

# 冰层厚度

## 自动化检测技术

*Ice Thickness Automated Detection Technology*

❁ 窦银科 著



電子工業出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

P931  
1004

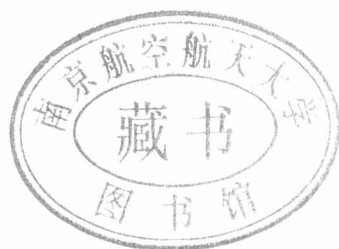


NUAA2014013148



# 冰层厚度自动化检测技术

窦银科 著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

2014013148

## 内 容 简 介

本书在总结目前各种实际冰层厚度检测方法优缺点的基础上,初步研究了淡水冰的电学性质,详细叙述了作者设计的几种冰层厚度自动检测技术的基本原理、研究过程,以及利用这些原理实现对冰层厚度定点、连续自动测量的检测方法与实现途径。书中还详细介绍了电阻率冰层厚度测量系统及电容感应式冰层厚度测量系统在黄河河道及南极海冰的现场应用情况。

本书适用于海洋、水文监测的工程技术人员参考,也可供大学和科研机构单位的研究生作为参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

冰层厚度自动化检测技术 / 窦银科著. —北京: 电子工业出版社, 2013.12

ISBN 978-7-121-22148-4

I. ①冰… II. ①窦… III. ①冰层—厚度—自动检测 IV. ①P931.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 299575 号

策划编辑: 张 榕

责任编辑: 张 榕

印 刷: 北京京华虎彩印刷有限公司

装 订: 北京京华虎彩印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 13.25 字数: 230 千字

印 次: 2013 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 68.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# FOREWORD

## 前言

自然界中冰冻是一种常见的物理现象，主要分布在高纬度地带。冰冻灾害会对水利设施、水电大坝、水产养殖、电力设施、航运和水上作业等造成严重的影响，甚至对人类的财产和生命安全造成不可估量的损失。因此，冰的生消现象与人类息息相关。

冰层厚度及其变化过程是研究冰层生消、开河冰塞、凌汛发生的基础性因素之一。在高纬度地区冬、春季节，河冰造成桥梁和水工建筑破坏的事例时有发生，因此水库冰冻对于大坝和取水口工程的安全管理至关重要。在渤海、波罗的海等亚极区海域，每年冬季都有不同程度的海冰生成，海冰对航运和油气生产具有重要影响。极区海冰在全球气候系统扮演着重要角色，也是全球气候变化的指示剂，海冰层厚度是描述海冰状态最基本、最重要的参数，海冰层厚度变化原型数据的获得有利于提高我们对气—冰—海相互作用机理的认识。冰层厚度是计算海冰、河冰和水库冰对海工或水工建筑物作用力的关键指标之一。

然而一直以来，冰层厚度都被认为是海冰或淡水冰最难监测的物理指标之一，钻孔直接测量是测量冰层厚度最可靠的监测手段，但其低效性难以满足冰科学和冰工程研究的需要。目前国际上已发展了多种自动化冰层厚度观测技术，如卫星遥感，雷达探测、电磁感应技术与激光测距技术的组合，舰载或系泊声呐等。其中卫星遥感、舰载或机载的雷达探测、电磁感应及激光测距、舰载声呐等设备，实现了中、大尺度的海冰层厚度探测，这些探测设备的广泛应用，为掌握大范围海冰层厚度分布状况及其年际变化特征提供了可能。系泊仰视声呐的应用实现了定点冰层厚度变化过程的自动化监测，然而其观测精度易受观测环境和冰自身物理性质的影响，难以满足冰科学和冰工程研究的需要。因此，发展有效的定点冰层厚度观测新技术十分必要。

作者从 2002 年开始研究冰层厚度的自动化检测技术与仪器研究开发工作，对

淡水冰的电学性质进行了初步研究,在此基础上研制成功了电阻率冰层厚度传感器及其系统、电容感应式冰层厚度传感器及其系统,并参与研究了磁致伸缩冰层厚度测量装置、浮子式冰层厚度测量装置等检测仪器。作者还携带研制的检测仪器两次赴中国南极中山站进行了现场实验应用,多次在黄河内蒙古段进行检测试验,取得了一些现场经验,现将有关研究成果和现场应用经验收集整理成此书,供同行们进行经验交流。

