

# 风电机组可靠性研究现状与发展趋势

李 焱<sup>1</sup> 朱才朝<sup>1</sup> 陶友传<sup>2</sup> 宋朝省<sup>1</sup> 谭建军<sup>1</sup>

1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆, 400030

2. 中船重工(重庆)海装风电设备有限公司, 重庆, 401122

**摘要:**对国内外风电机组失效模式和可靠性研究进展进行分析,对风电机组增速齿轮箱、轴承、发电机、叶片和润滑系统等关键零部件失效模式、失效原因及其检测方法进行归纳总结;分析了风电机组可靠性研究的常用方法和可靠性研究现状,给出了提高风电机组可靠性的研究重点、研究方法和措施。结合工程需求和研究现状,对风电机组可靠性研究趋势进行了分析,提出风电机组智能健康管理技术路线,该技术对降低风场运行维护成本和提高风电机组运行安全性具有重要意义。

**关键词:**风电机组;失效模式;可靠性;研究现状;发展趋势

中图分类号:TH12

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2017.09.021

## Research Status and Development Tendency of Wind Turbine Reliability

LI Yao<sup>1</sup> ZHU Caichao<sup>1</sup> TAO Youchuan<sup>2</sup> SONG Chaosheng<sup>1</sup> TAN Jianjun<sup>1</sup>

1. The State of Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing, 400030

2. CSIC(Chongqing) Haizhuang Windpower Equipment Co., Ltd., Chongqing, 401122

**Abstract:** The failure modes and research progresses of reliability for wind turbines at home and broad were analyzed. The failure modes, failure reasons and detection methods of key components in the wind turbines were summarized. Also, the frequently used methods of reliability analysis and research status of wind turbine reliability were analyzed. Then research focuses, research methods and measures to improve wind turbine reliability were presented. Combining with the engineering requirements and research status, the development tendency of wind turbine reliability was analyzed and the flowchart to investigate the smart health management technology of wind turbines was proposed. It is of great significance to reduce the costs of operations and maintenances and to improve the safety of wind turbines.

**Key words:** wind turbine; failure mode; reliability; research status; development tendency

## 0 引言

风能是当今世界最具发展前景和潜力的可再

生能源之一,资源充足且干净清洁<sup>[1]</sup>,到2015年底,全球累计风能发电能力已超过400GW。中国是风电装机规模最大的国家之一,装机能力已达到51473MW,占全球发电总能力的45.1%。2016年全国风电开发建设总规模(不含台湾省)为3083万千瓦(数据来自国家能源局),2050年我国风电装

收稿日期:2016-06-07

基金项目:重庆市重点产业共性关键技术创新专项(cstc2015zdcy-ztxx70012, cstc2015zdcy-ztxx70010);重庆市研究生科研创新项目(CYB16024)

ZHU Congrong, LI Wei, YU Tianming. Performance of Cast-iron Bonded Diamond Wheels in ELID Grinding Cemented Carbide[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2008(6):5-8.

[50] 周曙光,关佳亮,郭东明.ELID 镜面磨削技术应用[J].制造技术与机床,2001(6):37-39.

ZHOU Shuguang, GUAN Jialiang, GUO Dongming, et al. Application of ELID Mirror Grinding Technology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2001(6):37-39.

[51] 杨黎健,任成祖,靳新民.轴承套圈内圆在线电解修整磨削试验[J].中国机械工程,2011,22(2):212-214.

YANG Lijian, REN Chengzu, JIN Xinmin. Internal Cylindrical ELID Grinding Experiment of Bear-

ing Rings[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(2):212-214.

[52] INADA A, MIN S, OHMORI H. Micro Cutting of Ferrous Materials Using Diamond Tool under Ionized Coolant with Carbon Particles[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, 60(1):97-100.

(编辑 陈 勇)

**作者简介:**伍俏平,男,1981年生。湖南科技大学智能制造研究院副教授。主要研究方向为新型工具制备及高效精密磨削。发表论文30余篇,获发明专利6项。E-mail: meishanzhi1@sina.com。王 煜,男,1992年生。湖南科技大学智能制造研究院硕士研究生。瞿 为,男,1990年生。湖南科技大学智能制造研究院硕士研究生。邓朝晖,男,1968年生。湖南科技大学智能制造研究院教授、博士研究生导师。

机容量将达到 10 亿千瓦,风电成为发电主力。

风电机组是在波动风场环境中,实现风能捕获、传递和转换的复杂机电液一体化装备,其运行工况复杂多变,面临高温、高海拔、强沙尘、台风等多种极端恶劣环境条件,涉及多学科交叉领域,技术难度极大。随着风电机组装机数量不断增加、结构越来越复杂,其可靠性问题(如早期失效)变得非常突出<sup>[2]</sup>。风电机组的高失效率增加了运行维护(以下简称运维)成本,影响了风场的经济效益。对于工作寿命为 20 年的风电机组,运维成本大约占风场收入的 10%~15%;对于海上风电机组,运维成本更是高达 20%~25%<sup>[3]</sup>。高额运维成本增加了风场运营商的经济负担,也影响了风电市场竞争力,因此,开展风电机组可靠性评估和预测技术研究显得非常迫切。

本文总结了风电机组失效模式,重点介绍和分析了可靠性研究现状,并给出了风电机组可靠性研究的发展趋势和相应的技术路线,以及有待进一步研究的关键科学问题。

## 1 风电机组基本结构

风电机组是将风能转化为电能的重要装备。根据风轮结构及其在气流中的位置,风电机组主要有两种类型:水平轴风电机组(horizontal axis wind turbine, HAWT)和垂直轴风电机组(vertical axis wind turbine, VAWT)。研究表明,HAWT 比 VAWT 可靠<sup>[4]</sup>,被广泛运用于各种机型,其典型结构如图 1 所示。依据风电机组各部分在整个风机系统中所起的作用和安装位置,风电机组可以被分成转子系统、齿轮箱系统、发电机系统、塔筒系统、其他机械系统和其他电子系统六大系统。

