

风电机组传动链动态载荷识别算法及验证

巫发明^{1,3}, 李 晔¹, 杨从新², 杨 柳³, 王 靛³

(1.上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院 上海,200240)

(2.兰州理工大学能源与动力工程学院 兰州,730050)

(3.中车株洲电力机车研究所有限公司 株洲,412000)

摘要 以某大型双馈风电机组为研究对象,建立传动链动态载荷特性模型,提出传动链扭转振动和发电机转矩特性相结合的低速轴扭转载荷识别算法。开展多体动力学刚柔耦合模型仿真计算,验证振动特性和动态辨识载荷。结果表明,动态辨识载荷与仿真结果吻合度较高,额定风速以上其平均值偏差约为2%,1 Hz等效疲劳载荷偏差约为6%。样机测试验证结果表明,动态辨识载荷与实测结果具有较高吻合度,等效疲劳载荷偏差在5%以内,满足工程要求。本研究的传动链动态载荷识别方法,引入低通滤波算法,进行自主编程,只需机组自有检测和运行数据,并可获取机组运行过程中的低速轴扭转载荷,为机组安全监控提供有利支撑。

关键词 载荷识别; 振动; 风电机组; 动力学; 传动链
中图分类号 TH113.1

引 言

随着现代化建设速度不断加快,高铁、大飞机、汽车和新能源等领域的许多方面取得了重要的研究与应用成果,其中工程结构上的动态载荷问题也很受关注^[1-5]。由于实际载荷的复杂性,准确地识别载荷成为科研难点^[6-9]。近年来,风电机组迅速发展,新开发的机组容量越来越大,风轮叶片越来越长,机组体积和质量不断增加,风电行业面临的动力学和承载问题越来越多^[10-12]。动力学成为风电发展的研究热点,特别是传动链扭振问题被重点关注^[13-15]。在风电机组的实际运行中,传动链的主要部件易出现疲劳破坏,如齿轮箱、发电机等的故障^[16-17]。这是由于风的随机作用导致传动链受到频繁扰动,产生剧烈载荷变化。对实际工作过程中所承载荷进行识别,将为机组传动链的优化、故障评估及寿命预测提供基础。然而在实际工程中,当测点不可达、载荷作用点较多时,往往载荷无法通过传感器直接测得。一般情况下,结构的动响应是较为容易得到的,因此通过载荷识别方法确定载荷具有较高的实用价值。

笔者重点研究将动态载荷识别技术应用于风电机组传动链受载分析。通过对机组传动链结构在运用条件下的动载荷识别,有助于制定传动链上的部

件疲劳设计载荷谱,为主轴、主轴承、齿轮箱及联轴器等传动链上关键部件的动态设计与疲劳设计提供可靠的依据。传动链低速轴扭转载荷源于风电机组叶片,理论上可以通过风轮面上的风速、叶片的翼型及空气动力学基本理论等进行气动载荷计算,并通过载荷传递关系进行计算获取^[18]。但是,这种方法需求的计算条件获取困难,计算复杂度高,工程应用难度非常大。另外一种获取风电机组低速轴扭转载荷的方法是通过增设载荷测量设备进行直接测量,典型的做法是在主轴承增加扭矩应变测试装置,通过数据处理转化为扭转方向的载荷^[19]。采用此方法获取低速轴扭转载荷会带来较大的成本投入。本研究的动态载荷识别方法,通过 Matlab 进行自主编程^[20],在不增加载荷测量传感器情况下,对机组监测的运行数据进行低通滤波,让传动链振动特性正常通过,而超过设定临界值的高频信号则被隔断、减弱。应用载荷识别方法测算低速轴扭转载荷,并将测算的载荷值融入数据采集和监视控制系统(supervisory control and data acquisition,简称 SCA-DA),进行长期载荷在线监测,作为基本风电机组运行数据,可供机组进行监控和传动链部件的健康诊断分析。

1 基本理论

动态载荷识别问题属于结构动力学的第2类问题,它是根据结构在动态载荷作用下的振动响应和系统的特性参数来确定动载荷的过程^[4,8]。笔者将动态载荷识别算法应用于风电机组传动链低速轴扭转载荷识别,与理论仿真结果进行对比,主要对比传动链扭转载荷的平均值和1 Hz等效疲劳载荷^[19]。

