

数字散斑相关方法用于圆盘表面 热变形测量

丁水汀, 王子尧, 李 烨

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室 适航技术研究中心, 北京 100191)

摘 要: 为了克服压力应变片测量热变形的不足,采用 DSCM(数字散斑相关方法)对静止空心圆盘仅承受外缘热载荷时的表面热变形进行实时测量.实验系统中,采用电磁感应加热方式实现圆盘热边界条件的加载,并通过红外热像仪采集圆盘的实时温度分布数据.同时,为提高 DSCM 的测量精度,从 CCD(charge coupled device)相机视场范围的选取、中焦距微距镜头的使用以及光源的布置等方面来降低离面位移和散斑质量等误差因素的影响.盘面热变形位移的实验结果与理论结果的对比显示,两者符合较好,但仍存在一定偏差,最大绝对偏差为 $6\mu\text{m}$,最大相对偏差为 31%;盘外缘绝对偏差较大而相对偏差较小,盘内缘反之.对比结果验证了 DSCM 用于圆盘表面热变形测量的可行性,从而为涡轮盘盘面热变形研究提供了一种有效的实验工具.

关 键 词: 数字散斑相关方法;圆盘;热变形测量;瞬态热分析;偏差分析

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Application of digital speckle correlation method to disk surface thermal deformation measurement

DING Shui-ting, WANG Zi-yao, LI Ye

(Airworthiness Technologies Research Center,

National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,

School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To overcome the limitations of thermal deformation measurement conducted by strain gages, the DSCM (digital speckle correlation method) was used to determine the real-time surface thermal deformation of a static hollow disk subjected to thermal load on the outer rim. In the experiment system, electromagnetic induction heating method was applied to simulate the heat boundary of the disk and the real-time temperature distribution of the disk was obtained by infrared thermometer. Meanwhile, for the purpose of improving accuracy of DSCM, measures were taken by considering the range of field of CCD (change coupled device) camera view, the usage of medium focal length micro lens and the arrangement of illumination to lessen the effects of error factors like off-plane displacement and speckle image quality. The comparison between the experimental and theoretical results of thermal deformations shows that a good agreement is achieved, although some deviations still exist, and the maximum absolute deviations and relative deviations are $6\mu\text{m}$ and 31%, respectively; the absolute deviations of the outer rim are larger while the relative deviations are smaller,

收稿日期: 2013-07-12

基金项目: 航空发动机复杂系统安全性教育部长江学者创新团队(IRT0905)

作者简介: 丁水汀(1967—),男,辽宁铁岭人,教授、博士生导师,博士,主要从事燃气轮机热端旋转部件流动与换热机理研究及航空发动机适航性设计与验证技术研究.

and this case is contrary to the inner rim. The results validate that the feasibility of DSCM for disk surface thermal deformation measurement, thus providing an effective experimental tool on turbine thermal deformation investigations.

Key words: DSCM (digital speckle correlation method); disk; thermal deformation measurement; transient thermal analysis; deviation analysis

作为航空发动机的关键构件,涡轮盘在工作中承受着很大的机械负荷与热负荷,恶劣的工作条件使其成为发动机中故障较多的零部件之一.对涡轮盘机械负载、热负载、强度、寿命等进行研究在理论上与实际应用中都具有重要意义.目前,针对涡轮盘热应力与热变形的研究多采用理论分析或数值模拟方式^[1-5],缺乏实验数据的支持.对于热变形测量,如果采用基于应变片原理的电测法,存在如下不足^[6-7]:①应变片一般只能测量单点某一方向的变形,难以实现全域测量;②其安装方式与测量线路复杂,信号传递受电磁干扰、温度效应等诸多因素的影响较大;③较高温度下应用时一般需要按实测温度参数对测量结果进行修正.

