

文章编号: 1001-4888(2016)02-0199-10

接触状态对叶根轮槽应力分布影响的研究^{*}

袁沐, 姚骏, 陈巨兵

(上海交通大学 工程力学系, 上海 200240)

摘要: 汽轮机叶片叶根、轮槽连接区域常因加工误差及磨损等原因导致接触状态的改变, 从而改变整个区域应力分布并大大降低汽轮机的使用寿命。本文运用数字光弹性技术实验测试了长叶片叶根、轮槽在不同接触状态下的应力分布情况, 同时结合有限元进行了仿真计算。结果表明, 叶根、轮槽对称接触时, 全部齿同时接触的应力集中系数最小且分布较均匀; 而当部分接触齿产生间隙时, 接触状态发生显著变化, 应力集中系数明显增大; 尤其是当左右齿非对称接触时, 最大应力集中系数明显增大且应力分布不均匀。本文研究可为叶根、轮槽的优化设计、加工以及叶片的装配、维护提供实验依据。

关键词: 数字光弹性; 叶根轮槽; 接触状态; 应力分布; 有限元法(FEM)

中图分类号: O348.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-148

0 引言

汽轮机的叶片工作在高温、高压的蒸汽介质中, 加上转子旋转产生的离心力, 其应力状态非常复杂, 特别是叶片叶根和转子轮槽的连接状态对其应力分布有显著影响。叶根、轮槽的结构及其接触状态比较复杂, 在其圆角部分产生相当大的应力集中, 再加上振动下传到叶根所附加的动应力, 所以叶根事故又在叶片事故中占相当高的比例, 实际生产中叶片故障占汽轮机故障的 30% 左右^[1]。为了提高汽轮机的安全性, 必须对叶根、轮槽的接触状态及其对局部应力分布影响进行应力分析和优化结构设计, 尽量避免设计、工艺的不合理所造成的应力集中。叶根与轮槽间通过齿连接是目前采用的比较先进的连接方式, 由于结构复杂, 不存在解析解, 实验分析方法是解决这类问题的重要手段^[2-4]。

光弹性是目前研究接触应力和应力集中的一种比较成熟的实验方法。它利用偏振光通过透明受力模型获得干涉条纹图, 可很方便地直接确定模型各点的主应力差和主应力方向^[4-8]。如要得到主应力数值, 则需借助于弹性理论或其他实验方法^[9]。因为可直接观察模型的全部应力分布情况, 能直接看到应力集中部位, 可迅速、准确地确定应力集中系数^[10]。尤其是随着计算机图像处理技术在传统光弹性方法中的应用, 光弹性实验的分辨率得到大大提高, 数据处理也非常方便, 其应用也愈加广泛^[10-18]。本文运用数字光弹性实验研究了叶根、轮槽不同接触状态下的应力分布, 进而为其结构优化设计提供了重要的参考依据。

1 数字光弹法测量应力分布和应力集中系数的基本原理

本文中采用了平面光弹模型, 这与实际叶根尺寸存在一定偏差, 但根据实验和仿真结果显示, 当叶根厚度小于 60mm 时, 平面应力模型与实际情况吻合较理想^[1]。在光弹性实验中, 主要关心的相似参

^{*} 收稿日期: 2015-09-01; 修回日期: 2015-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(11372182, 11472267)资助

通讯作者: 陈巨兵(1966—), 男, 教授, 博士生导师。主要从事实验固体力学及测试技术研究。Email: jichen@sytu.edu.com

数为:

$$\pi_1 = \frac{\sigma L^2}{P} \quad (1)$$

式中, σ 为应力; P 为载荷; L 为特征尺寸。

模型相似时, 模型与原型中 π_1 相等, 而由于是线弹性模型, σ 与 P 比值不变。可得:

$$\sigma = \frac{k_L^2}{k_P^2} \sigma' \quad (2)$$

式中, σ 为原型应力; σ' 为模型对应点应力; k_L 、 k_P 为对应相似比。

由此可得, 原型与模型在应力分布及对应应力集中系数上完全相等。

光弹性法的基本理论是平面应力—光学定律。根据相似定律, 将具有暂时双折射效应的透明晶体材料(如环氧树脂、聚碳酸酯等)制成模拟实物的模型。当平面偏振光垂直射入平面应力模型时, 由于模型具有暂时双折射现象, 光波沿模型上射入点的应力主轴方向分解成两束平面偏振光, 这两束平面偏振光在模型内部的传播速度不同, 通过模型后产生了光程差, 则有^[6]:

$$\delta = Ch(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (3)$$

式中, δ 为两束平面偏振光的光程差; C 为模型材料的应力光学系数; h 为模型的厚度; σ_1 、 σ_2 为两束平面偏振光振动方向上模型材料的应力。

对于平面模型, 可直接放入平面偏振光场或圆偏振光场中得到相应的等倾线、等差线条纹, 通过应力光学定律可以建立起主应力方向与等倾线、主应力差与等差线之间的关系。

本文采用了相移法以实现光弹性条纹的自动化处理。通过使用相移器, 可以在干涉条纹中引入一个已知的相位差, 从而形成相移后的条纹图像。

首先, 在平面偏振光场下采用四步相移获得等倾线的相位图, 不同相位图中, 光强可表达为:

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= \frac{1}{2} k \sin^2 \frac{\delta}{2} [1 - \cos 4\alpha] \\ I_2(x, y) &= \frac{1}{2} k \sin^2 \frac{\delta}{2} [1 - \cos(4\alpha - \frac{\pi}{2})] \\ I_3(x, y) &= \frac{1}{2} k \sin^2 \frac{\delta}{2} [1 - \cos(4\alpha - \pi)] \\ I_4(x, y) &= \frac{1}{2} k \sin^2 \frac{\delta}{2} [1 - \cos(4\alpha - \frac{3\pi}{2})] \end{aligned} \quad (4)$$

式中, δ 为各点相位差; α 为等倾线参数角, 下同。联立方程即可求得:

$$\alpha = \frac{1}{4} \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} \quad (5)$$

解包裹即可得到全场等倾线信息。

然后, 在圆偏振光场中处理等差线。其中对主应力方向相同的区域, 旋转检偏镜可对等差线产生相移, 当旋转角分别为 0 , $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/4$ 时, 对应光强表达式为:

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= \frac{1}{2} k [1 - \cos \delta] \\ I_2(x, y) &= \frac{1}{2} k [1 - \cos(\delta + \frac{\pi}{2})] \\ I_3(x, y) &= \frac{1}{2} k [1 - \cos(\delta + \pi)] \\ I_4(x, y) &= \frac{1}{2} k [1 - \cos(\delta + \frac{3\pi}{2})] \end{aligned} \quad (6)$$

由以上四式即可解出:

$$\delta = \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad (7)$$

依此类推, 如果沿不同的主应力方向作与(4)式类似的相移, 分别求得对应的 δ 值, 再根据等倾线

相位图,按不同的 α 值选取对应的 δ 值。那么,就可以拼接出一个等差线的相位图像。事实上,依次沿不同的等倾线角 α 去作相移处理是费时和不必要的。通过实验可以验证:在用 Tardy 补偿法对分数级条纹进行标定时,如果主应力方向与起检偏镜存在夹角小于 13° 时,其产生的误差小于3%。故本文中选取 $\alpha = -\pi/2, -3\pi/2, -\pi/4, -\pi/8, 0, \pi/8, \pi/4, 3\pi/8$ 八个方向(由于对称性,事实上仅需采集四组数据)分别进行相移,即可拼接出全场相位差^[11]。

2 实验

如图1所示的叶根和轮槽是枞树型对称结构,各有三对齿、槽。叶片通过叶根安装在转子上的轮槽中组成汽轮机的主体。因此,叶根与轮槽的接触区域的应力分布状况对汽轮机的运行安全有着极其显著的影响。图1为某型汽轮机叶根、轮槽的全尺寸轮廓。左图是叶根,自上而下对称分布的I、II、III齿,对应安装在右图的轮槽中。因此叶根与轮槽的理想接触状态是三对齿分别对称接触,且各个齿的应力集中系数一致。由于加工、装配误差及叶片工作时复杂的受力状态,实际上叶根与轮槽的接触非常复杂,因此本文将研究四种典型的接触:只有第III对齿对称接触,简称状态A;只有第II对齿对称接触,简称状态B;三对齿全部对称接触,简称状态C;在第III对齿单边存在间隙的不对称接触,简称状态D。

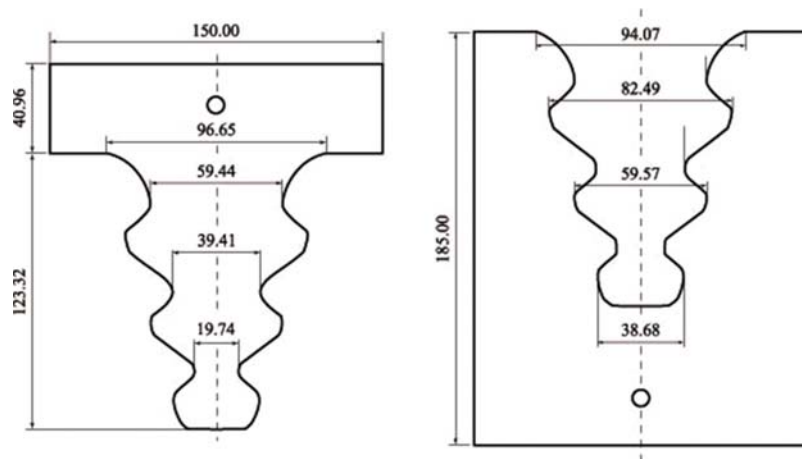


图1 叶根轮槽模型轮廓图(单位:mm)

Fig. 1 Profile image of the model of the blade and groove(unit:mm)

