

基于试验设计法的风机叶片铺层结构分析及优化*

谢少军, 潘柏松*, 陈栋栋, 张兆鑫
(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为了研究分析铺层结构对风力发电机叶片强度的影响,建立了叶片有限元模型,计算获得了各个铺层方案下某型号叶片的强度指标值,最后,基于实验设计法对叶片铺层结构进行了优化设计。分析结果表明: $\pm 45^\circ$ 单层纤维铺层对叶片强度的影响要大于 0° 单层纤维铺层;这两类铺层对强度的影响存在耦合作用;基于试验设计方法优化设计获得的铺层结构能满足强度要求。

关键词: 试验设计方法;风力发电机;叶片强度

中图分类号: TH122; TH614; TK83

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)02-0159-04

Analysis and optimization of ply schedule for wind turbine blade based on DOE

XIE Shao-jun, PAN Bai-song, CHEN Dong-dong, ZHANG Zhao-xin

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to study the influence on the strength of the wind turbine blade by the ply schedule, the finite element model of the blade was established, and the strength indexes of the blade were gotten at various ply schedules by FEM. At last, the ply schedule was optimized by DOE. The research result shows that $\pm 45^\circ$ ply laminate has a greater effect on the strength of the blade than 0° ply laminate dose; these two kinds of laminates have coupling effect on the strength of the blade; the ply schedule derived from DOE meets the blade strength requirements.

Key words: DOE; wind turbine; blade strength

0 引言

铺层结构设计是指对铺层纤维角度和其铺层数量的设计。为了实现叶片经济效益的最大化,在叶片结构设计阶段,铺层结构优化设计显得尤为关键。关于铺层结构的分析与设计已有一些文献报道,如刘旺玉等^[1]利用叶片有限元模型,结合响应面法,研究了铺层纤维角度对叶片强度可靠性的影响,结果表明较高强度可靠指标值的铺层纤维角度在 45° 附近。Bir 和 Migliore^[2]基于 $\pm 45^\circ$ 和 0° 铺层纤维角度,提出了一种铺层厚度初步设计方法,针对某型号叶片进行了铺层方案初步设计。但利用该叶片有限元模型,计算分析发现该叶片在叶根与翼型过渡区域强度严重不足,表

明文献[2]提出的铺层结构设计方法在叶根与翼型过渡区域是不适用的。

本研究针对文献[2]某型号叶片气动模型,利用复合材料有限元法,结合 Tsai-Wu 强度准则,基于试验设计方法研究分析 0° 和 $\pm 45^\circ$ 单层纤维铺层对叶片强度的影响,并对叶片铺层结构进行优化设计,从而为叶片复合材料结构设计方法的研究提供基础。

1 复合材料结构设计相关理论

1.1 复合材料结构分析力学模型

层压板是复合材料结构的基本结构形式,由各单层复合材料沿厚度方向叠合而成的多层材料,其中各单层复合材料可以有各自不同的纤维方向。层压板和

收稿日期: 2011-09-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075365)

作者简介: 谢少军(1986-),男,浙江绍兴人,主要从事机械 CAD/CAE 及结构优化设计方面的研究。E-mail: juse12346789@126.com

通信联系人: 潘柏松,男,教授,硕士生导师。E-mail: panbsz@zjut.edu.cn

单层复合材料的构造示意图如图 1 所示。

单层复合材料是一种很薄的单向复合材料,其纤维按同一方向整齐排列,如图 1(a)所示。沿纤维方向称为纵向,以 1 表示;与纤维垂直的方向称为横向,以 2 表示;与 1~2 平面相垂直的方向,以 3 表示。如图 1(b)所示,层压板有一个总的坐标系 x - y - z ,其中 z 轴与单层材料的 3 轴一致。各单层材料的纤维方向 1 方向与 x 轴方向有一个偏置角 θ (铺层纤维角度),图中表示的 θ 为正方向。

