

文章编号: 1000-4750(2006)07-0185-08

# 基于局部密集应变响应的海洋平台 冰载荷反演方法

\*李 辉, 丁 桦, 郑哲敏

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘 要:** 冰载荷的现场测量工作对于描述冰载荷与海洋平台的相互作用规律十分重要。回顾了自六十年代以来的各地冰载荷的测量情况, 针对在采用压力盒进行直接测量和利用结构整体响应进行间接反算的过程中存在的困难, 提出了一种利用局部应变响应信息来有效反演海洋平台冰载荷的新方法, 并设计了用于反演的附加套筒结构模型。阐述了反演的基本原理, 从理论上分析了反演的误差来源以及误差的稳定性, 并讨论了反演时载荷作用区域的判断方法和测点的布置原则。最后, 通过计算机仿真的反演算例和一缩尺模型的反演实验(包括模型应变响应的动态标定)验证了这种方法的可靠性。

**关键词:** 冰载荷; 海洋平台; 局部应变; 反演; 误差分析

**中图分类号:** P752; O34 **文献标识码:** A

## IDENTIFYING ICE LOAD ON OFFSHORE PLATFORM BASED ON LOCALLY CONCENTRATED STRAIN RESPONSE

\*LI Hui, DING Hua, ZHENG Zhe-min

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Ice load measurement is important in characterizing the interaction between ice and offshore platform. This paper reviews ice load measurement around the world since 1960s. Some common difficulties are discussed regarding direct measurement using pressure cells and indirect estimation using structural response. A new method of measuring ice load using locally concentrated strain response of offshore structures is proposed to overcome the difficulties. A sleeve-like structure attached to the offshore platform is designed for the purpose. The basic principle of the method is discussed, and the sources of solution error and solution stability are analyzed theoretically. Some principles are also discussed on how to estimate the loading area and how to select the measurement points for the proposed method. Finally a numerical simulation and the experimental validation using a scaled sleeve-like model, including dynamic strain response calibration under concentrated load, are performed respectively to prove the effectiveness of the method.

**Key words:** ice load; offshore platform; local strain; inverse method; error analysis

冰载荷是我国渤海海域油气钻井平台设计的主要控制载荷。影响冰载荷的因素很多, 主要有海冰的物理力学性质以及海冰与平台结构的耦合作用等。这些因素有些本身十分复杂, 有些如果单从

收稿日期: 2004-10-23; 修改日期: 2005-06-17

基金项目: 中国海洋石油总公司与中科院技术合作项目“海上平台优化设计与关键技术研究”(KJ CX23-SW-L03-01)资助项目

作者简介: \*李 辉(1973), 男, 湖南祁阳人, 博士生, 从事结构动力学及反问题研究(E-mail: lihui2400@163.com);

丁 桦(1960), 男, 北京人, 研究员, 从事爆炸力学、结构工程抗震和反问题等领域的研究;

郑哲敏(1924), 男, 北京人, 研究员, 博士, 博导, 中国科学院和工程院院士, 多年从事和指导固体损伤演化的力学分析、煤与瓦斯突出机理、岩土工程力学、海洋工程力学、爆炸力学等领域的研究。

理论上进行分析则难度较大,因此目前分析平台结构冰载荷的主要手段是通过实验来进行,包括模型实验和原型实验。一般的情况是通过分析多次实验所直接得到的冰载荷数据资料,再根据一些先验知识和必要的理论分析来得到能在一定程度上准确地描述冰载荷的结果,这种做法是目前比较可行的

办法。其中原型实验所得到的冰载荷数据显然要更加真实和可靠。

从六十年代开始,国内外曾多次对各种抗冰结构的冰载荷进行了直接测量或利用结构响应数据进行间接的反演,如表1所示。

表1 原型冰载测量情况表

Table 1 Ice load measurements on prototype structures

人 员	位 置	结构形式	冰类型	冰力测量方法	日期
杨国金、Wessels <sup>[1]</sup>	辽东湾	钻井平台	移动冰盖、冰脊、冰盘	压力盒直接测量和用加速度数据反演	1988~1992
Blenkarn <sup>[2]</sup>	库克湾, 阿拉斯加	钻井平台	运动海冰和冰脊	构件上的应变计, 用荷载盒试验桩柱	1963~1969
Lipsett 和 Gerard <sup>[3]</sup>	Athabasca 河、 Pembina 河	河流桥墩	运动河冰	由荷载盒支承桥墩前沿和桩柱, 参照过去的性能估计	1967、1969
Määttänen <sup>[4]</sup>	芬兰湾	灯塔	移动冰盖	压力盒直接测量	1975
Frederking <sup>[5]</sup>	Rideau 河	河流桥墩	运动河冰	用充液压力枕(fluid-filled flatjack)包裹 28%的桥墩周线	1992
Haynes <sup>[6]</sup>	St Regis 河	河流桥墩	运动河冰	沿桥墩周线包裹 CRREL 压力盒测量河 冰压力	1991
Timco <sup>[7]</sup>	Beaufort 海	活动式钢沉箱人工岛	运动海冰和冰脊	MODEF Panel 直接测量、应变计	1980s
Xu <sup>[8],[9]</sup>	渤海湾	JZ-20 钻井平台	移动冰盖	接触面上布置压力盒直接测量	1980s~1990s

