

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.03.009

新型风机增速箱输出轴优化设计及寿命预估

韦尧兵¹, 彭敬¹, 刘俭辉¹, 高刚刚^{1,2}

(1. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学技术工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 以新型风机增速箱输出轴为研究对象,对输出轴进行设计、校验,然后对实心结构空心优化,模拟实际工况,进行有限元分析,结果表明空心轴满足强度要求,验证了空心优化的合理性。在此基础上考虑低幅载荷强化与软化的双重作用,提出了一种修正的寿命预估模型,利用新模型对输出轴进行寿命预估,与设计寿命相差 5.22% 左右,具有较高的预估精度,而且计算简单,能够弥补现有模型忽略低幅载荷循环特性的缺陷。该研究方法对轴类零件的优化设计及寿命预估具有一定的指导意义。

关键词: 增速箱输出轴; 空心优化; 有限元; 循环特性; 寿命预估

中图分类号: TH114;O346

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2019)03-0327-06

Optimal design and life prediction of output shaft of new wind turbine gearbox

WEI Yaobing¹, PENG Jing¹, LIU Jianhui¹, GAO Ganggang^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. College of Technical Engineering of Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The output shaft of the new wind turbine gearbox is taken as the research object, which is designed and verified, with the hollow optimization of its solid structure made to carry out finite element analysis under actual working conditions. The results show that the hollow shaft meets the requirement of strength, which verifies the rationality of the hollow design. Considering the dual effect of low amplitude load strengthening and softening, a modified life prediction model is proposed. The model is used to predict the life of the output shaft with a difference of about 5.22% from the actual life. It has a high prediction accuracy and simple calculation, which can make up for the defects of the current model neglecting the characteristics of low amplitude load cycle. This research method is of certain guiding significance for the optimization design and life prediction of shaft parts.

Key words: gearbox output shaft; hollow optimization; finite element; cyclic characteristics; life prediction

目前,全球的风电行业都在开展轻量化设计^[1-2],增速箱作为风机的关键部件,实现了风能向电能转化过程中的增速及能量流传递,输出轴将增速箱输送的扭矩载荷传递给发电机进行发电,其工作性能的好坏直接影响风机的正常运转^[3-4]。对于风机轴类零件设计,传统方法往往通过增加轴径尺寸获得较高的可靠性,不仅造成结构强度剩余,而且浪费原材料,增加制造成本,不利于结构的轻量化设计^[5]。基于零件的失效相关性和强度退化因素,周

志刚^[6]研究了失效相关性和强度退化对风电齿轮传动系统可靠度和失效率的影响规律。Wu^[7]提出了新型齿轮箱模型,应用双偏心调幅方法和偏心轮结构特点,重点研究了输出轴旋转和轴向往复运动机构的工作原理。Zhu^[8]对 800 kW 风力发电机齿轮箱输出轴进行断裂失效分析,提出不同尺寸的凹坑表面处理工艺不当,导致疲劳源的产生,输出轴中心部严重的组织偏离进一步促进了疲劳裂纹的萌生和扩展。目前的研究仅限于对齿轮箱输出轴疲劳失效

收稿日期: 2018-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51605212);甘肃省自然科学基金资助项目(17JR5RA122)

作者简介: 韦尧兵,男,硕导,教授,研究方向为裂纹技术与应力断裂装备、CAD/CAM,基于对象的虚拟技术等。E-mail: weiyb@lut.cn

进行分析,并没有从轴材料本身的特性出发,研究载荷对轴疲劳强度的影响。

经过长期对风机工作载荷谱的研究,随机载荷中的低幅载荷对零件疲劳强度有强化与软化的作用^[9],因此,在输出轴的优化设计及寿命预估时,应充分考虑低幅载荷的循环特性,合理利用结构的剩余强度,提高风机的工作效率和负载,推动我国风电产业的长足发展。

