

风机偏心对空冷梁式桥架振动实验研究*

RESEARCH ON BEAM BRIDGE VIBRATION OF ACC INDUCING BY FAN ECCENTRIC MASS

郭铁能^{**1,2} 孟令军^{***1,2} 白春生^{1,2} 华旭^{1,2}

(1. 北京工业大学 先进制造技术北京市重点实验室, 北京 100124)

(2. 北京工业大学 先进制造与智能技术研究所, 北京 100124)

GUO TieNeng^{1,2} MENG LingJun^{1,2} BAI ChunSheng^{1,2} HUA Xu^{1,2}

(1. *Beijing Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

(2. *Institute of Advanced Manufacturing and Intelligent Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

摘要 空冷风机桥架振动的问题一直困扰着北方火电厂。振动幅值过大引起风机、电机与减速机等设备损坏,影响电厂运行的稳定性与经济效益。以山西孝义某电厂空冷风机桥架速度超标为对象,并使用数据采集仪器和加速度传感器对空冷风机桥架进行了振动测试。通过分析振动信号,并根据产生的频率特征来探索引起风机桥架振动的主要影响因素。测试结果发现,桥架振动过大是由于风机偏心质量引起的干扰力导致的。风机在工作运行过程中,桥架中部传感器位置处的相位正负交替,偏心质量使风机轴产生了摇摆,与桥架预期的水平振动并不一致。为了再次验证上述分析的合理性,对桥架进行有限元仿真分析,其分析结果与上述结论吻合。通过风机桥架的强迫振动实验和锤击实验发现,偏心质量引起桥架振动的最大频率值距离风机桥架的自振频率较远,不会引起风机桥架发生共振现象,所以,偏心质量引起的桥架振动仅与风机桥架的静刚度有关。测试结果将为梁式桥架设计和避免风机偏心引起的桥架振动提供依据。

关键词 风机桥架 振动测试 偏心质量 振动频率 有限元分析

中图分类号 TH113

Abstract The vibration problem of air-cooling fan bridge has been troubling the north thermal power plant. Excessive vibration amplitude causes the damage of fan, motor, reducer and other equipment, and affects the stability and economic benefit of power plant operation. In this paper, the vibration speed of the air-cooling fan exceeded the standard as the research object, and the data acquisition instrument and acceleration sensor were used to test the vibration of the air cooling fan bridge in the power plant of xiaoyi in Shanxi Province. According to the frequency characteristics generated by these incentives, the main influence factors of the vibration of the fan bridge caused by the original fan blades were explored. By analyzing the vibration signal, the main influencing factors of the vibration of fan bridge are explored according to the frequency characteristics. The test results show that the excessive vibration of the bridge is caused by the interference force caused by the fan eccentric mass. During the operation of the fan, the phase of the sensor at the middle of the bridge alternates positively and negatively, and the fan shaft produces a sway, which is inconsistent with the expected horizontal vibration of the bridge. In order to verify the rationality of the above analysis, the finite element analysis of the bridge frame was carried out, and the results are consistent with the above conclusions. Through the forced vibration test and hammer test of the fan bridge, it is found that the maximum frequency value of the vibration of the fan bridge caused by eccentric mass is far away from the natural vibration frequency of the fan bridge, and will not cause the resonance phenomenon of the fan bridge. Therefore, the vibration of the fan bridge caused by eccentric mass is only related to the static stiffness of the fan bridge. The test results will provide a basis for the design of beam bridge and the avoidance of vibration caused by fan eccentricity.

Key words Fan bridge; Vibration test; Eccentric mass; Vibration frequency; Finite element analysis

Corresponding author: GUO TieNeng, E-mail: guotn@163.com, Tel: +86-10-67396753, Fax: +86-10-67396753

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51875009), and the Natural Science

* 20190830 收到初稿, 20190929 收到修改稿。国家自然科学基金项目 (51875009), 北京市自然科学基金项目 (3162005) 资助。

** 郭铁能, 男, 1975 年 5 月生, 湖南娄底人, 北京工业大学副教授, 硕士生导师, 主要从事结构动力学, 机床动力学, 结构振动与控制研究。

*** 孟令军, 男, 1995 年 9 月生, 辽宁丹东人, 北京工业大学硕士研究生, 主要从事结构动力学研究。

Foundation of Beijing (No. 3162005).