由表1中可看出,目前对冰力的直接测量主要通过压力盒或荷载盒来实现的。使用压力盒等传感器直接测量的方法原理简单,可操作性强,但是这种方法也存在一些缺点。首先,压力盒对被测量载荷的方向和分布状况均有选择性,对于垂直于压力盒表面的均布压力测量效果最好,而对于切向载荷基本不敏感,因而适合于流体中的压力测量。对于固体接触材料,使用压力盒测得的载荷会随着材料刚度的增加而逐渐偏离真实值(偏低);其次,对于液压式和振弦式压力盒,由于机械滞后效应比较明显,测量得到的载荷其高频分量将失真<sup>[10,11]</sup>;此外,压力盒对标定的要求比较高,在实验室内采用油压的方式标定其效果一般比较好<sup>[10]</sup>,但这种情况与其原始受力方式存在一定差异,而采用砂、土进行标定的结果则往往不能令人满意<sup>[10]</sup>。

鉴于各种测量条件的限制,压力盒往往只能分布在有限几个平台桩腿上,而且沿腿柱一周的分布角度也有限制,因此无法实现对平台总的、全方位的冰力的测量。因此人们又试图通过利用结构的整体响应(如加速度响应)的方法来反算平台的动态总冰力<sup>[1]</sup>,但这种动态载荷反演方法需要比较完整和精确的结构参数如固有频率、阻尼和模态等,否则反演的结果会有较大误差。此外,在测点数目有限的情况下,测点的布置和测量数据的精度都对反演的结果有较大的影响。

本文针对冰载荷位置比较固定,局部应变响应信息比较明显而且灵敏度很高的特点提出一种利用局部应变响应反演海洋平台冰载荷的方法。这种方法兼有直接测量和间接反演的优点。一方面,这种方法所用的数据与电阻式压力盒相同,为应变数据。只要采样频率足够高,将不存在滞后效应,而且由于应变数据直接来自于与冰相互作用的结构的局部区域,这些数据包含有原始载荷的全部信息,因此与压力盒相比,它可以适用于各种载荷状况。另一方面,下文将证明利用这种方法可以实现对载荷的准静力反演,因此反演时只需要局部静力结构的参数,虽然它对测点的分布要求仍然很高,但对结构参数和测量数据精度的要求都大大降低了。

尽管上述方法具有诸多优点,但直接测量平台结构的局部应变响应依然存在许多困难。首先,要想对结构的局部区域进行标定以确定应变柔度矩阵则必须在现场进行,而且难度很高;其次,由于海平面的涨落使得局部区域经常发生变动;此外,对于裸露在结构外表面的应变片进行保护以免在与冰层的碰撞中损坏也是必须要考虑的问题。因此,为解决上述存在的问题并且使得测量简便易行,我们设计了一种套筒式结构模型,如图1所示。采用筒式结构可以最大限度地保持原桩腿的几何形状,降低冰载荷因结构迎冰面几何形状改变而导致的

套筒直接外挂于平台结构的桩腿上,上下两端各通过 4 个等间距的刚性支点与桩腿紧密连成一体。支点与桩腿接触处做成上下可滑动形式。套筒通过附带浮标的方式来保持它与海平面的相对位置不变,这样排除因海水的涨落导致冰载作用局部区域的变动。应变片可根据需要布置在各个相应位置上,达到一定程度上的密集分布。同时应变片粘贴于套筒内表面,这样可以有效避免冰层对应变片及防水装置的损坏,必要时可以在上下端安排一定的防护以防止碎冰块进入。套筒必须要选择一个合理的刚度范围,并由此确定它的几何尺寸和材料选择。太大的刚度会导致测量的应变响应不明显,并对平台桩腿的刚度造成一定影响。另一方面,因套筒质量一般不会有太大变化,刚度过低也会导致套筒结构的自振频率不能满足准静力反演中远大于冰载频率的要求和套筒本身的动力效应不能忽略,从而为将来的载荷反演增加了难度。在一般的情况下,由于套筒仅仅安装在平台桩腿可能与冰层接触的一个狭小局部范围以及上述的刚度要求,套筒的局部刚度对于平台结构的整体刚度不会有明显的影响。这样一个套筒结构简单,标定方法灵活多变,在实验室即可完成。而且标定工作可与数值模拟结合起来,既可实现全方位的载荷标定又可大大降低标定的工作量。



图 1 测量局部应变的套筒式结构模型

Fig.1 Sleeve-like structure for measuring local strain

## 1 反演的基本原理

当外加动载荷作用于结构时,它不仅会使结构产生整体的振动响应,也会在载荷作用周围一小块结构区域内产生局部响应。这些局部响应一部分是局部区域为平衡外载荷在某一时刻的静力效应而产生的静力变形,另一部分为外加载荷的动力效应所激发的相对于结构整体的局部区域的高频振动。