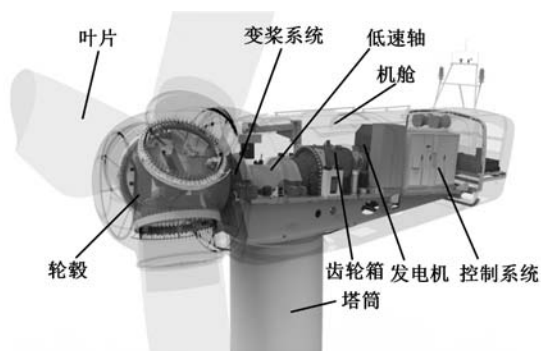


图 1 典型双馈式风电机组结构图

Fig.1 Structure of the doubly-fed wind turbine

现有风机多采用交流多相发电机,包括鼠笼式感应发电机(squirrel cage induction generator, SCIG)、绕线式感应发电机(wound rotor induc-

tion generator, WRIG)、双馈异步风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)、永磁式同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)、电励磁同步发电机(electrically excited synchronous generator, EESG)。不同制造商生产的同功率风机选用的发电机类型不同,同一制造商生产的不同功率风机采用的发电机也不同。海上风电机组一般比陆上风电机组容量大很多,叶片更长,多采用两级行星一级平行轴的功率传递形式,比陆上风电机组可靠性要求更严格。

## 2 风电机组失效模式

风电机组的失效频率与风机类型、工作环境密切相关,图 2 所示同一种风机工作在海上和陆地时不同的失效率情况<sup>[5]</sup>。可以看出关键与重要(以下简称“关重”)零部件的失效率要高于其他零部件,而同种零部件工作在海上比在陆地上更易失效。

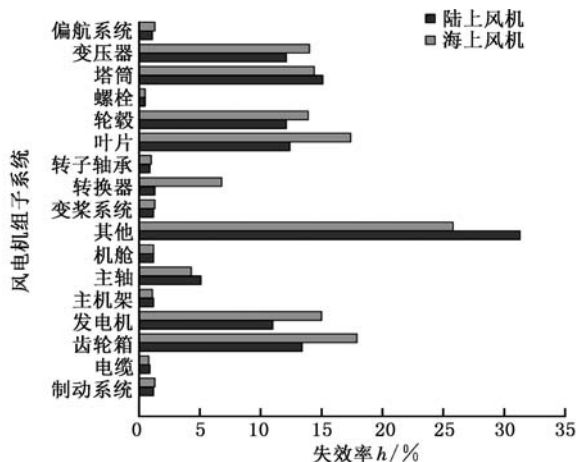


图 2 风电机组零部件失效率

Fig.2 Failure rates of components of wind turbines

对于风电机组传动系统,齿轮箱、发电机、叶片等关重零部件的失效率较高。齿轮箱的失效主要由齿轮、轴承的失效引起;发电机失效主要由轴承失效所致。风电机组关重零部件的失效模式、失效原因和检测方法见表 1<sup>[6]</sup>。

### 2.1 齿轮箱系统失效模式

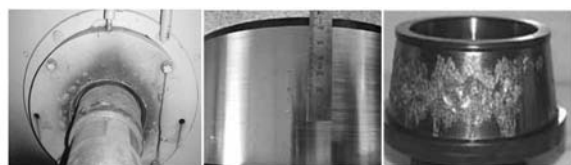
风电齿轮箱中任何一个零部件的失效都会产生较高的维修费用和因停机而带来的巨大经济损失,对于海上风电机组表现得更加明显。齿轮箱最常见的失效形式有轴承失效、齿轮疲劳、磨损、断裂失效、润滑不足等。图 3 所示为齿轮箱轴承的三种失效模式,其中疲劳失效较常见。齿轮箱中连接前箱体、齿圈和中箱体的螺栓也时有失效,主要是因为低速级一般为斜齿轮,再加上随机风载作用,箱体承受较大轴向力,而这些力全部作用在均布的螺栓上,受力不均很容易导致螺栓断裂

表 1 风电机组关重零部件失效模式

Tab.1 Failures modes of the key components of wind turbines

对象	功能	失效模式	失效原因	检测方法
转子叶片	将风能转化为机械能	叶片断裂,边缘开裂,卡死,电机故障,变桨轴承失效	疲劳载荷超过设计载荷,极端载荷,环境影响(结冰,腐蚀,雷击等),不平衡,气动不对称	变桨轴承处安装振动传感器,叶片上加装应力测试装置
主轴	传递低速大扭矩	断裂	疲劳载荷过大,发电机运行在非设计工况,电网掉电	低速传感器、轴承振动传感器
偏航系统	机舱绕塔筒转动	轴承摩擦增大,偏航角偏离,偏航齿轮齿面磨损或断裂	滚动物体破裂,润滑不足,轴承内外圈磨损	偏航误差信号
齿轮箱	将风能转化高速旋转的机械能	轮齿失效(疲劳点蚀,磨损,断裂)	疲劳载荷过大,超过设计载荷,材料使用不当,乏油,电网掉电,齿轮偏心,轴承故障	振动传感器
高速轴	高速轴停转并保持,以实现停机	过低或过高的制动扭矩	随机风载,安装误差	转速传感器
高速级齿轮	高转速输出机械能	磨损,弯曲疲劳	润滑不足,安装误差,高周循环应力	定期油位检查
花键	传递运动和动力	微动摩擦腐蚀	润滑不足,均载系数不当	均载测试分析
轴承	变滑动为滚动	过热,磨损,破裂	润滑不足,疲劳载荷,极限载荷作用,杂质,塑性变形	定期油位检查
轮毂组件	传递来自叶片的扭矩	结构失效,螺栓失效	超过轮毂设计载荷,预载荷过大,应力腐蚀	转子轴承加速度传感器,定期检查螺栓
油封	保持主轴承内油液不泄漏	油封边缘磨损或丢失	安装损伤,磨损	低油位开关保护
过滤	阻止杂质进入油液,同时过滤掉油液中杂质颗粒	箱体泄漏	箱体或密封件破损	低油位开关保护
发电机	产生电能	过热,故障,轴承故障、卡死,超速,转子损坏,定子故障	过载,环境影响,安装误差,疲劳,控制系统失效,机械结构故障,电网掉电	保护装置、超速检测、测试
润滑	齿轮、轴承润滑	漏油,油温过高或过低	油泵失效,油管堵塞,转向阀失效,泄漏,环境温度过高,热交换失效	油温传感器、空气温度、油液流量开关