Manuscript received 20190830, in revised form 20190929.

引言

直接空冷系统是空冷式火力发电厂的重要组成部分,其采用大直径轴流风机作为空气驱动装置,将汽轮机排出的乏汽,通过管道送入空冷凝汽器的钢制散热器中,由环境空气直接将其冷却为凝结水^[1-2]。随着工业的发展和人类生活水平的提高,水资源的需求量日益增大,再加上环境污染导致水资源短缺等诸多因素的影响,节水的直接空冷技术在国内外得到了快速发展。我国北方地区,煤炭资源丰富,但水资源缺乏,直接空冷技术在这一区域火电厂的运用产生了明显的环境和经济效益^[3-8]。

空冷风机主要由电机、减速器、风机轴、扇叶和桥架组成,风机桥架固定在空冷平台上。风机在运行过程中,风机桥架产生较大的振动^[9]。风机桥架的安全与可靠是保证风机正常运转和空冷系统正常工作的前提。据调查,托克托电厂、怀安电厂、东胜电厂等诸多电厂就曾多次因为风机桥架振动幅度过大^[10],导致电机、减速机及风机等设备损坏,并对支撑结构的安全造成隐患,而且这种情况还在持续。邵韵^[11]针对某石化 F1059 直接空冷机组桥架振动问题,对风机桥架进行了振动测试与模态分析^[12],发现桥架的固有频率与叶片通过频率接近,从而产生了共振,同时指出风机运行时不平衡力是引起桥架振动的原因之一。窦瑞杰等^[13]在风机系统 1:1 实验模型上,对桥架进行了一系列实验测试及分析,初步得出引起桥架振动的三种干扰力分别是风机转子的偏心、风机扇叶平面外的振动以及扭矩,但并未深入研究。屈铁军等^[14-15]采用动态应变测试技术对工况下风机轴的应变进行测试,结果表明风机运行过程中,产生 4 种干扰力。周全^[16]分析风机桥架振动的振动源,提出质量偏心是引起桥架

振动的原因之一,但其主要分析的是风机叶片上的涡流激振效应及对桥架振动的影响。上述研究初步分析风机运行时偏心力引起的桥架振动,并没有定量分析结果,而在桥架设计过程中,需要依据量化结果设计桥架。

本文在以上研究的基础上,对山西孝义某余热发电工程空冷风机桥架进行了振动分析。为此,本文采用加速度传感器对梁式风机桥架振动进行测试,并根据产生的频率特征来探索引起风机桥架振动的主要影响因素,并结合其他几家空冷桥架振动情况分析结果发现,风机偏心质量引起的桥架振动幅值很大。通过强迫振动实验采集到有效的实验数据进行频域分析,并对桥架模型有限元仿真探究了偏心力对风机桥架的作用方式。由桥架自振特性分析可知,偏心质量引起的桥架振动仅与风机桥架的静刚度有关。

1 风机桥架及振动测试方案

1.1 风机桥架概况

测试对象为山西孝义某余热发电工程的风机桥架,所在空冷平台高度 25 m,为混凝土框架结构。平台上一共有三台由风机、桥架及翅片等组成的冷却单元,并排一列布置。

每个冷却单元含有一台风机和支撑风机的桥架,如图 1a 所示。桥架跨度 8 m,主体由 H 型钢组成。风机以电机为动力源,由减速箱输出扭矩驱动。风机、减速机及电机安装在桥架中部。其中减速机以及电机的安装情况如图 1b 所示。风机桥架及各构件安装的误差是控制在国家要求标准范围内。