在本文中,我们主要分析结构局部区域的应变响应,并在反演过程中作了如下假定:

(1) 由结构整体振动导致的冰载作用局部区域结构的应变响应可忽略不计;

(2) 由外加载荷的动力效果所激发的局部区域的高频应变响应可忽略不计。

对于海洋平台这样的空间梁系结构,冰载一般作用于平台桩腿某一高度处,冰载作用局部区域通常远离构件的连接点或锚固点等构件内力、变形和曲率发生急剧改变的地方,因此由结构整体导致的冰载作用局部区域的应变响应是很小的。对于局部响应的高频振动部分,只要局部区域结构的最低自振频率远远大于外加冰载的频率上限,这部分响应也可忽略不计。根据对库克湾、德国 Eider 河口和渤海等地区的抗冰结构所作的长期冰力测量情况来看<sup>[1]</sup>,冰载的大部分能量集中在 0Hz~10Hz 频率带宽范围内,上限一般不超过 30Hz,测量时选择自振频率远远超过上述值的套筒结构较容易办到,因此上述的假定是可行的。

这样,当用应变响应来表示在某一时刻  $t$  的冰载荷作用下,局部区域结构的运动方程时,方程退化为简单的静力方程形式:

$$[K_\varepsilon]_{m \times m} \{\varepsilon(t)\}_{m \times 1} = \{F(t)\}_{m \times 1} \quad (1)$$

或者

$$\{\varepsilon(t)\}_{m \times 1} = [K_\varepsilon]_{m \times m}^{-1} \{F(t)\}_{m \times 1} = [\delta_\varepsilon]_{m \times m} \{F(t)\}_{m \times 1} \quad (2)$$

式中,  $[K_\varepsilon]$ 、 $[\delta_\varepsilon]$  分别为应变刚度矩阵和应变柔度矩阵,  $\{\varepsilon(t)\}$ 、 $\{F(t)\}$  分别为时刻  $t$  的应变响应矢量、冰载荷矢量,下标  $m$  表示测量的应变点数。因此,如果已知应变柔度矩阵以及每一时刻点的应变采样读数,便可通过对应变柔度矩阵求逆从而得到相应的载荷值。当反演的载荷数  $n$  小于测量的应变点数  $m$  时,应变柔度矩阵的逆矩阵为广义逆矩阵,即:

$$\{F\}_{n \times 1} = \begin{cases} [\delta_\varepsilon]_{n \times n}^{-1} \{\varepsilon\}_{n \times 1} & (m = n) \\ ([\delta_\varepsilon]_{n \times m}^T [\delta_\varepsilon]_{m \times n})^{-1} [\delta_\varepsilon]_{n \times m}^T \{\varepsilon\}_{m \times 1} & (m > n) \end{cases} \quad (3)$$

因此,这是一种准静力的反演方法。虽然式(3)中存在对矩阵求逆的情况,只要结构为静定或超静定结构,结构位移或应变柔度矩阵均为满秩,因此一般不存在矩阵出现奇异的情况。

## 2 反演结果的误差分析和测点布置原则

在实际情况中各种误差难以避免,一种好的反

演方法必定能容忍一定误差的存在，并满足问题的适定性要求。因此在本文所述方法中，各种小误差是否会被放大而造成反演结果的失真值得认真考虑的问题。经过分析，在利用局部应变进行反演的过程中误差的来源主要有三种，即：应变测量中的噪声误差、标定过程中存在的误差(应变柔度矩阵的误差)以及由于测量数据的非连续(离散)分布所带来的误差。

对于应变测量中的噪声误差，假设实测应变为：

$$\{\varepsilon_i\} = \{(1 + \Delta_i)\varepsilon_i^r\} \quad (4)$$

式中上标  $r$  表示真实值， $\Delta$  表示误差与相应真实值的比率。代入式(3)中，得：

$$\{F\}_{n \times 1} = \begin{cases} [\delta_\varepsilon]_{n \times n}^{-1} \{(1 + \Delta_i)\varepsilon_i^r\}_{n \times 1} & (m = n) \\ ([\delta_\varepsilon]_{n \times m}^T [\delta_\varepsilon]_{m \times n})^{-1} [\delta_\varepsilon]_{n \times m}^T \{(1 + \Delta_i)\varepsilon_i^r\}_{m \times 1} & (m > n) \end{cases} \quad (5)$$

对于  $\{F\}$ ，下述关系成立：

$$\{F^r\}(1 + \Delta_{\min}) = [\delta_\varepsilon]^+ \{\varepsilon^r\}(1 + \Delta_{\min}) \leq \{F\} \leq [\delta_\varepsilon]^+ \{\varepsilon^r\}(1 + \Delta_{\max}) = \{F^r\}(1 + \Delta_{\max}) \quad (6)$$