失效。图 4 为齿轮箱螺栓失效图,图中断面光滑,属于疲劳断裂。从螺母支撑面算起,断裂部位为第一圈螺纹处(图 4b、图 4c),测试发现,约有 1/3 的载荷集中在第一圈,而试验证明,开卸荷槽、适当的螺纹锥度和螺纹根部圆角半径可以增加螺栓承载能力,提高可靠性。



(a) 润滑不足 (b) 疲劳失效 (c) 磨损失效

图 3 齿轮箱轴承失效

Fig.3 Faults of the wind turbine bearings



(a) 断裂部位 (b) 螺杆部分 (c) 螺母部分

图 4 齿轮箱螺栓失效

Fig.4 Bolt faults of wind turbine gearbox

## 2.2 发电机失效模式

发电机与输出时变机械能的齿轮箱相连,发

电机承受来自齿轮箱的时变扭矩和转速,使得发电机成为风电机组失效率较高的关重件之一。导致发电机失效的根本原因有设计、操作、维修和外界环境等。发电机的失效率与整机容量、工作环境等有关。图 5 所示为不同容量风电机组发电机零部件失效率情况。不同故障原因会导致发电机不同的失效模式,这些原因包括设计、操作、维修和外界环境,见表 2。图 6 所示为发电机三种典型失效模式,其中轴承失效最为常见。

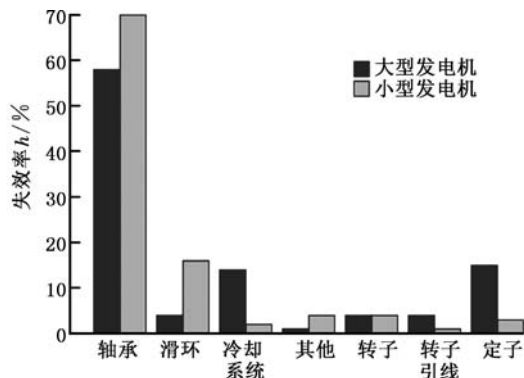


图 5 不同容量发电机零部件失效率统计

Fig.5 Component failure rates of different power generators

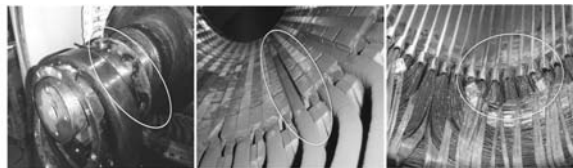
## 2.3 转子叶片失效模式

叶片长期承受着交变应力作用 and 环境影响,

表 2 发电机失效模式

Tab.2 Failure modes of the generator

起因	失效模式
设计原因	①电绝缘不足;②零部件固定不够;③瞬时轴电压过高;④转子导线故障;⑤结构过于复杂
操作原因	①安装不当;②电压异常;③接地不当;④超速
维修原因	①冷却系统失效;②轴承失效;③转子引线故障;④转子偏心
环境原因	①随机风载;②交变热应力;③污染;④电磁干扰

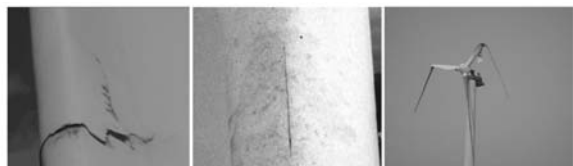


(a)轴承失效 (b)磁损 (c)线圈污染

图 6 发电机失效模式

Fig.6 Faults of the generator

失效率较高,主要的失效模式有疲劳、开裂、前后缘裂纹、前缘腐蚀、补强裂纹、褶皱、内腔缺陷、盖板故障、磨损、卡死、结冰和传感器故障,严重时会发生断裂,其中疲劳失效是风电机组叶片的主要失效模式,如图 7 所示。叶片维修困难,维修成本高,所以研究叶片失效模式、可靠性与载荷内在关系和失效机理对提高叶片可靠性具有重要意义。



(a)后缘裂纹 (b)前缘裂纹 (c)叶片断裂

图 7 叶片失效模式

Fig.7 Failure modes of the blade

### 3 风电机组可靠性研究

可靠性是指零部件(或系统)在规定的条件和时间内,完成规定功能的可能性。对于不可修复系统,可靠性的评价尺度是可靠度;对于可修复系统,可靠性的评价尺度是可用度。风电机组传动系统零部件既有可修复系统,又有不可修复系统。不可修复系统,如齿轮、轴承等,一旦损坏就需要替换;可修复系统,如螺栓松动、油管堵塞等。因此,风电机组的可靠性应综合考虑可靠度和可用度,以有效度作为可靠性评价尺度。图 8 示出了不同零部件失效后停机时间和失效率之间的关系,可以看出零部件的失效率越高,失效后需要的停机时间相对越短;反之,失效率较低的零部件,失效后所需停机时间反而较长。