为了克服电测法测量热变形的上述缺陷,考虑一种非接触式变形测量方法,DSCM 或称 DICM (digital image correlation method).该方法最早由美国南卡罗来纳大学的 Peter 与 Ranson^[8]及日本的 Yamaguchi^[9]于 20 世纪 80 年代初同时独立提出,它应用 CCD 相机拍摄物体表面的散斑标志点变形前后的图像,通过相关数学运算确定对象的位移或变形信息,具有全场测量、光路相对简单、表面处理技术简便、不需要光学干涉条纹、测量视场可调节以及对测量环境要求不高等优点^[10].近 30 年来,国内外不少学者针对该方法开展了一系列研究工作,在热变形测量方面,Lyons 等^[11]对高温环境下(650℃)采用 DSCM 测量平面热变形与拉伸变形的可行性进行研究,证实了该法在高温环境下同样可行且能达到在常温条件下使用时的测量精度.李鸿琦等^[12]采用显微数字散斑相关方法,研究薄层梯度镀层材料在稳态非均匀温度场下的层间变形行为,避免了接触传感器或面内云纹法等带来的附加应力和位移.潘兵等^[13]基于 DSCM 建立了一套非接触高温热变形测量系统,并对铬镍奥氏体不锈钢在 20~550℃ 温度范围内的热变形和热膨胀系数进行测量,结果验证了 DSCM 用于高温热变形的性能.

随着涡轮盘热应力研究的不断发展,针对过渡过程热应力演变机理的基础研究越发引人关

注,而如前文所述,DSCM 在热变形测量方面具有实时、全域、非接触测量且干扰因素较少等优势,这使得该方法有望成为未来涡轮盘热应力研究的有效实验手段.基于上述考虑,本文在国内首次采用 DSCM 对静止自由空心盘仅承受热载荷时的盘面热变形位移进行实时测量,并与空心盘热变形位移理论解对比,验证该方法的可行性,进而为未来推广 DSCM 在涡轮盘热应力研究领域(如旋转状态下涡轮盘热应力测量)的应用提供参考.

1 DSCM 技术原理

本实验选用德国 LaVision 公司的 CCD 相机和 StrainMaster 光学形变分析软件模块以及 DT311n/DT-315N 数字式频闪观测仪组成的 DSCM 系统测量圆盘表面的热变形位移场,测量控制、图像采集以及相关性分析等后处理过程均由 StrainMaster 软件完成,其位移或变形的识别过程如图 1 所示.将图像划分为若干个子区(或称询问域),在参考图像中确定一个子区 P ,通过相关性运算找到目标图像中与子区 P 相关性最好的子区 P' ,作为变形后子区 P 的位置,则可提取子区 P 的位移信息.

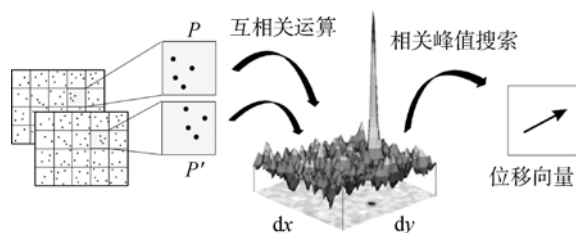


图 1 StrainMaster 软件相关性分析示意图

Fig. 1 Sketch of StrainMaster software correlation analysis

StrainMaster 软件采用变形前后子区中灰度分布函数 $f(x, y)$ 与 $g(x', y')$ 的互相关函数^[14]刻画子区相关性

$$C(dx, dy) = f(x, y) \circ g(x', y') = \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) g(x+dx, y+dy) \quad (1)$$

式(1)中运算符 $\circ$ 表示相关运算; n 为子区范围的大小,本文设定为 $128 \text{ 像素} \times 128 \text{ 像素}$; C 的数值反映了两个子区的相关程度. 在软件的位移分析中,变形提取转换为对式(1)求极大值,即通过相关搜索找出参考图像与目标图像中相关系数最大的点,进而确定变形量.