1.1 动量-叶素理论

风电机组所转化的能量来源于风的动能。由动量-叶素理论^[18]可知,叶素法向力 dF_n 和切向力 dF_t 分别表示为

$$dF_n = 0.5\rho c V_0^2 C_n dr \quad (1)$$

$$dF_t = 0.5\rho c V_0^2 C_t dr \quad (2)$$

其中: c 为叶素弦长; dr 为叶素展长; V_0 为来流风速; ρ 为空气密度。

法向力系数 C_n 和切向力系数 C_t 可以由升力系数 C_l 及阻力系数 C_d 计算得出

$$C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (3)$$

$$C_t = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi$$

考虑叶片数量 N ,作用在半径 r 处叶素的轴向推力为

$$dF = 0.5N\rho c V_0^2 C_n dr \quad (4)$$

作用在半径 r 处叶素的转矩为

$$dM = 0.5N\rho c V_0^2 C_t dr \quad (5)$$

因此,风轮转矩 T_{aero} 为

$$T_{aero} = \int 0.5N\rho c V_0^2 C_t dr \quad (6)$$

1.2 高速端转矩和损耗模型

机组传动链损耗包含机械和电气损耗。机械损耗包括主轴和齿轮箱等的损耗,其效率为 η_1 ,发电机轴功率 P_s 与气动功率 P 的关系为 $P_s = \eta_1 P$;电气损耗是由空载损失 L_0 和效率 η_2 组成,电功率输出 P_e 与发电机轴功率 P_s 的关系为 $P_e = \eta_2 (P_s - L_0)$, η_1 和 η_2 与机组的运行状态点相关,由试验实测获取。高速端转矩 T_e 由测量的发电机功率 P_e 和发电机转速 ω_e 计算获得, $T_e = P_e / \omega_e$ 。

1.3 传动链动载荷识别模型

将风电机组传动系统动力学模型简化成2自由度的动载荷识别模型,将其中传动链模型简化为有

质量和惯性的转子、具有刚度和阻尼的转子轴、由齿轮比 N 、齿轮箱刚度 K_s 和机械效率 η_1 表示的齿轮箱和转动惯量组成的发电机。发电机转矩通过齿轮箱反射,并指定为 NT_e 。风轮扭转角为 θ_1 ,发电机扭转角为 θ_2 。建立传动链系统载荷识别模型见图1。

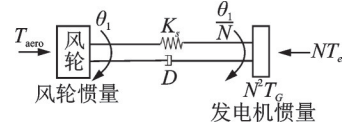


图1 传动链系统载荷识别模型

Fig.1 Drive train parameter model

风轮惯量产生的力矩为

$$J\ddot{\theta}_1 = T_{aero} - K_s \left(\theta_1 - \frac{\theta_2}{N} \right) - D \left(\dot{\theta}_1 - \frac{\dot{\theta}_2}{N} \right) \quad (7)$$

发电机惯量产生的力矩为

$$N^2 J_G \frac{\ddot{\theta}_2}{N} = -NT_e + K_s \left(\theta_1 - \frac{\theta_2}{N} \right) + D \left(\dot{\theta}_1 - \frac{\dot{\theta}_2}{N} \right) \quad (8)$$

其中:角度差 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2/N$; $\Delta\dot{\theta}$ 为转速差。

将角度差代入式(7)和式(8),可得

$$J\ddot{\theta}_1 = T_{aero} - K_s \Delta\theta - D\Delta\dot{\theta} \quad (9)$$

$$N^2 J_G \frac{\ddot{\theta}_2}{N} = -NT_e + K_s \Delta\theta + D\Delta\dot{\theta} \quad (10)$$

将 $\theta_2/N = \Delta\theta - \theta_1$ 代入式(10),可得

$$N^2 J_G (\ddot{\theta}_1 - \Delta\ddot{\theta}) = -NT_e + K_s \Delta\theta + D\Delta\dot{\theta} \quad (11)$$

再将式(9)代入式(11),可得

$$T_{aero} = NT_e + (N^2 J_G + J)\ddot{\theta}_1 - N^2 J_G \Delta\ddot{\theta} \quad (12)$$