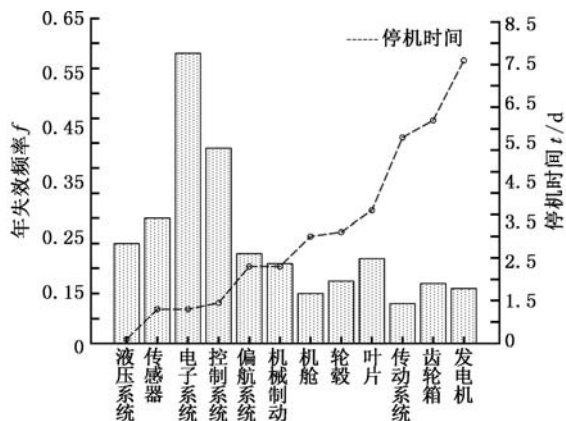


图 8 零部件年失效率与停机时间的关系

Fig.8 Relation between the failure rate and the downtime

风电装机容量逐年攀升,陆上风电基本饱和,而海上风电还处于起步阶段。不同主机企业生产的风机可靠性参差不齐,尚没有一个统一的评价标准。针对风电机组可靠性低的问题,国内外学者提出了各种研究方法,但大部分仅局限于齿轮传动系统,忽略了整机其他系统相互作用影响,采用简单串联或并联的方法计算可靠度,效果有限。针对风电机组运维成本高、难度大的问题,研发风电场组群智能健康管理系统,制定维修策略,可有效减少计划外维修次数,提高风电机组可靠性。

#### 3.1 风电机组可靠性分析方法

常用的可靠性分析方法主要有基于数据库的统计分析和基于载荷的应力-强度干涉理论两种。

##### 3.1.1 基于数据库的统计分析

风电机组服役期内的故障率是随时间变化的,很难用一个数学函数来表示,但可修复系统服役期内故障率近似服从浴盆曲线,如图 9 所示。其中,  $h(t)$  为失效率。威布尔分布、Gamma 分布和指数分布是风电机组可靠性分析中三个重要分布。三参数威布尔故障率分布函数可表示为<sup>[7]</sup>

$$F(t) = \lambda \left[ 1 - \exp\left(-\left(\frac{t-t_0}{\eta_1}\right)^{\beta_1}\right) \right] + (1-\lambda) \left[ 1 - \exp\left(-\left(\frac{t-t_0}{\eta_2}\right)^{\beta_2}\right) \right] \quad (1)$$

其中,  $t$  为时间,  $t > 0$ ;  $t_0$  为位置参数;  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为威布

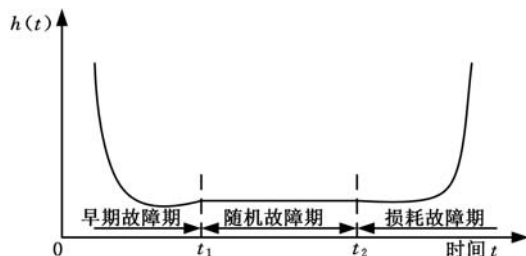


图 9 可修复系统失效率浴盆曲线

Fig.9 Bathtub curve of the failure rate of the repairable system

尔分布形状参数,且  $\beta_1\beta_2 > 1$ ;  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为尺度参数;  $\lambda$  为权重系数。取  $t_0 = 0$ ,  $\eta_1 = 10$ ,  $\eta_2 = 100$ ,  $\beta_1 = 5$ ,  $\beta_2 = 5$ 。

图 10 是故障概率密度函数图,图中出现两个峰值,分别表示浴盆曲线早期故障期和损耗故障期,在这两个阶段故障率较高。权重系数分别取 0.1、0.2、0.3 时,故障概率密度函数曲线仅在峰值处有较大变化,选取合适的权重系数以适应不同工作环境的风电机组故障率变化情况。图 11 所示为失效率随时间的变化情况,早期阶段出现一个峰值表示风电机组处于跑合阶段,磨损较大,失效率出现波动,之后便趋于稳定,后期失效率会越来越高。不同权重系数的失效函数曲线仅在峰值处有差异,这与风电机组容量和工况有关。图 12 是可靠度函数图,图中大致有三个阶段:阶段 I 可靠度急剧下降,主要是由于新装的风电机组对环境和载荷的适应;阶段 II 可靠度较为稳定,属于稳定磨损阶段;阶段 III 可靠度又开始急剧降低,表明风电机组已进入损耗故障期,可靠度较低。因此,浴盆曲线能较好地模拟风电机组整个服役期内失效率的变化情况。

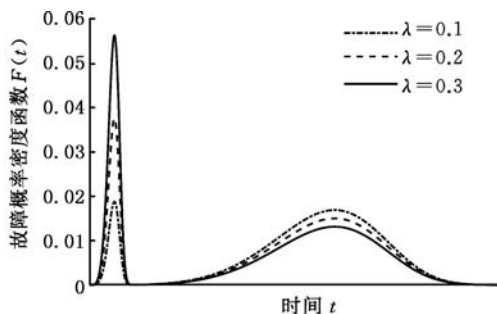


图 10 故障概率密度函数

Fig.10 Fault probability density function

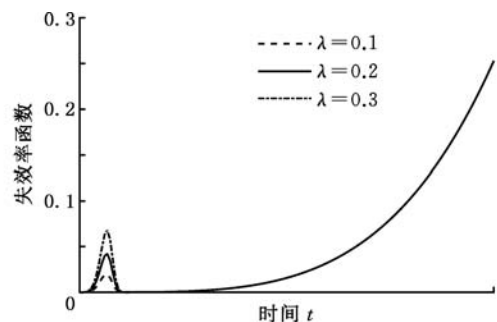


图 11 失效率函数图

Fig.11 Diagram of failure rate function

### 3.1.2 基于载荷的应力-强度干涉理论

风电齿轮箱中零部件的随机载荷和疲劳强度均服从正态分布<sup>[8]</sup>,则零部件应力和强度的概率密度函数分别为

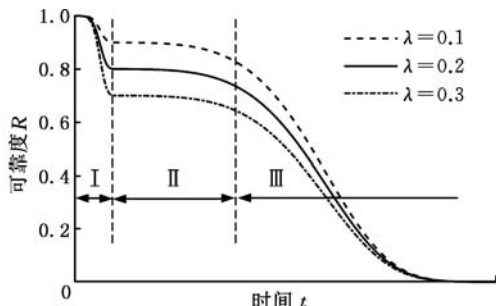


图 12 可靠度函数图

Fig.12 Diagram of the reliability function

$$f(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{S - \mu_s}{\sigma_s}\right)^2\right) \quad (2)$$

$$g(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\delta} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta - \mu_\delta}{\sigma_\delta}\right)^2\right) \quad (3)$$