高刚刚^[10]提出了一种新型双风轮合成增速箱的设计方案,即风力机的机舱两端的上下风向分别布置一排叶片,组成双风轮,然后通过合成增速箱对双排叶片产生的旋转力矩进行增速并合成,最终通过扭杆传递到地面,再用发电机进行发电,或其他形式的有效利用。本文只对合成增速箱合成输出轴进行研究,并参考成熟的水平轴风力发电机增速箱结构设计,经过理论分析计算,运用三维软件建立了三维实体模型。并以低幅载荷强化与软化效应为理论基础,对新型风机增速箱输出轴进行空心结构设计。利用有限元软件 ABAQUS 对空心轴分析计算,结果表明其强度满足使用要求,验证了结构设计的有效性,提出一种修正寿命预估模型。该模型能够弥补现有模型忽略低幅载荷作用的缺陷,不仅考虑其对结构强度产生的循环强化与软化作用,而且对现有的 Miner 模型进行修正,加入载荷强化率 R ,材料因子 ϵ 等参数,拓宽模型的应用范围,提高了计算精度。利用新模型对输出轴的疲劳寿命进行估算,计算结果更加贴近实际工作寿命。该方法为试制 600kW 新型风机奠定了理论基础。

1 增速箱输出轴结构设计与优化

新型风机合成增速箱输出轴输出转速为 380 r/min,通过扭杆传递到地面,再由第二部分增速机构继续提高转速到 1 500 r/min,传递给发电机进行发电。新型风机增速箱的左半部分结构见图 1。输出轴为第一部分增速机构的竖直轴,作为增速箱工作过程中支撑齿轮、传递转速的部件,由于长期受到两对锥齿轮啮合力的共同挤压,其强度和可靠性直接影响着齿轮的传动精度和风机的工作性能。

输出轴结构采用阶梯轴形式,在高低轴段衔接部位、键槽等处容易产生应力集中,形成裂纹源区,最终导致疲劳断裂^[11]。由于常规设计存在较大的强度剩余,根据轴类零件的受载情况和循环强化特性,通过合理地减小结构尺寸,使材料强度潜力得到充分发挥,最终获得最佳累积强化效果。

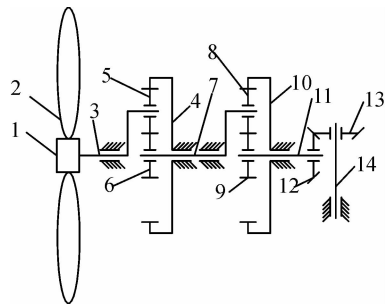


图1 双风轮合成增速箱传动系统结构简图(左半部分)

Fig. 1 Structure diagram of double wind wheel and synthesis speed-increasing gearbox transmission system(left part)

注:1—轮毂,2—叶片,3—主轴,4—一级行星架,5—一级行星轮,6—一级太阳轮,7—一级太阳轴,8—二级行星轮,9—二级太阳轮,10—二级行星架,11—二级太阳轴,12—三级输入锥齿轮,13—三级输出锥齿轮,14—输出轴

1.1 增速箱输出轴常规设计

输出轴材料为 40Cr,调制处理 229~269 HBS,静扭转强度为 1 532.6 MPa,疲劳极限 220.9 MPa。轴的传递功率 P 为 600 kW,取 $A_0=105$, $n=227$ r/min,扭矩 $T_1=12\ 176$ N·m。于是得到:

$$d_{\min} = A_0 \sqrt[3]{\frac{P}{n}} \quad (1)$$

式中: d_{\min} 为轴的最小直径(mm); A_0 为最小直径系数。

根据式(1)计算 $d_{\min}=145.177$ mm,考虑安全系数及键槽的影响,取 $d_{\min}=150$ mm。轴右端受力较大,右端取最小直径为 160 mm。设计计算后,输出轴结构见图 2。