将 $\omega = \dot{\theta}$ 代入式(12),可得

$$T_{aero} = NT_e + (N^2 J_G + J)\dot{\omega}_1 - N^2 J_G \Delta\dot{\omega} \quad (13)$$

空气动力学模型和传动链模型形成耦合系统。空气动力学模型计算气动性能和载荷,作用在传动链模型上;传动链模型对结构动力学模型产生反作用力,利用结构动力学模型计算转速,转速影响空气动力学模型的气动载荷,产生新的气动载荷。

风电机组传动链细化模型由空气动力学模型和风轮、主轴、齿轮箱、联轴器及发电机等动力学模型构成。将低速轴、高速轴模型按柔性轴处理,考虑刚度和阻尼特性,能更好地描述传动系统的动力学特性^[11]。 ω_L , ω_H 和 ω_2 分别为增速箱低速端、高速端和发电机端转速,如图2所示。根据图2的动力学模型,传动链系统动力学方程可写为

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1 + C_L(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_L) + K_L(\theta_1 - \theta_L) + C_1 \dot{\theta}_1 = T_{aero} \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + C_H(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_H) + K_H(\theta_2 - \theta_H) + C_2 \dot{\theta}_2 = -T_2 \\ J_L \ddot{\theta}_L - C_L(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_L) - K_L(\theta_1 - \theta_L) = -T_L \\ J_H \ddot{\theta}_H - C_H(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_H) - K_H(\theta_2 - \theta_H) = T_H \end{cases} \quad (14)$$

$$DEL = \left(\sum_i n_i S_i^m / T f \right)^{\frac{1}{m}} \quad (15)$$

其中: f 为 1 Hz; T 为 600 s。

2 仿真分析模型

2.1 模型参数

为研究风电机组的传动链扭振载荷,以某 3.xMW 变速变桨双馈型风电机组为例,使用 Simpack 软件建模^[22],调用 Aerodyn 程序开展气动与动力学的联合仿真分析。该机组的主要参数如表 1 所示。风电机组传动链参数如表 2 所示。

表 1 风电机组参数

Tab.1 Wind turbine parameter

参数	数值	参数	数值
风轮直径 / m	146	切出风速 / (m·s ⁻¹)	20
叶片数	3	湍流强度 I_{ref}	0.14
空气密度 / (kg·m ⁻³)	0.9	额定风速 / (m·s ⁻¹)	9.5
切入风速 / (m·s ⁻¹)	3	塔筒高度 / m	100
发电机额定功率 / kW	3 000		

表 2 传动链基本参数

Tab.2 Drive train parameter

参数	数值
风轮转子惯量/(kg·m ²)	2.26×10 ⁷
高速轴的转动惯量/(kg·m ²)	27.496
发电机转动惯量/(kg·m ²)	110
低速轴刚度/(Nm·rad ⁻¹)	1.87×10 ⁸
高速轴刚度/(Nm·rad ⁻¹)	3.25×10 ⁶
传动比	111.56

风电机组结构动力学分析中,采用国际电气委员会制定的相应标准规定的坐标系^[19]。

2.2 动力学仿真模型

采用 Simpack 作为仿真平台,建立精细化的传动链多体动力学模型。风电机组动力学系统结构如图 4 所示,风电机组拓扑图如图 5 所示。

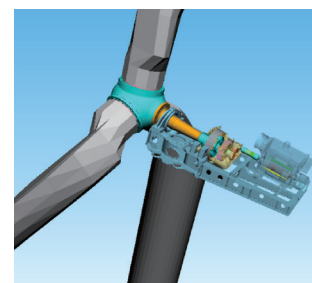


图 4 风电机组动力学系统结构图

Fig.4 Structural chart of wind turbine dynamics system

其中: J_L , T_{aero} 和 C_1 分别为风轮转动惯量、输入扭矩和阻尼系数; K_L , T_L 和 C_L 分别为低速轴刚度系数、扭矩和阻尼系数; K_H , T_H 和 C_H 分别为高速轴刚度系数、扭矩和阻尼系数; J_2 , T_2 和 C_2 分别为发电机端转动惯量、扭矩和阻尼系数。