式中上标“+”表示广义逆，概括式(5)中两种情况，不等式符号“ $\leq$ ”表示上式的各向量中任一元素均有上述不等式关系存在。由式(6)可见，只要测量的绝对最大误差值相对于真实值足够小，则它对反演的精度及稳定性影响不大。

对于第二项误差，假设实际标定的应变柔度矩阵中任一元素  $\delta_{\varepsilon ij}$  存在随机误差，用下式表示为：

$$\delta_{\varepsilon ij} = \delta_{\varepsilon ij}^r (1 + \mu_{ij}) \quad (7)$$

或用矩阵形式表示为(先分析  $m$  等于  $n$  时的情况)：

$$[\delta_\varepsilon] = [\delta_\varepsilon^r] + [\delta_\varepsilon^r] \otimes [\mu] = [\delta_\varepsilon^r] \{ [I] + [\delta_\varepsilon^r]^{-1} ([\delta_\varepsilon^r] \otimes [\mu]) \} \quad (8)$$

式中上标  $r$  表示真实值， $\mu_{ij}$  表示  $[\delta_\varepsilon]$  中第  $i$  行第  $j$  列元素的误差与相应真实值的比率， $[I]$  为单位矩阵， $\otimes$  表示如下矩阵运算，即： $[\delta_\varepsilon^r] \otimes [\mu] = [\delta_{\varepsilon ij}^r \mu_{ij}]$ 。

将其代入式(3)中，得(先分析  $m = n$  时的情况)：

$$\{F\}_{n \times 1} = \{ [I] + [\delta_\varepsilon^r]^{-1} ([\delta_\varepsilon^r] \otimes [\mu]) \}^{-1} [\delta_\varepsilon^r]^{-1} \{\varepsilon\}_{n \times 1} \quad (9)$$

对于式(9)中的矩阵  $[\delta_\varepsilon^r]^{-1} ([\delta_\varepsilon^r] \otimes [\mu])$ ，如果矩阵  $[\mu]$  中最大元素  $|\mu|_{\max}$  足够小，则可以证明如下不等式成立：

$$[\delta_\varepsilon^r]^{-1} ([\delta_\varepsilon^r] \otimes [\mu]) \leq [\delta_\varepsilon^r]^{-1} ([\delta_\varepsilon^r] \otimes [|\mu|_{\max}]) = [\delta_\varepsilon^r]^{-1} (|\mu|_{\max} [\delta_\varepsilon^r]) = |\mu|_{\max} [I] < 1 \quad (10)$$

式中， $\bullet$  表示矩阵范数， $|\mu|_{\max} = \max(|\mu_{\min}|, |\mu_{\max}|)$ 。因此，根据文献[12]，式(9)中的逆矩阵可

以展开成矩阵级数形式：

$$\{ [I] + [\delta_\varepsilon^r]^{-1} ([\delta_\varepsilon^r] \otimes [\mu]) \}^{-1} = [I] - [\delta_\varepsilon^r]^{-1} ([\delta_\varepsilon^r] \otimes [\mu]) + o([\delta_\varepsilon^r]^{-1} ([\delta_\varepsilon^r] \otimes [\mu])) \quad (11)$$

式(9)变为：

$$\{F\} = \{ [I] - [\delta_\varepsilon^r]^{-1} ([\delta_\varepsilon^r] \otimes [\mu]) \} \{F^r\} \quad (12)$$

同理，当  $m$  大于  $n$  时，也可以推导出类似于式(12)的结果。由式(12)可见，只要标定过程中的绝对最大误差值相对于真实值足够小，则反演结果的误差与标定误差是同量级的。

第三项误差与测点的分布情况及利用先验知识所进行的判断密切相关，很难通过量化的途径直观地表达出来。对海洋平台整体而言，冰载荷可以看成集中载荷，但对于载荷作用周围区域而言则必须要当成连续分布载荷来看待。从理论上说，当测点数足够多且各个应变测点的间距趋近于 0 时，测得的应变趋近于连续分布，反演的载荷也趋向于连续的真实分布情况。但在实际问题中我们只能测量有限点数的应变分布，所反演的载荷也只能通过有限点数的集中载荷来近似模拟真实载荷的分布，这样就不可避免地带来误差。此外，反演时选取哪些点作为载荷的作用点也需要事先进行判断，因为实际载荷的分布范围即使在其作用的局部区域内也可能只占其面积的一小部分，如果不加选择地取所有的点进行反演，就有可能造成非常大的误差。