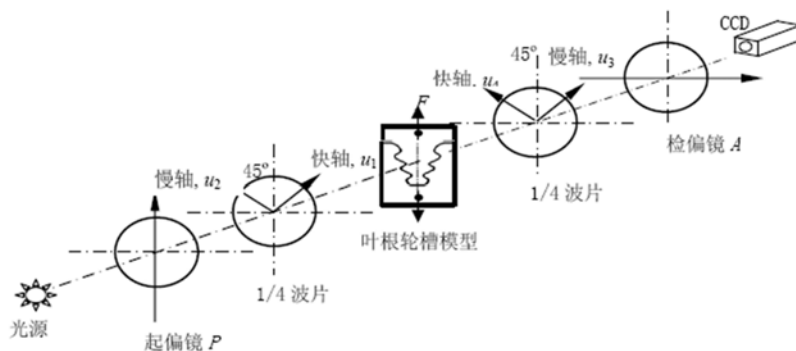


图2 圆偏振光学系统

Fig. 2 The system of Circularly polarized light

光弹性模型完全按照实际的叶根轮槽尺寸加工,材料为环氧树脂,厚度为6mm。试件加工时,首先浇注厚度为6mm的环氧树脂平板;再根据叶根、轮槽的设计图,加工平面光弹性试样;最后对光弹性试样进行退火处理,以消除加工的残余应力。对各组模型,再通过砂纸打磨的方法制造接触间隙,以获得不同的接触状态。

在如图2所示的圆偏振光系统中,将叶根、轮槽模型安装在加载架上,保持它们在同一平面内。微

调加载架的下端,确保上下加载点的作用力在同一条线上,并通过试样的中央,这样试样两边条纹呈对称分布。

测量时,在平面偏振光场中,通过四步相移法获得四幅原始图像;然后调整至圆偏振光场,分别在第一主应力方向为 $0, \pi/8, \pi/4, 3\pi/8$ 四个方向上进行相应的等差线相移,具体操作过程仅以 $\pi/8$ 方向为例,步骤为:

(1) 将双正交圆偏振光场逆时针旋转 $\pi/8$ (将双正交圆偏振光场中的起偏镜、两个 $1/4$ 波片、检偏镜一起逆时针旋转 $\pi/8$),采集第一幅条纹图像,此为 0° 图像(如要获得第一主应力方向为 $0, \pi/4, 3\pi/8$ 的等差线相移图,需将双正交圆偏振光场所有镜子分别逆时针旋转 $0, \pi/4, 3\pi/8$);

(2) 分别逆时针旋转检偏镜 $\pi/4, \pi/2, 3\pi/4$,采集图像分别为 45° 图像, 90° 图像, 135° 图像。它与步骤(1)中的 0° 图像形成了四幅图像,由此即完成了 $\pi/8$ 方向上的等差线相移。

(3) 采集了四个方向等倾线和等差线相移图共计 20 幅后,通过计算得到模型的全场等差线相位^[27]。

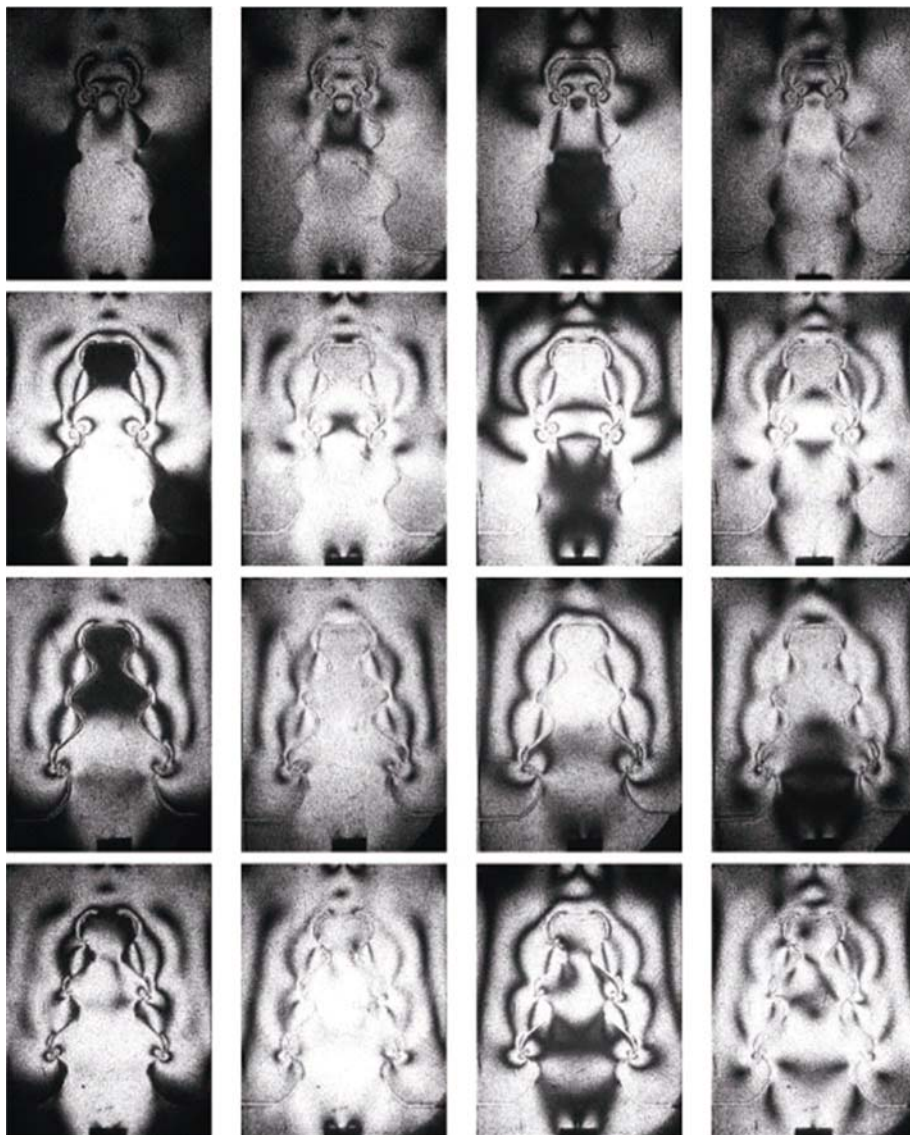


图 3 0° 方向等差线相移图,从上到下依次为状态 A、B、C、D,从左到右依次为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 图像

