

船用燃气轮机动力涡轮支架光弹应力测试分析

王峰*

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

张秋华

(哈尔滨工业大学)

〔摘要〕 本文利用光弹性原理,对某型船用燃气轮机动力涡轮后支架进行了应力测试分析,给出了该支架的等倾线和等差线,并在此基础上计算了该支架某截面的应力分布。

关键词 涡轮 光弹性 应力分析

一、前言

船用燃气轮机动力涡轮支架是该动力装置的一个重要构件,它主要起支撑动力涡轮的作用,在实际工作情况下,它要承受各种负载,如动力涡轮的重力,海水振荡和炮火轰击而引起的动力涡轮转子和静子对它的动态冲击力,因此搞清支架在受载情况下的应力状态,对该动力装置的安全运行具有重要的意义。我们按一定比例,制作了该支架的光弹模型,在使其承受静模拟载荷的作用下,应用光弹性应力测试方法,成功地绘制了该支架的等倾线,拍摄了它的等差线,并在此基础上利用剪应力差法计算了支架某典型截面的应力分布。

二、支架光弹性应力测试

光弹性测试是一种光学——力学测试方

法,它采用具有双折射性能的弹性透明材料,制成与构件形状几何相似的模型,并使其受载情况与实际构件的受力情况相似。这样如果把受载模型置入正交平面偏振光场,则可获得一系列干涉条纹,其中光强 $I=0$ 的暗条纹可分为两种,其一为等倾线,它是模型上主应力方向与偏振轴方向相同的点所构成的干涉条纹;其二为等差线,它是模型上主应力差相等的点所构成的干涉条纹,公式表示为:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = nf/d$$

式中 n ——等差线条纹级次;

f ——模型材料条纹值,是由模型材料与光源波长决定的常数;

d ——模型厚度。

为了准确地观测等差线,我们可把受载模型置入正交圆偏振暗光场,便能单独获得等差线。利用等倾线我们可测取模型上各点的主应力方向,而利用等差线则能够测取模型上各点的主应力差,并可由此进一步确定

模型上各点的应力状态。

该测试是在北京科学仪器厂生产的 409 一Ⅲ型偏振光弹仪上进行的。

图 1 为该支架的光弹模型图, 在它的上边标出了模拟载荷的施加方式, 以及载荷在各施力处的分配。模型材料为环氧树脂, 其材料条纹值为 $f = 1.31 \times 10^4 \text{N/m}$, 模型厚度为 $d = 9.55 \times 10^{-3} \text{m}$ 。

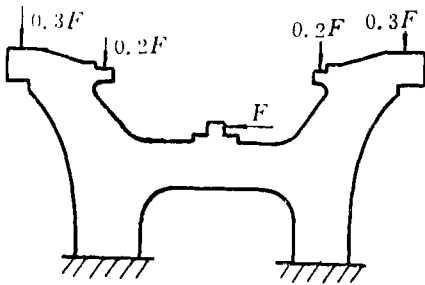


图 1 支架光弹模型及加载方式

首先将模型固定在加载架上, 然后按图 1 给模型加上载荷, 置入正交平面偏振光场中, 采用白光光源, 等差线呈现为较鲜艳的彩色条纹, 而等倾线则始终是黑色条纹, 同步转动起偏镜和检偏镜, 便可根据黑色条纹的变化情况, 绘制出在不同等倾参数 θ 下的等倾线图, 如图 2 所示。

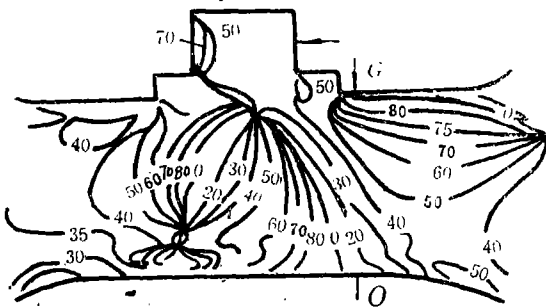


图 2 支架等倾线图 (局部)

