

基于分布式应变响应的船体结构变形 挠度测量方法研究与验证

郭保昌, 陈志坚

(海军工程大学 舰船工程系, 武汉 430033)

摘要:分析了结构变形监测的必要性以及本领域的现状,明确了当前存在的理论和技术难点,创新地提出了基于分布式应变测量舰船结构挠度的方法和理论,并进一步进行了详细理论推导。依据舰船典型甲板结构设计数值实验模型,运用商业有限元分析软件 PATRAN 进行了甲板结构挠度测试方法与精度的数值实验。通过对实验结果的分析、讨论和比较,证明了本方法和理论的正确性和可行性。所测结构变形挠度可用于建立舰船结构健康监测系统、轴系设计、修正舰船航行姿态以及提高武器精度等。

关键词:分布式应变;变形挠度测量;舰船船体结构;数值实验

本文引用格式:郭保昌, 陈志坚. 基于分布式应变响应的船体结构变形挠度测量方法研究与验证[J]. 四川兵工学报, 2014(3):90-94.

中图分类号:U663.2

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2014)03-0090-06

Research and Validation of the Methods to Measure Ship's Structural Distortion Deflection Based on Distribution Strain Response

GUO Bao-chang, CHEN Zhi-jian

(Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The necessity and current situation in structural distortion deflection was analyzed. The difficulty of theory and technology was defined. A method and theory was put forward to measure ship's distortion deflection based on the distribution strain response, the related formulas were derived in detail. A model for the numerical experiment was designed according to ship's typical deck structure. And in order to test the method and accuracy, a numerical experiment of measuring the deck's deflection was carried out with the help of commercial software, PATRAN. To prove the possibility and accuracy of the theory, the experiment result is analyzed, discussed and compared. The structural deflection that we get from the theory can be used to build health monitoring system of ship's structure, design shafting, and revise ship's attitude and increase weapon's accuracy.

Key words: distribution strain; distortion deflection; ship's structure; numerical experiment

Citation format: GUO Bao-chang, CHEN Zhi-jian. Research and Validation of the Methods to Measure Ship's Structural Distortion Deflection Based on Distribution Strain Response[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(3):90-94.

船舶是一个弹性体,在外力作用下会产生变形。无论是在船台建造过程还是在下水后的海上航行过程中,船体结构

都会有变形产生。船体变形会对高精度舰载武器的精度造成影响,舰船的结构变形会使测量航行姿态的惯性系统产生

收稿日期:2013-09-20

基金项目:国防科技“十二五”预研项目(4010501030102)。

作者简介:郭保昌(1988—),男,硕士研究生,主要从事船舶结构力学研究。通讯作者:陈志坚(1957—),男,教授,博士生导师。

误差,使依赖惯性系统获得姿态参数的武器系统、观通系统等精度下降。船体变形对航天测量船更为重要,若不修正船体变形,对近地圆轨道的测量误差在 800~900 m,而对于大椭圆轨道测量误差则达到 20 km^[1]。船体的总纵弯曲变形还会使舰船的轴系工作异常,产生振动与噪声,从而对舰船总体性能造成影响。

船舶结构的变形测量问题历来是造船工程师关注的焦点。文献[2]中指出传统的变形测量方法有:(液体)压力法、借助(大地)测量仪器的光学方法、摄影测量法等,但是由于船舶结构的庞大和环境的复杂,这些方法在军用舰船上或是不能采用、或是测量精度不能满足要求,且经常不能用于航行中的舰船。文献[3-4]对航行中舰船的测量进行了研究,采用基于捷联系统和统计模型的分布式测量方法,而该方法又不能用于船台上建造的船舶。本文创新地提出了可以同时测量船台上和航行中的船体结构变形的测量方法和理论。

本文根据舰船结构的组成规律和结构变形的实际测试需求,细化了表征船体结构变形的挠度概念,建立利用结构应变的分布式响应表征船体结构挠度的理论和数学模型,推导出了“弯曲应变—总挠度”的关系,并利用商业有限元软件 PATRAN-NASTRAN 对数学模型进行了数值实验,验证了方法的正确性与可行性。