Fig. 3 The phase-shifting image of isoclinic in 0° direction, the images in status A, B, C, D are in turn from top to bottom, and the images in $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ are in turn from left to right

图 3 为 500N 载荷下,以上 A、B、C、D 四种不同接触状态下的 0° 方向的四步相移图。其中状态 A、

B、C 为对称接触: 状态 A 对 II 齿和 III 齿打磨制造间隙(约 0.05mm~0.1mm, 下同), I 齿接触; 状态 B 打磨 I 齿和 III 齿, II 齿接触; 状态 C 未打磨, 为三齿接触。状态 D 为非对称接触, 对右侧(相对于图 3 中的方向)三齿进行了打磨。

3 实验结果与分析

获取条纹图后, 通过相移法可以计算出各接触状态的全场等差线相位图。根据光弹性公式即可计算出全场主应力差(Tresca 应力):

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nf}{d} \quad (8)$$

式中材料条纹值由标准实验测得为 $f=13.9\text{N/mm} \cdot \text{条}$, 模型厚度 $d=6\text{mm}$ 。

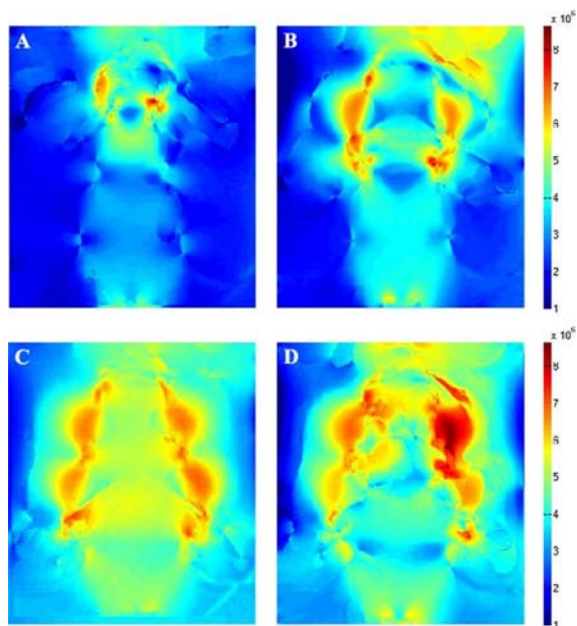


图 4 叶根轮槽在不同接触状态下的主应力差(单位:Pa)

Fig. 4 Principal stress difference on the blade root and the groove at different contact statuses (unit:Pa)

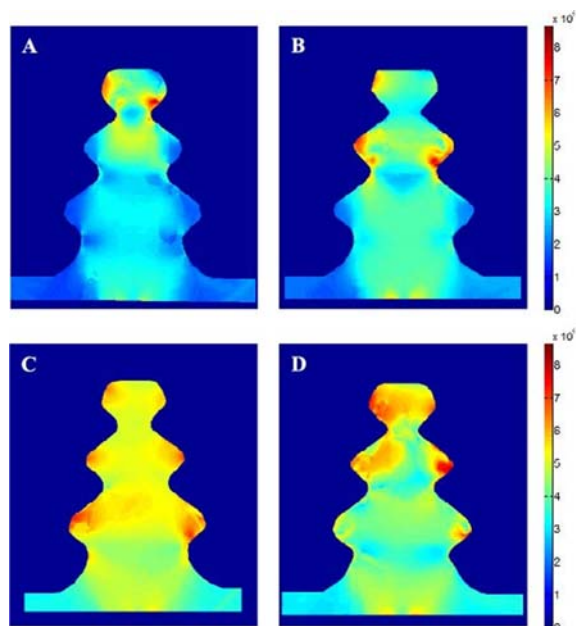


图 5 叶根在不同接触状态下的主应力差(单位:Pa)

Fig. 5 Principal stress difference on the groove at different contact statuses (unit:Pa)

图 4 即为四种不同接触状态下主应力差分布图, 显然叶根轮槽间接触状态对应力大小及分布的影响十分显著。三齿接触状态(状态 C)应力分布较为均匀, 单齿接触时(状态 A、B), 接触齿附近区域应力集中现象较为明显。对于非对称情况(状态 D), 两侧应力明显不平衡, 应力集中情况也更为明显。

与轮槽相比, 工程中更关注叶根的受力情况。为方便观察叶根接触边界附近的应力, 在图 5 中将叶根的主应力差分布图单独提取出来。由图可见, 叶根边缘应力显著高于中间区域。考虑到叶根结构的对称性, 选取其对称轴上的主应力差作为名义应力, 左右两边与轮槽接触处的主应力差与对称轴上的主应力差的比值作为应力集中系数(SCF, 下同); 并沿对称轴方向将叶根 20 等分, 如图 6 所示。计算结果如表 1 所示(下划线部分为该状态下所在区域的最大值)。