本书在第1章介绍了冰层厚度检测的研究意义、冰层厚度检测技术的发展过程和现状。第2章介绍了作者对淡水冰的直流弱导电性研究过程及冰的介电性初步研究实验,为后续研究利用冰的电学性质进行冰层厚度检测的方法提供初步的理论基础。第3章介绍了作者研制电阻率冰层厚度传感器及其系统,并对该系统的试验情况及优缺点进行了分析。第4章对作者近年研究的电容感应式冰层厚度检测系统进行了详细叙述,包括研究思路、方法、设计等。第5章介绍作者曾参与研究或现场试验应用过的几种冰层厚度测量装置或方法,这些装置或方法还处于研究更新阶段,目前还无法进行推广应用。第6章介绍了作者利用 GSM、GPRS、Iridium SBD9602 等模块开发的数据远程无线通信方法,实现了野外自动化监测。第7章介绍了电阻率冰层厚度检测系统和电容感应式冰层厚度监测系统在黄河内蒙古段、南极中山站对河冰、海冰进行自动化监测的现场应用试验情况,并对实验数据进行了分析。同时也介绍了利用电容感应技术监测高压输电线路覆冰层厚度的检测装置及方法。

在本书介绍的内容中,太原理工大学的秦建敏教授及部分研究生参加了电阻率冰层厚度传感器及其系统的研制与现场工作。大连理工大学的李志军教授等参加了浮子式冰层厚度测量装置、磁致伸缩式冰层厚度测量装置的研究与现场研究工作,在此,一并感谢!

本书的研究成果可以应用于长距离输水工程明渠输水渠道、河道、水库、湖泊的冰生消过程,极地海冰、冰川表层、冻土层、北方地区近海海岸冰层等变化的定点连续自动监测,为北方地区冬季水文自动预报、河流冰凌灾害预报、水电设施安全运行、地质环境监测、冬季道路、航空、海港安全运行、冬季水库水量检测、极地科考等提供一种新的检测理论与技术实现手段,对水文预报、防灾减灾、冬季海航、极地科考等领域具有一定的理论研究和工程实用价值。

著 者

# CONTENTS

# 目录

|                                         |      |
|-----------------------------------------|------|
| <b>第1章 绪论</b>                           | (1)  |
| 1.1 冰层厚度测量的意义                           | (1)  |
| 1.2 冰层厚度测量技术的发展及研究现状                    | (4)  |
| 1.2.1 冰层厚度测量的发展过程                       | (4)  |
| 1.2.2 冰层厚度监测方法的现状                       | (6)  |
| 参考文献                                    | (10) |
| <b>第2章 冰的电学性质初探</b>                     | (14) |
| 2.1 自然冰的弱导电性概念                          | (14) |
| 2.1.1 自然淡水冰的结构                          | (14) |
| 2.1.2 淡水冰的直流弱导电性实验与分析                   | (15) |
| 2.1.3 影响冰的直流导电性因素分析                     | (24) |
| 2.2 冰的介电性理论基础                           | (25) |
| 2.2.1 冰的介电理论的概念                         | (25) |
| 2.2.2 淡水冰的介电性能测试实验                      | (31) |
| 参考文献                                    | (34) |
| <b>第3章 电阻率冰层厚度检测传感器及其系统</b>             | (36) |
| 3.1 空气、冰、水的三层导电率区域划分方法                  | (36) |
| 3.1.1 利用空气、冰、水的导电特性确定冰层下界面的冰层厚度<br>检测方法 | (37) |
| 3.1.2 冰层厚度检测中需要解决的几个理论及技术难题             | (38) |
| 3.2 电阻率冰层厚度传感器的结构及其工作原理                 | (39) |

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 3.2.1 电阻率冰层厚度传感器结构及其系统组成 ..... | (39) |
| 3.2.2 电阻率冰层厚度传感器的设计制作 .....    | (41) |
| 参考文献 .....                     | (45) |