1 基本理论

1.1 结构变形测量方法

直接测量法测量结构变形挠度面临着难以确定基准、技术难度大、无法长期实时监测等问题,所以目前工程应用可行性不强。结构测量的传统方法主要是针对强度问题,利用点式电应变片传感器测量应变,然后根据经典弹性力学理论计算,间接得到所需要的强度、稳定性等方面的参数信息。目前较为可行的途径是立足于传统成熟的测量技术与力学理论,并对两者进行相应的突破创新,提出间接测量结构变形挠度的新方法。

点式电应变片传感器对恶劣环境的适应性较差,也不适合应用在长期的测量和监测中,测量得到的也只是点式应变响应数据,不能很好反映结构变形。光纤 Bragg 光栅传感器技术近年发展迅速,它具有体积小、容易埋入结构以及抗电磁干扰等优点^[5],能够对结构内部应力、应变、温度等参数实时在线检测,并可实现分布式传感,国外已经将其应用在结构健康状况监测中^[6-9]。光纤光栅虽有不易封装、温度造成中心波长漂移等缺点,但目前已有较为成熟的解决方案,能满足工程应用要求,可将其应用在结构变形测量中。经典弹性力学理论中没有用结构应变计算结构挠度的公式,但其现有的理论和公式非常丰富、成熟,可以以此为基础,提出新理论,建立准确可靠的数学模型并推导出需要的计算公式。

经过以上分析可以提出测量结构变形挠度的新方法,即利用 FBG 传感器按照特定布线方式测量结构表面应变,将得到的数据代入推导的公式进行处理,求得结构变形挠度。

只要能建立由分布式应变向结构挠度转换的数学模型,那么提出的新方法就是可行的。下面就建立数学模型,推导出计算公式,并通过数值实验验证公式的正确性。

1.2 船体结构变形分析

舰船是一个庞大的水上建筑物,其变形非常复杂,但总可以将划分为 2 类:总体弯曲变形与局部变形。

由于舰船均具有“细长”的特点,总体上舰船是一根变截面的薄壁“船体梁”^[10],总体弯曲变形具有梁弯曲变形的特点,反映船体梁总体弯曲变形特征的典型结构是沿船体纵向布置的甲板纵桁、船底纵桁。

局部变形是舰船局部结构的变形,如板架变形、板变形等。将骨架焊接在薄板上形成板架,有甲板板架、舷侧板架和船底板架等。采用带板梁理论,可将上述板架简化成由“带板梁”形成的交叉梁系。对于板,如以单位宽度沿某一方向对其进行截取,可以获得“板条梁”^[11]。对于潜艇,其典型结构是加肋圆柱壳、圆锥壳,如以单位宽度顺轴向截取壳体结构,同样可获得一根“梁带”^[12]。

表征梁变形外部表现状态的参量是挠度和转角变形。经典的梁挠度定义如图 1 所示,梁变形后形成挠曲线,挠曲线上的某点与变形前梁轴线上的同一点的偏移距离即为梁的挠度,即图 1 中的 $w + w_0$ 。挠曲线上的某点的切线与变形前梁轴线的夹角即为梁的转角变形。挠度和转角变形的具体值高度依赖于比较基准,图 1 中的比较基准是变形前梁轴线。如梁中的 m 剖面相对于 n 剖面的转角即为 $d\theta$,它与 m 剖面的转角变形和 n 剖面的转角变形均是不同的。

设 m 剖面的转角变形为 θ_m 、 n 剖面的转角变形为 θ_n

$$d\theta = \theta_m - \theta_n \quad (1)$$

“挠度与转角变形”经典定义的基准是变形前轴线,是无变形的初始轴心线。对于船体梁,由于其巨大的自重和建造过程的长时间性,无变形的初始轴心线是难以确定的。因此,梁挠度和转角变形的经典定义不便于工程使用。

工程实际关心的船体结构挠度主要是当前状态与某一状态的船体变形比较值,一般以建造时的状态为比较基准、以水中状态为当前状态。

鉴于舰艇结构的庞大性,工程实际中常关心结构上某点相对于某一条连线的偏移量,如轴系上轴承的当前位置与轴系对中时初始位置之间的位置偏移量。这种位移偏移量可以称之为轴承当前位置相对于轴系两端点割线的偏移量。