1.2 输出轴强度校核

在实际工作中,输出轴主要承受扭矩,由于两锥齿轮对称布置,齿轮啮合对轴的弯曲应力可以忽略,因此,在强度校核过程中,只对其扭转强度验证计算。输出轴受一对齿轮的共同作用,校核时按双倍扭矩计算,扭矩 $T=2T_1=24\ 352$ N·m。轴的抗扭截面系数为:

$$W_T = \frac{\pi D^3}{16} \quad (2)$$

轴的扭转强度校核公式为:

$$\tau_T = \frac{T}{W_T} \approx \frac{9550000 \frac{P}{n}}{0.2D^3} \leq [\tau_T] \quad (3)$$

式中: W_T 为抗扭截面系数(mm^3); τ_T 为扭转切应力(MPa); T 为扭矩载荷,计算时按照双倍扭矩计算; n 为轴的转速(r/min); $[\tau_T]$ 为许用扭转切应力(MPa); D 为轴的最小直径(mm)。

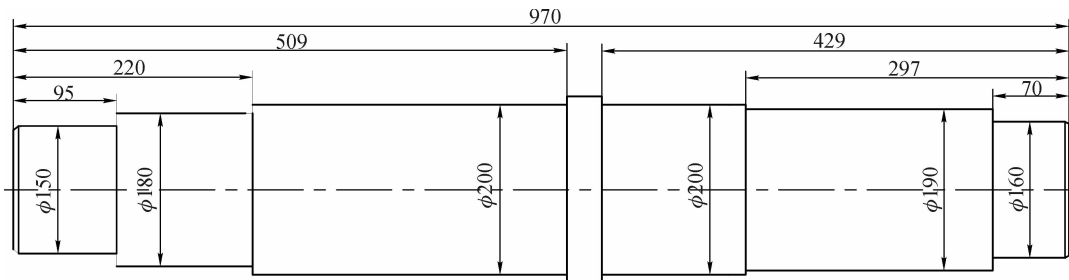


图 2 增速箱输出轴结构图

Fig.2 Output shaft structure of turbine gearbox

输出轴许用扭转应力为 $[\tau_T] = 50 \text{ MPa}$,由式(3)得 $\tau_T = 36.08 \text{ MPa} < [\tau_T]$,低于轴的许用扭转应力,满足使用要求。如果再考虑低幅载荷的强化效果,该输出轴设计尺寸有较大的强度剩余。

1.3 基于循环特性的空心轴设计

轴类零件的优化设计,主要有减小尺寸和空心结构两种方法。考虑40Cr材料的循环强化特性,对输出轴进行优化设计,使其能够发挥最佳强化效果^[12]。由于输出轴长度及布置形式基本不变,只能采用空心结构。通过空心化处理,既能保证输出轴有足够的强度抵抗外部载荷,又能减轻重量,提高材料利用率,选取空心轴内、外径之比 0.6 ^[13]。

空心轴的扭转强度校核公式如下:

$$\tau_T = \frac{T}{W_T} \approx \frac{9550000 \frac{P}{n}}{0.2D^3(1-\alpha^4)} \leq [\tau_T] \quad (4)$$

式中: α 为空心轴内外径之比。

由式(4)计算得 $\tau_T = 42.23 \text{ MPa} < [\tau_T]$,满足使用要求。

1.4 空心输出轴的有限元分析

利用ABAQUS对空心输出轴进行静力学分析,建立三维几何模型。由于最小轴径和键槽处是应力较大或应力集中区域,建模时需对这部分结构尺寸保持较高的精度,并在此处细化网格,共划分113 500个单元。根据输出轴的安装形式和受力情况,对轴左端面进行固定约束,在齿轮作用的两轴段添加扭转载荷,建立有限元模型见图3。