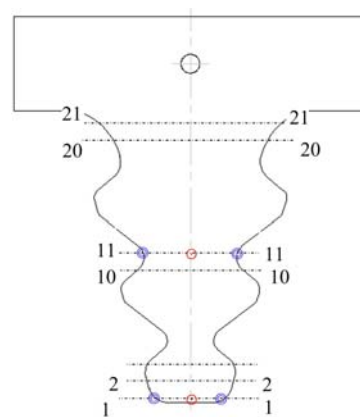


图 6 主应力差采样点位置

Fig. 6 Data points for the principal stress difference

表 1 各种接触状态下不同截面上应力集中系数(左右按图 4、图 5 中方向定义,下同,下划线部分为最大值)

Tab. 1 Stress concentration factors of the data points at different contact statuses
(with maximum value in each column underlined)

	状态 A		状态 B		状态 C		状态 D	
截面	左	右	左	右	左	右	左	右
1-1	1.85	0.75	1.62	0.98	1.23	1.08	1.21	0.93
2-2	1.57	0.98	1.50	1.09	1.15	1.10	1.26	1.02
3-3	1.38	1.34	1.17	1.08	1.02	1.01	1.14	1.15
4-4	1.57	1.76	0.96	0.88	0.99	0.98	1.22	1.07
5-5	<u>1.85</u>	<u>1.98</u>	0.81	0.79	0.94	1.01	1.27	0.98
6-6	0.97	1.08	0.82	0.75	0.99	1.24	0.96	1.12
7-7	0.58	0.68	1.59	1.30	1.14	1.17	1.05	1.28
8-8	0.46	0.39	1.41	1.29	1.27	1.24	1.35	1.50
9-9	0.47	0.43	1.26	1.48	1.02	0.99	1.43	<u>1.84</u>
10-10	0.65	0.53	1.60	<u>2.32</u>	0.94	0.95	<u>1.45</u>	1.58
11-11	1.12	1.22	<u>2.15</u>	2.13	0.90	0.90	1.18	1.27
12-12	1.13	1.21	1.31	1.21	0.96	0.98	1.09	0.86
13-13	0.59	0.88	0.87	0.94	1.06	1.06	1.27	1.06
14-14	0.53	0.68	0.45	0.54	<u>1.34</u>	1.19	1.25	1.09
15-15	0.50	0.59	0.50	0.57	1.17	1.10	1.10	1.44
16-16	0.53	0.61	0.53	0.59	1.05	<u>1.30</u>	1.10	1.38
17-17	0.54	0.62	0.74	0.82	1.18	1.18	1.41	1.32
18-18	1.00	0.86	0.86	0.61	1.18	1.14	1.40	1.33
19-19	1.01	0.95	0.61	0.61	1.00	0.90	0.98	0.87
20-20	0.53	0.83	0.48	0.62	0.84	0.83	0.77	0.74
21-21	0.47	0.55	0.49	0.62	0.74	0.70	0.71	0.74

通过对实验结果分析可以得到:

- 1) 叶根上的主应力差远远大于轮槽;
- 2) 对于三种左右对称的接触状态(状态 A、状态 B、状态 C),应力集中系数的最大值分别为 1.97、2.31、1.30,全部齿都接触的状态 C 的值是最小的。这就意味着增加接触的齿数(相当于增加受载时叶根与轮槽的接触面积)可以减小应力集中;
- 3) 比较对称接触状态 C 与不对称接触的状态 D 可以发现:状态 D 的最大应力集中系数为 1.84,比状态 C 高出 42%。可见,即便是极小的左右间隙差对叶根轮槽结构的安全稳定也有很大的影响。
- 4) 各状态的最大主应力差分别为 7.99MPa、7.99MPa、7.42MPa、8.65MPa;
- 5) 综合考虑最大应力集中系数和应力分布等因素,接触状态 C 为最佳的接触状态,该状态下最大应力集中系数最小,应力分布最为均匀,材料强度得到充分利用。

4 有限元仿真

对于模型同时还进行了仿真计算。其中所采用的软件为 Abaqus,单元类型为 CPS4I(4 节点非协调平面应力单元)。弹性模量为 3.5GPa,泊松比为 0.38,摩擦系数为 0.15,均为实验测得。接触面则采

