架的最大工作半径时的位置;(2) 工况二,臂架的最大工作高度位置。高空工作平台的自重及其工作平台上的附件为 100 kg,工作平台的额定载荷为365 kg,因而应在第三节臂的末端与工作平台连接处施加4 650 N的力。臂架除了受工作平台的载荷还有自身的重力,工作过程时的风力,风力按 12 m/s 的平均风速计算^[7]:

P = 0.625 · V_s (2)

V_s = 1.5 · V₀ (3)

式中:P—风压,V_s—风速值,V₀—平均风速。

当风速方向垂直于结构的迎风面积时,结构产生的风力为:

F = C · P · S (4)

S = L · B (5)

式中:F—风力;C—风力系数,此处取值为 1.35;S—臂架的迎风面积;L—臂架的长;B—臂架的宽。

L₁、L₂、L₃ 分别为 11.48 m、11.91 m、2.06 m;B₁、B₂、B₃ 分别为 0.336 m、0.25 m、0.22 m。把数据代入

上述公式计算得出三节臂的风载荷分别为 1 055 N、820 N、123 N。本研究把载荷,重力,风力按要求施加到臂架上。

2.3 有限元结果分析

笔者通过 ANSYS 有限元分析,得到臂架的等效应力图,如图 3 所示。

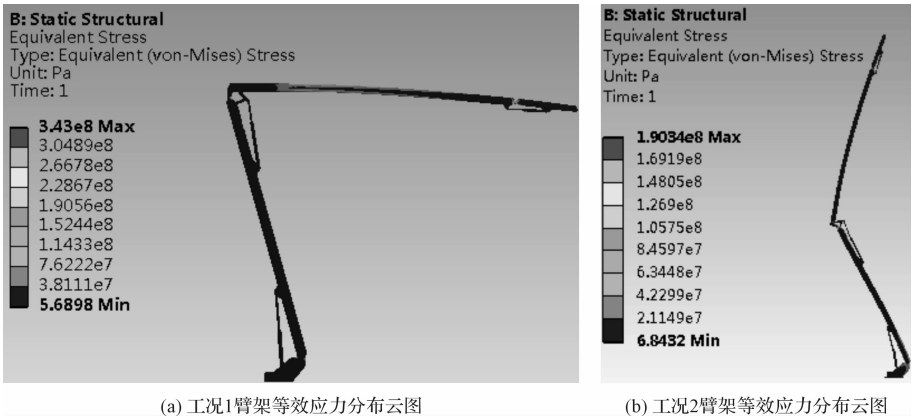


图 3 等效应力分布云图

从图 3 可知,工况一下臂架的应力集中主要在各节臂的连接处,其最大等效应力值为 343 MPa,最大等效应力值远小于 Q690 的屈服强度。工况二的应力集中现象和工况一的应力集中现象一样,都主要集中在各节臂的连接处。虽然两种极限恶劣工况下臂架在各节臂的连接处有局部应力集中现象,但是最大应力值都未超过 Q690 的屈服强度,所以臂架的结构强度是非常可靠的,不会因为受到复杂的载荷而出现断裂或发生变形^[8]。

3 模态分析

模态分析是研究机构的动态特性,对机构进行模

态分析可得知其固有频率和振型,避免在研发初期时的设计缺陷,使研发的机构具有良好的动态特性,从而缩短研发周期,减少一定的实验费用,避免机构发生共振^[9]。

臂架的动态性能非常重要,消防救援人员和被救人员在高空工作平台上,臂架的振动将使他们在高空工作平台上产生很大的振动摇摆。臂架的微小振动,将使工作平台产生很大的位移变化,所以研究臂架的动态性能是具有非常重要意义的。