式中,  $S$  为随机变量;  $\sigma_s$  为应力随机变量的标准差;  $\mu_s$  为应力随机变量的期望;  $\delta$  为强度随机变量;  $\sigma_\delta$  为强度随机变量的标准差;  $\mu_\delta$  为强度随机变量的期望。

根据应力-强度干涉理论定义,随机变量  $z = \delta - S$  也服从正态分布,所以应力-强度干涉模型可靠度

$$R = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left(-\frac{(z - \mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right) dz \quad (4)$$

式中,  $\sigma_z$  为  $z$  的标准差;  $\mu_z$  为  $z$  的期望。

由齿轮齿根弯曲疲劳应力和疲劳强度的均值和方差,利用可靠度公式计算齿轮的动态可靠度,图 13 所示为风电齿轮箱高速级小齿轮可靠度,前 20 000 h 可靠度下降较快,之后变化趋于平缓。

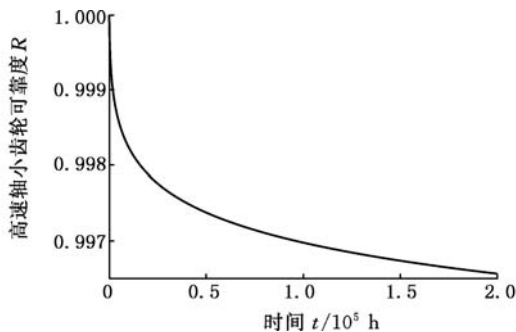


图 13 高速级小齿轮动态可靠度

Fig.13 Dynamic reliability of the high speed gear

### 3.2 风电机组可靠性研究进展

国内外对风电机组可靠性的研究从分析对象的角度大致可以分为两类:①基于载荷的可靠性分析;②基于数据库的可靠性统计分析。基于载荷的可靠性分析流程如图 14 所示。根据疲劳损伤累积理论,分别计算出测试载荷和设计载荷下风电机组的疲劳寿命和可用度,进行可靠性评价。

基于风场数据库的可靠性统计分析国外研究较多。ARABIAN-HOSEYNABADI 等<sup>[9]</sup>考虑关键零部件和风电机组失效率影响,比较了可靠性

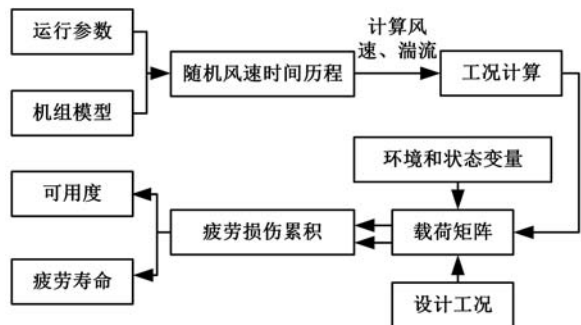


图 14 基于载荷的可靠性分析流程

Fig.14 Flow chart of reliability analysis based on load

分析软件(Relex)与失效模式和影响分析(failure mode and effects analysis, FMEA)方法的计算结果。GUO 等<sup>[10]</sup>提出了一种新的数学模型和算法,解决了风场失效数据不完整问题,证明三参数威布尔模型能够获得精确风机可靠性走势。TAVNER 等<sup>[4]</sup>采用统计方法分析了某风机 11 年的运行数据。ZHANG 等<sup>[11]</sup>将大数据分析技术运用到风电机组可靠性分析中,依据贝叶斯网络理论建立了离散状态模型,研究了有效寿命的预测方法。

美国可再生能源国家实验室(national renewable energy laboratory, NREL)在风电齿轮箱可靠性方面做了大量研究工作。SINGH 等<sup>[12]</sup>利用 FAST 和 MATLAB-Simulink 联合仿真,分析了电网和风电机组间的相互影响。NREL 提出通过主机厂、运营商、齿轮箱和轴承生产商、润滑剂企业和风场所有者多方合作的方式来提高齿轮箱可靠性<sup>[13]</sup>。KELLER 等<sup>[14]</sup>研究了发电机安装误差、齿轮箱与发电机的耦合刚度和齿轮箱运动等对高速级轴、轴承和发电机的影响。SMOLDERS 等<sup>[15]</sup>建立了齿轮箱可靠性预测模型,使用风场失效数据提高了可靠性预测准确性。AL-TUBI 等<sup>[16]</sup>使用数据采集与监控系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)采集的数据,基于 ISO 标准预测和评价了风电齿轮箱轮齿微点蚀失效风险。FENG 等<sup>[17]</sup>使用 SCADA 和状态监测系统(condition monitoring system, CMS)测试数据,开发新算法进行风电齿轮箱健康状态诊断。NEJAD 等<sup>[18]</sup>用 S-N 曲线方法计算了在额定功率下齿轮和轴承的疲劳损伤,并提出了一种基于可靠性的维修策略。周志刚等<sup>[19]</sup>通过齿轮箱动力学模型提取载荷矩阵,应用应力-强度干涉理论,建立了齿轮传动系统可靠性模型,分析了传动系统动态可靠度。谢里阳等<sup>[20]</sup>研究了复杂载荷的不确定性表征,建立了风电机组疲劳可靠性分析、计算和评估的完整方法和模型。