鉴于以上工程需求,本研究定义了,2 种挠度:割线挠度和切线挠度。

割线挠度:沿船体梁的轴心线方向任取 2 点 A 和 B ,测 A 和 B 之间任一点 C 的挠度,挠度值为 C 点与 A 、 B 两点连线的横向偏移量。

切线挠度:沿船体梁的轴心线方向任取 2 点 A 和 B ,测 A 和 B 之间任一点 C 的挠度,挠度值为 C 点与过 A 或 B 点切线的横向偏移量。

同理,可有割线转角和切线转角的定义。

对于梁段 AB 来说,“切线挠度”定义隐含着首端点边界条件对应于固支边界条件,而“割线挠度”则无这种隐含定

义,适合任意的两端边界条件。这2种定义与取自于梁中的梁段的实际情况是吻合的。

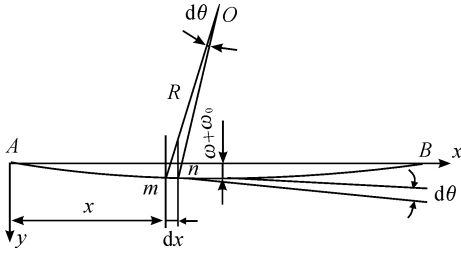


图1 梁弯曲变形示意图

1.3 分布式应变与结构挠度

根据工程需要选取的船体梁的初始状态不会是理想直线状态,是有微小弯曲的近似直梁。设船体梁具有相对于理想的直线中轴状态的初始挠度 w_0 , 相应的曲率半径为 R_0 ; 梁内距中性层为 y 处对应圆心角 θ 的初始弧长为 $ss_1 = (R_0 + y) \cdot \theta_0$ 。

船体梁变形后的挠度为 $\tilde{w} = w + w_0$, 相应的曲率半径为 R , 圆心角变化为 $d\theta$ 。则距中性层为 y 处的应变为

$$\varepsilon = \frac{y \cdot d\theta}{(R_0 + y) \cdot \theta} \quad (2)$$

设中性轴弯曲后长度不变,有

$$ds = R_0 \theta, ds = R(\theta + d\theta) \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{\theta} = \frac{R_0}{R} - 1 = R_0 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{yR_0}{(R_0 + y)} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \quad (5)$$

当曲率较小时(即曲率半径较大时),有

$$\frac{1}{R} \approx \frac{d^2(w + w_0)}{dx^2}, \frac{1}{R_0} \approx \frac{d^2 w_0}{dx^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon = y \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} \text{ 即 } \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{\varepsilon}{y} \quad (7)$$

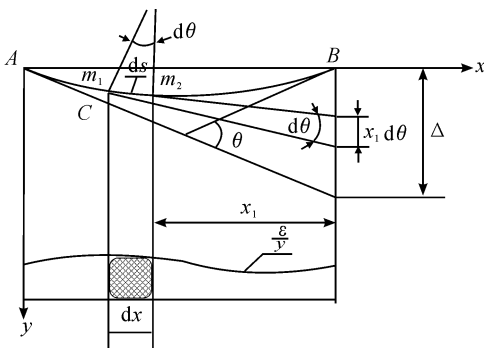


图2 “应变—转角关系数学模型”

如图2所示,在梁中取微段 dx , 设微段两端截面分别为 m_1, m_2 , 两截面变形后的相对转角为 $d\theta$, 有

$$d\theta = \frac{d^2 w}{dx^2} dx = \frac{\varepsilon}{y} dx \quad (8)$$

B 剖面相对于 A 剖面的转角为

$$\theta = \int_A^B d\theta = \int_A^B \frac{d^2 w}{dx^2} dx = \int_A^B \frac{\varepsilon}{y} dx \quad (9)$$

B 剖面相对于挠度曲线 A 点切线的横向移量(“切线挠度”)为

$$w_{BA} = \Delta = \int_A^B x_1 d\theta = \int_A^B x_1 \frac{d^2 w}{dx^2} dx = \int_A^B x_1 \frac{\varepsilon}{y} dx = \int_A^B (L - x) \frac{\varepsilon}{y} dx \quad (10)$$