减速机为二级减速,且为平行立轴式安装。风机、减速机及电机的基本物理参数如表 1 所示。电机的转速由变频器控制,转速控制范围为 50%~110%。

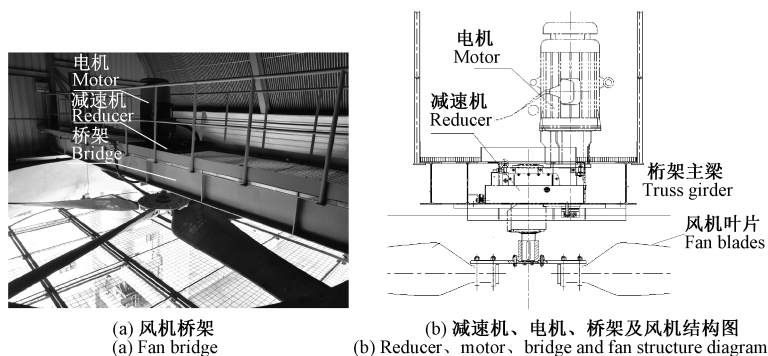


图 1 风机桥架及各构件结构图

Fig.1 Fan bridge and each component structure diagram

表 1 风机参数
Tab.1 Parameters of fan

风机参数 Fan parameters	参数值 Parameter values
风机总质量 Total mass of fan/kg	810
叶片质量 Blades quality /kg	65
叶片数量 Blades number	6
减速机质量 Reducer quality/kg	420
减速机减速比 Reduction ratio of reducer	11.227
电机质量 Motor quality/kg	580
电机额定转速 Rated speed of motor/(r/min)	1 480
转速控制范围 Speed control range /%	50~110

1.2 测试仪器及测点布置

测试仪器主要有 LMS 数据采集仪, BK4514B-001 型号的加速度传感器。该传感器的性能指标是满足现场测试环境的, 传感器振动测试的频率范围为 1 Hz~10 000 Hz。为了测试桥架主梁中部和减速器上的振动情况, 分别在桥架主梁中部和减速器箱体的竖直方向(Z 向)上布置 1 号、3 号和 2 号传感器, 传感器布置示意图如图 2 所示。

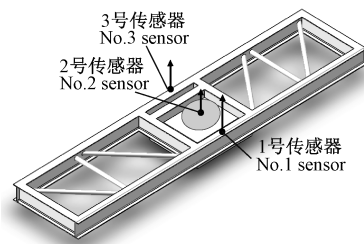


图 2 风机桥架模型与测点布置

Fig.2 Fan bridge model and measuring points

1.3 测试工况

根据风机的工作范围, 电机转速控制在 50%~110% 范围内, 从低速到高速分为 12 个工况, 风机在不同工况下平稳运行 300 s, 表 2 是测试工况与风机对应的相关参数。偏心质量是在制造和安装过程中风机转子的质心偏离风机轴线产生的。在风机运转过程中会产生离心力, 又称为偏心力。因此, 由偏心力引起振动的振动频率与风机轴的转频相等。根据表 2 中风机轴的转频, 可以将测量范围限定在 0 Hz~2.9 Hz 范围内。

表 2 风机工况参数
Tab.2 Fan working parameters

工况 Working condition	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
电机工况 Working condition of motor/%	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110
电机轴频率 Motor shaft frequency/Hz	25	27.5	30	32.5	35	37.5	40	42.5	45	47.5	50	55
风机轴频率 Fan shaft frequency/Hz	1.31	1.44	1.57	1.70	1.84	1.97	2.10	2.23	2.36	2.49	2.62	2.88

2 风机桥架振动响应分析

偏心力引起的桥架振动主要来自风机轴, 因此, 测量传感器主要布置在桥架的中部。

2.1 频域分析

风机在不同工况下转速不同, 输出频率也有区别。为此, 取风机在各工况平稳运行后桥架各处传感器的振动数据, 频谱分析的参数选择如表 3 所示。为了提高低频信号的准确性, 在时域上也尽量获得足够长的有效数据信号, 运用 Matlab 软件对采集到有效的实验数据进行频域分析。

表 3 频谱分析的参数

Tab.3 Spectral analysis parameters

频谱分析参数 Spectral analysis parameter	参数值 Parameter values
采样频率 Sample frequency /Hz	2 048
带宽 Bandwidth /Hz	4 096
谱线 Spectral line	1 024
分辨率 Resolution ratio /Hz	1/300
采样时间 Sampling time /s	300
采样数据点 Sample data points	614 400