## 第4章 电容感应式冰层厚度检测传感器及其系统 .....

|                                              |       |
|----------------------------------------------|-------|
| 4.1 电容感应技术概述 .....                           | (46)  |
| 4.2 基于电容感应技术的冰层厚度测量方法的提出 .....               | (48)  |
| 4.3 基本单一平面电极电容感应技术的机理分析与仿真 .....             | (50)  |
| 4.3.1 基本单一平面电极电容器的电容与电场强度分析 .....            | (50)  |
| 4.3.2 冰、水介电质对单一平面电容传感器的静电场影响的<br>仿真 .....    | (52)  |
| 4.4 同面多电极电容感应技术的原理分析与仿真 .....                | (57)  |
| 4.4.1 同面多电极电容的电容感应技术的原理分析 .....              | (57)  |
| 4.4.2 同面多电极电容感应式冰层厚度检测传感器的电场仿真 .....         | (58)  |
| 4.5 基于电容感应技术的冰层厚度检测系统 .....                  | (67)  |
| 4.5.1 冰层厚度的分层检测思路 .....                      | (67)  |
| 4.5.2 电容感应式定点冰层厚度检测方法的可行性试验研究 .....          | (68)  |
| 4.5.3 基于电容感应技术进行冰层厚度测量的可行性试验研究 .....         | (73)  |
| 4.6 电容感应式冰层厚度检测传感器的结构设计 .....                | (77)  |
| 4.6.1 新型电容感应式冰层厚度检测传感器的整体结构设计 .....          | (78)  |
| 4.6.2 新型电容感应式冰层厚度检测传感器的结构设计中需注意<br>的问题 ..... | (84)  |
| 4.7 表面吸附“水膜”对传感器测量精度影响的分析 .....              | (86)  |
| 4.8 电容感应式冰层厚度检测系统的硬件电路选型与设计 .....            | (89)  |
| 4.8.1 电容感应式冰层厚度检测系统构成 .....                  | (89)  |
| 4.8.2 正弦波发生电路设计 .....                        | (90)  |
| 4.8.3 有源滤波电路设计 .....                         | (94)  |
| 4.8.4 多路模拟开关与控制部分电路设计 .....                  | (98)  |
| 4.8.5 单片机数据采集电路的设计 .....                     | (99)  |
| 4.9 电容感应式冰层厚度检测系统的软件设计 .....                 | (106) |
| 4.10 电容感应式定点冰层厚度检测传感器的静态特性分析 .....           | (108) |

|                                                   |       |
|---------------------------------------------------|-------|
| 4.11 电容感应式冰层厚度检测系统的温度特性与补偿 .....                  | (112) |
| 4.12 电容感应式冰层厚度检测系统的冰层厚度判断算法及 MATLAB<br>编程实现 ..... | (116) |
| 参考文献 .....                                        | (123) |

## 第5章 其他几种冰层厚度自动化检测方法 .....

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| 5.1 底面浮筒接触式冰层厚度检测方法 .....              | (128) |
| 5.1.1 检测装置系统的机械结构分析 .....              | (128) |
| 5.1.2 工作原理 .....                       | (128) |
| 5.1.3 冰层厚度测控仪 .....                    | (130) |
| 5.1.4 测控仪硬件电路设计 .....                  | (131) |
| 5.1.5 测控仪软件设计 .....                    | (144) |
| 5.2 磁致伸缩式冰层厚度自动检测系统 .....              | (144) |
| 5.2.1 仪器测量原理 .....                     | (144) |
| 5.2.2 仪器的现场应用实例 .....                  | (145) |
| 5.3 编、译码数字式冰层厚度传感器 .....               | (148) |
| 5.3.1 编、译码数字式冰层厚度传感器结构及其工作原理 .....     | (148) |
| 5.3.2 集成数字编译码电路 MC145026/28 特性简介 ..... | (149) |
| 5.3.3 编、译码数字冰层厚度传感器的制作与实验 .....        | (151) |
| 参考文献 .....                             | (154) |

## 第6章 冰层厚度检测系统中的数据无线远程传输技术 .....

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 6.1 基于 GSM 短消息的无线数据传输方式 .....       | (155) |
| 6.1.1 GSM 无线数据传输原理介绍 .....          | (155) |
| 6.1.2 GSM 河道流域冰层厚度监测系统管理软件的研制 ..... | (158) |
| 6.2 GPRS 无线数据采集方式 .....             | (163) |
| 6.3 铱星卫星数据传输方式 .....                | (167) |

## 第7章 冰层厚度检测技术的现场应用 .....

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 7.1 电阻率应用实验 .....     | (172) |
| 7.1.1 低温实验室实验应用 ..... | (172) |
| 7.1.2 南极实验应用 .....    | (174) |