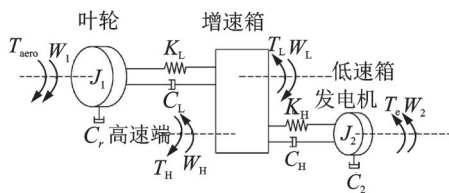


图 2 传动系统动力学模型

Fig.2 Dynamic model of transmission system

由式(13)可知,传动链前端的气动力可由发电机扭矩叠加传动链惯量力和扭转振动力求得。由式(14)可知,齿轮箱的所受扭矩力也可由发电机扭矩叠加传动链惯量力和扭转振动力求得。此研究方法 与文献[21]开展的运输类飞机阵风载荷与机动载荷识别算法有一定的相似之处。笔者主要针对风电机组的运行特点进行了研究与建模分析,并建立了传动系统载荷识别计算流程,如图 3 所示。

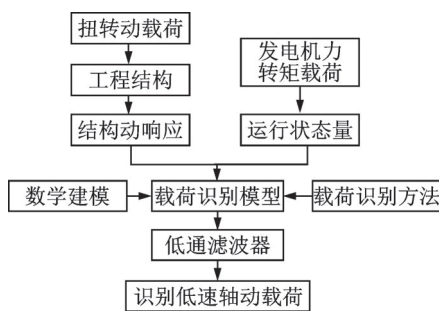


图 3 传动链动态载荷识别计算流程

Fig.3 Drive train dynamic load identification model

1.4 疲劳载荷评估方法

等效载荷可通过雨流循环计算获取,雨流循环计算是用作结构疲劳分析的方法。指定一个或多个 S-N 曲线的斜率 m 与频率 f ,计算出的等效载荷作为恒频正弦载荷的振幅,得到与原始信号一样的疲劳损伤^[19]。载荷测试 10 min 结果的 1 Hz 等效载荷为

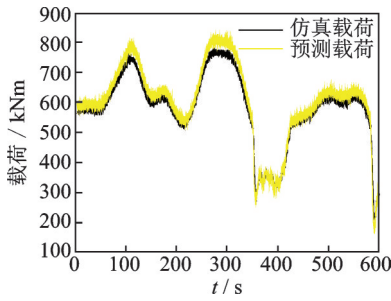


图7 仿真载荷和预测载荷时序对比(I)
Fig.7 Comparison of simulation load and predicted load (I)

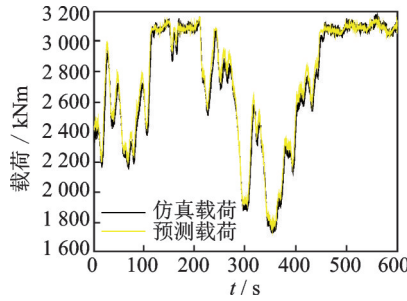


图8 仿真载荷和预测载荷时序对比(II)
Fig.8 Comparison of simulation load and predicted load (II)

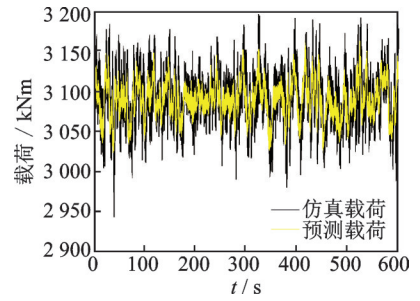


图9 仿真载荷和预测载荷时序对比(III)
Fig.9 Comparison of simulation and predicted load (III)

4 试验验证及分析

为了进一步研究和验证仿真及载荷识别模型,按照 IEC 61400—13 的标准要求^[19],选取在青海都兰风电场的测试样机(#8号机组)进行测试,测试样机机型及机位布置情况如图 10 所示,测试风场的空气密度为 0.9 kg/m³,年平均风速为 7.5 m/s。