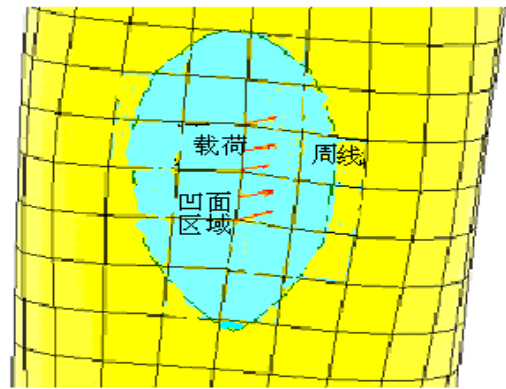


图 2 圆柱壳在局部压力作用下产生的凹面

Fig.2 Concave on cylinder shell induced by local pressure

一般地，作用于结构表面的压力(冰载以压力为主)会在其作用区域附近产生一个凹面，这种情况在薄壳结构中十分明显，如图 2 所示。凹面的大小范围与结构的刚度、载荷的分布形状和载荷总值密切相关，在实验室可根据标定的情况确定。在凹面的中心，外表面为压应变，内表面为拉应变，在凹面的周线附近，外表面为拉应变，内表面为压应变，

二者之间为过渡区域。因此凹面的中心应变绝对值较大区域即可判断为载荷的作用区域,反演时判断载荷作用点应落在此区域内。这样尽管反演所得载荷的分布形状与实际情况相比仍可能有较大误差,但可保证载荷总值的反演精度要求。同时,应变片应布置在凹面区域及周线附近,而且在凹面中心要尽可能密集,反演时尽量取应变绝对值较大的点,以杜绝测量噪声的影响。

### 3 载荷反演的数值仿真

为了验证上述理论的正确性,建立如下套筒结构的数值模型,如图 3 所示。套筒直径 1.1m,高 1.5m,上下两端通过四点可固定于直径 0.9m 的桩腿上(上下移动方向不约束),套筒壁厚 2cm,材料为普通钢材,弹性模量  $2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ ,泊松比为 0.3,结构单元采用厚壳单元。假定在结点 425 和结点 266 之间的一片柱面区域( $0.144\text{m}^2 \times 0.576\text{m}^2$ )在某一时刻  $t$  存在垂直于表面的均布压力载荷  $2000\text{kN/m}^2$  ( $\omega_f \ll \omega_0 = 161.8\text{Hz}$ ),压力总和为  $1.66 \times 10^2 \text{kN}$ ,如图 3 中部区域所示。

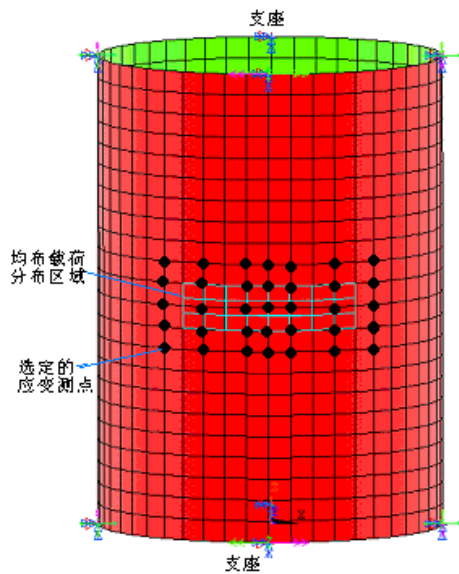


图 3 套筒的数值模型

Fig.3 Numerical model of the sleeve-like structure

在本文中,对于反演所必须的应变测量值和需要实际标定的应变柔度矩阵,我们均通过计算机仿真来代替,所有数值仿真工作和数据处理均在 ANSYS7.1 软件平台上完成。反演载荷时,先考虑不存在测量和标定误差的情况。为方便起见,只取载荷作用区域及周围的柱面区域内部分结点(图 3 中的各黑点,共 35 点)的  $z$  方向(竖直方向)应变作为

反演载荷的应变值读数。它们在  $t$  时刻的均布压力下的  $z$  方向应变分布情况和载荷反演结果如图 4 所示。

由图 4 可见,图中带圈的黑点的应变读数均为拉应变,处于压力所形成的凹面中,而其余各黑点的应变值均为负,处于压力作用区域的外围,结点上无载荷作用,因此判断载荷作用在带圈的黑点上。在计算机仿真的反演算例中,反演所用的应变柔度矩阵的各元素值通过分别在各载荷点上施加单位力并求解来得到。利用这些条件进行反演,得到各结点的载荷分布,仍表示于图 4 中。由此可见,反演时所判断的载荷作用区域与实际的压力区域有一定差别,而且不再是均匀分布,但这是由于反演时用集中载荷代替分布载荷以及反演载荷点数不足所致。从中得到各点的压力总和为  $1.51 \times 10^2 \text{kN}$ ,比真实值约小 9.0%。