臂架的前四阶振型如图 4 所示。

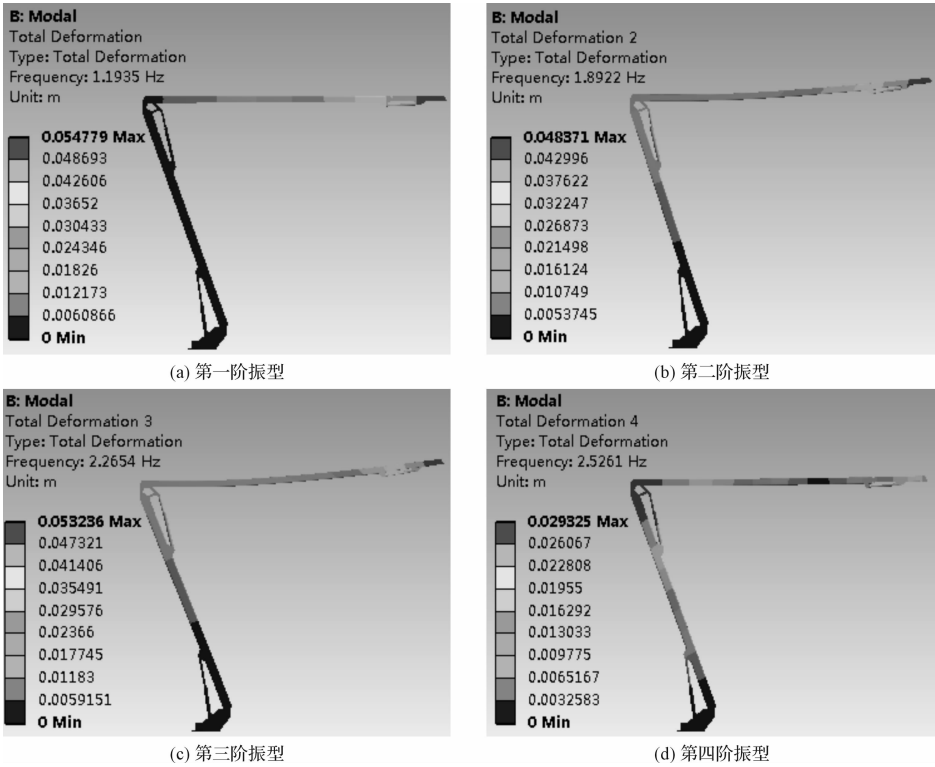


图 4 臂架的前四阶振型

臂架的前四阶固有频率和振型如表 2 所示。

表 2 臂架前四阶固有频率和振型

阶数	固有频率 /Hz	振型特征
1	1. 194	三节臂都侧向弯曲
2	1. 892	三节臂都上下弯曲
3	2. 265	三节臂都上下弯曲
4	2. 526	三节臂都侧向弯曲

从臂架的模式分析可知,臂架的振型主要为臂架的侧向弯曲和上下弯曲。因此在登高消防车的实际救援中应防止液压缸的变幅运动和风载荷引起的共振。

4 有限元优化设计

从前面的静力学分析可知,臂架能满足实际工况下的强度,并远远小于材料的屈服极限,且工况一的等效应力大于工况二,因此,在工况一的受载下优化臂架厚度。臂架的长度和截面形状已经确定了,为了使臂架达到轻量化,降低臂架的重心,增加登高消防车的稳定性,本研究在满足材料强度的要求下对三节折叠臂的厚度进行参数化优化^[10]。进行有限元优化设计首先要进行参数化建模,然后再进行网格划分、加载、求解,再次是后处理,最后是提取状态变量及目标函数、优化参数评价^[11]。