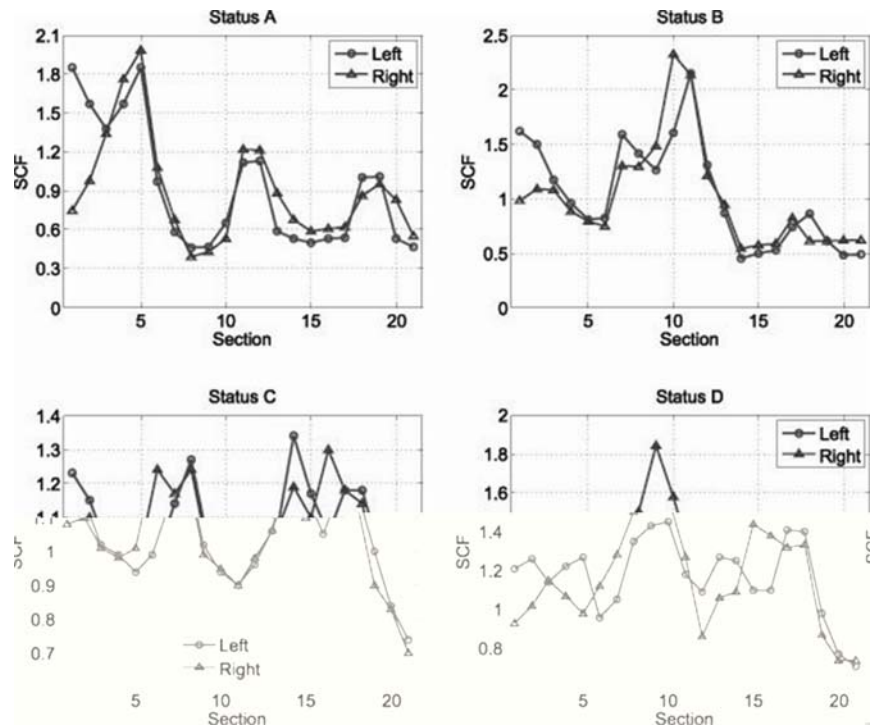


图 7 不同接触状态下各采样点应力集中系数

Fig. 7 Stress concentration factors of the data points at different contact statuses

用有限滑移算法。其中不同状态下,间隙设置如表 2。

表 2 不同接触状态各齿间隙(单位:mm)

Tab. 2 Clearance between pairs of teeth in different contact statuses (unit:mm)

	状态 A		状态 B	状态 C	状态 D	
位置	对称	对称	对称	对称	左侧	右侧
I 齿	0	0.05	0	0	0.05	0
II 齿	0.05	0	0	0	0.05	0
III 齿	0.05	0.05	0	0	0.05	0

图 7 为叶根主应力差仿真图,其应力分布情况及集中区域与实验结果一致,其中各主要接触区域峰值应力与实验结果对照如表 3(下划线数值为所在状态下的最大值)。由表 3 数据可见,各接触状态仿真结果与实验结果相差多在 10% 以内,考虑到实验中装配及间隙打磨的误差,二者结果吻合较为理想。

表 3 各接触区域峰值主应力差对照表(单位:MPa,下划线者为最值)

Tab. 3 The peak values of principal stress difference of the contact areas(unit:MPa,with maximum value underlined)

	状态 A		状态 B		状态 C		状态 D			
位置	仿真	实验	仿真	实验	仿真	实验	仿真(左)	实验(左)	仿真(右)	实验(右)
I 齿	<u>8.21</u>	<u>7.99</u>	5.24	5.89	6.3	6.42	6.39	7.34	5.37	6.69
II 齿	3.61	3.87	<u>8.91</u>	<u>7.99</u>	5.6	6.63	6.77	6.34	<u>9.07</u>	<u>8.65</u>
III 齿	2.65	3.13	3.20	3.28	<u>7.98</u>	<u>7.42</u>	4.68	5.48	5.43	6.10

取应力集中系数(SCF)为各点 Mises 应力与所在行应力均值的比值,则三对接触齿在不同接触状态下的最大应力集中系数如表 4,其变化趋势与实验结果一致。状态 C 的 SCF 在四种状态中分布最为均匀,三对接触齿充分接触,无应力特别集中的区域,叶根强度得以充分利用。而状态 D 接触非对称,其 SCF 相较于状态 C 则显著增高。对比 C、D 两种状态的横向(X 轴)位移图 8,可见状态 D 中叶根横向位移远远大于 C 状态,并且产生了明显的刚体转动。这直接导致叶根与轮槽间接触区域偏离设计