发电机是风电机组的关键部件,它的可靠性决定着发电量和整个传动系统的安全性。GIORSETTO 等<sup>[21]</sup>用统计学方法,考虑随机风载引起的变功率和变载荷输出对风力发电机可靠性的影响。目前的变桨距控制技术和无刷双馈发电机的变速恒频控制技术,改善发电机受力状态对提升发电机可靠性具有积极作用。TOFT 等<sup>[22]</sup>将可靠性设计方法运用到叶片设计中,考虑了叶片实际承受的疲劳载荷和随机载荷,在单一失效模式下估计叶片可靠性。DIMITROV 等<sup>[23]</sup>使用模型修正系数法和一阶可靠性方法,研究了不同失效模式下可靠性精确计算方法和系统结构失效概率。工程上为了提高叶片可靠性,在叶片和前后缘合模缝处添加加强布,不仅可以提高强度,而且可以隔离污染,加强布和定期维修如图 15 所示。



(a) 模线加强布

(b) 定期维修

图 15 提高叶片可靠性举措

Fig.15 Measures of improving blade reliability

### 3.3 风电机组可靠性研究趋势

可靠性理论经过多年发展渐趋成熟,但针对风电机组的可靠性研究尚处于初级阶段,研究深度不够,影响因素考虑不全面,手段有限,且研究成果缺乏工程应用价值。未来风电机组可靠性研究正朝着智能健康管理方向发展,它体现在以下三个方面:

(1)一般零部件故障远程诊断技术。风电机组零部件重要程度取决于零部件故障频率及其引起的维修时间。一般零部件失效率较低,失效后不会引起太长的停机时间,为降低维护成本,保证一般零部件正常使用,需要研发一般零部件故障远程诊断技术。KUSIAK 等<sup>[24]</sup>分析 5 min 采样间隔的 SCADA 数据,对风电机组零部件故障进行分类和预测,减少了计划外维修次数。朱才朝等<sup>[25]</sup>基于 WindCon 状态监测系统,对某兆瓦级风电齿轮箱进行了远程实时在线测试与评价。

图 16 所示为一般零部件故障远程诊断系统技术路线。目前风机大多装有 SCADA 和 CMS 两套系统,但两者相互独立,不能实现测试结果的相互佐证。应用现场总线通信技术,实现故障录

波器与本地控制器的快速通信及数据存储,利用互联网技术、移动存储等技术实现故障录波、远程访问及本地控制器的远程操作记录功能,开发基于 SCADA 和故障录波的辅助诊断软件,进行一般零部件故障远程诊断,实现有计划维修。

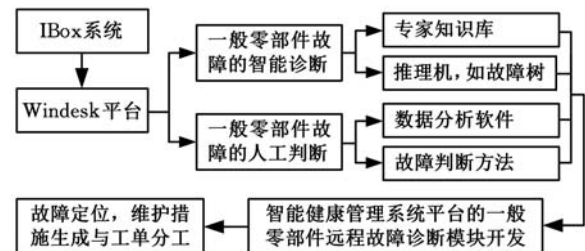


图 16 一般零部件故障远程诊断系统技术路线

Fig.16 Technology route of general component fault diagnosis system

(2)关重零部件健康状态预测技术。关重零部件相对一般零部件失效频率更高,失效所需维修时间更长,故需研发关重零部件健康状态预测技术,图 17 所示为关重零部件状态在线预测系统技术路线。周志刚等<sup>[26]</sup>通过建立风力发电机随机风速动力学模型,提取齿轮副动态啮合力和轴承动态接触力时间历程,应用雨流计数法、Goodman 公式、线性累积损伤法则和材料的  $P-S-N$  曲线,预测了各齿轮和轴承的疲劳寿命。LIANG 等<sup>[27]</sup>应用有限元方法分析主轴轴承在不同工况下径向和轴向受力情况,确定了轴承危险位置,获得了轴承的  $S-N$  曲线,根据 Goodman 公式和疲劳损伤累积法则,预测主轴轴承的疲劳寿命和健康状态。

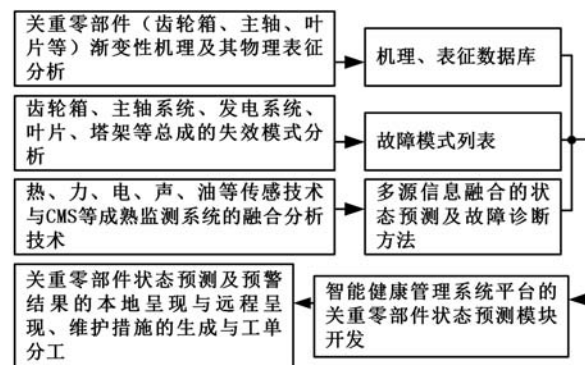


图 17 关重零部件状态在线预测系统技术路线

Fig.17 Technology route of key component diagnosis system

(3)整机寿命管理技术。图 18 所示为整机寿命管理系统技术路线。基于疲劳损伤累积理论,结合实测时序疲劳载荷,并根据零部件更换及传感器故障等插补值进行修正,得到各零部件剩余寿命,进而实现整机寿命的有效管理。图 19 所示为风电机组寿命状态与疲劳损伤关系曲线,通过寿命有效管理,使风电机组疲劳损伤值低于设计