|       |                                        |       |
|-------|----------------------------------------|-------|
| 7.2   | 电容感应式冰层厚度检测系统现场实验应用 .....              | (176) |
| 7.2.1 | 黄河应用案例 1 .....                         | (176) |
| 7.2.2 | 黄河应用案例 2 .....                         | (182) |
| 7.3   | 电容感应式冰层厚度传感器及其系统在南极海冰监测中的应用 .....      | (185) |
| 7.4   | 利用电容感应式冰层厚度传感器设计的冰裂缝宽度自动检测装置及其应用 ..... | (190) |
| 7.4.1 | 概述 .....                               | (190) |
| 7.4.2 | 极地海冰冰裂缝宽度测量方法 .....                    | (193) |
| 7.4.3 | 应用试验过程 .....                           | (194) |
| 7.4.4 | 问题与结论 .....                            | (196) |
| 7.5   | 基于电容感应技术的输电线路覆冰层厚度检测实验应用 .....         | (197) |
| 7.5.1 | 概述 .....                               | (197) |
| 7.5.2 | 电容感应式输电线路覆冰层厚度模拟检测的原理 .....            | (198) |
| 7.5.3 | 电容感应式输电线路覆冰层厚度检测系统的电容测量电路分析 .....      | (199) |
| 7.5.4 | 仿真分析 .....                             | (201) |
| 7.5.5 | 实验与分析 .....                            | (203) |
|       | 参考文献 .....                             | (204) |

# 第1章

## 绪论

### 1.1 冰层厚度测量的意义

2009—2010年冬,渤海和黄海北部在冷空气持续不断的袭击下发生了最严重的冰情,此次严重冰情对我国环黄海和渤海沿岸省市经济造成了严重影响。据统计,冰情灾害所造成的经济损失近55亿元。汹涌澎湃的黄渤海沿岸顿时凝固,变成了“冰塑”的世界。2010年1月23日中国渤海海冰范围扩大至4.6万平方公里,过半渤海面积被海冰覆盖。根据国家海洋局卫星、雷达、航空遥感和海洋站现场观测资料分析,2010年1月12日,渤海海冰分布面积已达3万平方公里,占整个海区面积的近40%,辽东湾海冰外缘线离岸最大距离达71海里,黄海中部的青岛胶州湾也出现了罕见的结冰现象。其中,渤海海冰分布面积占渤海总面积的51%。这次海冰灾害持续时间长、范围广、冰层厚,给渔业生产造成严重影响。据报道,截至2010年1月21日,山东省渔业受灾人口达9.5万人,山东渔业直接损失超过10亿元<sup>[1]</sup>。而造成这些损失的罪魁祸首是冰,所以对冰情实时监测引起了人们的高度重视。

近年来,随着各个国家都大力发展本国经济,工业排放的二氧化碳激增,温室效应愈发明显,从而引起的南北极冰川大量消融,海平面上升。据统计,在过去的30多年内,南北极冰川的消融量超过了过去的150多年消融量的总和。极地冰川主要包括北极海冰、格陵兰岛上的冰盖、南极海冰和南极冰盖。就以格陵兰岛来说,过去格陵兰岛东部在夏季最多也不会消融覆盖率的50%。而在2012年,水星卫星拍摄到的照片显示,格陵兰岛东部冰川严重消融,在拍摄短短的几天内,冰盖消融率就从40%激增到97%。据测算,格陵兰岛冰盖融化的水占南北极全部

冰川中融化量的 17%。如果照这样下去，在不久的将来格陵兰岛的冰盖可能会全部融化，全球海平面将会上升 7m，那也就意味着神秘的蓝钻“海洋之星”将会消失，大多数沿海地区和城市将会被淹没，马尔代夫将不复存在，存活了将近有 14 万年的病毒毒株，有可能会在冰川中蛰伏，传播给人类等<sup>[2~4]</sup>，严重威胁着人类的生存和发展。

在我国内陆，每年冬季北方的河流都会结冰，河冰是在特定的气象条件、地形河势和水力作用下产生的自然现象。研究河冰生消演变及其运动规律，从而根据气象、水文、冰情历史资料、实时信息和河道特征，应用热力学和水力学原理，对各种冰情要素进行预报，防治冰凌危害，是寒冷地区国家发展中必须考虑的一个重要问题<sup>[5]</sup>。开河后经常会发生冰凌现象，产生自然灾害，河流冰凌灾害有以下几种主要形式。

(1) 冰坝洪水。冰坝洪水是天然河流中最严重的冰凌灾害。冰坝是由大量的冰块在河道中堆积而成的。冰坝形成以后，堵塞河道，大大减少过水断面面积、增加水流阻力。流冰开始堆积的原因是由于河道障碍物、弯道、卡口、河道束窄、断面变化等。冰坝使水位上涨，在某些河段流水漫堤，造成凌洪灾害。

(2) 冰花堵塞<sup>[6]</sup>。悬浮的冰花遇到过冷的固体时则贴附在其外表，层层冻结，逐渐加厚，减少甚至完全堵塞过水断面，如电站进水口拦污栅等，使电站不能正常运行，同时电站上游会因水位壅高漫出河堤形成凌洪灾害。