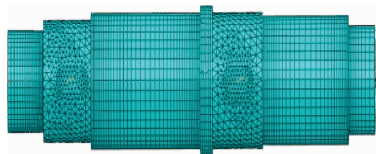


图 3 输出轴有限元模型

Fig.3 Finite element model of the output shaft

通过分析计算,得到输出轴的应力云图见图4。从图4中看出输出轴最大应力区域出现在左端最小轴径处和右端与键槽连接的轴肩处,轴径处的最大

应力值为 165.8 MPa ,轴肩处的最大应力为 146.5 MPa 。在这两个部位尺寸变化幅度较大,所以应力集中明显。安全系数取 1.4 ,低于传动轴材料的疲劳极限为 260.9 MPa ,所以空心轴设计符合强度要求。

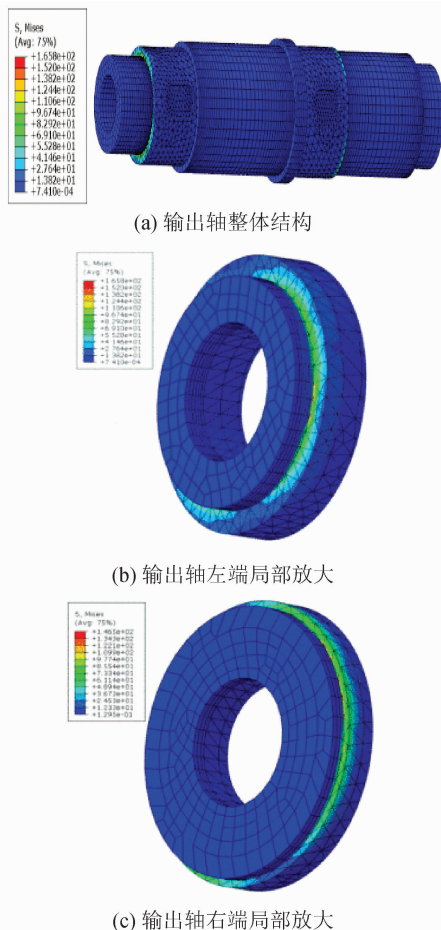


图 4 输出轴应力云图

Fig.4 Stress nephogram for the output shaft

2 基于循环特性的寿命预估模型

2.1 循环特性的微观机理

当金属材料在适当的低幅载荷作用下,材料内部的组织结构就会发生断裂,从而形成按一定顺序排列的新微观组织。循环强化是针对材料本身的特

性来说的,对于循环强化材料来说,组织断裂致使金属晶体缺陷密度增加,在体积不变的前提下,单位体积内抵抗外力的分子数增加,使结构得到强化。之后在载荷的重复作用下,新旧组织交错排列,数量达到一种动态平衡,此时组织强化达到峰值。由于新组织相对短小,不能有效的抵抗外部破坏,随着新组织的增多,强化效果不断削弱。继续增加循环次数或者突然增大载荷,会造成组织断裂,形成微观裂纹。

外部载荷对结构都会有不同程度的损伤作用,对于循环强化材料来说,低幅载荷对材料形成锻炼效应。开始时载荷强化速率远远大于损伤,随着循环次数的增加,载荷损伤速率也在不断提高,当达到最佳循环次数 n 时,强化与损伤速率达到动态平衡,累积强化作用也随之达到峰值。继续施加载荷,损伤速率大于强化,材料的强度不断降低,会造成组织断裂,形成微观裂纹,最终导致疲劳断裂。

2.2 寿命预估模型

基于金属材料在低幅载荷作用下的循环特性,提出一种修正 Miner 寿命预估模型,考虑载荷强化率 R ,材料因子 ϵ 等参数的影响,可以准确地预测循环强化的疲劳寿命,提高新模型的适用性。

结构在随机载荷作用下,强度与循环次数的变化规律见图 5。对于循环强化材料,由于低幅载荷的强化作用,当达到最佳循环次数 n 时,强化与损伤达到动态平衡,强化作用也随之达到峰值。