参数化有限元优化设计的步骤如图 5 所示。

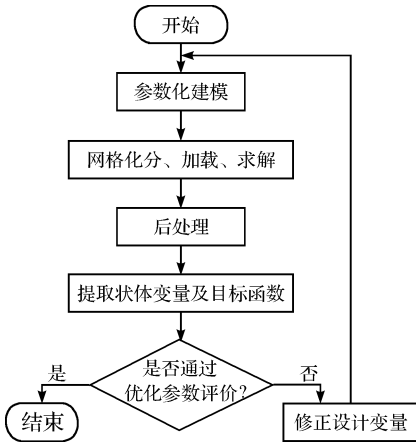


图 5 参数化有限元优化设计步骤图

4.1 优化数学模型

本研究的目的是保证登高消防车臂架的材料在不发生失效的前提下,通过优化臂架的三节折叠的厚度,来减小臂架的自重,降低臂架的重心,减轻登高消防车上装系统的重量,从而不仅可以提高登高消防车的性能,还可以达到经济性的目的。优化设计的数学模型可以表示为^[12]:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ s. t. \quad g_u(x) \leq 0 \quad u = 1, 2 \cdots, m \\ x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $f(x)$ — 目标函数, $g_u(x)$ — 约束函数, x_i — 设计变量。

取臂架三节折叠臂的厚度 t_1 、 t_2 、 t_3 3 个参数作为截面几何优化的变量,臂架的最大等效应力小于材料的许用屈服应力。由于三节折叠臂的材料相同,减小臂架的质量,即减小臂架的体积,本研究以臂架的体积最小和最大等效应力最小为优化目标^[13]。在臂架的设计尺寸基础上确定各节臂厚的优化尺寸范围如下:

$$4 \leq t_1 \leq 6, 4 \leq t_2 \leq 6, 4 \leq t_3 \leq 6。$$

4.2 优化算法

优化过程采用了多约束非线性二次规划法。假如经过 K 次优化迭代,得到设计点 X_k ,继续从该点继续进行搜索,最后找到逼近问题的最优点^[14]。其迭代过程首先选定设计的初始值、计算函数值和梯度值,然后构造二次规划的子问题,再次求解二次规划子问题、寻找新的近似极小点,最后判断收敛精度是否满足要求,满足则停止搜索、迭代,不满足则继续搜索、迭代。

4.3 臂架的优化结果分析

本研究利用多约束非线性二次规划法,按照等效应力和体积最小的原则,选出 3 个方案作为最优解的备选方案^[15],备选方案如表 3 所示。

表 3 臂架截面厚度优化备选方案

内容	方案一	方案二	方案三
第一节臂厚 t_1 /mm	4	4. 217	4. 109
第二节臂厚 t_2 /mm	4	4. 422 9	4. 844 8
第三节臂厚 t_3 /mm	4	4. 033 9	4. 050 4
最大等效应力 /MPa	336	335. 3	334. 7
体积 /m ³	0. 355	0. 366	0. 369

比较 3 个备选方案可知,方案一的体积最小,最大等效应力也小于材料的屈服极限,因此,选择方案一为最终优化方案,从而实现了 2 个目标函数的共同优化。

臂架优化前后的截面厚度、最大等效应力、体积的比较如表 4 所示。

表 4 臂架优化前后数值比较

内容	优化前	优化后
第一节臂厚 t_1 /mm	6	4
第二节臂厚 t_2 /mm	6	4
第三节臂厚 t_3 /mm	6	4
最大等效应力 /MPa	343	335. 7
体积 /m ³	0. 425	0. 355

从表 4 可知,经过优化后,各节臂的厚度都明显

减小了,优化后的臂架最大等效应力为 335.7 MPa,减小了 7.3 MPa,体积减少了 16.5%,这表明臂架的截面

参数化优化取得了良好的效果。

臂架优化后的等效应力分布云图如图 6 所示。



图 6 臂架优化后的等效应力云图

从图 6 可知,臂架优化后的强度非常可靠,能满足登高消防车的实际工况要求。

在设计结果向最优化目标逼近时,每一个状态变量对于目标变量的影响程度不同,这就是敏感性问题^[16-17]。

ANSYS Workbench 可以给出各个参数对目标函数的影响大小,并且可以进行直观的分析和比较,因此可以为设计分析提供理论依据。臂架的最大等效应力和臂架的体积对于三节折叠臂厚度的敏感性如图 7 所示。

