

风力发电机叶片振动失效机理分析

乔印虎¹, 张春燕²

(1.安徽科技学院 工学院,安徽 凤阳 233100;2.新疆大学 机械工程学院,乌鲁木齐 830008)

摘要:对风力发电机叶片材料、翼型构成及叶片破坏形式作了介绍,进一步分析了风机叶片失效破坏原因,提出了相应的避免措施。提出了叶片损坏的主要原因是摆振和挥舞两种方式的振动与弹性叶片的变形耦合所导致。

关键词:风力发电机;叶片;颤振;共振;失速

中图分类号:TM315

文献标识码:A

文章编号:1002-2333(2007)04-0055-03

Vibration Fatigue Mechanism of Wind Turbines' Blade

QIAO Yin-hu¹, ZHANG Chun-yan²

(1.Engineering College, Anhui Science and Technology School, Fengyang 233100, China;

2.Mechanical Engineering College, Xinjiang University, Urumqi 830008, China)

Abstract: This paper introduces the material of turbines' blades, the constitution of a wing section as well as the destructed form of a blade, and then analyzes the destructed reasons of a blade, and also, finds some ways to overcome the problems. It is found that the main reasons of a blade's damage are the linkage of a blade's edge and flutter's vibration with the elastic blade's distortion.

Key words: wind turbine; blade; flutter; resonates; stall

1 引言

风机叶片是风力发电机的关键部件,其性能好坏直接影响整机运行及稳定。叶片在不停旋转中,各种激振力几乎都是通过叶片传递出去的,它是风机受力最复杂的部件;无论是地球附面层形成的风的不均匀流,还是重力

基金项目:校引进人才科研启动资金支持项目(ZRC200697)

的影响以及阵风等因素,都作用在叶片上。它展向长、弦向短,柔性较好,是一个容易发生振动的细长弹性体,风机各种机械振动首先发生在叶片上。除保证必要的机构刚度和避免出现疲劳破坏外,必须考虑风机转子、塔架、传动系统的动载荷和动应力、结构的机械振动稳定性、气弹性稳定性和动力响应等,以满足具有长期在户外自

当 $T_s=300K$, $T_0=4.2K$ 时,可以计算出铜屏的屏温 $T_F=122K$ 。

则,铜屏向内杜瓦壁的传热 Q_3 为:

$$Q_3 = \varepsilon_{01} \sigma A_1 (T_F^4 - T_0^4) = 0.4 \text{ kJ/h}$$

式中: ε_{01} —铜屏和内杜瓦之间的综合发射率; A_1 —内杜瓦的表面积; A_2 —铜屏内壁表面积; ε_{02} —不锈钢内杜瓦表面发射率,在 $T_0=4.2K$ 时取值 0.01; ε_F —铜屏表面发射率,在 $T_F=122K$ 时取值 0.021; ϕ_{01} —相对辐射角系数,取值为 1。

3.4 支撑构件的传导热 Q_4

在外杜瓦内壁和内杜瓦外壁之间,在侧板两侧上分别设置三个支持定位杆,定位杆采用聚酰亚胺,其热导率在室温 300K 下为 $\lambda=0.26W/mK$ 。则

$$Q_4 = \lambda \frac{A}{L} \Delta T = 0.22 \text{ kJ/h}$$

3.5 其它传热

超导电流引线所产生的传导热和引线工作时的焦耳热,和输液管的传导热比较大。但是由于采用可拔引线和可拔输液管,因此这部分传热不计入系统的漏热量。

对于真空夹层,由于已经抽成 $1 \times 10^{-3}Pa$ 的真空,所以气体的对流和传到所引起的漏热可以忽略不计。

所以,系统的总漏热为: $\Sigma Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 1.35 \text{ kJ/h}$

折算成液氮的损耗量为: $M = \Sigma Q / \gamma = 1.35 / 2.55 = 0.53 \text{ L/h}$

4 结论

本社瓦装置采用真空多层绝热、铜辐射冷屏、蛇形排气管的结构形式,省去了传统的在内杜瓦外面添加液氮屏的结构,大大简化了工艺结构,减轻重量,操作方便,绝热效果良好。根据传热理论分析,液氮的损耗量也小于技术要求的数值。

【参考文献】

- [1] 陈国邦,张鹏.低温绝热与传热技术[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] Микшев М.А. Основы Теплопередачи[M]. Госэнергоиздат,1956.
- [3] 阎守胜,陆果.低温物理实验的原理与方法[M].北京:科学出版社,1985.
- [4] 徐烈.我国低温绝热与贮运技术的发展与应用[J].低温工程,2001(2):1-8.
- [5] 徐烈,朱卫东,汤晓英.低温绝热与贮运技术[M].北京:机械工业出版社,1999. (编辑 立明)