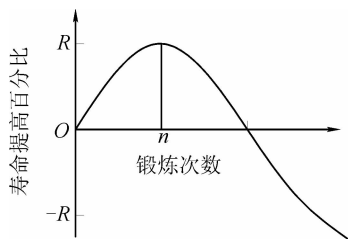


图 5 低载强化规律

Fig. 5 Rule of strengthening under low amplitude loading

结构在循环载荷作用下工作,首先考虑低幅载荷的强化作用,求得最佳循环次数及疲劳强度累积最大值。然后,考虑包括低幅载荷在内所有负载的损伤效果,认为到达最佳循环次数之后,强化作用保持不变,但所有载荷开始对结构有明显的损伤作用,损伤大于强化,强化作用逐渐减小,直至结构发生疲劳断裂。计算损伤利用低幅载荷累积强度提高后的 S-N 曲线计算。设构件在 s 级应力下工作,第 $1 \sim k$ 级为低幅载荷, $k+1 \sim s$ 级为高幅载荷。

按照应力谱施加各级应力,求得强化作用达到

最大值时的循环次数 n ,对应此时的循环块数 λ_0 为:

$$\lambda_0 = \frac{n}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (5)$$

继续施加各级应力,直到结构发生失效。设此时循环块数为 λ_1 ,根据 Miner 理论,整个循环块的累积损伤和为:

$$D = a(1+R)^\epsilon \quad (6)$$

由于低幅载荷对结构造成的损伤作用极小,忽略达到最佳循环次数 n 之前的载荷损伤,只考虑其强化作用。当循环次数超过 n 之后,所有载荷的损伤和为:

$$D = \lambda_1 \sum_{i=k+1}^s \frac{n_i}{N_i} \quad (7)$$

各级应力的循环次数和为:

$$N = (\lambda_0 + \lambda_1) \sum n_i \quad (8)$$

将式(5)~(7)代入式(8)可得总循环次数 N 为:

$$N = \frac{\left(n \sum_{i=k+1}^s \frac{n_i}{N_i} + a(1+R)^\epsilon \sum_{i=1}^k n_i \right) \sum n_i}{\sum_{i=k+1}^s \frac{n_i}{N_i} \sum_{i=1}^k n_i} \quad (9)$$

式中: R 为载荷强化率,即加载后疲劳强度增加百分率(对于循环软化材料,即加载后疲劳强度降低百分率); ϵ 为材料因子,对于循环强化材料取值 1; a 为 Miner 累积损伤理论取值; N_i 为各级应力作用下循环到破坏时的寿命; n_i 为各级应力下的循环次数。

式(9)为考虑载荷循环特性的修正寿命预估模型。基于低幅载荷强化与软化的两重性,新模型弥补了传统模型忽略低幅载荷对结构强度影响的不足,仅仅利用材料的疲劳性能参数就能准确的估算结构寿命,从而避免了重复代价高昂的疲劳试验。

2.3 模型验证

新型风机增速箱输出轴的工作载荷具有很强的随机性,随着风速的变化其受到的载荷也在不断变化,其中有很大一部分是低于轴类材料疲劳极限的低幅载荷。传统的风机轴类零件设计忽略低幅载荷的强化作用,低估了材料的抗疲劳能力,因此设计方案过于安全,造成很大的强度剩余。利用上文提出的新模型对输出轴进行优化设计及寿命预估,既实现了结构的轻量化设计,又能满足强度要求。

选取上文风机增速箱输出轴的工作载荷谱^[14-15],运用新模型对输出轴进行寿命预估,进而验证模型的正确性。图 6 为经处理后齿轮箱载荷谱,根据载荷谱计算出输出轴应力和疲劳寿命。