理想情况下,当子区为 $128 \text{ 像素} \times 128 \text{ 像素}$ 时,StrainMaster 软件二维向量测量精度可达 0.005 个像素. 但实际实验中系统受到更多误差因素的影响,测量结果精度一般达不到理想情况,分析认为^[10,15],造成变形测量误差的原因主要包括:①系统误差,主要来源于 StrainMaster 软件相关性分析方法本身的精度与系统硬件质量及测试环境中的误差因素,例如 CCD 相机的像素、离面位移误差以及散斑图质量等. ②随机误差,主要来源于光源的不稳定性与噪声的影响,如系统振动、电磁干扰以及 CCD 相机系统本身的噪声影响.

为减小上述误差因素的影响,在实验系统设计以及实验过程中采取了相应的措施,以保证 DSCM 测量结果的可靠性.

2 实验系统

本文的工作是在北京航空航天大学航空发动机气动热力国家级重点实验室的结构-热耦合实验台上完成的,实验装置图如图 2 所示. 实验在静止状态下,利用电磁感应加热器对圆盘施加热载荷,采用 StrainMaster 软件控制,同步触发 CCD 相机与频闪观测仪,并启动红外热像仪,同时采集实验件待测区域的 DSCM 散斑图与红外热像图,再经由 StrainMaster 软件后处理得到盘面热变形与温度分布.

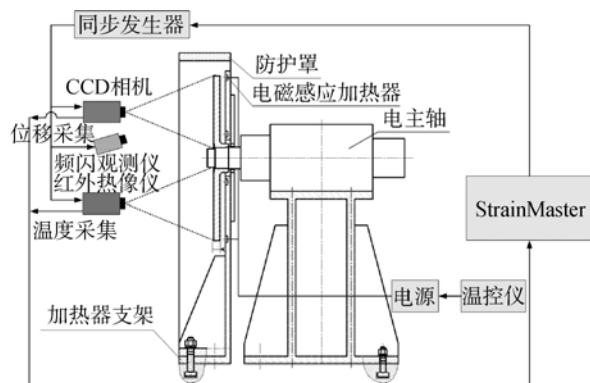


图 2 结构-热耦合实验台示意图

Fig. 2 Sketch of structure-thermal coupling experimental system

2.1 实验件与加热系统

实验件是一个由结构钢 40Cr 加工的内径为 41.5 mm ,外径为 320 mm ,厚度为 25 mm 的空心圆盘,实验温度范围内 ($20 \sim 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 材料的主要物性参数如表 1 所示.

表 1 结构钢 40Cr 的物性参数

Table 1 Physical properties of structural steel 40Cr

参数	温度/ $^{\circ}\text{C}$		
	20	100	200
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7820	7820	7820
比定压热容 $c_p/(\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}))$	550	550	550
导热系数 $\lambda/(\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}))$	33.8	32.5	31
热膨胀系数 $\alpha/10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	12	12	12
弹性模量 E/GPa	211	208	202
泊松比 ν	0.274	0.285	0.280

为提高 CCD 相机摄像分辨率,保证图像有较高的质量,实验前需进行表面制斑处理. 使用白光金属漆在圆盘表面沿径向喷涂一条高度为 30 mm 的散斑窄带作为拍摄区域,在窄带接近中心位置刻画一条带刻度的径向线,用以确定拍摄区域的径向位置,实验时调节 CCD 相机与光源位置,使 CCD 相机视场锁定于盘面径向不同位置的区域进行拍摄.

实验采用电磁感应加热方式模拟圆盘热边界条件,加热器布置方式如图 3 所示,在加热器支架的径向位置 $\phi = 628 \text{ mm}$ 处布置一个整体式的加热感应线圈. 感应线圈由直径为 8 mm 的铜管加

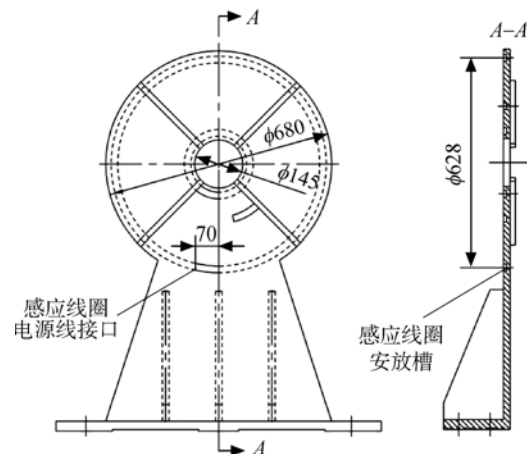


图 3 加热器支架及布置方式(单位:mm)

Fig. 3 Support and layout of heater appliance (unit:mm)

上铜管外的包裹材料制成,径向宽度为 24 mm,轴向厚度为 12 mm. 通过控制器控制其加热功率与加热时间,模拟圆盘热边界条件.

