

磁致位移传感器冰雪厚度测量仪原理及其应用

雷瑞波^{*1,2}, 程言峰², 李志军¹, 王 昕¹

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 中国极地研究中心, 上海 200136)

摘要: 基于磁致伸缩原理的位移传感器具有高精度、高稳定性、多位置测量的特点, 据此研制了一种能同时测量冰/雪表面和冰底面变化的接触式冰雪厚度测量仪. 该仪器被应用到低温实验室冰厚和南极固定冰区冰雪厚度的测量中. 实验室历时 540 h, 测量精度 ± 0.13 cm; 现场应用持续 6 个月, 测量精度 ± 0.20 cm. 高精度的测量数据, 特别是现场测量数据, 为分析冰厚变化的细微过程提供了基础, 为深入研究气-冰-海耦合过程, 完善海冰热力学数值模型提供了支持. 另外, 该仪器还能冰工程领域的研究提供技术支持.

关键词: 冰; 雪; 厚度; 测量; 传感器

中图分类号: P731.15 **文献标志码:** A

0 引言

海冰是全球气候变化的指示剂, 极地冰区是影响全球气候变化的关键区域^[1]. 同时, 冰荷载是寒区水利工程、海岸和海洋工程设计的控制荷载之一, 给水工和海工建筑物的安全运行带来极不利的影响^[2,3]. 在气候-环境科学研究中, 冰厚是最基础的参数之一, 目前建立的冰物质平衡预报模式, 需要大量实测冰厚数据作为模式计算的初始条件和结果检验依据; 在冰工程中, 冰厚是计算海冰对海工建筑物作用力的关键指标之一^[4]. 已有冰厚测量技术中, 钻孔和热电阻丝的接触式测量最为可靠^[5], 但因其劳动强度大, 不能实现连续观测. 系泊仰视声纳被认为是定点冰厚自动化观测最有效的设备, 但实践证明其典型精度只有 20 cm, 相对精度 11.5 %^[6]. 此外, 还有卫星遥感、雷达测量、电磁感应测量等自动化观测技术, 但它们的精度都不能满足工程设计和管理的需要, 只能在大面积的冰厚观测中发挥作用^[7~9].

基于磁致伸缩位移传感器, 李志军等研制了一种接触式的冰雪厚度测量仪^[10]. 它克服了劳动强度大、不能实现连续自动测量的缺点. 本文介绍该

仪器的测量原理, 给出其在实验室和南极现场应用的运行性能分析, 证实其在低温环境下的适用性.

1 工作原理

铁磁质磁化方向的改变会引起介质晶格间距的改变, 使得铁磁质的长度和体积发生变化, 此即磁致伸缩现象, 也称为威德曼效应, 其逆效应称为维拉里效应. 磁致伸缩丝为波导钢丝, 在脉冲电流激励下会形成环形磁场, 并与磁环的永磁场相交, 因威德曼效应, 产生周向机械扭转变形, 并以扭力波的形式向两端传播. 当回波到达检出机构时, 因维拉里效应, 在线圈两端产生感应电脉冲. 通过电路设计可得到激励脉冲到回波感应脉冲的时间 t , 则磁环与检出机构的距离 $L = v \cdot t$, v 为扭力波传播速度. 当前广泛应用于活塞位置测量、液位测量、竞技场距离测量等方面^[11,12] 的磁致位移传感器就是基于上述磁致伸缩原理发展而来的. 与电磁波/声波测距技术相比, 因为磁致位移传感器所检测的扭力波波速在不同环境下变化不大, 时间检测容易实现, 因此具有高时间分辨率和高精度的特点. 另外, 如果在不同位置放置多个磁环, 可实现多位置测量. 利用磁致位移传感器技术, 并

考虑到特殊的应用环境要求,本文研制了一种接触式冰雪厚度测量仪,见图 1. 冰雪厚度测量仪设计期望的综合精度为 $\pm 0.2\text{ cm}$,测量间隔在 $10\sim 180\text{ min}$ 可调,最低工作环境温度为 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