风机叶片由于制造误差与安装等原因使其重心与

风机轴的几何中心不重合, 导致偏心。风机在旋转过程中由于偏心会引起离心力。离心力的大小与风机转速的平方成正比。当转速最大时, 离心力达到最大值。离心力方向随着风机的转动方向而变化, 且始终指向风机轴横截面径向。这种动不平衡特性引起的振动具有周期性, 引起的振动频率在数值上等于风机的运转频率, 且变化趋势随着风机转速的提高而提高。在这种情况下, 风机的运转频率范围为 1.31 Hz~2.88 Hz, 所以振动最大的频率段应接近 2.9 Hz。

风机桥架的强迫振动实验分析结果表明: 在竖直方向上, 1 号、2 号、3 号传感器数据分析结果如图 3、图 4、图 5 所示。从图中可以看出, 1 号、3 号传感器在竖直方向上受偏心力的影响很大, 而且随着风机转速的增加不断增大, 对桥架中部减速器上的 2 号传感器影响较小。频域图中的峰值点对应频率与风机轴转频相等, 从而证明了风机偏心质量引起的桥架振动幅值过大。

2.2 偏心力对风机桥架的作用方式

偏心力的作用方式通常表现为横向, 但是, 从现场测试的结果可以看出, 偏心力的作用也表现在竖直方向上。偏心力的这种作用方式可以用风机轴的摇摆来

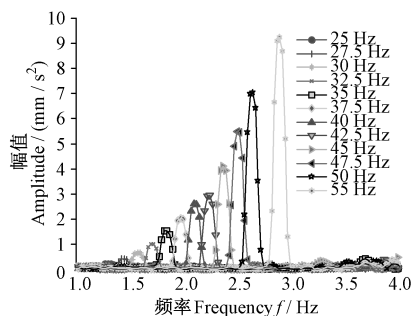


图3 1号传感器频域图

Fig.3 No.1 sensor spectrum diagram

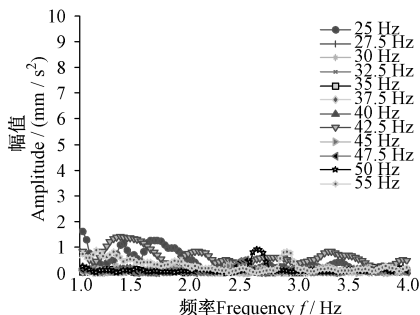


图4 2号传感器频域图

Fig.4 No.2 sensor spectrum diagram

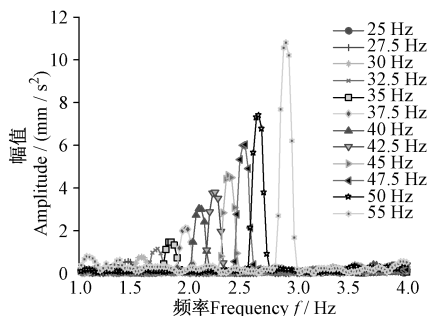


图5 3号传感器频域图

Fig.5 No.3 sensor spectrum diagram

解释,具体分析如下:

风机安装在桥架的中部,风机轴在两根主梁之间,由于偏心力的作用,风机在工作过程中,风机轴产生了摇摆。1号、3号传感器在竖直方向上受偏心力的影响

较大,并且1号、3号传感器位置处的振动相位正负交替,2号传感器处于风机轴的正上方,因此,受偏心力的影响不明显。

为了验证上述分析结果,需要对比1号和3号传感器各峰值点对应的相位是否相反。如图6、图7所示为1号、3号传感器在各工况下的幅频图,从图中可以看出1号、3号传感器各峰值点所对应的频率相同。

为了清楚地表达各工况下1号、3号传感器峰值点所对应的相位关系,将1号、3号传感器各峰值点所对应的相位值提取出来,如表4所示。从1号、3号传感器的相位值可以看出,每一个峰值点频率所对应的相位总是一正一负,该结果表明:风机轴在工作过程中受偏心力的作用发生摇摆,从而随着频率越高,风机桥架两根主梁产生的振动幅值越大。