(3) 影响航运和建筑物安全。流动的冰块会产生很大的动冰压力和撞击力，碰撞船舶和其他建筑物，使河流冬季无法通航，水工建筑物也会遭到破坏。

(4) 损坏岸坡和水工建筑物 在温度升高时，冰盖膨胀产生巨大的静冰压力使河岸护坡和水工建筑物（如进水塔、桥墩和胸墙等）遭到破坏。

在内陆的河道中，黄河是我国北方最大的河流，每年春季最容易发生冰凌灾害。它全长 4900 多公里，流域面积达 75 万平方公里。由于黄河中上游所处纬度较高，每年冬季河水结冰，翌年春季解冻融化。黄河河道在宁夏和内蒙古、山东段流向是自南向北，由于南北气温的差异，封冻是溯源而上的，解冻是由上而下的，这就很容易产生冰塞，堵塞河道，引起河水上涨，形成明显的冰凌洪水<sup>[7]</sup>。因此，黄河几乎每年都发生的凌汛，成为威胁黄河流域数千公里封冻河道沿岸人民生命的自然灾害隐患之一。2009 年 1 月 18 日凌晨 2 时，山西省临汾市吉县壶口瀑布景区一带出现了百年不遇的大凌汛。短短的一个小时内河床提高了 4 米，跨度达到 800 余米，景区内堆满冰凌，造成景区旅游公路、公用设施、数十间房

屋被淹没, 周边居民住宅也有不同程度的受损, 预计灾害损失在 1000 万元以上。

除了河道结冰发生冰凌灾害之外, 冬季结冰也会影响一些大型工程, 如我国正在实施的南水北调工程<sup>[8]</sup>。南水北调中线工程总干渠自陶岔渠首至北京玉渊潭全长 1240 公里, 总水头仅 98 米, 全线基本自流。与我国黄河凌汛成因相似, 南水北调在冬季输水过程中, 当气候转冷, 北方渠段发生冰情时, 水流中含冰量将逐渐增多、积聚。由于沿线交叉建筑物很多, 渠道不可避免转弯或过水断面发生变化。由此可见, 南水北调在冬季完全有可能发生冰凌, 对输水能力和建筑物冬季安全运行造成严重影响, 如何对冬季明渠段河冰生消过程进行自动监测以保证其安全运行是一项尚未解决的重大工程难题<sup>[9]</sup>。

总之, 冰凌灾害给河道治理、凌汛期防汛、交通运输带来很大困难。河冰的形成还影响着水利工程设施的设计、运行和维护, 成为水资源开发利用时的一个需重点考虑的因素<sup>[10]</sup>。所以, 在我国北方地区如何预防河流冰凌灾害已经成为一个亟待解决的问题。做好预防工作的前提是对河道冰情进行实时监测, 通过不断得到的数据进行分析、判断, 并做出及时准确的预报, 才能避免灾害的发生<sup>[11]</sup>。

冰层厚度及其变化过程是研究冰层生消、开河冰塞、凌汛发生的基础性指标之一; 海冰层厚度是描述海冰状态最基本、最重要的参数<sup>[12]</sup>, 也是研究南北极海冰变化及冰川物质平衡的基础<sup>[13]</sup>; 在南北极, 海冰多年的冰层厚度的变化是世界气候变化的“窗口”, 是全球气候变化的指示灯<sup>[14]</sup>。检测南北极海冰及南极冰盖厚度的变化, 并利用高精度的实时检测数据进行海冰及冰盖生长变化的计算机模拟, 有利于提高我们对气—冰—海相互作用机理的认识, 对世界气候的研究有重要的意义<sup>[15]</sup>。在我国内陆, 对黄河及其他河道冬季冰层厚度的自动化连续检测也有重要的现实意义, 只有及时掌握河道内冰层厚度的生消变化及冰下水位及流量, 才能预测开河后哪些河段可能发生冰凌灾害, 为防凌预报, 减少沿岸人民的生命财产损失提供可靠的数据<sup>[16~17]</sup>。由于检测环境大多处于气温寒冷、风雪交加的野外恶劣环境, 使得对冰层厚度与冰冻条件下水位等冰情参数的检测要比一般水情参数(如水位、雨量等)的检测困难得多。据了解, 由于没有可供实际使用的冰生消过程自动检测设备, 目前我国北方冰冻地区冬季对冰层厚度、冰下水位的常规水文检测完全采用人工凿洞或钻冰进行, 数据的传输大多数仍采用传统的数据记录报送方式, 不仅准确率低、效率差、数据传输不及时, 而且工作环境相当恶劣, 工作具有一定的危险性<sup>[18]</sup>。这种状况与我国当前水利工作信息化的要求也是不符的。因此, 采用高精度、高可靠性的自动化的冰情测报系统是流域冰情检测