2.2 测量系统

本实验选用 ThermaCAM P60 型红外热像仪测量盘面温度分布,其测温范围为 $-40 \sim 120^{\circ}\text{C}$,测量精度为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$. 实验前,对圆盘表面喷涂亚光黑漆,增大圆盘表面辐射率以减小环境因素干扰,使用直径 $\phi = 0.3 \text{ mm}$,测量精度为 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 的铜-康铜热电偶对圆盘在实验工况内的温度全范围进行标定,验证红外热像仪用于盘面温度测量的精度.

对于 DSCM 系统,为保证测量精度,正式工作前充分预热测量系统,以减小系统本身的噪声影响. CCD 相机分辨率为 $2048 \text{ 像素} \times 2048 \text{ 像素}$,拍摄视场大小为 $18 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$. 保证相机芯片清洁以防止其表面灰尘颗粒对微小位移测量带来的误差,并使用中焦距的微距镜头以防止较小的离面位移引起显著的面内位移测量误差^[16]. 为减小系统误差的影响,尽可能保证 CCD 相机光轴与圆盘表面垂直^[17];并合理布置光源方位,使得被测表面不会出现明显的亮斑,确保获得高质量的图片;此外,保证实验室相对稳定的工作条件有助于减小随机误差.

2.3 实验过程

实验前调整好 CCD 相机、频闪观测仪以及红外热像仪与测量区域的相对位置,准备就绪后,启动 DSCM 系统,预热 5 min 后开始测量,启动电磁感应加热器,调节加热功率为 5 kW,对圆盘外缘加热,从加热零时刻起采集红外热像图与 DSCM 散斑图,两者的采集频率分别设为 $1/8 \text{ Hz}$ 与 $1/5 \text{ Hz}$,到第 55 s 时停止加热,继续采样 10 s 后终止测量. 对散斑带半径 $r=75, 110, 200, 300 \text{ mm}$ 的 4 个区域分别进行上述测量,得到加热过程中测量区域的红外热像图与 DSCM 散斑图随时间的演变历程.

3 实验结果分析

3.1 盘面温度分布

将红外热像图导入红外热像仪后处理软件中,在图上沿径向均匀选取 8 个点,分析读出其温度值,得到外缘加热过程中不同时刻的实验温度分布,选取 4 个时刻 $\tau=30, 40, 50, 60 \text{ s}$,温度分布如图 4 所示.

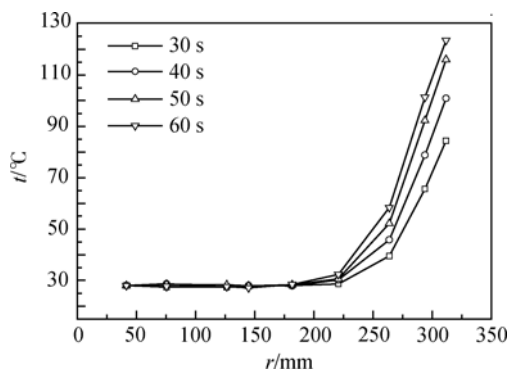


图 4 不同时刻圆盘温度分布

Fig. 4 Temperature distributions at different moments

本文采用指数函数对不同时刻的温度分布进行拟合,其通用公式为

$$t(r) = A_1 \exp(r/A_2) + A_3 \quad (2)$$

对应的拟合系数 A_1, A_2 与 A_3 见表 2.