梁中任一剖面 C 相对于 A 剖面的挠度 w 可按下述方法获得。

首先求出挠度曲线在 A 点的转角 θ_a , 按图3所示几何关系,有

$$\theta_a = \arctan^{-1} \frac{\Delta}{L} \quad (11)$$

$$w_{CA} = \Delta_1 = \int_A^C \tilde{x}_1 d\theta = \int_A^C \tilde{x}_1 \frac{d^2 w}{dx^2} dx = \int_A^C \tilde{x}_1 \frac{\varepsilon}{y} dx \quad (12)$$

$$\tilde{w}_{CA} = tg\theta_a \cdot a - \Delta_1 = \frac{a}{L} \cdot \Delta - \Delta_1 = \frac{a}{L} \int_A^B x_1 \frac{\varepsilon}{y} dx - \int_A^C \tilde{x}_1 \frac{\varepsilon}{y} dx = \quad (13)$$

$$\frac{a}{L} \int_A^B (L - x) \frac{\varepsilon}{y} dx - \int_A^C (a - x) \frac{\varepsilon}{y} dx$$

式(13)即为“单积分型应变—挠度关系数学模型”。上述数学模型适合任意边界条件的梁。是以应变为基准测量舰船“主艇体结构总体变形”的理论基础。式(13)所求得的挠度是梁中任意一点相对于梁的2个端点连线的横向偏移量,即“割线挠度”。

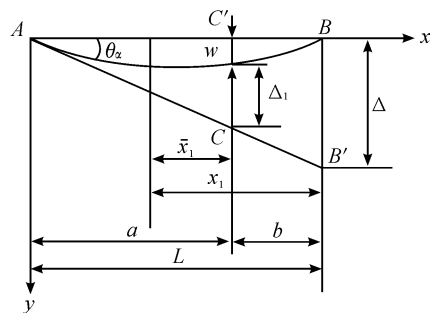


图3 “应变—挠度关系数学模型”

将 AB 之间划分为 N 段, AC 之间为 N_c 段, 设每段长度为 $h_i |_{i=1,2,\dots,N}$, 由式(9)、式(12)有单积分型多点应变测 B 点“切线挠度”数学模型:

$$w_{BA} = \sum_{i=1}^N (L - x_i)_i \frac{\varepsilon_i}{y_i} h_i \quad (14)$$

$$w_{CA} = \sum_{i=1}^{N_c} (a - x_i)_i \frac{\varepsilon_i}{y_i} h_i \quad (15)$$

由式(13)有单积分型多点应变测 C 点“割线挠度”数学模型

$$w_{CA} = \frac{a}{L} \sum_{i=1}^N (L - x_i) \frac{\varepsilon_i}{y_i} h_i - \sum_{i=1}^{N_c} (a - x_i) \frac{\varepsilon_i}{y_i} h_i \quad (16)$$

本文理论在悬臂梁以及薄壁圆柱壳纯弯曲模型上的正确性已通过数值仿真实验以及模型测试实验得到了验证^[13],如果能进一步证明本文理论在板架结构上也同样适用则会使其具有很大的工程应用价值。船体板架结构是一种由“带板梁”形成的交叉梁系,其变形特征与梁变形相似。板架结构大多是复杂弯曲,而且还有剪力的影响,但是本文理论实质上是研究“弯曲应变—总挠度”的关系,通过本文公式计算得到的挠度已经包括了弯曲变形挠度、剪切挠度和受复杂弯曲影响的挠度分量等。因此只要通过合理的布片方式以及式(17)~式(20)排除掉复杂弯曲时表面应变值中的轴向载荷影响,得到满足式(2)~式(8)的弯曲应变值,就能得到结构变形的总挠度。

板架的甲板板不是纯弯曲,中面应变不为零,设甲板板上下表面的弯曲应变分别为 $\varepsilon_{上}$ 和 $\varepsilon_{下}$,中面应变为 $\varepsilon_{中}$,上下表面总应变分别为 $\tilde{\varepsilon}_{上}$ 和 $\tilde{\varepsilon}_{下}$,弯曲应变 ε 可由以下计算得到:

$$\varepsilon_{上} = -\varepsilon_{下} \quad (17)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{上} = \varepsilon_{上} + \varepsilon_{中}, \quad \tilde{\varepsilon}_{下} = \varepsilon_{下} + \varepsilon_{中} \quad (18)$$

$$\varepsilon_{上} = \frac{\tilde{\varepsilon}_{上} - \tilde{\varepsilon}_{下}}{2} \quad (19)$$

$$|\varepsilon| = |\varepsilon_{上}| = |\varepsilon_{下}| \quad (20)$$

通过以上分析可知,本文理论在板架也是可行的,接下来就通过数值实验进行验证。

2 数值实验验证

2.1 验证方案设计

如图4所示,利用有限元软件PATRAN设计一个算例进行验证:建立一个长宽比为2:1典型甲板板架模型,尺寸如图3中标注所示;单元网格尺寸为100 mm×100 mm;甲板板、横梁和纵桁均为板单元,甲板、横梁腹板、纵桁腹板厚度