技术发展的必然趋势。对冰层厚度的研究是今后水利量测发展的一个重点, 研究冰层厚度自动化检测方法也是非常重要的课题。

## 1.2 冰层厚度测量技术的发展及研究现状

### 1.2.1 冰层厚度测量的发展过程

随着人类社会生产力的发展和进步, 海冰检测的方法、仪器和途径也在不断发展和扩大。19 世纪 40 年代, 北欧一些国家开始利用沿岸附近的灯塔或附近的高地上进行测量, 主要方法是目测。19 世纪 70 年代开始, 西方国家开始使用船舶检测海冰层厚度, 采用目测和绳索测量的办法。20 世纪 20 年代特别是 60 年代以来, 冰的检测被世界所重视, 开始使用飞机和卫星进行冰情检测<sup>[19]</sup>。

我国对冰的测量记载主要是一些海冰资料, 最早可以追溯到唐代, 但只是海冰状况的简单记录, 并没有厚度的实际测量数据的记录。我国最早的正规的海冰检测记录始于清代的光绪年间, 甲午战争后, 特别是伪满洲国时期, 日本帝国主义用船舰、飞机监测黄海、渤海的冰情。1959 年, 我国制定了第一部《海滨冰情观测规范》, 开始全面展开海冰常规监测工作。20 世纪 70 年代初开始开展了地面雷达监测海冰工作和接收极轨气象卫星海冰图像。1986 年开始, 开始用航空遥感监测海冰, 1989 年用机载合成孔径雷达 (SAR) 监测海冰。

我国对河冰的监测开始于 20 世纪 60 年代<sup>[20]</sup>, 1986 年原水利水电部制定了首部《河流冰情观测规范》, 1993 年进行了修订<sup>[21]</sup>。从监测河道冰情至今, 大多数监测站仍采用较为原始的人工监测的方法测量冰层厚度。

1993 年美国科罗拉多州林姆技术有限公司的 G.L.斯托拉齐克 (申请专利号: 93120674) 发明了一种用于固体表面冰层厚度检测的测量系统专利技术, 其系统构成及原理为: 一个天线, 用于放在受到冰或水层积累的表面位置, 并具有一个谐振频率和含有实数项的输入导纳; 与该天线耦合的麦克斯韦电桥装置, 用于检测所述谐振频率、所述输入导纳和所述实数项; 以及频率扫描装置, 用于在接近与所述谐振频的多个频率上驱动天线, 其中所述谐振频率、所述输入导纳和所述实数项可以被确定<sup>[22]</sup>。

进入 21 世纪以来, 现代高科技自动化冰层厚度监测手段相继出现, 利用卫星、

雷达等现代设备对大面积冰情变化进行观测已在国内、国外普遍采用<sup>[23, 24]</sup>。2002年12月7日欧洲的两个航天机构——欧空局(ESA)和欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)签订了一份价值7.91亿欧元的合同,建造3颗气象卫星,以提高风暴预报和监测地球极地冰层覆盖的能力。它们于2003年发射至地球上空840公里的轨道,绕地球南北极运行,卫星将携带十几种仪器,用于监测风、湿度和臭氧层并拍摄图像,帮助检测地球极地冰层覆盖情况。这种新的卫星还将为与欧美联合进行的极地观测任务提供数据<sup>[25]</sup>。2003年,欧洲科学家发明了一种新型冰层厚度传感器,它可以鉴别出飞机等机械表面凝结的厚度在0.1mm以上的冰层,有可能从2004年开始在普通商业客机以及直升机上装配这种新型传感器<sup>[26]</sup>,这一由欧盟资助的科研项目由欧洲多国科学家参加。这种主要由钢材料制成的新型传感器内部有一套复杂的光学系统,以及两个或多个半导体薄片。在外部气候条件发生改变的情况下,半导体薄层内的电子移动会随之发生改变。经过与之相配的光学镜像系统进行处理后,这套系统最终能够释放出激光束。通过对激光束的特性进行测量,控制人员就可以精确获知感应器探头上形成的冰层的厚度。