表 2 不同时刻对应的温度分布拟合系数

Table 2 Temperature distributions fitting coefficients at different moments

τ/s	拟合系数		
	A_1	A_2	A_3
30	0.007 710	34.835	26.529 100
40	0.019 397	37.635 637	26.391 305
50	0.040 484	40.253 567	25.806 648
60	0.100 530	44.953	24.285 300

3.2 盘面热变形理论解

根据弹性理论经验公式,等厚空心盘只承受热载荷时盘上的热应力分布公式为^[18]

$$\begin{aligned} \sigma_r = & -\frac{E\alpha}{r^2} \int_{r_i}^r t_\theta(r) r dr + \\ & \frac{E\alpha}{(r_e^2 - r_i^2)} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2} \right) \int_{r_i}^{r_e} t_\theta(r) r dr \\ \sigma_\theta = & \frac{E\alpha}{r^2} \int_{r_i}^r t_\theta(r) r dr - E\alpha t_\theta(r) + \\ & \frac{E\alpha}{(r_e^2 - r_i^2)} \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2} \right) \int_{r_i}^{r_e} t_\theta(r) r dr \end{aligned} \quad (3)$$

式中 σ_r 为径向热应力; σ_θ 为周向热应力; E 为弹性模量; α 为圆盘热膨胀系数; r_i 为盘内径; r_e 为盘外径; $t_\theta(r)$ 为盘面径向温度分布 $t(r)$ 与参考温度 t_0 之差. 位移值由下式确定:

$$u(r) = \frac{r}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_r) + r \alpha t_\theta(r) \quad (4)$$

式中 ν 为泊松比.

将拟合得到的盘面径向温度分布代入式(3),

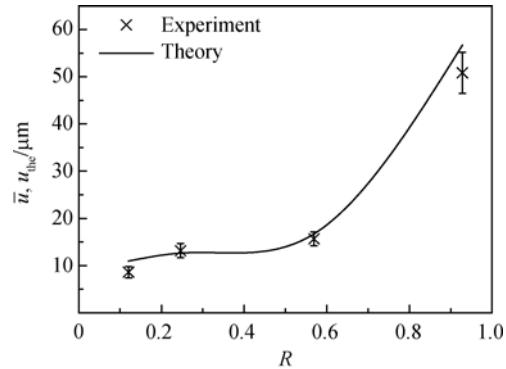
再将式(3)代入式(4),即可得到盘面热变形位移理论值的最终表达式为

$$u(r) = \frac{\alpha(1+\nu)}{r} \int_{r_i}^r t_{\theta}(r) r dr + \frac{\alpha}{r_e^2 - r_i^2} \cdot \frac{r^2 + r_i^2 - \nu r^2 + \nu r_i^2}{r} \int_{r_i}^{r_e} t_{\theta}(r) r dr \quad (5)$$

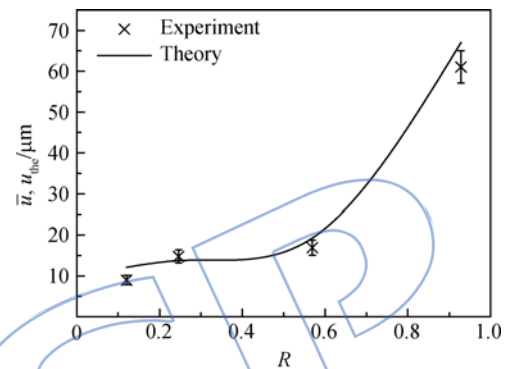
3.3 实验结果分析

选择与温度测量相同时刻的 DSCM 散斑图,以零时刻拍摄的 DSCM 散斑图像作为参考图像,由 StrainMaster 软件分析得到测量区域位移场,计算位移场的平均值 $\bar{u}$ 作为该区域所在半径位置处的位移测量值,标准差 δ 作为位移平均值的最大误差限,则位移测量值可表达为 $u = \bar{u} \pm \delta$.