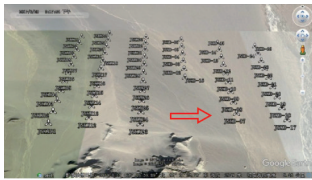


图 10 样机试验安装地点

Fig.10 Installation site of prototype experiment

试验风电机组可测状态参数包括监测传动链扭转载荷识别的输入参数为发电机转速、风轮转速及发电机功率。用于对比分析需关注的参数为风速、叶片变桨角度等。在试验系统的主轴径向方向布置应变传感器,进行传动链扭转载荷的测量,用于对比分析,应变传感器布置如图 11 所示。根据现场机组试验条件,使用硬件平台和数据采集软件组成的系统来采集数据并进行分析。首先,开展模态试验,利用测试数据获取传动链的固有频率;其次,利用这些测量和计算的数据,基于计算反求技术对传动链所受的载荷进行识别;最后,对结果进行对比。

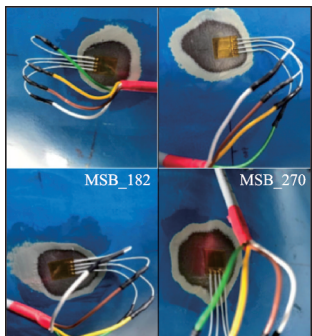


图 11 应变传感器主轴安装位置

Fig.11 Strain gauges installed on the main shaft surface

4.1 模态测试

风电机组传动链扭转振动耦合主轴、齿轮箱、联轴器及发电机等试验模态特性可通过机组的传动链扭转载荷进行快速傅里叶变换处理^[24]。从图 12 可看出,该传动链的实测数据频谱峰值有 0.561 5 Hz (叶片面外 1 阶)、0.898 Hz (叶片面内 1 阶)、1.143 Hz (传动链 1 阶)、1.255 Hz (叶片面外 2 阶)和 1.63 Hz (叶片面内 2 阶),其传动链 1 阶频率与仿真模型计算结果基本一致,偏差为 0.83%。

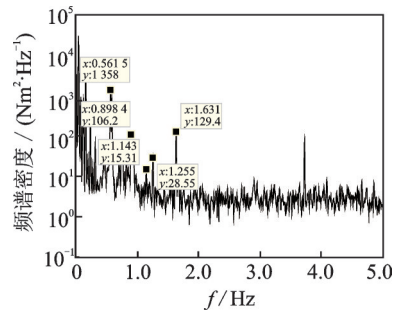


图 12 测试载荷频谱分析

Fig.12 Spectrum analysis of test load

动态载荷识别反问题涉及动态测试方法、动力模型修正及计算反求方法等多个问题^[25-26]。因此,笔者应用样机现场测试对其模型参数进一步验证。从频谱分析可以看出,传动链扭转载荷主要集中在 2 Hz 以下。因此,传动链扭转载荷识别模型应采用低通滤波。

4.2 动态载荷识别结果验证

为了方便地将动态载荷识别方法应用于工程实际问题,开发了动态载荷识别软件包。选取 3 个有代表性的运行状态点进行动态载荷识别模型的验证,其对比结果如图 13~15 所示。

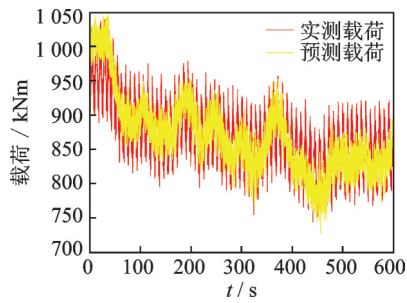


图13 测试载荷和预测载荷时序对比(I)
Fig.13 Comparison of test load and predicted load (I)

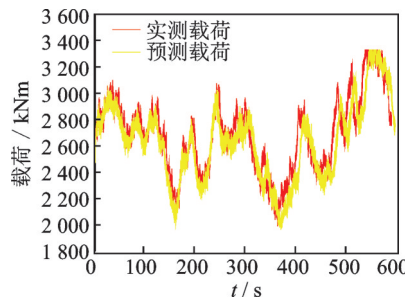


图14 测试载荷和预测载荷时序对比(II)
Fig.14 Comparison of test load and predicted load (II)