我国于20世纪90年代初开始使用气象卫星对渤海海冰进行监测,并通过中央电视台实现了海冰预报。在国家南、北极科学考察过程中,我国科学工作者也利用船载雷达、摄像机与GPS卫星定位仪对南、北极海洋冰面及冰山情况进行观测与研究,取得丰富的第一手极地海冰资料。

在冰的学术研究方面,从文献资料<sup>[27]</sup>可知,国际上对冰的学术研究组织是“国际水利与环境工程学会(International Association for Hydro-Environment Engineering and Research)”,它是国际水利工程与研究协会(IAHR)地球物理分部下属的第四个专业委员会,成立于1973年。我国于1988年加入该组织,并多次派人参加了该组织举办的国际冰工程学术讨论会。在1996年第13届国际冰工程学术会上,我国学者孙肇初、李桂芬、吴辉碇先后被选为执委会委员。对冰的科学研究比较活跃的国家主要是地处寒冷地区的国家,如芬兰、挪威、瑞典、新西兰、日本、美国、俄罗斯等国家。美国陆军寒压研究和工程实验室、芬兰赫尔辛基大学地球物理系、芬兰海洋研究所、芬兰和瑞典冰服务中心等都是国际著名的冰研究机构。

随着综合国力的不断增强,我国在海冰研究领域科研队伍在不断壮大,中国水利水电科学研究院、兰州冰川冻土研究所、大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室、国家海洋技术中心、中国极地研究中心、太原理工大学测控技术研

究所等一批研究机构围绕我国北方冰川冻土、渤海近海冬季冰情及南、北极海冰与冰川变化进行科学试验研究。中国从 1984 年开始,连续 30 次派遣南极科学考察队、5 次派遣北极科学考察队深入极地进行海冰观测及冰芯取样检测,取得了丰富的资料;今年中国将进行第 6 次北极科学考察和第 31 次南极考察,纵观各次南北极考察,海冰的检测都是科学考察的重点内容;中国已在过去的五年内投入了大量的资金,实施了极地科考的三大硬件改造项目。目前中国南极中山站已经改造完成,建立了第一个南极内陆科考站——昆仑站,为今后内陆冰层厚度的观测打下了坚实的基础,使我国在冰研究领域跻身于国际先进国家行列<sup>[28]</sup>。

## 1.2.2 冰层厚度监测方法的现状

随着计算机、数据通信、新型传感器、电子检测等信息处理技术的飞速发展,具有预报直观、准确的冰情现场物理检测方法已成为实际工程应用中冰情检测与预报的主要技术手段。近年来,国内外学者在冰层厚度测量和计算方面进行了大量研究工作。目前,国内外对冰生消过程的测量可以采用冰模型仿真预测和现场物理检测两种不同的途径加以实现。水利学中,利用冰模型进行冰层厚度预测常用的方法包括有数理统计预测、灰色预测、数值计算预测等。其中,数理统计、灰色预测方法适合中长期或超长期冰情预报<sup>[29]</sup>。

冰模型仿真预测利用冰生长、消融的物理过程建立动力和热力学模式,通过对模式方程的数值计算,可以对冰场分布、冰层厚度变化、流凌速度等进行中短期预测,并取得很多成功的冰情预报案例<sup>[30]</sup>。但是,利用冰模型仿真预测方法建立冰的动力和热力学模式数学方程进行冰情数值预测的前提是需要依赖于历史的或实时的高精度冰情数据,还需要结合水文、气象、地质等现场物理实测数据作为方程的边界条件才能进行,其测估结果的准确性与已掌握的实测数据的数量、精度有很大的相关性,预测的正确性往往要在事后才能得到证实。因此,在冰情实时监测与预报系统中,冰模型仿真预测往往是作为辅助的监测手段用于数据后期处理方法或中、远期冰层厚度与冰情预报<sup>[31]</sup>。

目前,实际应用于工程冰层厚度检测的现场物理检测方法又可以依据检测方式的不同进一步划分为接触与非接触两种不同的检测类型<sup>[32]</sup>。接触型现场物理检测方法在进行冰情检测过程中,冰情传感器需要与被测冰体直接发生接触,而非接触型检测方法则不与冰体发生直接接触。