图 5 所示为不同时刻盘面热变形位移 u 实验结果与理论结果的对比,其中横坐标为无量纲半径 $R = (r - r_i) / (r_e - r_i)$,4 个测量区域无量纲半径分别为 0.12, 0.24, 0.57, 0.93, 实验值以误差棒的形式显示在图上,误差棒中心点即为对应的位移平均值,误差棒的长度的一半即为位移值的标准差.由图 5 可以看出:①不同时刻盘面热变形位移实验值与理论值分布在趋势上吻合较好,除去少数点外,理论值分布曲线基本位于实验值误差棒的包络之中,初步验证了 DSCM 用于圆盘表面热变形测量的可行性;②误差棒的长度,即位移



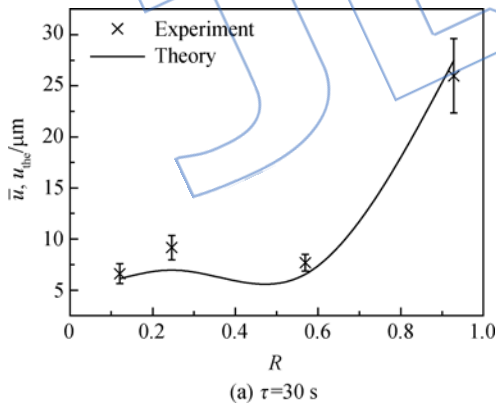
(c) $\tau=50$ s



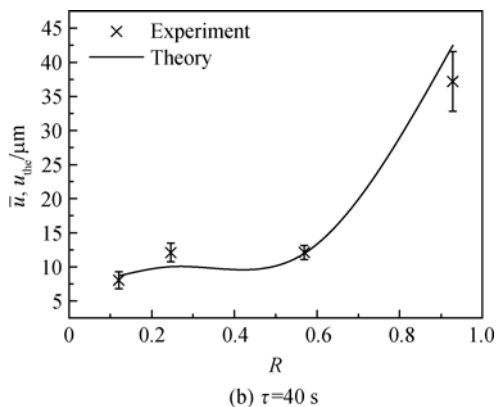
(d) $\tau=60$ s

图 5 不同时刻盘面热变形分布实验结果与理论结果

Fig. 5 Experimental and theoretical results of disk surface thermal deformation distributions at different moments



(a) $\tau=30$ s



(b) $\tau=40$ s

测量值的标准差,在盘外缘区域明显大于内缘及中部区域.

然而,实验值与理论值仍存在偏差.取绝对偏差为位移实验平均值与理论值之差的绝对值,即 $e = |\bar{u} - u_{the}|$,其中 $\bar{u}$ 与 u_{the} 分别为位移实验平均值与理论值,取相对偏差为绝对偏差与理论值的比值,即 $\epsilon = |\bar{u} - u_{the}| / u_{the}$.图 6 所示为不同半径位置处不同时刻的实验值、理论值以及相对偏差,并标注了最大绝对偏差 e_{max} 与最大相对偏差 ϵ_{max} .可以看到,不同半径处实验值与理论值绝对偏差不同,盘内缘到中段位置 ($R = 0.12, 0.24, 0.57$) 绝对偏差不超过 $3.2 \mu\text{m}$,而盘外缘位置 ($R = 0.93$) 最大绝对偏差达到 $6 \mu\text{m}$;从整体上看,盘外缘位移实验值与理论值的绝对偏差大于内缘及中部区域实验值与理论值的绝对偏差.

与绝对偏差相比,相对偏差更能反映偏差水平的大小,由图 6 可知,全盘最大相对偏差为 31%,发生在盘内缘区域 ($R = 0.24$).盘外缘处相对偏差较之盘内缘相对偏差要小,这与绝对偏差