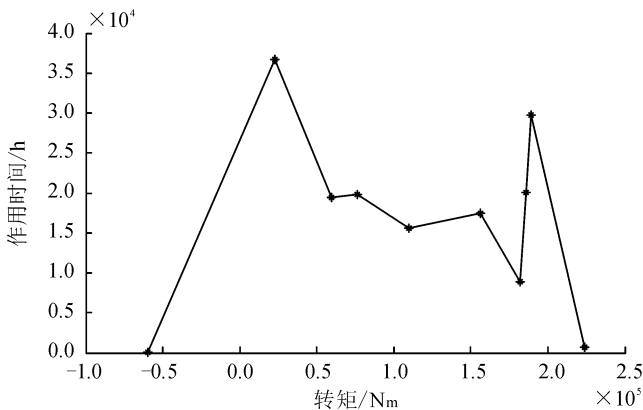


图6 增速箱工作载荷谱

Fig. 6 Working load spectrum of turbine gearbox output shaft

根据轴类零件疲劳寿命的相关研究可知,40Cr达到最佳强化效果时的循环次数为 $n=2 \times 10^5$ 次,载荷强化率 R 取 $0.2^{[16]}$ 。由于40Cr为循环强化材料,材料因子 ϵ 取为1, a 为Miner理论取值,累积损伤和为1,风机增速箱的设计寿命为20 y,每年工作300 d,每天工作20 h。分别将 n ,载荷强化率 R ,材料因子 ϵ ,Miner理论值 a 代入式(9),得到输出轴疲劳寿命估算值为 2.62×10^5 r/d,每分钟约转218 r。风机增速箱轴类零件的实际工作寿命均值约为230 r/min^[10]。由新模型计算结果可知,考虑强化特性的寿命预估模型得出的疲劳寿命值与实际工作寿命误差约为5.22%。

选取工程上广泛应用的Miner线性累积损伤理论对输出轴进行寿命估算,不考虑载荷的循环效应,临界疲劳损伤均值为1,计算得148 r/min,与实际寿命相差约为34.44%。结果表明,对比传统的寿命预估模型,新模型具有较高的预测精度,并且计算简单,对工程实践具有一定的指导意义。

3 结论

本文通过对新型风机增速箱输出轴的优化设计及寿命预估,可以得出以下结论。

1) 由于输出轴的传统设计方法存在较大的强度剩余,因此提出空心结构的设计方法,充分发挥传动轴的强度潜能。利用有限元软件进行分析计算,结果满足设计要求,验证了空心优化的合理性。

2) 提出一种修正寿命预估模型,综合考虑材料循环强化特性,载荷强化率 R ,材料因子 ϵ 等因素的影响,能更加准确地预估结构件在随机载荷作用下的疲劳寿命。利用新模型对空心轴进行寿命估算,与设计寿命相差仅为5.22%,具有较高的预估精度,运算简便、快捷。

参考文献:

- [1] 毛范海, 韩孟克, 董惠敏, 等. 一种兆瓦风电齿轮箱前机体结构轻量化设计[J]. 机械传动, 2015, (11): 50-53.
MAO Fanhai, HAN Mengke, DONG Huimin, et al. Structural lightweight design of a megawatt wind turbine front gearbox[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, (11):50-53.
- [2] 杨世强, 侯玉庆. 光伏板清洁装置横臂轻量化设计方法[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(2): 159-165.
YANG Shiqiang, HOU Yuqing. Lightweight design method for the cross arm of photovoltaic panels cleaning device[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(2): 159-165.
- [3] 宣安光, 朱才朝. 风电机组增速箱制造技术研究及进展[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(1):155-160.
XUAN Anguang, ZHU Caichao. Research and development of manufacturing technology on wind turbine gearbox[J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(1):155-160.
- [4] 沈岗, 向东, 牟鹏, 等. 风电装备整体式动力学建模与仿真分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(14):129-134.
SHEN Gang, XIANG Dong, MU Peng, et al. Integral dynamic modeling and simulation of wind turbine[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(14): 129-134.
- [5] 储军, 徐慧, 王有涛. 基于低幅载荷累积强化效果的传动轴轻量化设计[J]. 机械设计与制造, 2012, (5): 79-80.
CHU Jun, XU Hui, WANG Youtao. Lightweight design of drive shaft based on cumulative enhanced effect of low amplitude load[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012, (5):79-80.
- [6] 周志刚, 徐芳. 考虑强度退化和失效相关性的风电齿轮传动系统动态可靠性分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(11):80-87.
ZHOU Zhigang, XU fang. Dynamic reliability analysis of gear transmission system of wind turbine considering strength degradation and dependent failure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11):80-87.
- [7] WU Shangsheng, DENG Haiyan, DENG Hongjian, et al. Mechanism research and experiment of two-dimensional gearbox with output shaft rotating and reciprocating motion[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, (3).
- [8] ZHU Weiheng. Fracture failure analysis on gearbox output shaft of 800 kW wind turbine generator[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, (6).
- [9] SONGLIN Z, XI L. Lightweight design of vehicle com-