为了获得单独的等差线条纹图, 我们把光路布置改变成正交圆偏振光场, 并采用单色光源, 即在白光光源上加一单色滤光片, 从零开始逐渐给模型加载, 同时观察模型上条纹级次的变化规律, 在白光下, 等差线图

中总存在某些特殊的黑点, 它们的条纹级次 $n = 0$, 根据应力连续原则, 条纹级次也是连续变化的, 由此我们便可从零级次条纹开始, 按顺序确定整数条纹级次。当载荷加到额定值时, 模型上出现一定级次的等差线条纹, 此时便可拍摄下等差线条纹图, 如图 3 所示。



图 3 支架等差线图

以上我们获得了支架在受载情况下的等倾线和等差线图, 为进一步确定支架应力状态提供了基本资料。

在该支架的内部点上, 为二向应力状态, 等差线参数仅给出了各点的主应力差值, 因此要确定模型内部点的主应力各自的大小, 需将主应力予以分离。下面我们采用剪应力差法, 来求解支架模型某典型截面上 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 和 σ_1, σ_2 的分布。

在等差线图上确定所测截面 OG , 建立以 O 为原点的直角坐标系, 如图 4 所示, 把 OG

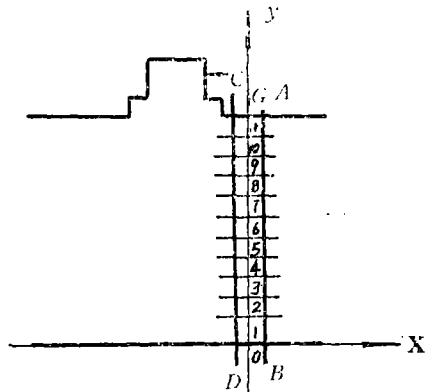


图 4 截面位置与测点划分

长等分为 11 份, 使每份长 $\Delta y = 3 \times 10^{-3} \text{m}$

(在此第0点到第1点的长 $\Delta y_{0,1} = 4 \times 10^{-3} m$), 在OG两侧等距离处作 AB, CD 两平行截面, 使两截面间距为 $\Delta x = 4 \times 10^{-3} m$ 。

由等倾线图我们可以确定各测点的等倾参数 θ , 由等差线图我们可以确定各测点的条纹级次 n , 当 n 为非整数级次时, 我们可以利用旋转检偏镜方法之一的Tardy, H、L补偿法来确定, 即首先转动整个光场的镜片系统, 直到起偏镜和检偏镜的偏振轴分别与该点的主应力方向相重合, 然后转动检偏镜, 使相邻的等差线移到待测点 i , 若检偏镜转过 θ 角度, 第 n 级等差线移动到 i 点, 则该点的条纹级次为

$$n_i = n + \theta^\circ / 180^\circ$$

由以上所得到的每一测点的 θ 、 n 值, 便可由下式

$$\sigma_1 - \sigma_2 = n f / d$$

$$|\tau_{xy}| = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta$$

得到OG, AB, CD截面上各测点的主应力差值和剪应力绝对值, 自由边界上0点与边界相切的应力 $(\sigma_2)_0$ 为压应力, 该点附近 τ_{xy} 由坐标系知为正值, 又由于OG线上无零度等倾线通过它, 故OG线上的 τ_{xy} 均为正值。

在自由边界0点的正应力 $(\sigma_y)_0 = 0$, 由下式

$$(\sigma_y)_1 = (\sigma_y)_0 - \frac{\Delta \tau_{xy}|_0^1}{\Delta x} \Delta y$$

$$(\sigma_y)_i = (\sigma_y)_{i-1} - \frac{\Delta \tau_{xy}|_{i-1}^i}{\Delta x} \Delta y$$

便可得到每一测点的一个应力分量, 式中

$$\Delta \tau_{xy}|_{i-1}^i = (\Delta \tau_{xy})_{i-1} + (\Delta \tau_{xy})_i / 2$$

$$\text{而 } (\Delta \tau_{xy})_i = (\tau_{xy})_{AB} - (\tau_{xy})_{CD}$$

另一应力分量由下式计算得到:

$$\sigma_x = \sigma_y \pm \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - 4\tau_{xy}^2}$$