作者简介:唐琼(1973-),女,硕士,讲师,从事射流和科研工作。

收稿日期:2007-01-08

然环境条件下使用的耐候性,尤其是海上风电的快速发展要求。因此,叶片的设计和制造质量水平十分重要,被视为风力发电系统的关键技术和技术水平的代表。

2 风机叶片材料性能及翼型

叶片材质强度是风力发电机性能优劣的关键。目前叶片所用材质主要为玻璃纤维增强复合材料,又称玻璃钢。由其制成的叶片重量轻,比强度高。玻璃钢的比重为 $(1.5\sim 2.0)\times 10^3\text{kg/m}^3$ 之间,只有钢材的 $1/4\sim 1/5$ 。比合金钢高1.7倍,充分利用复合材料的可设计性,可以制作出形状复杂、轻质高强的叶片,以对叶片的强度、刚度、固有频率等基本参数进行优化设计;具有疲劳强度高、缺口敏感性低、内部阻尼大、耐候性优良的特点^[1]。

风机叶片看起来像航空器的机翼。实际上,叶片最远端部分横切面的设计类似于正统飞机机翼。但是叶片内端的厚轮廓,通常是专门为风机设计的。在额定工况下,通过叶片每一剖面输出功率最大,由此导出最佳气动外形参数分布,包括沿展向各剖面弦宽和扭角。优化过程中考虑了诱导速度、升阻比、叶尖损失等对最佳性能的影响。由理论计算得到的弦宽和扭角分布在叶根处较大。考虑到叶根处剖面对风轮输出功率贡献不大,同时为降低叶片重量和成型难度。叶根一般设计成圆柱形。一般大型风机叶片使用3~4个翼型,布置在叶片展向不同位置,翼型间平滑过渡。可见,为叶片选择轮廓涉及很多折衷的方面,以达到可靠运转与延时特性等。

3 叶片气动弹性问题分类及产生原因

3.1 叶片气动弹性问题分类

就空气动力学方面的发生原因而言,气动弹性问题可分为二类:第一类颤振问题与气流分离和旋涡形成有关。这类颤振现象特别会出现在具有非流线型剖面的高层钢结构建筑及某些高速旋转机械上。这类颤振有时称之为“驰振(galloping)”或“失速颤振(stall flutter)”。此时,桨叶以恒定的大幅值持续振动,即“极限循环振荡”。该振动具有很大的振幅,气动力特性会有所改变,振动会变得更稳定,导致“自限振荡”。若桨叶具有足够大的扭转柔性,扭转会继续发展,直至桨叶弯曲或扭转失效,这一不稳定现象也称为“扭转发散”或“非振动失效”。这类颤振可以只与一个典型的单自由度有关。因此这类颤振问题的数学处理比较简单,甚至能得到非线性稳定性方程的解析解。

第二类颤振问题的特征,是它发生在势流中,因此气流分离和边界层效应对颤振过程没有重要影响。这类颤振主要发生在航空航天飞行器结构的流线型剖面升力系统中,通常称为“经典颤振”。是桨叶扭转和挥舞产生的自激不稳定振动。也即弯曲-扭转两自由度耦合系统的自激振动,桨叶颤振会导致桨叶剧烈的突发振荡,并增长达到破坏性的幅度。其基本特点是流动基本附着无明显分离,在这类颤振中,由于气动力对翼面的纯沉浮弯曲振动或纯扭转振动是起着阻尼的作用,因此在工程上不会发生单自由度的经典颤振,一般说来,参与经典颤振的弹性自

由度是较多的^[2]。由于风机叶片不是完全的航空翼型,所以上述两种颤振都有可能发生。

此外,桨叶的挠曲一般是挥舞运动、摆振运动和扭转运动相互耦合而产生的变形,除产生以上两种形式的破坏外,在摆振方向还会产生“摆振不稳定”。

3.2 叶片气动弹性问题的产生过程

首先,经典颤振发生的条件:结构上的瞬时流体动力与弹性位移之间有相位差,因而使振动的结构有可能从气流中吸收能量而扩大振幅。当叶片受扰动向上偏离平衡位置后,弹性恢复力使它向下方平衡位置运动,同时产生作用于叶片重心的向上惯性力,因叶片重心在扭心之后,惯性力产生对扭心的力矩而使叶片攻角减小,引起向下的附加气动力,加快叶片向下运动;当叶片运动到下方极限位置而返回向上运动后,出现相反的情况。整个过程中,空气动力是激振力,与叶片转动速度的二次方成正比;同时还有空气对叶片的阻尼力成反比。防止叶片颤振的最有效方法是使叶片中心前移以减小惯性力矩。