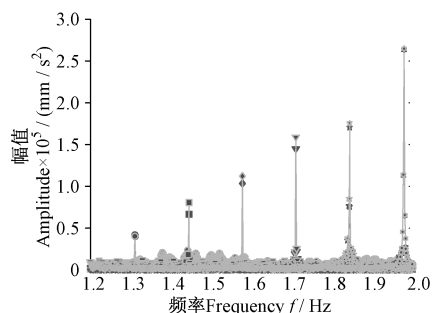


图6 1号、3号传感器工况1~6幅相频图

Fig.6 No.1 and 3 sensor working conditions 1~6 spectrum and phase diagram

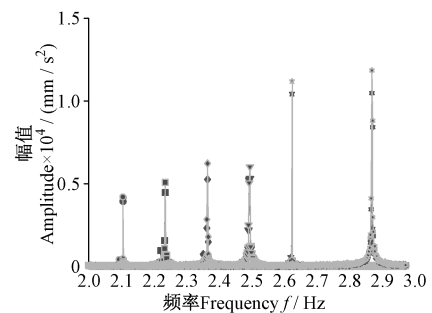


图7 1号、3号传感器工况7~12幅相频图

Fig.7 No.1 and 3 sensor working conditions 7~12 spectrum and phase diagram

表4 1号、3号传感器峰值点处的相位值

Tab.4 Phase value at the peak point of the No. 1 and No. 3 sensors

工况 Working condition	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
测试峰值点频率 Frequency of test peak points/Hz	1.31	1.44	1.57	1.71	1.84	1.97	2.11	2.24	2.37	2.50	2.64	2.89
1号传感器相位值 Phase value of No.1 sensor/rad	0.17	0.344 8	-1.445	-1.548	0.999 4	-2.604	-1	-2.922	-0.121 9	1.206	2.332	-0.906
3号传感器相位值 Phase value of No.3 sensor/rad	-2.93	-2.876	1.669	1.487	-2.192	0.475 5	2.155	0.107	2.992	-2.033	-0.869 5	2.263

3 风机桥架动力学分析

风机叶片产生的偏心力引起了风机输出轴的摇摆,桥架两根主梁在输出轴的作用下上下振动。基于该振动模式对桥架进行建模和分析。考虑到栅格板及简易扶手等其它结构在桥架整体刚度方面的贡献很少,在建模和分析过程中予以忽略。

3.1 桥架三维模型

根据工程图建立桥架的三维模型,桥架主要由两根 H 型钢作为主梁,承载风机,减速器和电机,安装在桥架中部位置,并由风机底板支撑。如图 8 所示为装有减速器和电机简化模型的桥架,风机叶片的重量以质量元的方式放置在风机轴上叶片安装的位置。

3.2 桥架自振特性分析

在上述强迫振动实验的基础上,为了了解桥架的自振特性,需要对桥架进行锤击实验,锤击测试风机静止状态下桥架的自振情况,力锤锤击点为桥架一侧主梁中部。通过现场数据采集,将实验数据运用 Matlab 进行模态分析,如图 9 所示是对风机桥架进行锤击实验得到的频域图,表 5 所示为前六阶固有频率。

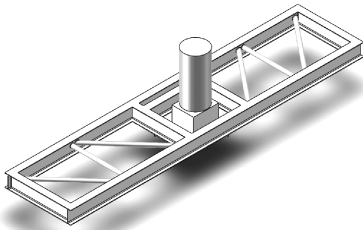


图 8 桥架三维模型
Fig.8 Bridge 3D model

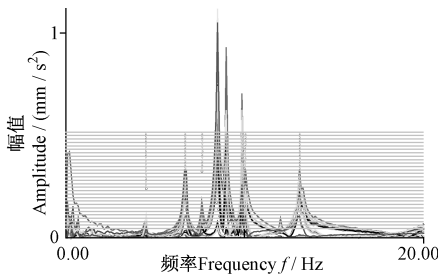


图 9 桥架频域图
Fig.9 Frequency domain diagram of the bridge

表 5 固有频率
Tab.5 Natural frequencies

模态 Modal	固有频率 Natural frequency f/Hz
1	6.745
2	7.148
3	9.892
4	10.73
5	15.83
6	16.38