为16 mm,横梁面板和纵桁面板厚度为20 mm;纵骨为梁单元、16号球扁钢;材料弹性模量 $E = 2.1 \times 10^8$ kPa,泊松比 $\mu = 0.3$,密度 $\rho = 7.8 \times 10^{-6}$ kg·mm⁻³,四边简支,甲板板顶部受1个单位的均布载荷。

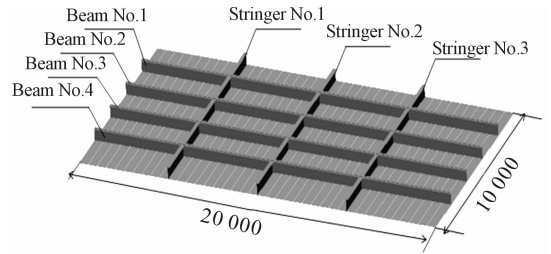


图4 数值实验模型示意图

验证方案如下:在有限元计算结果中,沿模型中的一条直线提取甲板板单元的弯曲应变值作为测量值,提取相应位置的变形挠度作为挠度真值。将测量值代入前述公式进行计算,得到变形挠度的“分布式方法计算值”。将这个“分布式方法计算值”与挠度真值进行比较如果吻合良好则证明本研究的理论是准确可行的。在位移为零的两侧约束边之间的全部单元中,沿直线按步长 h 分别等于500 mm、400 mm、300 mm、200 mm、100 mm提取应变、挠度值进行计算和验证。

提取应变和挠度值的方向分为2种:第一种是沿长边方向,在横梁位置处甲板板中以及横梁之间典型板格中提取;第二种沿短边方向,在纵桁位置处甲板板中以及纵桁之间典型板格中提取。约定以上第一种为“方向一”,第二种为“方向二”。

2.2 模型计算结果

在按不同方向进行计算时,令步长依次等于500 mm、400 mm、300 mm、200 mm、100 mm,计算相对误差,发现步长越小误差情况越好,当步长等于300 mm时此验证模型挠曲线的理论与实验值已吻合良好,如图5所示。