值,从而使风电机组服役时间超过 20 年设计寿命,提高了利用率。

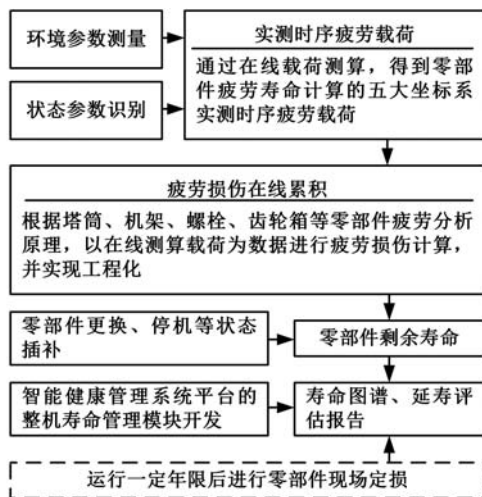


图 18 整机寿命管理系统技术路线

Fig.18 Technology route of life management system of the wind turbine

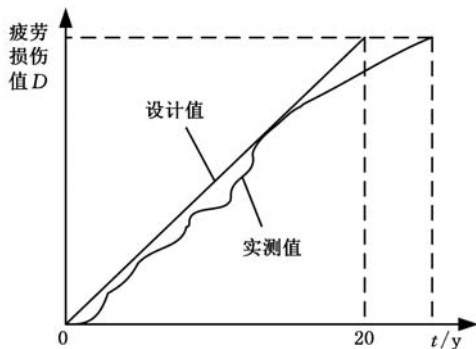


图 19 风电机组寿命管理

Fig.19 Wind turbine life management

在整机寿命管理方面,MANUEL 等<sup>[28]</sup>利用风场记录的大数据,采用统计方法分析了外界环境对风电机组可靠性的影响,研究结果可以有效指导风机设计和维修,提高整机使用寿命。SM-ARSLY 等<sup>[29-30]</sup>提出了通过一套集成状态监测系统方案,它能自动进行数据采集、分析和存储,进行风电机组结构可靠性评价,制定有效的运行维护策略,从而实现全生命周期管理。

#### 4 展望

针对风电行业最关心的可靠性问题,国内外学者提出了很多研究方法,但大部分局限于齿轮传动系统,忽略了整机其他系统相互作用影响,采用简单串并联的方法计算可靠度,效果有限。本文在结合风场测试数据分析结果和主机厂、风场实地调研的基础上,指出目前风电机组可靠性研究主要存在以下几个方面问题。

(1)基于风电机组疲劳寿命的可靠性研究。

疲劳失效是风电机组主要失效模式,所以需要研究整机的疲劳寿命和可靠性,根据风机动力学模型和运行参数,考虑随机风速和各关重零部件失效相关性,计算风电机组传动系统各关重零部件载荷和接触应力矩阵,同时考虑风机工作环境,分析关重零部件疲劳损伤累积。另外,在设计工况下,分析风电机组疲劳寿命和可靠性,并与理论计算结果进行对比,验证设计可靠度与理论计算值之间的差距,对指导风电机组设计和可靠性增长试验具有重要意义。

(2) 零部件健康状态渐进式变化机理及物理表征研究。根据风电机组关重零部件功能和机构特点,结合所受载荷和故障统计数据,研究其健康状态的渐进式变化机理,寻求与健康状态相关的物理表征,确定故障状态物理表征的趋势模型和阈值,对零部件或系统可靠性作出评价和预测。

(3) 基于整机动力学可靠性研究。建立风电机组从叶片到地基的传动系统动力学模型,在变风速、海浪等影响的情况下,研究风电机组结构和传动系统动态可靠性,进而对整机的运行可靠性进行评估;而现有可靠性研究均忽略了海浪对基础和塔筒的影响,误差较大,所以急需一套考虑海浪、海风影响的风电机组可靠性评估和预测工程模型和试验方法。

(4) 多状态系统可靠性研究。风电机组经常运行在多种工况交替变化情况下,失效模式多样,现有研究仅考虑一种工况和失效模式,不能反映风电机组实际运行情况;故研究多工况及多失效模式下风电机组传动系统的疲劳损伤、多因素相关条件下的系统可靠性和疲劳寿命预测模型和方法,对于提高可靠性评估精度、指导工程实际具有重要意义。

(5) 研发可靠性在线评估系统。现有风机大多均装有 SCADA 和 CMS 系统,但两者相互独立,不能实现测试结果的相互佐证。基于现有 SCADA 系统和 CMS 系统,融合两套测试数据,从中提取特征数据,通过无线传输系统,结合可靠性工程模型和软硬件设备在线进行实时动态可靠性评估和预测,对于降低运维成本、提高风场运行效率具有重要意义。

#### 参考文献:

[1] HANSEN A, IOV F, BLAABJERG F, et al. Review of Contemporary Wind Turbine Concepts and Their Market Penetration[J]. Wind Engineering, 2004, 28(3): 247-263.

- [2] PÉREZ J M P, MÁRQUEZ F P G, TOBIAS A, et al. Wind Turbine Reliability Analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 23(23): 463-472.
- [3] LU B, LI Y, WU X, et al. A Review of Recent Advances in Wind Turbine Condition Monitoring and Fault Diagnosis [C]//Power Electronics and Machines in Wind Applications. Pemwa, 2009: 1-7.
- [4] TAVNER P, SPINATO F, BUSSEL G J W V, et al. Reliability of Different Wind Turbine Concepts with Relevance to Offshore Application [C]//Proceedings of European Wind Energy Conference. Brussels, 2008: 1-10.
- [5] SHAFIEE M. A Fuzzy-FMEA Risk Assessment Approach for Offshore Wind Turbines[J]. International Journal of Prognostics & Health Management, 2013, 4(S2): 1-10.
- [6] General Electric Company. Mod 1 Wind Turbine Generator Failure Modes And Effects Analysis[R]. Washington, D.C.: NASA, 1979.
- [7] KLUTKE G-A, KIESSLER P C, WORTMAN M. A Critical Look at the Bathtub Curve [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2003, 52(1): 125-129.
- [8] 刘波. 基于零部件寿命相关的风电齿轮箱可靠性建模[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- LIU Bo. Reliability Modeling for Wind Turbine Gearbox Based on Considering the Failure Correlation Existed in Components[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [9] ARABIAN-HOSEYNABADI H, ORAEE H, TAVNER P. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for Wind Turbines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(7): 817-824.
- [10] GUO H, WATSON S, TAVNER P, et al. Reliability Analysis for Wind Turbines with Incomplete Failure Data Collected from after the Date of Initial Installation[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(6): 1057-1063.
- [11] ZHANG X, KANG J, JIN T. Degradation Modeling and Maintenance Decisions Based on Bayesian Belief Networks[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2014, 63(2): 620-633.
- [12] SINGH M, MULJADI E, JONKMAN J, et al. Simulation for Wind Turbine Generators—with FAST and MATLAB-Simulink Modules [R]. Golden; United States; National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2014.
- [13] OYAGUE F, BUTTERFIELD C, SHENG S. Gearbox Reliability Collaborative Analysis Round Robin[R]. Golden; National Renewable Energy