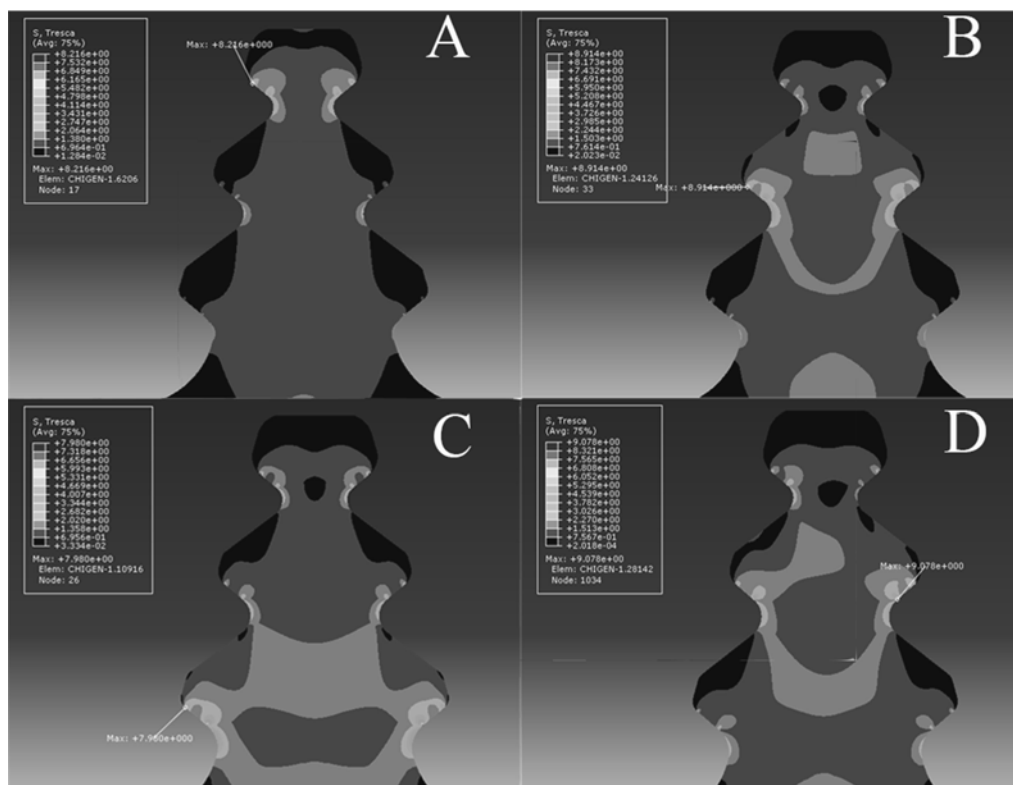


图 8 各接触状态主应力差(Tresca 应力)仿真云图

Fig. 8 The simullink contour map of the principal stress in different contact statuses
接触面,大大减小了接触面积,造成了应力集中系数的急剧上升。

表 4 各接触状态下接触齿最大应力集中系数

Tab. 4 The peak values of the SCF in different contact statuses

位置	状态 A	状态 B	状态 C	状态 D
I 齿	2.87	1.90	2.65	3.42
II 齿	1.73	3.13	2.92	3.75
III 齿	1.78	1.72	3.22	2.19