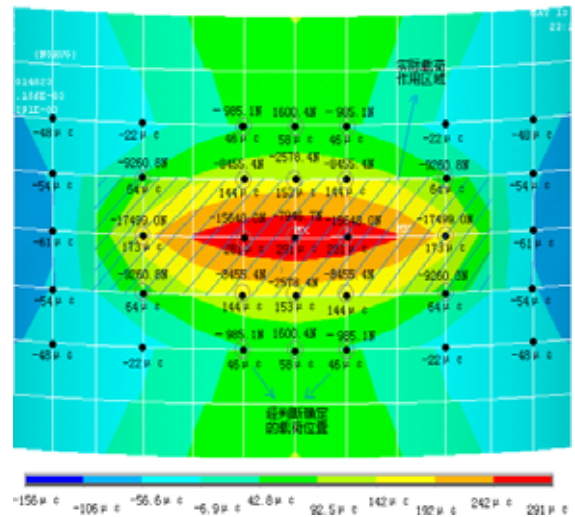


图 4 结构应变分布( $z$  方向)及反演结果(无测量和标定误差)

Fig.4 Strain distribution (direction  $z$ ) and load identification results (without measuring and calibration error)

假定用于反演的应变读数存在  $\pm 10\mu\epsilon$  (约为各有效测点应变平均值的 10%左右)范围内的均匀分布的随机误差,使得实际应变分布如图 5 所示。仍然利用上述的先验判断来进行反演,得到的结果表示在图 5 中。从中得到各点的压力总和约为  $1.48 \times 10^2 \text{kN}$ ,比真实值约小 10.8%,比无测量和标定误差时的值小 2.0%。

与上述类似,假定标定的应变柔度矩阵中每一元素均存在  $\pm 5\%$  范围内的均匀分布的随机误差,但应变读数及分布与图 4 所示相同。仍然利用上述的先验判断来进行反演,反演得到的载荷分布如图 6 所示。所得到的各结点压力总和为  $1.52 \times 10^2 \text{kN}$ ,比

真实值约小 8.4% ,比无测量和标定误差时的值约大 0.7%。

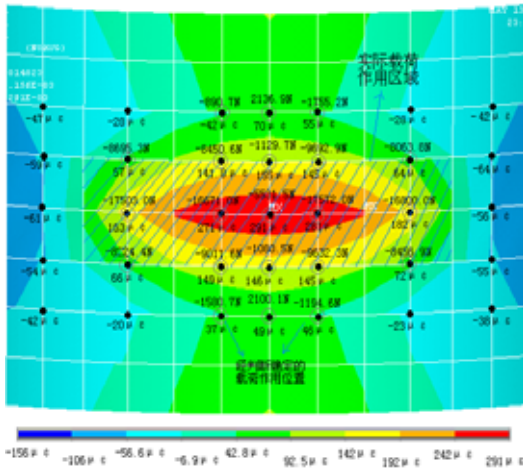


图 5 应变读数中存在均匀分布的随机误差时的应变分布和反演结果

Fig.5 Strain distribution and load identification results with uniformly distributed random errors in strain

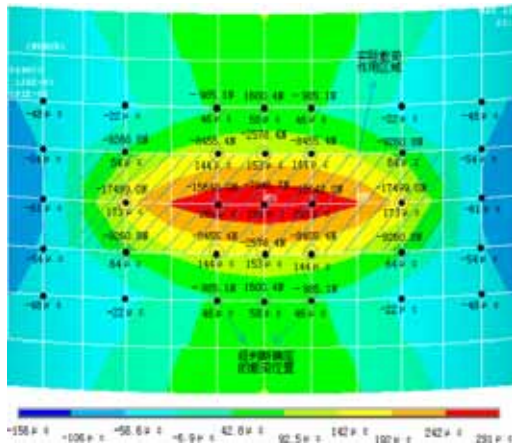


图 6 标定的应变柔度矩阵存均匀分布误差时的应变分布及反演结果

Fig.6 Strain distribution and load identification results with uniformly distributed random errors in calibrated strain compliance matrix

现在假定上述误差均存在,但对于反演的应变读数点进行加密,总数由 35 点增加到 55 点,如

图 7 中的黑点所示。对于增加的读数点仍然利用上述的先验判断来确定该结点上是否存在载荷作用,然后进行反演,反演得到的载荷分布如图 7 所示。所得到的各结点压力总和为  $1.58 \times 10^2 \text{kN}$ ,比真实值约小 4.8%,比无测量误差和标定误差时的值约大 4.6%。

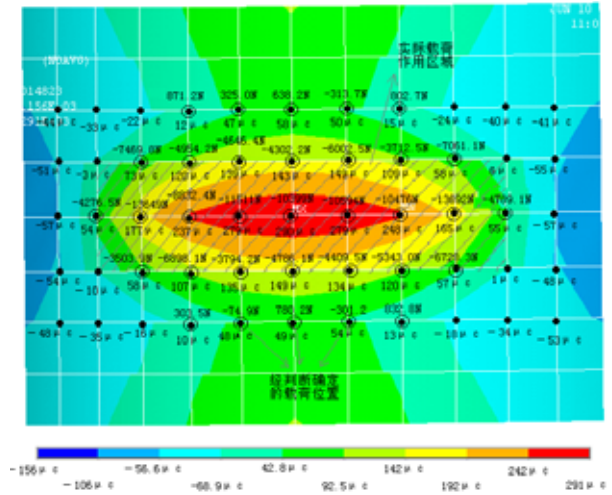


图 7 测点数加密且各项误差均存在时的应变分布及反演结果

Fig.7 Strain distribution and load identification results with both random errors and using more densely distributed measuring points