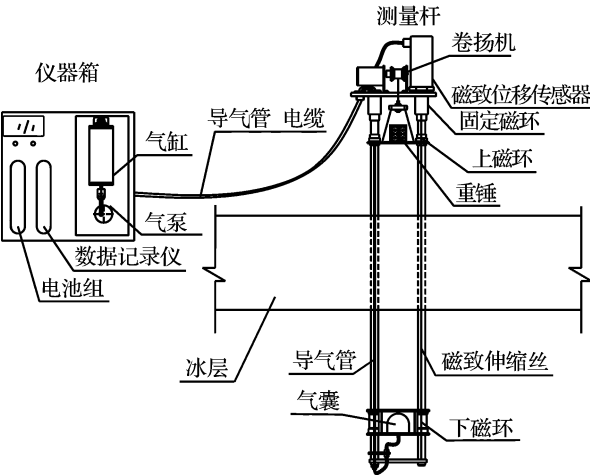


图 1 磁致位移冰雪厚度测量仪示意图
Fig. 1 An apparatus for monitoring ice/snow thickness based on magnetostrictive displacement sensor

如图 1 所示,仪器箱和测量杆是测量仪的两个主要部件.它们之间用导气管和电缆连接,导气管用于连接气缸和下磁环机构内的气囊,电缆用于连接测量杆上的位移传感器和卷扬机的电气部分.测量杆由两根导热性较低的 PPR 管包裹,导气管从其中一根测量杆内通过,传感器的磁致伸缩丝则装在另一根测量杆内.仪器的测量过程主要是通过控制两个可活动磁环运动完成.测量时,上磁环机构向下运动,放置在冰/雪面上;下磁环机构通过气动方式控制,当气缸压缩空气时,磁环机构内的气囊膨胀,下磁环机构浮起,与冰底面接触.这时探测上、下活动磁环与固定磁环的距离,与初值比较,得到冰/雪表面和冰底面的位置.测量完毕后,上磁环机构在卷扬机牵引力的作用下向上运动;随释放气缸压力,气囊收缩后下磁环机构下沉到测量杆底端.

2 应用性能分析

2.1 实验室应用

在低温实验室进行了一组淡水冰生长过程模拟实验,实验水槽平面大小 $2\text{ m}\times 0.5\text{ m}$,水深 0.7 m ,环境温度 $-16\sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$,冰生长最终厚度

46.2 cm ,实验历时 540 h .实验历时 250 h 时,实验室出现电路故障,断电 8 h .实验过程中利用磁致位移冰雪厚度测量仪测量冰厚,并利用热电阻丝测量装置进行冰厚比对测量,其目的是验证仪器测量数据的可靠性.图 2 给出了仪器和热电阻丝测量装置同时刻的测量结果(X 和 Y).实验历时 250 h 压缩机停止工作后,水槽内冰层增长速率出现空间差异,压缩机恢复工作后,冰增长的空间差异仍需要一定时间才能消除.所以对应实验历时 $250\sim 300\text{ h}$,冰层从约 25 cm 增长至 30 cm 时,热电阻丝测量装置与仪器的测量结果差异较大,偏差超过 1 cm .除此期间外,两者的偏差均小于 1 cm .仪器测量数据可靠,然而热电阻丝测量装置的测量精度只有 $\pm 0.5\text{ cm}$,而且测量频次较低,不能依此判断仪器的测量精度.为分析仪器的测量精度,假设冰生长速率在 12 h 内为一定值,以 12 h 为时间窗对测量结果作线性滤波,计算实测值与拟合值的偏差 e ,并分别计算正、负偏差值的均值绝对值和标准差,取它们的和作为误差.图 3 给出

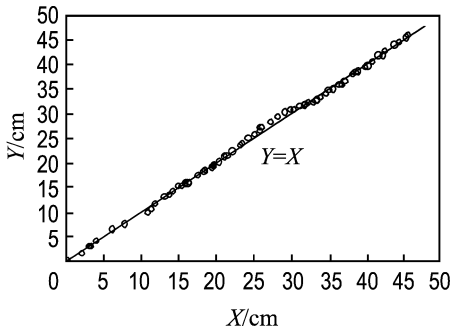


图 2 磁致位移测量仪和热电阻丝装置实验室冰厚度测量结果比较

Fig. 2 Comparison between ice thickness recorded by the magnetostrictive displacement sensor and that by the hot-wire ice thickness gauge in laboratory