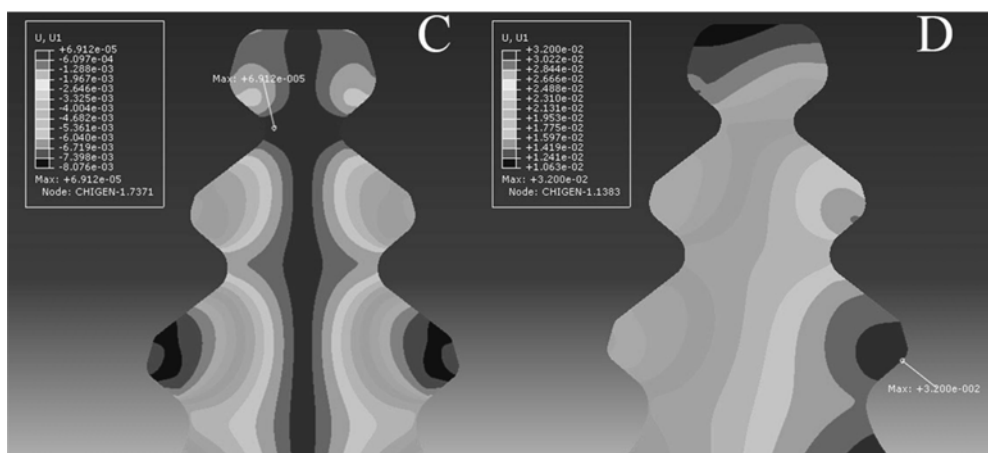


图 9 C、D 状态下横向位移云图

Fig. 9 The contour map of the lateral displace in status C and D

5 结论

光弹性实验的结果直观、有效地显示出了整个叶根轮槽上的应力分布状况,能够直接看到条纹密集的应力集中区域。通过计算机图像处理技术对采集的图像进行了条纹自动处理,最终获得了各接触状态的应力分布和应力集中情况定量结果。经对比分析后可以发现,全部齿同时接触且左右对称的接触状态是最佳的。此种接触状态下,叶根与轮槽的接触面积最大,减小了应力集中;应力分布也比较均匀,材料的强度得到充分的利用。尤其是当叶根、轮槽间存在非对称接触间隙时,应力集中系数显著增大,由仿真结果可知,这主要是由于齿根偏离设计接触面所导致。这种情况对汽轮机的运行有很大的安全隐患。因为材料限制,实验和仿真都以弹性阶段进行分析,而实际原型叶根的部分受力较大区域可能存在塑性变形,这导致实验结果与实际测试现象相比有一定偏差,这也是一个值得研究的问题。不过,本文对叶根应力分布的分析仍然对现实中的汽轮机设计工作有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 王小平. 用变态模型研究汽轮机叶根轮槽的三维接触问题[D]. 天津大学, 2009:1—20 (WANG Xiaoping. Research of the three-dimension contact problem of the steam turbine blade's root and groove by the distorted model[D]. Tianjin University, 2009:1—20 (in Chinese))
- [2] Denizhan Yavas, Imren Uyar, Demirkan Coker, et al. Experimental and computational investigation of debonding at the interface of two L-shaped polycarbonate plates[C]. ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2012.
- [3] Sobahan Mia, Shota Mizukami, Ryusei Fukuda, et al. High-pressure behavior and tribological properties of wind turbine gear oil[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(1):111—114.
- [4] Meguid S A, Kanth P S, Czekanski A. Finite element analysis of fir-tree region in turbine discs[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2000, 35(4):305—317.
- [5] Frocht M M. Photoelasticity(Vol. 1)[M]. J. Wiley, 1941.
- [6] Frocht M M. Max Mark. Photoelasticity(Vol. 2)[M]. J. Wiley, 1948.
- [7] Ramesh K, Mangal S K. Data acquisition techniques in digital photoelasticity: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1998, 30(1):53—75.
- [8] 钟振威, 贺玲凤. 改进的六步相移法确定等倾角与等差线相位[J]. 实验力学, 2013, 28(4):524—528 (ZHONG Zhenwei, HE Lingfeng. On the determination of isoclinic angle and isochromatic line by a improved six-step phase shifting mehtod[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(4):524—528(in Chinese))
- [9] 李斌, 杨国标. 光弹性—数字散斑相关混合法在光弹条纹主应力分解中的应用[J]. 实验力学, 2013, 28(2):181—186 (LI Bin, YANG Guobiao. On the application of photoelasticity-digital speckle correlation hybrid method in separation of main stress photoelastic fringes[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(2):181—186 (in Chinese))
- [10] Aben H, Ainola L, Anton J. Integrated photoelasticity for nondestructive residual stress measurement in glass[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 33(1): 49—64.
- [11] 张东升, 张帆, 郁时炼. 光弹条纹图像的全场相移技术[J]. 实验力学, 1996, 11(1): 38—46 (ZHANG Dongsheng, ZHANG Fan, YU Shilian. Whole-field phase shifting for isoclinic and isochromatic patterns[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1996, 11(1):38—46 (in Chinese))
- [12] Zheng Tieyu, Danyluk A S. Study of stresses in thin silicon wafers with near-infrared phase stepping photoelasticity[J]. Journal of Materials Research, 2002, 17(1): 36—42.
- [13] Fangming Zhao, Simon A Hayes, Eann A Patterson, et al. Measurement of micro stress fields in epoxy matrix around a fibre using phase-stepping automated photoelasticity[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63(12):1783—1787.
- [14] Morris L, O'Donnell P, Delassus P, et al. Experimental assessment of stress patterns in abdominal aortic aneurysms using the photoelastic method[J]. Strain, 2004, 40(4):165—172.
- [15] Majmudar T S, Behringer R P. Contact force measurements and stress-induced anisotropy in granular materials

- [J]. Nature, 2005, 435(7045): 1079—1082.
- [16] Roberto Adrian Markarian, Cristiane Ueda, Claudio Luiz Sendyk MSc, et al. Stress distribution after installation of fixed frameworks with marginal gaps over angled and parallel implants: a photoelastic analysis[J]. Journal of Prosthodontics, 2007, 16(2):117—122.
- [17] Christopher C J, James M N, Patterson E A, et al. Towards a new model of cracktip stress fields[J]. International Journal of Fracture, 2007, 148(4):361—371.
- [18] Lei Zhenkun, Yun Hai, Zhao Yanru, et al. Study of shear transfer in Al/epoxy joint by digital photoelasticity[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(6):701—707.
- [19] Patterson E A. Automated photoelastic analysis[J]. Strain, 1988, 24(1):15—20.
- [20] Ramesh K, Ganesan V R, Mullick S K. Digital image processing of photoelastic fringes—a new approach[J]. Experimental Techniques, 1991, 15(5):41—46.
- [21] Haake S J, Wang Z F, Patterson E A. Evaluation of full field automated photoelastic analysis based on phase stepping[J]. Experimental Techniques, 1993, 17(6):19—26.
- [22] Asundi A. Phase shifting in photoelasticity[J]. Experimental Techniques, 1993, 17(1):19—23.
- [23] Ajovalasit A, Barone S, Petrucci G. A review of automated methods for the collection and analysis of photoelastic data[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1998, 33(2):75—91.
- [24] Ramji M, Ramesh K. Whole field evaluation of stress components in digital photoelasticity issues, implementation and application[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(3):257—271.
- [25] Ramji M, Prasath R G R. Sensitivity of isoclinic data using various phase shifting techniques in digital photoelasticity towards generalized error sources[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(9):1153—1167.
- [26] Zhang Y, Huang M, Liang H, et al. Branch cutting algorithm for unwrapping photoelastic phase map with isotropic point[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(5):619—631.
- [27] Han Y, Zhang D, Cui Y, et al. Automated photoelasticity stress analysis[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2009, 15(2):147—152.

On the Effect of Contact State on Stress Distribution in Turbine Blade Root Wheel Groove Area

YUAN Mu, YAO Jun, CHEN Ju-bing

(Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Contact state change in the area connecting blade root with wheel groove in steam turbine due to machining error and wear etc. may change the stress distribution of whole area and thereby greatly reduce the service life of steam turbine. In this paper, stress distribution in the area connecting long blade root and wheel groove was experimentally measured in different contact states, based on digital photoelasticity technique, and FEM numerical simulation. Results show that when blade is symmetrically contacted with wheel groove, all teeth contact simultaneously, the stress concentration factor is the smallest and its distribution is uniform. But when gaps exist between parts of teeth, the contact state changes obviously, the stress concentration factor increases greatly. Especially, when the left and right teeth contact asymmetrically, the maximum stress concentration factor increases obviously and the stress distribution is nonuniform. Above results can be helpful to optimization of design, processing, assembling and maintenance of blade root and wheel groove in steam turbine.

Keywords: digital photoelasticity; blade root wheel groove; contact state; stress distribution; finite element method (FEM)