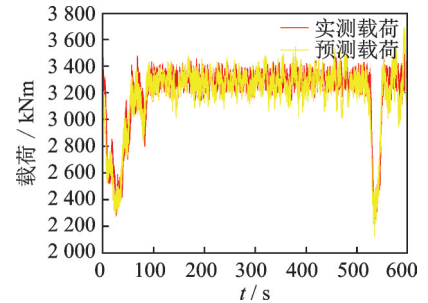


图15 测试载荷和预测载荷时序对比(III)
Fig.15 Comparison of test load and predicted load (III)

从图13可知,风电机组在切入风速(I)阶段,机组是转矩控制,传动链扭矩随风速的变化而波动。要保持机组最佳风能吸收状态,需调节转速来实现最佳跟踪。通过发电机转矩、转速变化率及转速差变化率,可准确对传动链载荷进行识别。预测的10 min平均值与测试值偏差约大于0.9%,其等效疲劳载荷偏差约小于11%。主要原因是预测模型中未考虑叶片实际安装时存有一定的气动不平衡,这将带来前端主轴测点处有一定的1P波动载荷。

从图14可知,风电机组在额定风速(II)阶段,机组是转矩控制,传动链扭矩随风速的变化而波动。要保持机组处在最佳风能吸收状态,需调节转速来实现最佳跟踪。通过发电机转矩、转速变化率及转速差变化率,可准确对传动链载荷进行识别。预测的10 min平均值与测试值偏差约大于1.9%,其等效疲劳载荷偏差约小于0.45%。

从图15可知,风电机组运行在切出风速(III)阶段,机组是通过变桨系统进行控制,传动链扭矩随风速的变化而波动。机组要保持处在恒定功率,需调节叶片桨距角来实现最佳跟踪。通过变桨角、转速变化率及转速差变化率,可准确对传动链载荷进行识别。预测的10 min平均值与测试值偏差约小于0.1%,其等效疲劳载荷偏差约小于5%。

从图13~15可以看出:在额定风速以上,仿真结果与实测结果吻合度较高;在低风速段,其等效疲劳偏差略大。从机组寿命累计统计可知,预测能满足工程应用的要求。

5 结论

1) 应用Simpack的仿真计算数据,验证机组传动链动态辨识的载荷。结果表明,动态辨识载荷与仿真结果吻合度较高。在额定风速以上,其平均值偏差小于2%,1 Hz等效疲劳载荷偏差在6%以内。

2) 通过样机测试了验证方法的可行性,由动态

辨识载荷与实测结果对比可知,同样在小风速段,其等效疲劳偏差略大,但平均值偏差较小。在额定风速以上,动态辨识载荷与实测结果的平均值及等效疲劳载荷吻合都较好,偏差在5%以上,满足工程要求。

3) 所采用方法能有效地反映机组传动链的动力学问题,与试验载荷吻合度非常高,推导的扭转载荷能用于机组分析。以机组自有的检测和运行数据为基础,扩展性地获取机组运行过程中的低速轴扭转载荷,可为机组安全监控提供有利支撑。

参 考 文 献

- [1] 王洪波,赵长见,廖选平.基于飞行工作模态分析的飞行器动载荷识别研究[J].动力学与控制学报,2017,15(2):178-184.
WANG Hongbo, ZHAO Changjian, LIAO Xuanping. Study on dynamic load identification of aircraft based on operational mode analysis [J]. Journal of Dynamic and Control, 2017, 15(2): 178-184. (in Chinese)
- [2] 赵方伟.铁路货车车体载荷谱测试及疲劳强度评价研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [3] 文祥荣,智浩,缪龙秀.基于模态分析法的结构动载荷识别研究[J].北京交通大学学报,2000,24(4):11-14.
WEN Xiangrong, ZHI Hao, MIAO Longxiu. Research on structural dynamic load identification based on modal analysis method [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2000, 24(4): 11-14. (in Chinese)
- [4] 杨锡运,郭鹏,岳俊红.风力发电机组故障诊断技术[M].北京:中国水利水电出版社,2015:12-30.
- [5] 黄屹丰,裘进浩,刘克格.支柱式起落架载荷标定数据工程处理方法[J].振动、测试与诊断,2020,40(2):245-255.
HUANG Yifeng, QIU Jinhao, LIU Kege. Engineering treatment methods for load calibration data of telescopic landing gear [J]. Journal of Vibration, Measurement &