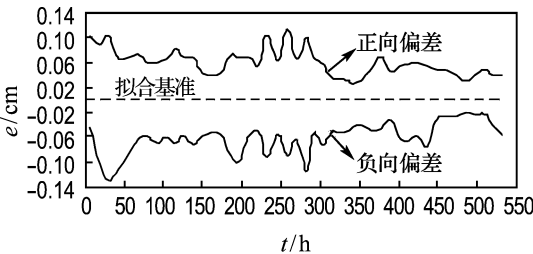


图 3 实验室测量数据正、负偏差
Fig. 3 The positive and negative errors in laboratory

了测量数据的正、负偏差. 正偏差最大值为 0.11 cm, 负偏差最大值为 0.13 cm, 因此仪器的实验室综合精度为 ± 0.13 cm, 优于仪器期望的综合精度, 达到预想效果.

2.2 现场应用

在实验室应用的基础上, 对仪器进一步改进后, 将其应用于中国南极中山站附近固定冰区冰雪厚度的定点测量中. 2006-03-27 实施了仪器的布放, 布放时冰厚 25 cm. 2006-03-30 开始测量, 测量间隔设定为 180 min, 个别天数采用 120 min. 表 1 总结了仪器运行过程中所经历的现场环境条件.

表 1 仪器运行期间的现场环境条件
Tab.1 The field conditions during experiment

参数	数值
最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	-30.2
最低月平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	-18.6
极端风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	25.9
大风天气/d	93
湿度范围/%	19~92
最低气压/hPa	923.7
降雪天气/d	52
暴风雪天气/d	11
极夜时间/d	58
最大日潮差/m	1.82

观测至 2006-09-21 结束. 根据现场观测, 该区域冰面雪盖日累积量小于 10 cm, 冰底生长率小于 $3 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$, 所以当冰/雪表面测量值与当天测量均值相差大于 10 cm, 冰底测量值与当天测量均值相差大于 3 cm 时, 数据视为奇异值. 奇异值均为机械部件故障引起. 这些故障在现场能被发现和处理, 引起的奇异值也都能被识别. 下磁环机构工作效率为 93.7%, 上磁环机构工作效率为 92.6%.

为了验证仪器测量数据的可靠性, 在仪器周边 2 m 半径范围内共进行了 24 次钻孔冰厚测量. 图 4 给出了钻孔与仪器同时时间的测量结果 d_d 和 d_c , 它们的平均偏差为 (1.5 ± 1.0) cm, 可认为仪器测量数据是可靠的.

假定日内海冰生长率不变, 采取实验室测量数据精度分析方法, 对仪器现场观测精度进行估计, 得到冰底面测量值正、负偏差(图 5), 正、负偏差最大值均为 0.20 cm, 达到期望的综合精度.

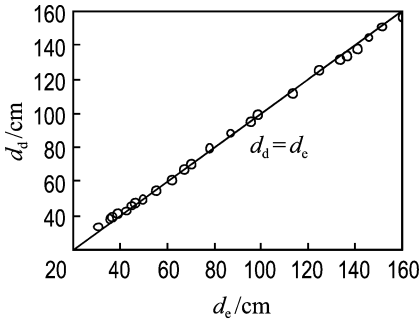


图 4 仪器和钻孔海冰厚度现场测量结果比较
Fig. 4 Comparison between sea ice thickness recorded by the apparatus and that recorded by drill-hole in field