3.3 桥架模态分析

桥架建模后,并进行网格划分,然后对桥架进行模态分析。如图 10 所示为桥架前二阶振型,自振频率如表 6 所示。

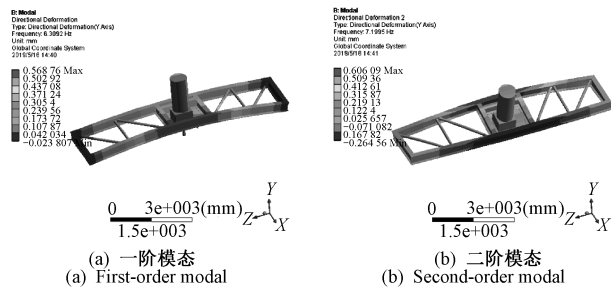


图 10 桥架模态振型
Fig.10 Modal mode of bridge

表 6 桥架固有频率
Tab.6 Inherent frequency of bridge

模态 Modal	仿真固有频率 Simulated natural frequency f/Hz	实测固有频率 Measured natural frequency f/Hz	误差 Error/%	振型 Mode of vibration
1	6.309 2	6.745	6.9	竖向弯曲 Vertical bending
2	7.199 5	7.148	0.56	横向摇摆 Lateral swaying

将风机桥架有限元分析结果与桥架锤击实验结果进行对比,如表 6 所示。从对比结果中可以看出,风机桥架的三维模型与实际桥架的前两阶固有频率基本相等,因此可以证明风机桥架三维模型的动力学特性与实测桥架基本相同。

通过对风机桥架有限元仿真可知,第一阶模态振型为竖向弯曲,第二阶模态振型为横向摇摆,从而验证了偏心质量作用方式不仅表现在横向,同时也表现在竖直方向上。

从强迫振动实验分析结果可以看出,偏心质量引起桥架振动的最大频率值为 2.9 Hz,距离风机桥架的自振频率较远,不会引起风机桥架发生共振,所以偏心质量引起的振动仅与风机桥架的静刚度有关。分析偏心质量与风机桥架的振动关系时,可以仅考虑桥架的静刚度。

4 结论

本文以实测直接空冷系统风机桥架振动响应为依据,结合风机在各工况平稳运行后桥架各处传感器的振动数据,运用仿真软件对采集到的有效实验数据进行频域分析。基于该振动模式对桥架进行建模和分析,并根据桥架锤击实验对模型进行验证,结论如下:

1) 通过强迫振动实验及分析振动信号可知,这种动不平衡特性引起的振动频率在数值上等于风机的运转频率,因此,引起风机桥架振动的原因是风机偏心引起的干扰力,且随着风机转速的增加,偏心引起的干扰力不断增大。

2) 风机在工作过程中,偏心质量使风机轴产生了摇摆。1号、3号传感器在竖直方向上受偏心力的影响较大,并且1号、3号传感器位置处的振动相位正负交替。为了再次验证上述分析的合理性,对桥架进行有限元分析,其分析结果与上述结论吻合。

3) 从风机桥架的强迫振动实验和桥架自振特性分析可知,偏心质量问题引起桥架振动的最大频率值距离风机桥架的自振频率较远,不会引起风机桥架发生共振现象,所以偏心质量引起的桥架振动仅与风机桥架的静刚度有关。分析偏心质量与风机桥架的振动关系时,可以仅考虑桥架的静刚度。

4) 在风机桥架设计时,应避免风机偏心引起的干扰力造成桥架振动过大,测试结果将为后期桥架设计和减振提供依据。

参考文献 (References)