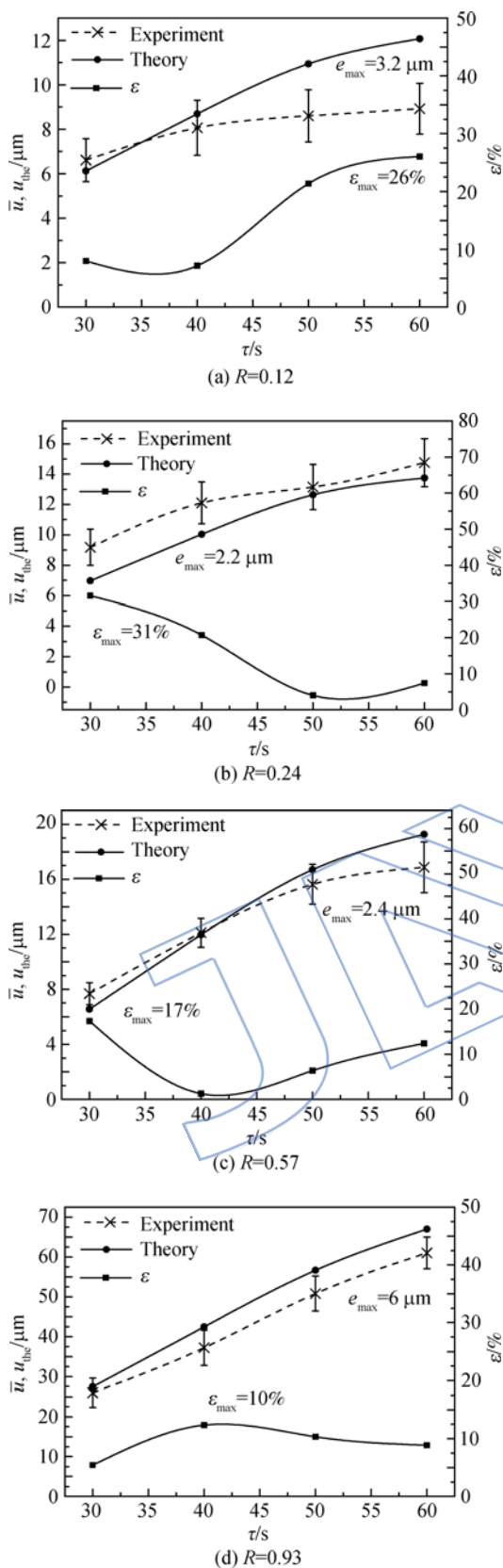


图6 不同位置盘面热变形实验值、理论值与相对偏差

Fig. 6 Experimental and theoretical results and relative deviations of disk surface thermal deformation at different locations

的分布趋势相反。盘内缘整体偏差水平较大的可能原因包括:①由于圆盘与轴采用过盈配合连接方式,内缘受圣维南原理的影响,而理论分析中未加以考虑;②外缘加热工况下盘内缘位移明显小于盘外缘位移,对相对较小的位移的测量可能存在更大的误差。

综上,圆盘热变形位移的实验值与理论值之间存在一定的偏差。分析认为,偏差的来源主要包括以下两点:

1) 实验模型与理论模型不完全一致,主要表现为两方面:①理论值中温度分布采用经实验测量点温度拟合的结果,与圆盘真实温度分布存在偏差;②理论分析采用薄盘模型,温度、位移等物理量轴向梯度均为零,而实际实验中轴向梯度不为零,导致一定偏差。

2) 实验系统的测量误差,包括红外热像仪的测温误差以及 DSCM 测量系统的误差,后者详见第2节中的误差因素分析。对本实验而言,主要误差因素包括 StrainMaster 软件方法原理本身的精度、系统硬件质量、光源光强变化以及测试环境中的噪声误差因素。

4 结论

本文的研究得到了以下结论:

1) 不同时刻,圆盘表面热变形位移分布的实验结果与理论结果在趋势上吻合较好,表明 DSCM 技术应用于圆盘表面热变形位移测量是可行的。

2) 实验结果与理论结果之间存在一定偏差,最大绝对偏差为 $6\mu\text{m}$,最大相对偏差为 31% ,从整体上看,盘外缘绝对偏差较大而相对偏差较小,盘内缘反之。

3) 实验值与理论值的偏差主要来源于两个方面:一是实验模型与数值模型不完全相同;二是实验测量误差,主要误差因素为软件分析方法本身误差、硬件质量、系统参数、光源光强随时间的变化、环境中噪声因素的影响等。