下面借助图解说明叶片为什么会发生另一类颤振——失速颤振。

叶片剖面如图1所示,当有气流沿着 W 方向吹它时,就会出现以下两种情况:当气流 W 与 X 轴的夹角 α (这里叫作攻角)比较小,气流很顺当地贴着叶片上的上下表面流过,如图1(a)所表示的那样;另一种是 α 角很大,气

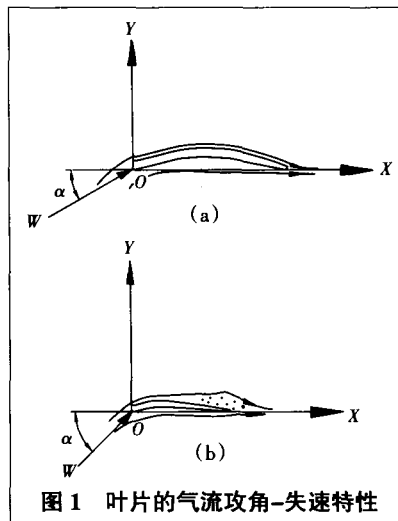


图1 叶片的气流攻角-失速特性

流通过叶片下表面时仍是贴壁流动,但流过上表面时就出现分离,如图1(b)所示。这种现象空气动力学上称之为失速,我们将对应这个失速点的攻角称为临界攻角^[3]。

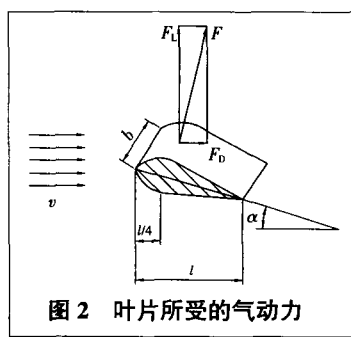
叶片在风的气流作用下会产生升力。在上面两种情况中,叶片升力大小随攻角 α 而变,在 α 小于临界攻角时, α 愈大升力愈大;当超过临界攻角时,则 α 愈大升力愈小。这是叶片失速后的最大特点。再有,当叶片的叶尖以一定的速度相对根部作向上的弯曲运动时,原来流场中的流相对于叶片的新位置就有了一个很小的角度差。这种攻角的变化引起了力的变化。若 α 小于临界 α ,当叶片向上作弯曲运动时升力是变小的。这种变小的升力对于叶片尖部向上的弯曲起了阻滞抑制的作用。然而,若 α 大于临界 α ,当叶片向上弯曲运动时升力是趋向增加的。这个增大的升力对于叶片的向上弯曲运动起了推波助澜的加强作用。因这时气流给叶片加进了能量。在这种情况下,叶片的振动会愈来愈强烈。而经过多次的振动,叶片的振动应力会大到令材料无法承受的程度。以至于在很

短的时间(十数秒到几十秒)即出现裂纹或断裂。让人不好防备的是,这种现象出现时除了伴随有嗡鸣和尖啸声外,并无任何先兆,是突发性的。航空工程界给这种现象起了个专用名词叫“颤振”,由于这种颤振是在叶片失速下形成的,故又称为失速颤振。通过颤振发生过程可以看出,颤振是由气动力、惯性力和弹性力交互作用的结果。

3.3 叶片气动弹性问题的产生原因分析

3.3.1 叶片转动过程中的受力分析

风机叶片所承受的载荷包括确定性和随机性载荷。与气动力有关的载荷均应视为随机载荷,理想稳定状态几乎不存在,但由于风机工况范围较大,随机响应分析仍有局限性。可把叶片上的荷载简化为确定性的。确定性载荷又可分为瞬时和周期性的。以下是有关风机玻璃钢叶片的载荷分析。



作用在叶片上的力可简化为三种:气动力、离心力和重力。其中气动力可分解为沿叶片法向和切向两个力;作用在翼型上的力 F 与相对速度方向有关:

分量 F_D 与速度 v 平行,称为阻力;分量

F_L 与速度 v 垂直,称为升力。不同截面形状的翼型其升力和阻力特性差异很大,影响翼型升力、阻力特性的外形因素主要有:弯度、厚度、前缘、表面粗糙度、有限翼展。

3.3.2 叶片气动弹性问题的产生原因

叶片在气动力、重力和离心力作用下,其主要振动形式有:挥舞、摆振和扭转。挥舞是指叶片在垂直于旋转平面方向上的弯曲振动;摆振是指叶片在旋转平面内的弯曲振动;扭转是指叶片绕其变距轴的扭转振动。这三种机械振动和气动力交织作用,形成气动弹性问题。如果这种相互作用是减弱的,则振动稳定,否则会出现颤振和发散^[4],这种不稳定运动的破坏力极强,是风力发电机设计中必须要考虑并要避免的,因此,叶片的动力学问题是风机叶片设计中的关键部分。

随机载荷气动力引起的振动,可以看作是不确定性力,即弹性桨叶在气动力和力矩的作用下产生位移或变形,桨叶挠曲变形改变了气流流动的边界条件,从而影响作用在桨叶上的力和力矩,这些力和力矩的变化反过来又进一步引起桨叶的挠曲。桨叶的弹性运动和气动载荷间这种流固耦合效应通常称之为“气动弹性”。桨叶在气动力影响下,产生一系列大幅值振荡或具有发散特性的挠曲,称为“气动弹性不稳定”,也叫颤振。

叶片颤振的发生是由于弯扭振动中某些参数耦合所导致的。叶片各剖面的扭角不同,故主惯性轴是不平行的,这就产生 x 和 y 方向的弯曲耦合振动。叶片旋转时还会产生离心力。离心力使各剖面受到轴向拉力,相当于增加了叶片的弯曲刚度,使叶片的弯曲频率增加。一般离

心力对叶片的一阶频率影响较大,而对二阶以上的频率影响不大。如考虑叶片剖面重心与扭转中心不一致,则还会引起弯扭耦合振动。

3 避免颤振的措施

风机在运行中,很难完全避免由于惯性不平衡力而引起的激振力,在设计中应当设法使振动尽可能减小,特别是要避免发生“共振”。这样,桨叶的固有振动频率是很重要的参数。由于桨叶的旋转使叶片“刚化^[5]”,其固有频率发生了改变,而且桨叶在颤振时的固有频率是系统耦合振动的固有频率,但大多数情况下系统耦合振动频率同静止状态单个桨叶弯曲、扭转或弯扭耦合频率很接近,通常认为桨叶的自激振动频率便是固有频率。一般桨叶、塔架和传动装置的各阶固有频率为风轮转速的函数,通常激振力的频率是旋转速度的整数倍,通过一组通过坐标原点的射线与频率曲线的交点对应的风轮转速,即为风轮的临界转速。在实际工作中可通过适当调整结构的质量和刚度分布,改变固有频率或限定风机的转速,使转速尽量避开其共振点。

通常认为3叶片的风机,气动激振力以3倍转速频率^[6](简称3P)的谐波分量为最大。因此叶片固有频率接近转速频率某一整数倍一定范围时,就会产生较大动应力,使叶片具有共振的性质。为避免共振,叶片固有频率需离开共振频率一定距离,这个距离常用百分比表示,称为叶片的共振安全率。

4 结语

在三种力作用下,叶片主要振动形式:挥舞、摆振和扭转。这三种机械振动和气动力交织作用,形成气动弹性问题。如果这种相互作用是相互减弱的,则振动稳定;否则会出现颤振和发散,这两种不稳定运动的破坏力极强,叶片的破坏主要是这两种形式的颤振引起的。在航空航天领域,飞机机翼以及火箭都容易发生^[7]。叶片振动过程中的能量主要集中于二、三阶低频处,所以挥舞和摆振是风机叶片的主要振动,而扭转在高阶仍不是主要振动。

[参考文献]

- [1] 薛忠民.复合材料风机叶片市场展望及技术进展[EB/OL].http://www.frp-online.com.cn/zh/ReadNews.asp?NewsID=227,2006.5.20.
- [2] 刘晓燕.风机叶片设计和稳定性分析[D].西安:西北工业大学,2004.
- [3] Darris L.White.A New Method for Dual-Axis Fatigue Testing of Large Wind Turbine Blades using Resonance Excitation and Spectral Loading[D].University of Colorado,2003.
- [4] 李德源,叶枝全,包能胜,等.风力机旋转风轮振动模态分析[J].太阳能学报,2004(1):76-81.
- [5] 陈余岳.大型风力机玻璃钢叶片设计[J].玻璃钢复合材料,1998(4):17-20.
- [6] 王其政.结构耦合动力学[M].北京:宇航出版社,1999.

(编辑 启迪)

作者简介:乔印虎(1979-),男,助教,主要研究方向为数控与检测。
收稿日期:2006-09-25