式中正负号由 σ_1 与 x 轴间的夹角大小来决定, 当 $\theta < 45^\circ$ 时, 根式前取负号; 当 $\theta > 45^\circ$ 时, 根式前取正号。

将以上得到的 σ_x 和 σ_y 值代入下式, 就得到主应力 σ_1 和 σ_2 值:

$$\sigma_1 = \frac{(\sigma_x + \sigma_y) + (\sigma_1 - \sigma_2)}{2}$$

$$\sigma_2 = \frac{(\sigma_x + \sigma_y) - (\sigma_1 - \sigma_2)}{2}$$

OG截面上的 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 和 σ_1, σ_2 的计算结果见表1, $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 和 σ_1, σ_2 的分布曲线如图5所示。

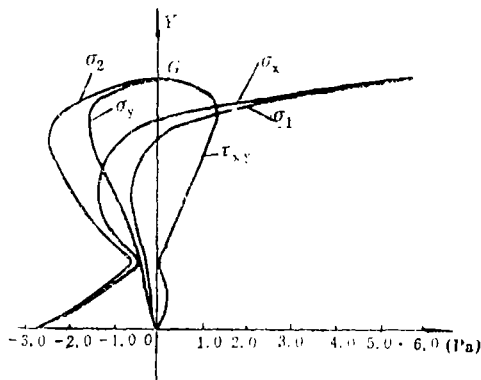


图 5 OG截面上 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 和 σ_1, σ_2 的分布

根据相似理论, 我们把模型上的主应力还原到构件上去:

$$\sigma_p = \frac{d_m l_m p_p}{d_p l_p p_m} \sigma_m$$

式中带 m 下标的物理量为模型上的相应量, 带下标 p 的为构件上的相应量, 其中

$$d_m / d_p = 9.55 \times 10^{-3} / 3.0 \times 10^{-3} = 0.318$$

$$l_m / l_p = 4.3 \times 10^{-2} / 2.15 \times 10^{-1} = 0.2$$

$$p_p / p_m = 46849g / 55g = 851.8$$

$$\text{所以有 } \sigma_p = 0.318 \times 0.2 \times 851.8 \sigma_m = 54.17 \sigma_m$$

由此便可计算原构件上每一相应点的主应力大小, 见表1。

三、结果与分析

1. 由以上图表可见, 我们利用光弹性原理, 成功地获得了某型船用燃气轮机动力

表 1

AB, CD, OG 截面应力计算

单位: MPa

点号	AB 截面				CD 截面				$\Delta\tau_{xy}$
	n	$\sigma_1 - \sigma_2$	θ	τ_{xy}	n	$\sigma_1 - \sigma_2$	θ	τ_{xy}	
0	2	2.74	0	0	2	2.74	0	0	0
1	1.1	1.51	17	0.42	1.1	1.51	3	0.08	0.34
2	0.22	0.30	23	0.11	1	1.37	9	0.21	-0.10
3	0.67	0.92	25	0.35	0.46	0.63	15	0.16	0.19
4	0.82	1.13	30	0.49	0.08	0.11	20	0.04	0.45
5	0.89	1.22	39	0.60	0.62	0.85	25	0.33	0.27
6	1.07	1.47	45	0.73	0.72	0.99	33	0.45	0.28
7	1.33	1.83	50	0.90	1	1.37	36	0.65	0.25
8	1.73	2.37	55	1.12	1.27	1.74	45	0.87	0.25
9	2.27	3.12	65	1.19	1.71	2.35	52	1.14	0.05
10	3.13	4.30	75	1.07	3	4.12	69	1.38	-0.31
11	3	4.12	0	0	7	9.61	0	0	0