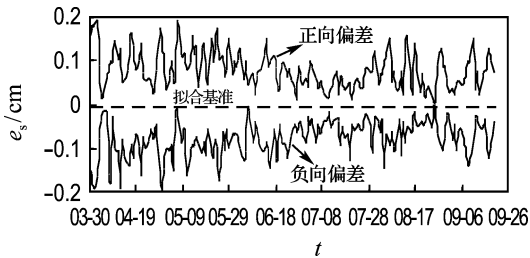


图 5 现场测量数据正、负偏差
Fig. 5 The positive and negative errors in field

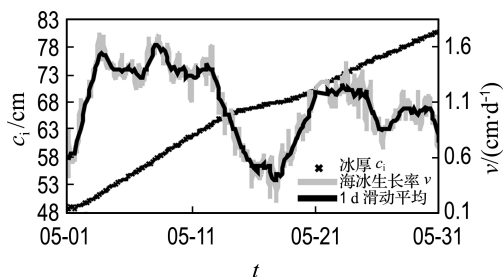
2.3 新技术现场观测数据的优势分析

海冰热力学数值模拟结果表明极地海冰稳定生长期的生长率每天只有几毫米^[13], 但这些结论尚缺少实际观测数据支持. 如果使用多日间隔的冰厚度测量数据, 就难以反映模式中气象或水文强迫的短时效应. 因此, 如何观测到毫米级的冰厚数据成为了海冰热力学研究的“瓶颈”问题^[14].

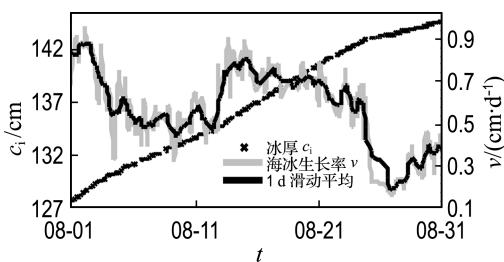
图 6 给出了 2006-05 和 2006-08 的海冰厚度 c_i 和海冰生长率 v . 海冰生长率存在明显的日变化, 这对于传统观测手段来说, 会因其精度不高而不能识别. 另外, 冬季天文潮引起的水体水平热交换对东南极普里滋湾固定冰生长的影响一直都被认为可以忽略^[15]. 然而, 磁致位移测量仪能得到海冰生长率的细微变化, 观测结果表明海冰生长率在大潮期(05-15、08-10 以及 08-25 左右)相对较低, 小潮期(05-08、05-23 以及 08-17 左右)相对较高, 具有明显的半月周期变化特性.

积雪厚度是计算积雪表面能量平衡的关键参数. 现场观测时, 积雪厚度由上磁环的观测数据得到. 2006-07-30 至 2006-07-31, 中山站地区经历了

当年最强降雪过程,因降雪后出现了大风天气,冰表面雪厚度变化明显.图7给出了07-29至08-02积雪厚度的变化过程,仪器准确地捕捉到了雪厚在这其间经历的快速变化过程,这对于传统的花杆测量来说,因其测量频次较低,是难以实现的.



(a) 2006-05



(b) 2006-08

图6 2006年5月、8月海冰厚度及其生长率变化

Fig. 6 Sea ice thickness and growth rate in May and August of 2006

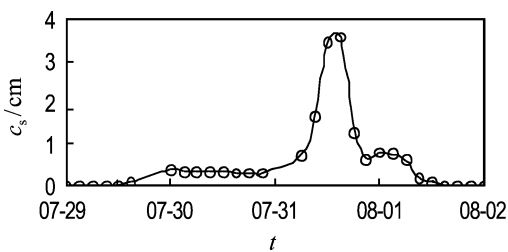


图7 2006-07-29至2006-08-02积雪厚度变化过程

Fig. 7 Variations in snow depth from 29 July to 2 August in 2006

3 结 论

通过多种方法证实了磁致位移测量仪测量数据的可靠性.仪器能同时测量冰底面和表面的变化过程,在低温实验室和现场应用的测量精度分别为 ± 0.13 cm和 ± 0.20 cm,均达到期望的综合

精度要求,为解决制约冰热力学研究向精细发展的“瓶颈”问题提供了基础.通过仪器在南极中山站的应用,首次观测到天文潮对该区域固定冰生长的影响即使在冬季也不能忽视的现象.该仪器适用于极区、亚极区非变形海冰,高纬度地区河冰、水库冰,和实验室冰厚无人值守的连续测量.目前测量环境对仪器测量精度的影响主要体现在恶劣环境可能使仪器出现机械故障,然而这些缺陷将来是可以通过机械部件的优化设计得以弥补的.