- Diagnosis, 2020, 40(2): 245-255. (in Chinese)
- [6] 方健,刁坤,汪晓虎. 三缸机传动系扭振试验研究和仿真分析[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(1): 115-121.
FANG Jian, DIAO Kun, WANG Xiaohu. Experimental study and simulation analysis on torsional vibration characteristic of 3-cylinder engine driveline system [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(1): 115-121. (in Chinese)
- [7] 傅志方. 振动模态分析与参数辨识[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990: 390-395.
- [8] 杨智春, 贾有. 动载荷的识别方法[J]. 力学进展, 2015, 45: 201502.
YANG Zhichun, JIA You. The identification of dynamic loads advances in mechanics [J]. Advances in Mechanics, 2015, 45: 201502. (in Chinese)
- [9] 刘杰. 动态载荷识别的计算反求技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [10] CARROLL J, McDONALD A, McMILLAN D. Failure rate, repair time and unscheduled O&M cost analysis of offshore wind turbines [J]. Wind Energy, 2015, 19: 1107-1119.
- [11] 陈雪峰, 郭艳婕. 风电装备振动监测与诊断[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 4-16.
- [12] OLIVEIRA G. Vibration-based structural health monitoring of wind turbines [D]. Porto: Faculty of Engineering of the University, 2016.
- [13] 沈岗, 向东, 牟鹏. 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. Dynamic modeling and simulation of wind turbine [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(14): 129-134. (in Chinese)
- [14] GAO Y, DAI H, LI X. Application analysis of vibration for high speed shaft bearings used in wind turbine gearbox [J]. Bearing, 2016, 4: 50-51.
- [15] 刘宏, 赵荣珍. 冲击载荷下风电机组传动链的振动响应及控制研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1579-1586.
LIU Hong, ZHAO Rongzhen. Research of vibration response and control method of wind turbine drive train under impact load [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(6): 1579-1586. (in Chinese)
- [16] TONY B, DAVID S, NICK J. Wind energy handbook [M]. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2002: 209-311.
- [17] 廖明夫, 宋文萍, 王四季. 风力机设计理论与结构动力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2014: 249-297.
- [18] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 157-160.
- [19] IEC 61400—13. Wind turbines generator systems-part 13: conformity testing and certification [S]. Geneva: International Electro-technical Commission, 2015.
- [20] 徐斌, 高跃飞, 余龙. Matlab有限元结构动力学分析与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 288-373.
- [21] 闫楚良, 杜晓坤, 李五一. 运输类飞机阵风载荷与机动载荷识别算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(2): 308-312.
YAN Chuling, DU Xiaokun, LI Wuyi. Distinction algorithm between gust load and maneuver load of transport aircraft [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(2): 308-312. (in Chinese)
- [22] 缪炳荣, 傅秀通. SIMPACK动力学分析基础教程[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008: 22-93.
- [23] 杜静, 颜益峰, 黄伟, 等. MW级风力发电机整机气-弹-控耦合联合仿真分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(3): 598-608.
DU Jing, YAN Yifeng, HUANG Wei, et al. Air elastic-control coupling co-simulation analysis of MW-grade wind turbine [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(3): 598-608. (in Chinese)
- [24] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 10-80.
- [25] 陈太聪, 沈文杰. 模态辨识中随机减量技术的实用改进[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(2): 245-255.
CHEN Taicong, SHEN Wenjie. Practical improvement of the random decrement technique in modal identification [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(2): 245-255. (in Chinese)
- [26] 乔百杰, 陈雪峰, 刘金鑫, 等. 机械结构冲击载荷稀疏识别方法研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(3): 81-89.
QIAO Baijie, CHEN Xuefeng, LIU Jinxin, et al. Sparse identification of impact force acting on mechanical structures [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3): 81-89. (in Chinese)



第一作者简介: 巫发明, 男, 1983年1月生, 博士、教授级高级工程师。主要研究方向为整机系统设计、动力学以及在线振动监测等。

E-mail: 55890138@qq.com

通信作者简介: 杨从新, 男, 1964年6月生, 博士、教授、博士生导师。主要研究方向为动力学、流体力学和流体机械等。

E-mail: ycxwind@163.com