点号	OG 截面									
	n	$\sigma_1 - \sigma_2$	θ	τ_{xy}	σ_x	σ_y	σ_1	σ_2	σ_{1p}	σ_{2p}
0	2	2.74	0	0	-2.74	0	0	-2.74	0	-148.43
1	1.13	1.55	10	0.26	-1.63	-0.17	-0.13	-1.68	-7.04	-91.01
2	0.59	0.81	15	0.20	-0.96	-0.26	-0.21	-1.02	-11.38	-55.25
3	0.04	0.05	22	0.02	-0.34	-0.30	-0.29	-0.34	-15.71	-18.41
4	0.62	0.85	25	0.33	-1.08	-0.54	-0.39	-1.23	-21.13	-66.63
5	0.73	1.00	33	0.46	-1.21	-0.81	-0.51	-1.51	-27.62	-81.80
6	0.93	1.28	38	0.62	-1.33	-1.02	-0.54	-1.81	-29.25	-98.05
7	1.17	1.61	45	0.80	-1.22	-1.22	-0.41	-2.02	-22.21	-109.42
8	1.52	2.09	51	1.02	-0.97	-1.40	-0.29	-2.37	-15.71	-128.38
9	2.14	2.94	58	1.32	-0.23	-1.52	0.59	-2.34	31.96	-126.76
10	3.22	4.42	72	1.30	2.15	-1.42	2.57	-1.85	139.22	-100.21
11	4	5.48	0	0	5.48	0	5.48	0	296.85	0

涡轮后支架的等倾线和等差线, 从而直观地、全场性地描绘了支架在受到静模拟载荷情况下的应力状态。

2. 由等倾线图, 我们可清楚地了解到主应力方向的变化规律, 掌握应力各向同性点的分布。

3. 由等差线图, 可直观地了解主应力差的变化趋势, 显而易见在承受横向载荷的

轴承销子附近, 出现了较高级次的等差线条纹, 可以判断该处周围出现最大应力。通过测量, 在销子根部边界某处, 条纹级次达 $n = 8.0$ 级, 主应力 $\sigma_{1p} = 594.75 \times 10^6 \text{P}$ 。(原构件上)。

4. 为了更详细了解构件内部的应力状态, 我们选择了靠近轴承销子附近的一个典型截面OG, 并用剪应力差法, 详细求解了

该截面上的 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 和 σ_1, σ_2 的分布规律,并能在其分布曲线上,直观地得到它们的变化。

5. 该支架模型具有一定的时间边缘效应,空载时边界上已有条纹产生,即有初始应力存在,这将影响测量结果的精确度,不同程度上干扰了等倾线的变化规律,以及等差线的条纹级次。试验中我们已首先拍摄了空载情况下的等差线初始状态图,并在实际

测试与计算中,尽力给予修正,提高了测量结果的可靠性。

该测试结果将对同类构件的设计和安全运行,提供有意义的参考。

参 考 文 献

[1] 天津大学材料力学教研室光弹组. 光弹性原理与测试技术. 北京: 科学出版社, 1980

[2] 张如一, 陆耀楨. 实验应力分布. 北京: 机械工业出版社, 1981

Photoelastic Stress Measurement and Analysis of Marine Gas Turbine Power Turbine Support

Wang Feng

(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

Zhang Qihua

(Harbin Polytechnical Institute)

Abstract

This paper describes the stress measurement and analysis of a marine gas turbine power turbine rear support by use of photoelasticity theory, presents the isoclinic lines and equidifference lines and on this basis calculates the stress distribution on the said support section.

Key words: turbine, photoelasticity, stress analysis

~~~~~  
 { 简 讯 }  
 ~~~~~

华能经济开发公司从美国购买两套 STIG LM5000 型燃气轮机发电机组。

据“燃气轮机世界”1990年1—2月号报导,深圳华能经济开发公司向美国 Stewart & Stevenson 公司订购了两套 LM5000-STIG (注入蒸汽的燃气轮机循环) 120 燃气轮机发电机组。这两套设备将安装在深圳市。

合同要求卖方向买方提供燃气轮机发电机组设备、备件、操作人员的培训、技术保障和设备维护等服务。上述两套设备将在1990年交货,该项合同的总价款为 29 171 300 美元。

深圳注入蒸汽的燃气轮机机组在注入全部蒸汽加大功率的情况下,每台机组的现场额定功率为47兆瓦。在最大蒸汽注入量为 54 431 千克/小时下,每台机组名义的ISO基本负荷额定功率为 51 620 千瓦。深圳市计划这两套发电机组每年约运行 4000 小时。

(吉桂明 供稿)