表 2 归纳总结了此次算例中各种误差情况下的反演精度。由此可见,第三项误差,即因测点数据的离散性所导致的误差对于反演结果精度的影响最大,它的存在使得反演的结果与真实值相比有 9%的偏差。而第一项误差(测量过程中存在的 10% 噪声误差)和第二项误差(应变柔度矩阵的 5% 误差)的增加只是在第一种情况的基础上分别带来了 1.8%和 0.6%的精度损失,说明这两项误差对于反演精度的影响在可控制的范围内。第四种反演情况中,尽管三项误差均存在,但反演结果偏差从 9% 降到了 4.8%,这说明当有效测点分布较为密集时,反演结果精度将有明显的提高。

表 2 各种误差存在的情况下反演所得的总载荷值与真实值的比较

Table 2 Comparison of Total loads between the calculated and real values with different errors

	反演的载荷总值	与真实值的偏差(实际值-真实值)/真实值	与仅存在第三项误差时的偏差
仅有第三项误差	151 kN	-9.0%	
第一项 + 第三项	148 kN	-10.8%	-2.0%
第二项 + 第三项	152 kN	-8.4%	0.7%
第一项 + 第二项 + 第三项,且测点数加密	158 kN	-4.8%	4.6%
真实值	166 kN	—	—

### 4 动态载荷反演的室内实验及其标定

为了进一步验证载荷反演的结果，我们制作了一个 1/3 的几何缩尺模型，并进行了相应的动态标定和实验工作，冰载荷通过人为加载进行模拟。为便于控制载荷大小，套筒由铝材制成，厚约 1.5mm，直径 350mm，这样在较小的载荷下即有明显的应变响应，便于手动加载控制。套筒内表面共布置了 26 个应变片，各片之间间距 3cm，它们的位置如图 8 所示。在实验中我们先进行动态标定，即分别在各个应变片位置施加动态集中压力时程曲线(由力传感器测量)，同步采样测量各应变片的响应，采样频率均为 512Hz，远大于套筒模型的实测最低固有频率(51.3Hz)。对各个采样时刻点的应变响应值除以该时刻的力信号，并在时域内取加权平均值即得到应变响应柔度矩阵，然后我们在图示斜线区域施加均匀分布的动态压力时程曲线，根据测量得到的应变响应时程和标定的应变柔度矩阵在每一采样时刻点根据式(2)反演此时此刻点的动载荷，最后与实际载荷时程进行对比。图 9 为动态标定的示意图，图 10 给出了第 13 号应变片在动态标定时测得的动态力时程和应变响应时程。由于所施加的动态力主频率(约 2.5Hz)远小于套筒模型的实测最低固有频率，因此动力问题可以以准静力方式处理。由此可计算出第 13 号应变片在作用于第 8 号应变片位置的压力下的应变响应刚度(在整个时程内平均)约为 $-8.36\mu\epsilon/N$ 。



图 8 铝套筒模型及内表面应变片位置  
Fig.8 Aluminum sleeve-like model and strain-gage distribution

在反演均匀分布动压力载荷时，按照上文所述的方法分析各个测量点的应变响应，并确定动态力的分布区域。最后根据式(2)反演每一采样时刻点的载荷。图 11 比较了反演得到的动态压力总值时程

与实际测量的动压力时程。图中计算的结果清楚地反映了实际动载荷的频率特征和作用规律，但计算值有些偏高，绝对误差基本上在 5N~8N 左右。

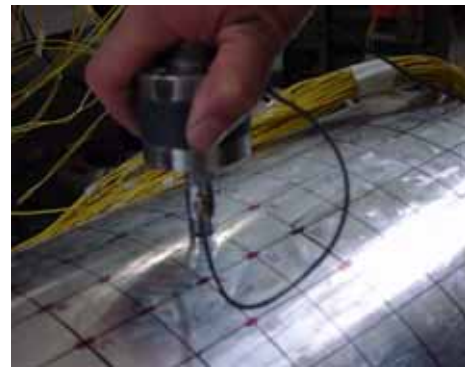


图 9 套筒模型的标定(手动加载，用力传感器测量力信号)  
Fig.9 Model calibration by applying load manually and measuring load response simultaneously

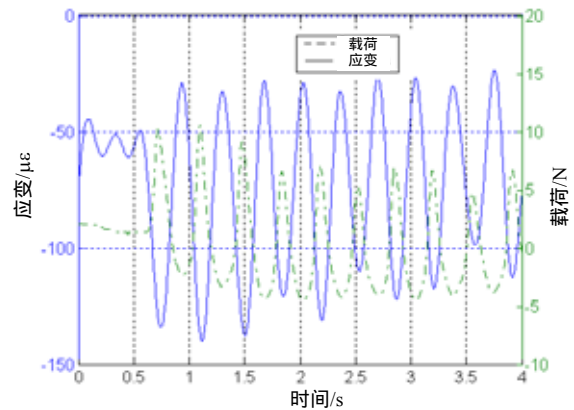


图 10 动态标定时应变响应和集中力时程(集中力作用于第 8 号应变片，在第 13 号应变片产生的响应)  
Fig.10 Strain response and concentrated load during the dynamic calibration process (load is at gage 8 and strain response at gage 13)