图5和图6中的相对误差大小如表1和表2所示。

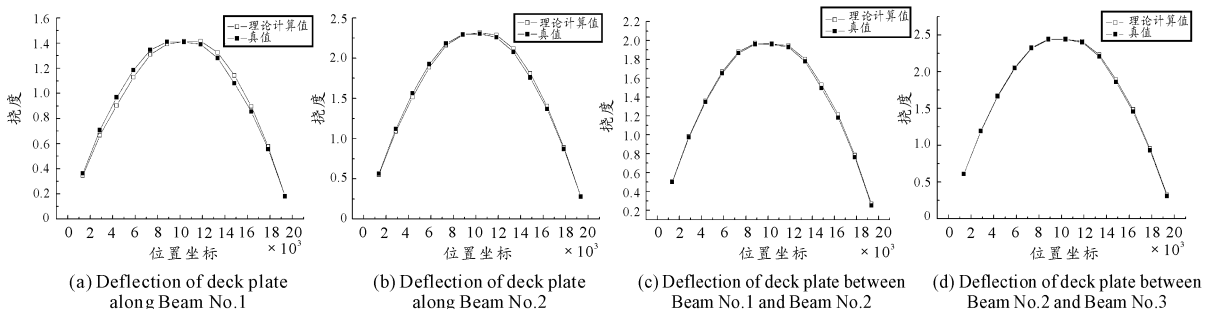


图5 沿方向一模型相应部位挠曲线理论值与真值对比

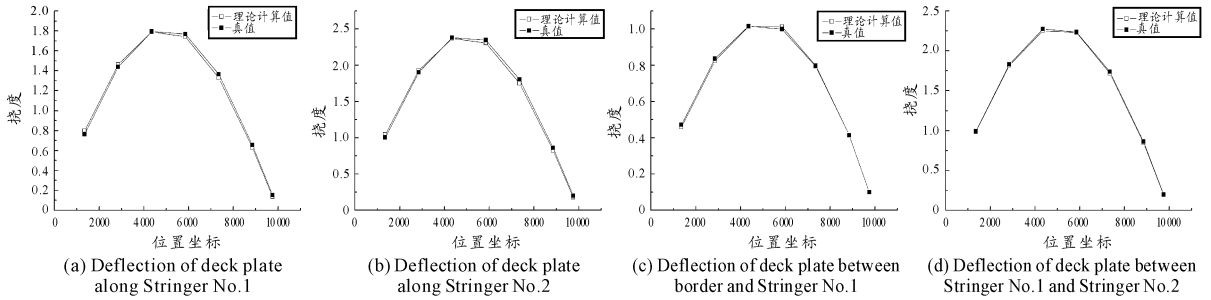


图6 沿方向二模型相应部位挠曲线理论值与真值对比

表1 图5中相对误差

X coordinate	Drawing 5(a)	Drawing 5(b)	Drawing 5(c)	Drawing 5(d)
1 350	-0.048	-0.021	0.008	0.003
2 850	-0.058	-0.027	0.009	0.003
4 350	-0.066	-0.030	0.010	0.004
5 850	-0.048	-0.021	0.011	0.005
7 350	-0.028	-0.010	0.007	0.004
8 850	-0.012	-0.002	0.005	0.002
10 350	0.004	0.006	0.003	0.001
11 850	0.018	0.012	0.008	0.005
13 350	0.034	0.020	0.014	0.010
14 850	0.058	0.030	0.023	0.017
16 350	0.049	0.026	0.026	0.019
17 850	0.039	0.022	0.030	0.022
19 350	0.005	0.007	0.037	0.046

表2 图6中相对误差

Y coordinate	Drawing 6(a)	Drawing 6(b)	Drawing 6(c)	Drawing 6(d)
1 350	0.042	0.038	-0.024	-0.006
2 850	0.017	0.014	-0.014	-0.008
4 350	-0.002	-0.004	-0.004	-0.009
5 850	-0.015	-0.017	0.013	-0.004
7 350	-0.027	-0.029	0.006	-0.011
8 850	-0.042	-0.044	0.001	-0.016
9 750	-0.098	-0.019	0.000 02	-0.016

由表1与表2可知,大部分结果误差都小于5%,只有1号横梁和1号纵桁处少数几个计算点相对误差略大。此时绝大部分位置的精度已经可以满足要求,靠近边界的部分变形较小,即使在绝对误差很小的情况下也可能造成较大的相对误差,此时可以通过合理布设传感器规避这些位置或者增加

这些位置传感器的布设密度使误差达到精度要求。

3 实验结果分析

由数值实验研究可知,利用本研究提出的理论测量结构变形挠度时,步长越小精度越高,当步长减小到一定程度(本实验为300 mm)时,大部分部位的相对误差都已经满足工程应用要求(小于5%),靠近边界的个别部位误差相对较大,然而通过继续减小步长也可使其误差小于5%。说明本文提出的单积分“应变-挠度”数学转换模型是正确的且具有良好的精度,利用该数学模型并结合FBG传感器技术测量结构应变响应进而得到板架结构变形的的方法是可行的。

本文研究成果主要有以下几个创新点:

- 1) 创新地提出了测量变形的新技术,并重新定义了相关概念。
- 2) 创新理论,推导出了利用结构分布式应变测量变形挠度的公式。
- 3) 建立模型进行了数值实验,对理论进行了充分验证。应用价值主要有以下几点:

1) 研究成果可用于精确设计轴系降低噪声,修正惯性系统参数调整舰船航行姿态,提高舰载武器和精密测量仪器的精度等。

2) 研究成果还可用于建立舰船结构健康监测系统,对结构的变形、强度和稳定性等进行实时监控。

4 结束语

本研究提出了基于分布式应变响应测量结构变形挠度的方法,并进行了具体理论推导,通过数值实验对其正确性和可行性进行了验证,接下来可以在此基础上进一步丰富理论,研究掌握其中更多的规律以便更好地指导应用。

参考文献:

- [1] 李晓勇,张忠华,何晶.船体变形对航天测量船外弹道测量的影响[J].飞行器测控学报,2006,25(3):7-12.
- [2] 程和斌,刘芳华.舰船变形状态监测与预报的关键技术研究[D].镇江:江苏科技大学,2011. (下转第99页)