参考文献:

- [1] 刘钦政,黄嘉佑,白 珊,等. 全球冰海洋耦合模式的海冰模拟[J]. 地学前缘, 2000, 7(增):219-230
- [2] 贺益英. 寒区工业取水口防冰工程新方法的研究[J]. 水利学报, 2003(1):7-11
- [3] 李 锋,岳前进. 不同破坏模式下锥体结构冰力定性分析[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(6):785-788 (LI Feng, YUE Qian-jin. Qualitative analysis of ice forces on conical structures under different failure modes [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(6):785-788)
- [4] 李志军,吴紫汪,高树刚,等. 渤海连续冰层关键力学参数预报模式[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(2):238-241 (LI Zhi-jun, WU Zi-wang, GAO Shu-gang, et al. Forecast model for key mechanical parameters of level ice sheet in Bohai [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43(2):238-241)
- [5] PEROVICH D K, GRENFELL T C, RICHTER-MENGE J A, et al. Thin and thinner: Sea ice mass balance measurements during SHEBA [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(C3):8050-8075
- [6] STRASS V H. Measuring sea ice draft and coverage with moored upward looking sonars [J]. Deep-sea Research. I, 1998, 45:795-818
- [7] LAXON S, PEACOCK N, SMITH D. High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region [J]. Nature, 2003, 425:947-950
- [8] SUN B, WEN J, HE M, et al. Sea ice thickness measurement and its underside morphology analysis

using radar penetration in the Arctic Ocean [J]. **Science in China, Series D**, 2003, **46**(11):1151-1160

[9] WORBY A P, GRIFFIN P W, LYTLE V I, *et al.* On the use of electromagnetic induction sounding to determine winter and spring sea ice thickness in the Antarctic [J]. **Cold Regions Science and Technology**, 1999, **29**(1):49-58

[10] 李志军,张占海,李广伟,等. 接触式自动测量冰、雪厚度变化过程的方法[P]. 中国:ZL 03 111668. X, 2005-01-26

[11] 李庆山,潘日敏,戴曙光,等. 磁致伸缩位移传感器位移测量研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2005, **26**(8):50-56

[12] HRISTOFOROU E, CHIRIAC H. Position measuring system for applications in field sports [J]. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 2002, **249**:407-410

[13] PURDIE C R, LANGHORNE P J, LEONARD G H, *et al.* Growth of first-year landfast Antarctic sea ice determined from winter temperature measurements [J]. **Annals of Glaciology**, 2006, **44**(1):170-176

[14] 李志军,张占海. 中国 2003 年北极海冰调查及未来北极海冰研究战略[J]. 极地研究, 2004, **16**(3): 202-210

[15] HEIL P. Atmospheric conditions and fast ice at Davis, East Antarctica;a case study [J]. **Journal of Geophysical Research**, 2006, **111**(C5):C05009, doi: 10.1029/2005JC002904

**Principle and application of apparatus for
monitoring ice/snow thickness
based on a magnetostrictive displacement sensor**

LEI Rui-bo^{*1,2}, CHENG Yan-feng², LI Zhi-jun¹, WANG Xin¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China)

Abstract: Magnetostrictive displacement sensor has characteristics of high precision, high reliability and multi-position detecting. Based on the principle of this sensor, a new apparatus for monitoring ice/snow thickness and ice foundation variation was developed. This apparatus was used to measure ice thickness in freezing laboratory for about 540 h and landfast-sea-ice thickness and snow depth in Antarctica for about 6 months. Precision estimation indicates that the error of the apparatus is ± 0.13 cm in laboratory and ± 0.20 cm in field, respectively. The data, especially for the field data, with high precision, can give a powerful support to analyze the process of ice growth and decay in a short-temporal scale, and to thoroughly understand the couple interaction processes among atmosphere, ice and ocean, furthermore, to modify ice thermodynamic numerical model. In addition, this apparatus will supply technical support for ice engineering research.

Key words: ice; snow; thickness; measure; sensor