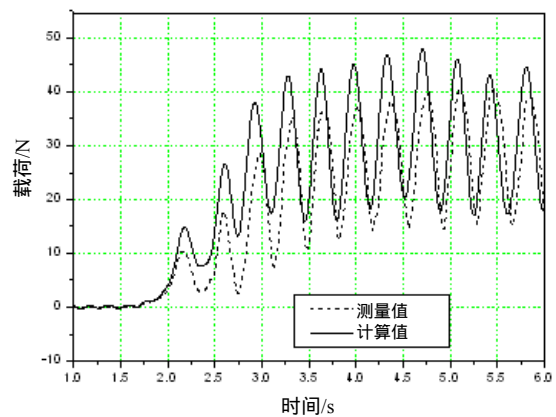


图 11 反演的动载荷与实际测量值的比较  
Fig.11 Comparison between the calculated and the measured loads

## 5 结论

(1) 利用密集局部应变响应来反演海洋平台冰载荷的方法与采用压力盒的直接测量法相比,它简单实用灵活。本文中设计的附属套筒模型结构简单,能适应于各种方向的冰载荷和海面涨落情况并且基本上无滞后效应。标定时与数值模拟相结合可大大减少标定工作量。

(2) 利用密集局部应变响应来反演海洋平台冰载荷的方法是一种准静力的载荷反演方法。这种方法对于测量和标定的过程以及其它相关过程中可能存在的小误差不敏感,反演的精度较好。

(3) 测点的布置和反演时载荷作用区域的判断和选取对于反演结果的精度有较大的影响,对测点尽可能加密布置并利用先验知识判断载荷的分布区域是减少此项误差,保证反演精度的有效措施。

### 参考文献:

- [1] 杨国金. 海冰工程学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.  
Yang Guojin. Engineering Science of Sea Ice [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [2] Blenkarn K. Measurement and analysis of ice forces on Cook Inlet structures [C]. Houston: Proceedings of Offshore Technology Conference (OTC 1261), 1970.
- [3] Lipsett A W, Gerard R. Field measurements of ice forces on bridge piers, 1973~1979 [R]. Alberta: Alberta Research Council and Alberta Cooperative Research Program in Transportation and Surface Water Engineering, Report SWE 80-3,130, 1980.
- [4] Määttänen M. On conditions for the rise of self-excited ice-induced autonomous oscillations in slender marine pile structures [R]. Winter Nav. Board: Research Report, 25, 1975.
- [5] Frederking R M W, Sayed M. Ice impact force measurements on a vertically face bridge pier [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1992, 114(1): 63~65.
- [6] Haynes F D, Sodhi D S, Zabilansky L J, Clark C H. Ice force measurements on a bridge pier in the St. Regis River [R]. Hanover: CRREL Special Report No. SR 21-14, 6, 1991.
- [7] Timco G W, Johnston M. Ice loads on the molikpaq in the canadian beaufort sea [J]. Cold Regions Science & Technology, 2003, 37(1): 51~68.
- [8] Xu J, Leira B. Dynamic response of a jacket platform subjected to ice floe loads [C]. Quebec City: Proceedings of 6th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC-81), 1981.
- [9] Xu J, Li T. A critical sea ice state warning system for winter offshore oil production in north bohai bay [C]. Potsdam: Proceedings of the 14th IAHR Ice Symposium (IAHR-96), 1998.
- [10] 谢永利, 王晓谋. 关于电阻式微型压力盒的标定与分析[J]. 西安公路学院学报, 1993, 13(3): 23~27.  
Xie Yongli, Wang Xiaomou. Calibration and analysis of miniature resistance-strain-transforming pressure cells [J]. Journal of Xi'an Highway Transportation Institute, 1993, 13(3): 23~27. (in Chinese)
- [11] 陈志坚, 游庆仲, 林闽, 李筱艳. 振弦式压力盒在刚性接触面应力监测中的应用研究[J]. 中国工程科学, 2002, 4(12): 80~85.  
Chen Zhijian, You Qingzhong, Lin Min, Lixiaoyan. Application of vibrating wire pressure cell for stress monitoring on rigid interface [J]. Engineering Science, 2002, 4(12): 80~85. (in Chinese)
- [12] 李正良. 矩阵理论和代数基础[M]. 北京: 电子科技大学出版, 1989.  
Li Zhengliang. Introduction to Matrix Theory and Algebra [M]. Beijing: University of Electronic Science & Technology of China Press, 1989. (in Chinese)