本文的研究工作初步验证了 DSCM 应用于圆盘热变形研究的可行性,但应当注意的是,作为对 DSCM 这种新的圆盘表面热变形测量方法的初步探索,本文的实验结果还不能满足精确定量分析的需求,而且实际测量应用中可能存在更多影响因素,因此,提高 DSCM 测量热变形结果的可靠性,仍需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Yapıcı H, Bastürk G. Numerical solutions of transient conjugate heat transfer and thermally induced stress distribution in a heated and rotating hollow disk[J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(1): 61-84.
- [2] Hosseini K S A, Naghdabadi R. Thermoelastic analysis of a functionally graded rotating disk[J]. *Composite Structures*, 2007, 79(4): 508-516.
- [3] Vullo V, Vivio F. Elastic stress analysis of non-linear variable thickness rotating disks subjected to thermal load and having variable density along the radius[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45(20): 5337-5355.
- [4] PENG Xulong, LI Xianfang. Thermal stress in rotating functionally graded hollow circular disks[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(8): 1896-1904.
- [5] Hassani A, Hojjati M H, Mahdavi E, et al. Thermo-mechanical analysis of rotating disks with non-uniform thickness and material properties[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2012, 98: 95-101.
- [6] 张如一, 沈观林, 李朝弟. 应变电测与传感[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [7] 李巧真, 李刚, 韩钦泽. 电阻应变片的实验与应用[J]. *实验室研究与探索*, 2011, 30(4): 134-137.
LI Qiaozhen, LI Gang, HAN Qinze. Experiment and application of resistance strain gauge[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2011, 30(4): 134-137. (in Chinese)
- [8] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental mechanics[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 427-431.
- [9] Yamaguchi I. Speckle displacement and decorrelation in the diffraction and image fields for small object deformation[J]. *Optica Acta*, 1981, 28(10): 1359-1376.
- [10] 王怀文, 亢一澜, 谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展[J]. *力学进展*, 2005, 35(2): 195-203.
WANG Huaiwen, KANG Yilan, XIE Heping. Advance in digital speckle correlation method and its applications[J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(2): 195-203. (in Chinese)
- [11] Lyons J S, Liu J, Sutton M A. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 1996, 36(1): 64-70.
- [12] 李鸿琦, 邢冬梅, 马世虎, 等. 梯度功能材料热弹性应变场分析[J]. *实验力学*, 2002, 17(3): 274-278.
LI Hongqi, XING Dongmei, MA Shihu, et al. Experiment study of thermal strain field of functionally gradient material[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, 17(3): 274-278. (in Chinese)
- [13] 潘兵, 吴大方, 高镇同. 基于数字图像相关方法的非接触高温热变形测量系统[J]. *航空学报*, 2010, 31(10): 1960-1967.
PAN Bing, WU Dafang, GAO Zhen tong. A non-contact high-temperature deformation measuring system based on digital image correlation technique[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(10): 1960-1967. (in Chinese)
- [14] 戴福隆, 沈观林, 谢惠民. 实验力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [15] 王冬梅, 方如华, 秦玉文. 数字图像相关测量的误差分析及其改进措施[J]. *实验力学*, 1998, 13(3): 416-422.
WANG Dongmei, FANG Ruhua, QIN Yuwen. Measuring errors analysis and improvement of digital image correlation method measurement system[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1998, 13(3): 416-422. (in Chinese)
- [16] Sutton M, McNeill S, Helm J, et al. Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision[J]. *Photomechanics*, 2000, 77: 323-372.
- [17] 孟利波, 金观昌, 姚学锋. DSCM 中摄像机光轴与物面不垂直引起的误差分析[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2006, 46(11): 1930-1932.
MENG Libo, JIN Guanchang, YAO Xuefeng. Errors caused by misalignment of the optical camera axis and the object surface in the DSCM[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2006, 46(11): 1930-1932. (in Chinese)
- [18] 吕文林. 航空发动机强度计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.