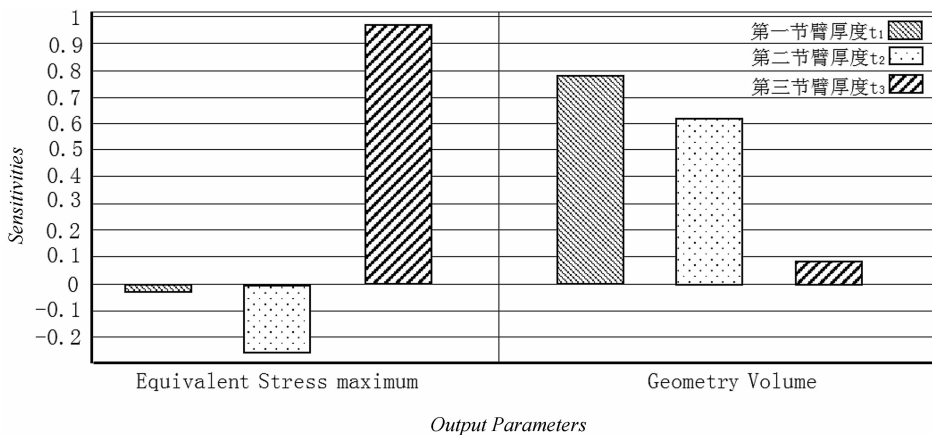


图 7 臂架的最大等效应力和体积对臂架截面厚度的敏感性

从图 7 可知,最大等效应力对第三节臂厚度最敏感,对第一节臂厚度最不敏感;在臂架体积方面,第一节臂厚度对其影响最大,第二节臂厚度次之,第三节臂厚度对其影响最小。在进行臂架参数化优化时,面对提高臂架强度,减轻臂架质量等问题应优先调整敏感性高的参数以快速达到目标。

5 结束语

(1)本研究利用 ANSYS 对臂架进行了有限元分析,由臂架的静力学分析可知,臂架的强度非常可靠,从模态分析得出臂架的振型为臂架侧向弯曲和上、下弯曲,在使用中应注意防止风载荷和臂架变幅运动引起的共振;

(2)与以往的设计分析方法相比,将参数化有限

元法与多约束非线性二次规划法有机结合,可以让优化迭代算法融入有限元分析的全过程,能快速地搜索到全局最优解。优化后的臂架最大等效应力减小了 7.3 MPa,体积减少了 16.5%,减轻了登高消防车的上装系统的重量,达到了轻量化的目的;

(3)通过参数敏感性分析,得出臂架截面参数对臂架强度和重量的影响,为进一步优化臂架结构提供理论依据,在进行臂架参数化优化时优先调整敏感性高的参数以快速达到优化的目标。

参考文献 (References):

- [1] 晋民杰,杨明星,范英,等.折臂式随车起重机动臂有限元分析[J].机械设计与制造,2014(9):69-71.
- [2] 吴香明.基于有限元的登高消防车上车机构研究[J].消防科学与技术,2015,34(7):919-921.

[3] 马 军,彭 博,路 迪,等. 高空作业车工作装置整体性能有限元优化设计研究[J]. 机械设计,2015(6):56-60.

[4] 武 敏,谢龙汉. ANSYS workbench 有限元分析及仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2014.

[5] BATTEZZATO A. Kinetostatic analysis and design optimization of an n-finger underactuated hand exoskeleton [J]. **Mechanism & Machine Theory**,2015(88):86-104.

[6] CUI G. Shape optimization based on ANSYS[J]. **Journal of Information & Computational Science**,2015,12(11):4291-4297.

[7] WANG B J, TAO Y, LI J W, et al. Optimization design of lifting beam for heavy engine compartment based on ansys workbench [J]. **Applied Mechanics & Materials**, 2014 (602-605):234-238.

[8] 刘 昆,彭美春,林怡青,等. 基于 ANSYSWorkbench 鼓式制动器冲焊蹄的有限元分析[J]. 广东工业大学学报,2013,30(1):92-96.

[9] LIU Y. Method for structural optimization design of wafer handling robot arms[J]. **Journal of Mechanical Engineering**,2015,51(1):1-9.

[10] 张 松,艾 兴,赵 军. 高速主轴/刀具联结的参数化有限元法优化设计[J]. 机械工程学报,2004,40(2):83-86.