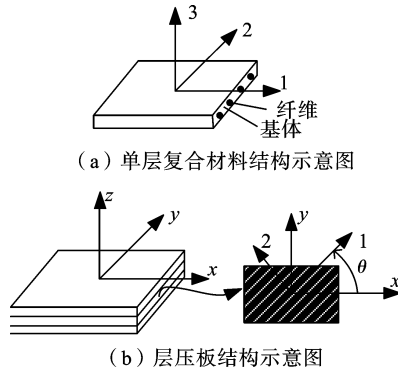


图 1 单层复合材料和层压板构造示意图

由图 1 可见,单层复合材料由纤维和基体组成。由于纤维和基体材料性能有较大差异,在单层复合材料层内,沿纤维方向的性能和垂直纤维方向的性能相差很大,形成了正交各向异性性能。而层压板又是由不同纤维角度的单层材料层叠而成,所以层压板表现出更复杂的力学性能。

1.2 试验设计方法(DOE)

试验设计方法^[3]是指通过设计一系列试验,对一个过程或系统的输入变量作一些有目的的改变,以便能观察到和识别出引起输出响应变化的缘由。常用的试验设计方法有:正交试验设计法、均匀试验设计法、回归正交设计法、序贯试验设计法等。

正交试验设计法^[4]是指用正交表安排多因素试验的方法,由于其具有完成试验要求所需的实验次数少;数据点的分布均匀;可用相应的极差分析方法、方差分析方法等对试验结果进行分析等特点而应用广泛,这正是本研究采用的试验设计方法。试验设计方法基本术语有:①试验指标:指作为试验研究过程的因变量,常为试验结果特征的量;②因素:指作试验研究过程的自变量,常常是造成试验指标按某种规律发生变化的那些原因。③水平:指试验中因素所处的具体状态或情况,又称为等级。

正交试验设计法的一般步骤为:①确定试验因素、水平和试验指标;②设计正交表表头;③依据正交表进行相关试验并记录试验数据;④试验结果分析。

正交表如表 1 所示,下面以表 1 为例讨论了试验

表 1 $L_4(2^3)$ 正交表

列号	1	2	3	试验指标
1	1	1	1	y_1
2	1	2	2	y_2
3	2	1	2	y_3
4	2	2	1	y_4
K_1	$y_1 + y_2$	$y_1 + y_3$	$y_1 + y_4$	
K_2	$y_3 + y_4$	$y_2 + y_4$	$y_2 + y_3$	
极差	$\text{Max}\{y_1 + y_2, y_3 + y_4\} - \text{Min}\{y_1 + y_2, y_3 + y_4\}$	$\text{Max}\{y_1 + y_3, y_2 + y_4\} - \text{Min}\{y_1 + y_3, y_2 + y_4\}$	$\text{Max}\{y_1 + y_4, y_2 + y_3\} - \text{Min}\{y_1 + y_4, y_2 + y_3\}$	

结果分析时的极差分析方法,极差指的是各列中各水平对应的试验指标平均值的最大值与最小值之差。用极差法分析正交试验结果,可获得在试验范围内各列对试验指标的影响从大到小的排队。某列的极差最大,表示该列的数值在试验范围内变化时,对试验指标的影响最大,反之则最小。

1.3 Tsai-Wu 强度准则

层压板作为复合材料结构的基本材料具有同常规金属材料不同的、更复杂的强度破坏机制。复合材料强度破坏准则还没有统一,目前主要有最大应变失效准则、最大应力失效准则、Tsai-Wu 强度失效准则和 Hill-Puck 强度失效准则等。

Tsai-Wu 强度失效准则耦合性地考虑了各个应力分量及材料抗拉、抗压强度的不等性,且已经实验验证其能对多种应力状态的复合材料强度失效能成功预测^[5]。其表达式为:

$$F_T = |A + B| \quad (1)$$

其中:

$$A = -\frac{(\sigma_{11}^f)^2}{\sigma_{11}^{fT}\sigma_{11}^{fC}} - \frac{(\sigma_{22}^f)^2}{\sigma_{22}^f\sigma_{22}^f} - \frac{(\sigma_{33}^f)^2}{\sigma_{33}^{fT}\sigma_{33}^{fC}} + \frac{(\tau_{12}^f)^2}{(\tau_{12}^f)^2} + \frac{(\tau_{23}^f)^2}{(\tau_{12}^f)^2} + \frac{(\tau_{13}^f)^2}{(\tau_{12}^f)^2} + \frac{C_{12}\sigma_{11}\sigma_{22}}{\sqrt{\sigma_{11}^{fT}\sigma_{11}^{fC}\sigma_{22}^{fT}\sigma_{22}^{fC}}} + \frac{C_{23}\sigma_{22}\sigma_{33}}{\sqrt{\sigma_{22}^{fT}\sigma_{22}^{fC}\sigma_{33}^{fT}\sigma_{33}^{fC}}} + \frac{C_{13}\sigma_{11}\sigma_{33}}{\sqrt{\sigma_{11}^{fT}\sigma_{11}^{fC}\sigma_{33}^{fT}\sigma_{33}^{fC}}} \quad (2)$$

$$B = \left(\frac{1}{\sigma_{11}^{fC}} + \frac{1}{\sigma_{11}^{fT}} \right) \sigma_{11} + \left(\frac{1}{\sigma_{22}^{fT}} + \frac{1}{\sigma_{22}^{fC}} \right) \sigma_{22} + \left(\frac{1}{\sigma_{33}^{fT}} + \frac{1}{\sigma_{33}^{fC}} \right) \sigma_{33} \quad (3)$$

式中: σ_{11}^{fT} —沿复合材料纤维方向的抗拉强度; σ_{11}^{fC} —沿复合材料纤维方向的抗压强度; τ_{12}^f —复合材料面内抗剪强度; C_{12}, C_{23}, C_{13} —Tsai-Wu 强度理论耦合系数,可设定为-1^[6],其余符号含义可类推获得。

作为强度失效与否的判据,当强度指标值 $F_T > 1$ 时,就认为结构不满足强度要求。

2 叶片有限元模型

为了便于比较分析,本研究选用了文献[2]给出的某型号叶片气动外形几何参数,如表2所示。文献[2]采用的箱型截面结构和铺层纤维角度排布示意图如图2所示。其前缘由 $\pm 45^\circ$ 单层纤维铺层铺设而成,翼梁由 $\pm 45^\circ$ 、 0° 单层纤维铺层和轻木夹心构成,后缘为 $\pm 45^\circ$ 单层纤维铺层和轻木夹心,腹板为 0° 单层纤维铺层和轻木夹心构成。文献[2]选用的E-glass复合材料参数^[7]如表3所示,其单层厚度为0.53 mm,轻木夹

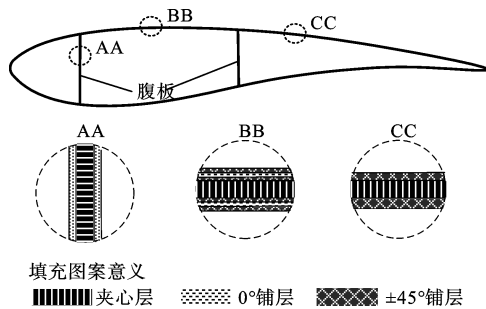


图2 箱型截面结构示意图

表2 叶片几何参数

位置 /m	弦长 /m	扭角 /deg	0° 层数	±45° 层数	夹心 层数	弯矩 /(N·m)
0	0.66	0.00	16	4	0	790 931
0.8	0.66	0.00	14	4	0	721 609
2.3	1.10	20.39	12	6	0	594 875
4.4	1.68	16.02	12	4	10	432 676
6.5	1.54	11.65	10	4	10	297 659
8.6	1.25	6.96	10	4	10	194 412
10.7	0.99	1.98	12	4	8	118 960
12.8	0.79	-1.88	12	4	6	66 036
14.9	0.61	-3.37	12	4	4	31 178
17.0	0.46	-3.41	8	4	2	10 653
19.1	0.45	-3.45	2	4	2	1 176
20.15	0.45	-3.47	2	4	2	-