- ponents based on strengthening effects of low-amplitude loads below fatigue limit[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2012, 35(3): 269-277.
- [10] 高刚刚. 新型双风轮合成增速箱的设计与仿真分析及优化[D]. 兰州:兰州理工大学, 2017.
GAO Ganggang. Design, simulation analyses and optimization of a new speed-increasing gearbox for wind turbine with double rotors[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [11] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002.
- [12] 赵礼辉, 郑松林, 冯金芝. 基于低载强化特性的疲劳寿命估计方法[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(8): 115-122.
ZHAO Lihui, ZHENG Songlin, FENG Jinzhi. Fatigue life prediction based on simplified low-amplitude-load strengthening model[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(8):115-122.
- [13] 濮良贵, 纪名刚. 机械设计[M]. 第 8 版. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [14] 胥良. 基于载荷谱的兆瓦级风电齿轮箱动态特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
XU Liang. Dynamic characteristics research based on load spectrum of megawatt level wind turbine gearbox [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [15] 郑松林, 鞠方超, 冯金芝. 一种新的谱载荷寿命评估模型[J]. *机械强度*, 2014, 36(2):261-266.
ZHENG Songlin, JU Fangchao, FENG Jinzhi. A new fatigue life prediction model by random load spectrum [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2014, 36(2): 261-266.
- [16] 郑松林. 低幅载荷对汽车前轴疲劳寿命影响的试验研究[J]. *机械强度*, 2002, 24(4):547-549.
ZHENG Songlin. Studying the effect of low amplitude loading on fatigue life of truck front axle[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2002, 24(4):547-549.

(责任编辑 王绪迪)

(上接第 326 页)

- [19] 张晓辉, 余宁梅, 习岗, 等. 基于小波消噪的植物电信号频谱特征分析[J]. *西安理工大学学报*, 2011, 27(4): 411-416.
ZHANG Xiaohui, YU Ningmei, XI Gang, et al. The analysis on spectrum characteristic of plant electrical signal based on wavelet de-noising[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2011, 27(4): 411-416.
- [20] 李国臣, 于海业, 李强征, 等. 植物电位信号采集与处理方法的研究[J]. *农机化研究*, 2006, 6: 145-148.
LI Guochen, YU Haiye, LI Qiangzheng, et al. Discussion on method of measuring and proceeding plant physiological signals[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006, 6: 145-148.
- [21] 段晓杰, 王宝珠, 潘洪刚. 基于 LabVIEW 技术的虚拟小波消噪仪设计[J]. *国外电子测量技术*, 2005, 24(8): 18-21.
DUAN Xiaojie, WANG Baozhu, PAN Honggang. Design of virtual wavelet noise eliminator based on LabVIEW[J]. *Technology Electronic Measurement Technology*, 2005, 24(8):18-21.
- [22] 陈薇, 翁绍捷, 王玲玲, 等. 基于虚拟仪器和小波降噪的植物电信号测量系统的设计[J]. *中国农机化*, 2010, 231(5): 94-97.
CHEN Wei, WENG Shaojie, WANG Lingling, et al. Design of the measurement system for week electrical signal based of virtual instrument and wavelet de-noising[J]. *Chinese Agriculture Mechanization*, 2010, 231(5): 94-97.

(责任编辑 王绪迪)