- Laboratory, 2009.
- [14] KELLER J A, GUO Y, SETHURAMAN L. Gearbox Reliability Collaborative Investigation of Gearbox Motion and High-speed-shaft Loads[R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2016.
- [15] SMOLDERS K, LONG H, FENG Y, et al. Reliability Analysis and Prediction of Wind Turbine Gearboxes[C]// European Wind Energy Conference and Exhibition, Warsaw, 2010:2660-2682.
- [16] AL-TUBI I S, LONG H. Prediction of Wind Turbine Gear Micropitting under Variable Load and Speed Conditions Using ISO/TR 15144-1: 2010 [J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science 1989-1996, 2013, 227 (9): 1898-1914.
- [17] FENG Y, QIU Y, CRABTREE C J, et al. Use of SCADA and CMS Signals for Failure Detection & Diagnosis of a Wind Turbine Gearbox[J]. European Wind Energy Conference and Exhibition, Brussels, 2011:17-19.
- [18] NEJAD A R, GAO Z, MOAN T. Fatigue Reliability-based Inspection and Maintenance Planning of Gearbox Components in Wind Turbine Drivetrains[J]. Energy Procedia, 2014, 53:248-257.
- [19] 周志刚, 秦大同, 杨军, 等. 考虑失效相关性的风力发电机齿轮传动系统动态可靠性分析[J]. 太阳能学报, 2013, 34(7):1212-1219.  
ZHOU Zhigang, QIN Datong, YANG Jun, et al. Time-dependent Reliability Analysis of Gear Transmission System of Wind Turbine Considering Dependent Failure[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(7):1212-1219.
- [20] 谢里阳, 刘建中, 吴宁祥, 等. 风电装备传动系统及零部件疲劳可靠性评估方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(11):1-8.  
XIE Liyang, LIU Jianzhong, WU Ningxiang, et al. Fatigue Reliability Evaluation Method for Gearbox Component and System of Wind Turbine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11):1-8.
- [21] GIORSETTO P, UTSUROGI K F. Development of a New Procedure for Reliability Modeling of Wind Turbine Generators[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, PAS-102 (1):134-143.
- [22] TOFT H S, SØRENSEN J D. Reliability-based Design of Wind Turbine Blades [J]. Structural Safety, 2011, 33(6):333-342.
- [23] DIMITROV N, FRIIS-HANSEN P, BERGGREEN C. Reliability Analysis of a Composite Wind Turbine Blade Section Using the Model Correction Factor Method: Numerical Study and Validation[J]. Applied Composite Materials, 2013, 20(1):17-39.
- [24] KUSIAK A, LI W. The Prediction and Diagnosis of Wind Turbine Faults [J]. Renewable Energy, 2011, 36(1):16-23.
- [25] 朱才朝, 胥良, 马飞, 等. 兆瓦级风电齿轮箱远程实时在线测试及评价 [J]. 振动与冲击, 2012, (20):17-22.  
ZHU Chaichao, XU Liang, MA Fei, et al. Remote Real-time Online Testing and Evaluation for a Megawatt Level Wind Turbine Gearbox [J]. Journal of Vibration & Shock, 2012, 31(20):17-22.
- [26] 周志刚, 秦大同, 杨军, 等. 随机风载作用下风力发电机齿轮传动系统疲劳寿命预测[J]. 太阳能学报, 2014, 35(7):1183-1190.  
ZHOU Zhigang, QIN Datong, YANG Jun, et al. Fatigue Life Prediction of Gear Transmission System of Wind Turbine under Stochastic Wind Load [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014, 35(7): 1183-1190.
- [27] LIANG Y, AN Z, LIU B. Fatigue Life Prediction for Wind Turbine Main Shaft Bearings[C]//International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. Chengdu, 2013:888-893.
- [28] MANUEL L, NGUYEN H H, BARONE M F. On the Use of a Large Database of Simulated Wind Turbine Loads to Aid in Assessing Design Standard Provisions[C]//Proceedings of the 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Grapevine, 2013:1-9.
- [29] SMARSLY K, HARTMANN D, LAW K H. An Integrated Monitoring System for Life-cycle Management of Wind Turbines [J]. Smart Structures & Systems, 2013, 12(2):209-233.
- [30] SMARSLY K, LAW K H, HARTMANN D. Towards Life-cycle Management of Wind Turbines Based on Structural Health Monitoring[C]//International Conference on Performance-based Life-cycle Structural Engineering, Hong Kong, 2012:1-9.

(编辑 陈 勇)

作者简介: 李 焱, 男, 1989 年生. 重庆大学机械工程学院博士研究生. 主要研究方向为风电机组可靠性和寿命预测. E-mail: yao\_li\_@outlook.com. 朱才朝(通信作者), 男, 1967 年生. 重庆大学机械传动国家重点实验室教授、博士研究生导师. E-mail: cczhu@cqu.edu.cn. 陶友传, 男, 1966 年生. 中船重工(重庆)海装风电设备有限公司总工程师. 宋朝香, 男, 1983 年生. 重庆大学机械传动国家重点实验室副教授. 谭建军, 男, 1991 年生. 重庆大学机械传动国家重点实验室博士研究生.