[11] 戴 磊,关振群,单菊林,等. 机床结构三维参数化形状优化设计[J]. 机械工程学报,2008,44(5):152-158.

[12] 林旭强,史伟杰,潘柏松. 熔炼镁合金用复合型坩埚热疲劳分析及优化[J]. 机电工程,2012,29(9):1011-1014.

[13] 林欣达,林 穗,姜文超,等. 有限元求解器 Calculix 预处理并行优化方法[J]. 广东工业大学学报,2015,32(4):138-144.

[14] CHRISTOF L,CLAUS H,JORG W Z,et al. Associative parametric CAE methods in the aircraft pre-design[J]. **Aerospace Science and Technology**,2005,9(7):641-651.

[15] 曹龙龙. 高空作业车臂架结构设计分析及优化[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院,2014.

[16] 王玉梅,周 静,梁玲坤,等. 新型平缝机摆梭驱动机构的优化设计[J]. 轻工机械,2016,34(5):76-79.

[17] 张艳伟,孙国正. 混凝土泵车臂架系统优化及防仿真[J]. 武汉理工大学学报,2002,26(2):246-248.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

伍财生,袁清珂,吴 强,等. 登高消防车臂架的有限元分析与优化研究[J]. 机电工程,2017,34(7):730-735.

WU Cai-sheng, YUAN Qing-ke, WU Qiang, et al. Finite element analysis and optimization of the boom of aerial fire truck[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017,34(7):730-735.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 707 页)

链不存在危险的共振频率,可以安全、平稳地运行。该传动链动力学仿真研究结果表明该机组传动系统在工作转速范围内不存在扭转共振风险,结构设计比较合理,为机组运行的安全稳定性提供了技术支持。

参考文献 (References):

[1] ABDERRAZZAQ M A, HAHN B. Analysis of the turbine standstill for a grid connected wind farm[J]. **Renewable energy**,2006,31(1):89-104.

[2] 秦 月. 风力发电机组传动链动力学建模与仿真分析研究[D]. 重庆:重庆大学电气工程学院,2014.

[3] 陈 严,欧阳高飞,叶枝全. 大型水平轴风力机传动系统的动力学研究[J]. 太阳能学报,2003,24(5):729-734.

[4] HELSEN J, VANHOLLEBEKE F, MARRANT B, et al. Multibody modeling of varying complexity for modal behavior analysis of wind turbine gearboxes[J]. **Renewable Energy**,2011,36(11):3098-3113.

[5] 金 鑫. 风力发电机组系统建模与仿真研究[D]. 重庆:重庆大学电气工程学院,2007.

[6] 王建宏. 风力发电机的柔性多体动力学研究[D]. 重庆:重庆大学电气工程学院,2009.

[7] BLUDSZUWCIT M. 2.5 MW drive train dynamics analysis [J]. **Renewable energy**,2011,36(12):1-10.

[8] 黄宜森,顾 金,刘松超. 1.5 MW 低风速风力发电机组主传动系统设计与动力学分析[J]. 可再生能源,2012,30(1):21-26.

[9] GERMANISCHER LLOYD. Guideline for the certification of wind turbines[R]. Hamburg: Germanischer Lloyd,2010.

[10] SCHLECHT B, SCHULZE T, HAHNEL T. Multibody system simulation of drive trains in wind turbines[C]. Proceedings of the 2004 International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven: ISMA,2004.

[11] 侯海波. MW 级风电机组动力学性能仿真分析研究[D]. 重庆:重庆大学电气工程学院,2012.

[12] 周 丹. 大功率风力机叶片模态及气动特性分析[J]. 流体机械,2015(12):33-36.

[13] 何 芳. 大型风电液力机械传动装置的分析与研究[J]. 液压气动与密封,2012(1):66-71.

[14] INTEC GmbH. SIMPACK User Documentation. SIMREF: 9.7 Eigenvalues[R]. Wessling: INTEC GmbH,2010.

[编辑:张 豪]