3 结论

1) 2A12T4 铝合金的激光焊接具有一定的不稳定性。总体呈现随激光功率、保护气流量的增大,焊接速度的降低,焊缝固液趾角增大,熔宽、熔深增加。

2) 焊缝熔合线附近区域枝晶呈现柱状特征,焊缝中心区主要为网状分布的等轴枝晶、间杂有大的完整树枝晶。气焊熔剂能明显改善焊缝表面的氧化程度,并细化晶粒。

3) 功率为 2200 W 时,接头热影响区内存在宽度约为 0.2 mm 左右的软化区,硬度值为 89.1 ~ 117 HV_{0.5},焊缝中心区硬度值为 61.9 ~ 105 HV_{0.5},分别为母材的 72.9%、66.1%。

4) 功率为 2 000 W 时,比 2 200 W 的试样,焊缝软化现象明显得到改善,并且热影响区硬度值提高至 103 ~ 126 HV_{0.5},中心区硬度值提高至 86.5 ~ 120 HV_{0.5},分别为母材的 79.46%、75.56%。硬度得到明显提高。可知在获得稳定焊透的前提下降低激光功率,可以减缓热影响区的性能急剧下降的趋势,提高接头性能。

参考文献:

- [1] 李成功,傅恒志,于翹. 航空航天材料[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [2] 《中国航空材料手册》编辑委员会.《中国航空材料手册》第 2 卷. 变形高温合金. 铸造高温合金[M]. 北京:中

国标准出版社,2002. [3] 楼瑞祥. 大飞机用铝合金的现状与发展趋势[C]//中国航空学会 2007 年学术年会:材料专题[S. l.]:[s. n.]:1-8.

- [4] 刘兵,彭超群,王日初,等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报,2010(9):1705-1715.
- [5] 胡芳友. 飞机损伤的激光抢修技术[J]. 中国激光,2009,36(9):2245-2250.
- [6] 左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2008.
- [7] 孙福娟,官永飞,张丹峰,等. 气焊熔剂在铝合金激光焊接中的应用[J]. 现代制造工程,2008(5):89-91.
- [8] 孙福娟,刘洪军,张丹峰. LY12CZ 铝合金激光焊接工艺[J]. 中国激光,2006,33(2):273-277.
- [9] 臧昊. 2024 高强铝合金高功率 CO₂ 激光焊接性研究[D]. 上海:上海交通大学,2013.
- [10] 严军,高明,曾晓雁. 激光-MIG 复合焊接 2A12 铝合金工艺和接头性能[J]. 中国有色金属学报,2009,19(12):2112-2118.
- [11] 周万盛,姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [12] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2005.

(责任编辑 杨继森)

(上接第 94 页)

- [3] 陈熙源. 船舶结构分布式测量系统及其模型[J]. 船舶工程,2004,26(5):62-66.
- [4] 裴福俊,万德钧. 一种基于应变模态分析的舰船分布式挠曲姿态测量方法[J]. 中国惯性技术学报,2005,13(1):15-20.
- [5] LI H C H,HERSZBERG I,DAVIS C E,MOURITZ A P,et al. Health monitoring of marine composite structural joints using bre optic sensors[J]. Composite Structures,2006,75(5):321-327.
- [6] TODD M,Nichols J,TRICHEY S,SEAVER M,NICHOLS C,VIRGIN L. Bragg grating-based bre optic sensors in structural health monitoring[J]. Philos Trans Roy Soc,2007,365(1851):317-343.
- [7] SILVA M R,LOPEZ A R. Structural health monitoring of marine composite structural term joints using embedded ber

bragg grating strain sensors[J]. Compos. Struct,2009,89(2):224-234.

- [8] 王为,林玉池. 光纤光栅在船舶结构健康监测中的关键技术研究[D]. 天津:天津大学,2010.
- [9] 梁文彬,赵美蓉. 基于光纤光栅的船舶结构健康监测技术研究[D]. 天津:天津大学,2011.
- [10] 朱锡,吴梵. 舰艇强度[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [11] 吴梵,朱锡,梅志远. 结构力学[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [12] 许辑平. 潜艇强度[M]. 北京:国防工业出版社,1980.
- [13] 官杰,陈志坚. 船体结构变形长期监测的理论与实验研究[D]. 武汉:海军工程大学,2012.

(责任编辑 杨继森)