表3 单轴复合材料性能参数

工程材料参数		强度	
E_{11}/GPa	33.6	σ_{11}^T/MPa	980
E_{22}/GPa	8.21	σ_{11}^C/MPa	-746
E_{33}/GPa	7.87	σ_{22}^T/MPa	30.6
G_{12}/GPa	4.48	σ_{22}^C/MPa	-20
G_{23}/GPa	4.78	σ_{33}^T/MPa	12.8
G_{13}/GPa	2.62	σ_{33}^C/MPa	-10
ν_{12}	0.29	τ_{12}^T/MPa	73.2
ν_{23}	0.31	τ_{23}^T/MPa	70.2
ν_{13}	0.37	τ_{13}^T/MPa	16.9

心的弹性模量为187 MPa,泊松比为0.3,单层厚度为3.125 mm。

IEC614001 标准^[8]规定在极端风速下,轮毂处风速为70 m/s,风机停机状态下,应只考虑叶片翼缘向载荷,进行叶片强度校核分析^[9-10]。在该状态下,截面承受的翼缘向弯矩由叶素动量理论^[11-13]计算获得,如表2所示。利用ANSYS 商用有限元分析软件,本研究选用8节点Shell 281 单元,建立了叶片有限元模型。

3 铺层纤维角度对强度的影响

由于叶片强度危险区域位于翼型过渡区域,同时,为了简单起见,本研究假设叶根和翼型过渡区域的铺层方案是一样的,通过安排 $\pm 45^\circ$ 和 0° 单层纤维铺层数量多个水平的正交试验来分析叶根和翼型过渡区域的铺纤维角度对叶片强度的影响。 $\pm 45^\circ$ 和 0° 单层纤维铺层的试验水平表如表4所示,根据因素和水平个数,并考虑2个因素之间交互作用,本研究设计了 $L_{25}(5^6)$ 的正交试验表,如表5所示,且将叶片最大Tsai-Wu 强度指标值 F_T 作为试验指标。

表4 2因素5水平表

水平	0°铺层数	±45°铺层数
	A	B
1	4	4
2	14	14
3	24	24
4	34	34
5	44	44

表5 标准正交表 $L_{25}(5^6)$

试验号			(A×B) (A×B) (A×B) (A×B)				F_T
	A	B	1	2	3	4	
1	1	1	1	1	1	1	133.9
2	1	2	2	2	2	2	15.8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	5	5	4	3	2	1	0.46
K_1	163.2	174.3	137.3	138.5	138.1	141.3	
K_2	33.6	24.9	42.3	22.6	28.1	21.1	
K_3	14.5	11.6	22.9	34.0	12.8	14.2	
K_4	7.4	7.3	12.7	12.5	30.7	16.3	
K_5	4.5	5.1	8	15.6	13.5	30.3	
极差	158.7	169.2			126.9		

因素主次:B>A>A×B

基于表5 给出的正交试验表,笔者利用叶片有限元模型,计算获得了各个铺层方案对应的叶片最大Tsai-Wu 强度指标值 F_T ,如表5 所示。本研究采用极差分析,发现 $\pm 45^\circ$ 单层纤维铺层对叶片强度的影

响要大于 0° 单层纤维铺层, 且两者对强度的影响存在耦合作用。

4 铺层结构设计

基于表 5 给出的 $\pm 45^\circ$ 和 0° 单层纤维铺层的正交表, 本研究拟合获得了叶片最大 Tsai-Wu 强度指标值 F_T 关于 $\pm 45^\circ$ 和 0° 单层纤维铺层数量的响应函数曲面, 该响应函数曲面的等高线图如图 3 所示。由图 3 可见, 等高线呈曲线形式, 表明了如上所述的 $\pm 45^\circ$ 和 0° 单层纤维铺层对叶片强度存在耦合作用。

最优铺层方案是指既满足强度要求又铺层总数最少的方案。本研究在此不考虑安全余量, 认为 $F_T=1$ 时叶片满足强度要求。显然, 等高线值为 1 的曲线上各点都满足强度要求, 而铺层总数最少, 指该曲线上距离坐标原点最近的点, 也就是所求的最优铺层方案。基于图 3 可获得该叶片 3~4 号截面的最优铺层