- [1] 刘 挺. 直接空冷结构风机致振研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015:2-8.
LIU Ting. Research on direct air-cooling fan inducing structural vibration [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015:2-8(In Chinese).
- [2] 刘 林, 白国良, 曾金盛, 等. 直接空冷电厂低频运转大直径风机系统振动研究[J]. 钢结构, 2012, 27(5):21-25.
LIU Lin, BAI GuoLiang, ZENG JinSheng, et al. Study on the big diameter and low-frequency operation in direct air cooling power plant[J]. Steel Construction, 2012, 27(5):21-25(In Chinese).
- [3] 陈晓环. 国内外直接空冷系统的发展及现状[J]. 科技创新与应用, 2013, 3(9):74.
CHEN XiaoHuan. Development and present situation of direct air cooling system at home and abroad [J]. Technology Innovation and Application, 2013, 3(9): 74(In Chinese).
- [4] 朱丽华, 白国良, 李晓文, 等. 基于主子系统耦合效应的直接空冷结构体系抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(2):58-64.
ZHU LiHua, BAI GuoLiang, LI XiaoWen, et al. Study on the seismic behavior of direct air cooled condenser support platform based on primary-secondary system coupling effect [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(2):58-64(In Chinese).
- [5] 戴振会, 孙奉仲, 王宏国. 国内外直接空冷系统的发展及现状[J]. 电站系统工程, 2009, 25(3):1-4.
DAI ZhenHui, SUN FengZhong, WANG HongGuo. Present status and development of direct air-cooling unit in the world[J]. Power System Engineering, 2009, 25(3):1-4(In Chinese).
- [6] 裴顺奕, 胡 阳. 电站空冷技术的现状及应用前景[J]. 电站辅机, 2011, 32(4):1-4.
QIU ShunYi, HU Yang. The present situation and applied prospective of the air cooling technology in power plant [J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2011, 32(4):1-4(In Chinese).
- [7] YANG L J, DU X Z, YANG Y P. Measures against the adverse impact of natural wind on air-cooled condensers in power plant[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2010, 53(5): 1320-1327.
- [8] YANG L J, CHEN L, DU X Z, et al. Effects of ambient winds on the thermo-flow performances of indirect dry cooling system in a power plant[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2013, 64(2): 178-187.
- [9] 屈铁军, 窦瑞杰, 安 栋. 电厂直接空冷风机系统扰力测试研究[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(4):80-83.
QU TieJun, DOU RuiJie, AN Dong. Measurement of disturbing force caused by direct air-cooling fans of power station [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(4): 80-83 (In Chinese).
- [10] 汤拥华. 漳山电厂二期机组空冷增容改造研究[D]. 保定:华北电力大学, 2014:3-42.
TANG YongHua. Study on air cooling capacity expansion of second units in Zhangshan power plant [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014:3-42(In Chinese).
- [11] 邵 韵. 直接空冷系统风机桥架振动特性研究[J]. 应用能源技术, 2016, 33(1): 4-7.
SHAO Yun. Study on vibration characteristics of fan bridge in direct air cooling system [J]. Applied Energy Technology, 2016, 33(1): 4-7(In Chinese).
- [12] 晏红文, 田红旗, 赵 萍, 等. 大型风力发电机组传动链动力学分析与试验研究[J]. 机械强度, 2015, 37(6):1023-1029.
YAN HongWen, TIAN HongQi, ZHAO Ping, et al. Dynamic analysis and experimental study on transmission chain of large-scale wind turbine [J]. Journal of Mechanical Strength, 2015, 37(6): 1023-1029(In Chinese).
- [13] 窦瑞杰, 屈铁军. 电厂直接空冷系统风机桥强迫振动响应测试研究[J]. 北方工业大学学报, 2011, 23(1):70-74.
DOU RuiJie, QU TieJun. Measurement on response to forced vibration of fan bridge of direct air-cooling fan system of power station [J]. Journal of North China University of Technology, 2011, 23(1):70-74(In Chinese).
- [14] 屈铁军, 王献云, 窦瑞杰, 等. 直接空冷系统风机运行扰力试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊1):71-80.
QU TieJun, WANG XianYun, DOU RuiJie, et al. Experimental research of oscillation forces of fans in operation of direct air cooling system [J]. Chian Civil Engineering Journal, 2011, 44(Suppl1): 71-80(In Chinese).
- [15] QU T J, WANG X Y, XIONG Y S. Research on method of vibration analysis of fan bridga truss in operation [C]. International Conference, Electric Technology and Civil Engineering. Lushan China, 2011: 1472-1476.
- [16] 周 全. 直接空冷风机桥架振动研究[D]. 武汉:武汉大学, 2014:10-15.
ZHOU Quan. Study on bridge vibration of direct air cooling fan [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014:10-15(In Chinese).