常见的非接触型冰情现场物理检测方法有两种。

(1) 通过卫星、机载雷达或空中拍摄进行大范围区域内的冰情遥感遥测方法<sup>[33~35]</sup>。我国和欧美等许多国家通过发射专用气象卫星、机载雷达或舰载摄像对南北极、喜马拉雅山脉、渤海等地区的海冰、冰川的监测预报，是这类方法的典型应用<sup>[36~37]</sup>。该方法的优点是适宜对大面积冰盖、冰凌的分布与表面形态变化的监测；缺点是造价高，无法掌握局部小范围冰层结构内部的生消连续变化过程，难以应用到许多河流渠道和水利设施的冰情连续检测与测报领域。雷达测量冰层厚度示意图如图 1-1 所示。

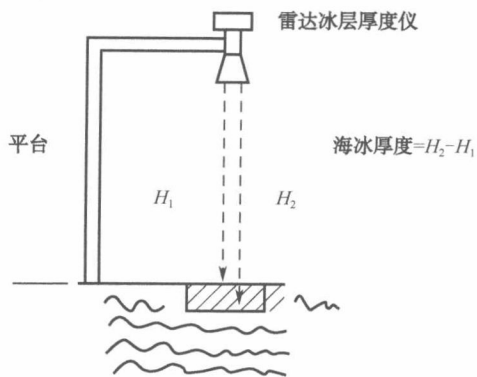


图 1-1 雷达测量冰层厚度示意图

通过物理电磁学探测方法进行小范围固定区域的冰层厚度无接触检测方法，如声学探测法、光学探测法、时空干涉探测法等<sup>[38, 39]</sup>。其中，一些方法可以达到很高的测量精度。例如，欧洲科学家发明了一种用于检测机翼结冰程度的激光冰层厚度传感器，它可以鉴别出飞机等机械表面凝结厚度在 0.1mm 以上的冰层。我国在近几年组织的对南北极科学考察中，都借助 GPS 卫星定位技术、舰载摄像、水下机器人和海底声呐装置，对南北极地区的冰层厚度变化进行了实际测量。该类方法虽然具有操作简单、迅速，检测结果便于计算机处理等优点，但大多数存在着造价高、测量误差大的问题。其误差主要来自冰的性质，以及冰的温度变化对电磁波或声波产生的影响。

加拿大 Geonics 公司生产的 EM31 型电磁感应海冰层厚度探测仪也属于一种电磁物理探测方法<sup>[40]</sup>。已经多次在南极海冰的调查中得到应用，其精度也能达到厘米级，每次测量时需根据被测冰水的环境输入水的电导率等参数，且需船载或人工扛的方法进行，不能实时监测。图 1-2 是机载电磁感应探测传感器 EM31。



图 1-2 机载电磁感应测冰传感器 EM31

中国自行研制的 ROV 水下机器人是一种专门用于水下作业的高科技产品<sup>[41]</sup>, 可利用仰视声呐系统观测海冰的厚度, 为仰视测量, 分界面是冰和空气, 其重达 550kg, 且价格昂贵。该技术多次在中国的南北极考察中投入使用<sup>[42]</sup>, 但只能随船进行断续测量, 未能实现长期的连续监测。

(2) 探地雷达扫描法。探地雷达简称 GPR, 也称地质雷达, 用于冰层厚度探测的雷达也称为冰雷达。它是一种对地下的或物体内部不可见的目标或界面进行定位的电磁技术。其工作原理为, 高频电磁波以宽频带脉冲形式, 通过发射天线被定向送入地下, 经存在电性差异的地下地层或目标体反射后返回地面。由接收天线接收。电磁波在介质中传播时, 其路径、电磁场强度与波形将随所通过介质的电磁特性和几何形态而变化, 所以对接收信号进行分析处理, 可判断地下的结构或埋藏物等。当采用探地雷达扫描法对某一区域 (如河道断面或水库冰面) 冰层进行扫描检测时, 可以采用机载、车载或人工拖拽方法加以实现, 国内外都有科学工作者采用车载雷达对道路结冰状态进行自动监测和采用雷达扫描获取冰层断面状态的应用报道, 例如, 我国科学家在南极科学考察中用探地雷达获取了南极 Amery 冰架的内部结构; 水利科学工作者用探地雷达获取了大庆市红旗泡水库湖面冰层厚度<sup>[43]</sup>。

接触型冰层厚度现场物理检测方法适应于对定点冰层厚度的检测。常见的方法<sup>[44]</sup>有以下两种。

(1) 钻孔测量的方法。这种方法的准确度高, 是最可靠的测量手段, 至今仍然被广泛采用, 但这种方法很难实现定点实时观测, 并且因为劳动强度大、工作效率低下, 只能用做关键点的测量, 在结冰期和融冰期, 出于安全考虑而难以实