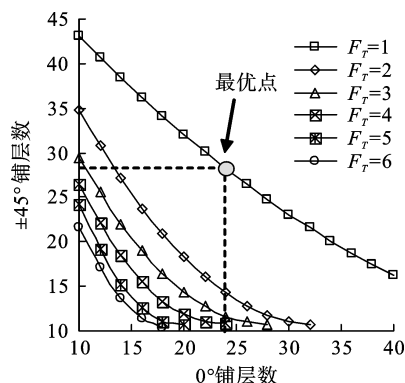


图 3 Tsai-Wu 强度指标值 F_T 响应曲面等高线图

表 6 优化后铺层方案(只给出了铺层变动的截面)

截面编号	1	2	3	4	5	6
半径/m	0.35	0.7	1.0	1.4	1.69	1.99
$\pm 45^\circ$	28	28	28	28	20	10
0°	24	24	24	24	26	26
夹心	0	0	0	4	4	4

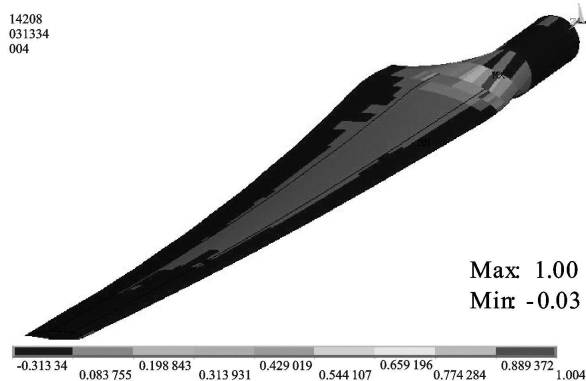


图 4 强度指标值分布云图

为: 28 层 $\pm 45^\circ$ 轴铺层和 24 层 0° 轴铺层。对铺层数作相应的平滑过渡处理后, 叶片的最终铺层方案如表 6 所示。本研究利用叶片有限元模型, 计算发现该铺层方案满足结构强度要求(其 $F_T=1$), 如图 4 所示。

5 结束语

本研究针对某型号风力发电机叶片, 通过试验设计法研究分析了两类铺层角度对风力发电机叶片强度的影响, 获得了 0° 和 $\pm 45^\circ$ 两类铺层对叶片强度的影响特性。

研究结果表明, 该研究为风力发电机叶片的铺层结构优化设计及结构强度特性的研究提供了一定的帮助, 具有一定的实际应用价值。

参考文献(References):

- [1] 刘旺玉, 张海全, 曾琳. 基于响应面法的仿生风力机叶片可靠性分析[J]. 太阳能学报, 2010, 31(9): 1204-1208.
- [2] BIR G S, MIGLION P G. Computerized method for preliminary structural design of composite wind turbine blades[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2001, 123(4): 372-381.
- [3] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [4] 方开泰. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [5] SODEN P D, HINTON M J, KADDOUR A S. Recommendations for designers and researchers resulting from the world-wide failure exercise [J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(3-4): 589-604.
- [6] MARK E T. Structural Analysis of Polymeric Composite Materials[M]. New York: CRC Press, 2003.
- [7] MANDELL J F, SAMBORSKY D D. DOE/MSU composite material fatigue database: test methods, materials, and analysis [R]. New Mexico: Sandia National Laboratories, 1997.
- [8] International Electrotechnical Commission. IEC 61400-1, Wind Turbine Generator System-Part I: Safety Requirements [S]. International Electrotechnical Commission, 2005.
- [9] 翁瑞森. 高压变频器在风机节能上的应用 [J]. 机电技术, 2011(1): 86-87.
- [10] 陈彩丽, 王加兴. 基于 Witness 的汽轮机叶片车间仿真优化方法研究[J]. 轻工机械, 2010, 28(4): 116-118.
- [11] JAMES F M, JON G M, ANTHONY L R. Wind Energy Explained-theory, Design and Application [M]. 2nd ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2010.
- [12] 陶忠维. 垂直轴阻力型风力机功率计算方法研究 [J]. 机械, 2011, 38(3): 27-70.
- [13] BURTON T, SHAMPE D, JENKINS N, et al. Wind Energy Handbook[M]. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2001.

[编辑: 张翔]