

美国国家研究理事会

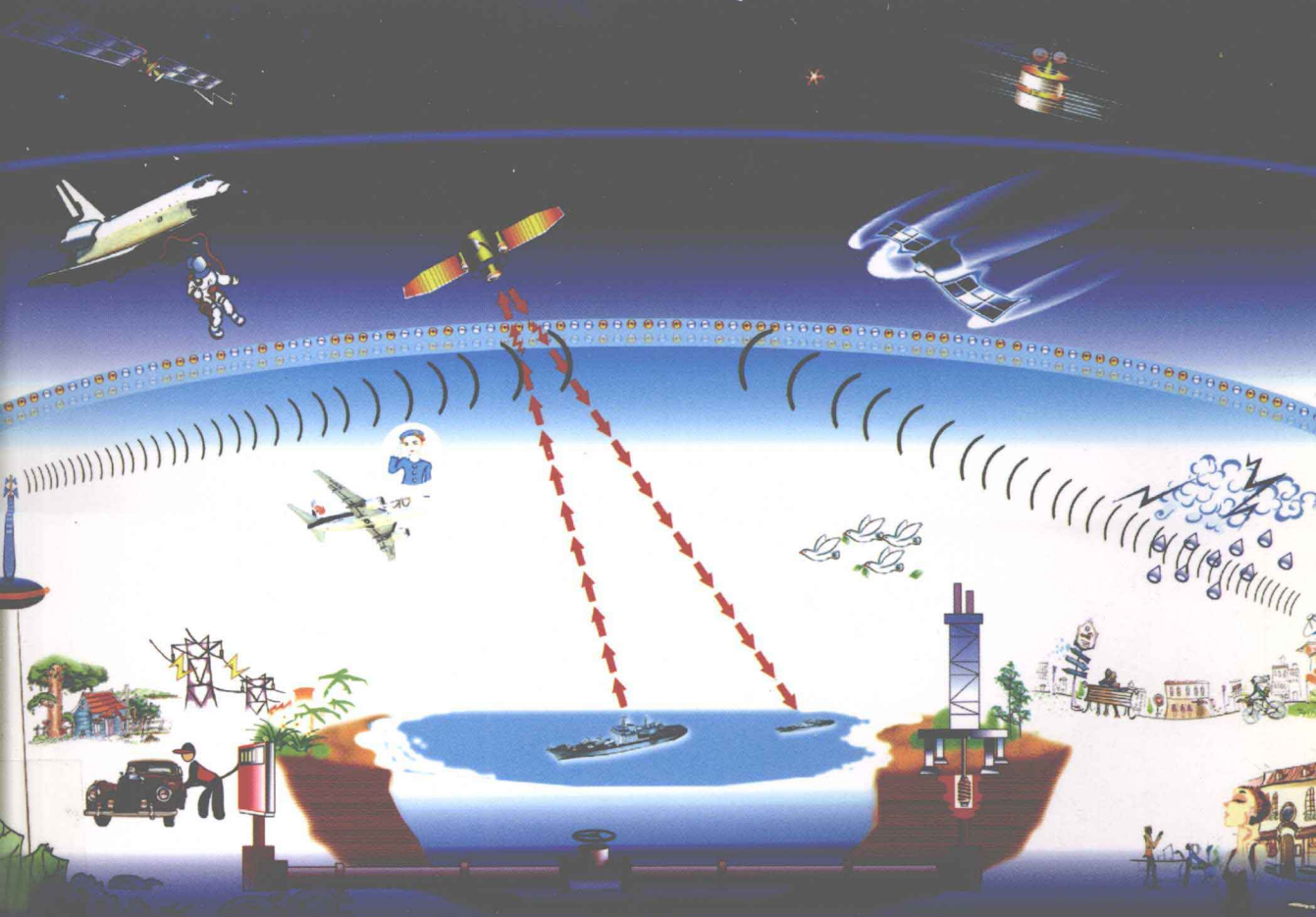
恶劣空间天气事件对社会和经济影响委员会（工作组）

编著

王劲松 张效信 等 译

恶劣空间天气事件

——解读其对社会与经济的影响



气象出版社

China Meteorological Press

· 中文版 ·

恶劣空间天气事件

——解读其对社会与经济的影响

SEVERE SPACE WEATHER EVENTS Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report

美国国家研究理事会

恶劣空间天气事件对社会和经济影响委员会(工作组) 编著

王劲松 张效信 等 译

 气象出版社
China Meteorological Press

图字:01-2010-1935 号

This is a translation of **SEVERE SPACE WEATHER EVENTS: Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report**, Committee on the Societal and Economic Impacts of Severe Space Weather Events: A Workshop, National Research Council © 2008 National Academy of Sciences. First published in English by the National Academies Press. All rights reserved.

ISBN-10: 0-309-12769-6

ISBN-13: 978-0-309-12769-1

图书在版编目(CIP)数据

恶劣空间天气事件:解读其对社会与经济的影响/

王劲松等译. —北京:气象出版社,2011.7

ISBN 978-7-5029-5259-4

I. ①恶… II. ①王… III. ①空间科学:天气学—研究②灾害性天气—影响—社会—研究③灾害性天气—影响—经济—研究 IV. ①P44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 144523 号

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码:100081

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

电 话:总编室:010-68407112,发行部:010-68409198

责任编辑:王桂梅 申乐琳

终 审:章澄昌

封面设计:博雅思企划

责任技编:吴庭芳

责任校对:永 通

印 刷 者:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:9.25

字 数:237 千字

版 次:2011 年 7 月第 1 版

印 次:2011 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1—3000

定 价:48.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

前 言

太阳活动等自然现象导致日地空间状态发生的变化被称为“空间天气”。剧烈的空间天气变化可能造成所谓的空间天气灾害,使得在太空中或地面上的技术系统功能下降,甚至报废,宇航员等人员的健康受到损害,从而导致国民经济蒙受损失、国家安全受到威胁。例如,1989年3月,一次空间天气灾害致使加拿大魁北克省停电9 h,所导致的直接经济损失达上亿美元。越来越多的事实表明,一次空间天气灾害能在通信、导航、航空、航天、勘探及能源等各种技术层面同时产生系统的冲击,导致巨大的经济损失。

新的太阳活动周,即第24太阳活动周已经开始,在未来几年内,太阳活动水平将日渐活跃,并在2013—2014年左右到达新的最强期。为应对日益频繁的空间天气事件,2008年5月22—23日,美国国家研究理事会召集工业界、联邦政府以及社会科学团体的代表们召开了空间天气与社会经济研讨会,探讨如何应对即将到来的太阳活动峰年期间频发的空间天气灾害。2009年1月,该会议的综合报告出版,旋即引起了全球学术界的高度重视,同时也引起了媒体和公众的浓厚兴趣。

鉴于社会各界对该报告的极大关注,同时考虑到该报告对我国研究应对空间天气灾害具有极高的参考价值,中国气象局国家空间天气监测预警中心(国家卫星气象中心)的同志们将该报告译为中文。经与原出版商进行版权协商后,现正式予以出版。王劲松、张效信负责了全书翻译的组织和协调工作。概述的译者为唐云秋,第1章的译者为余涛和敦金平,第2章的译者为毛田、王云冈和赵明现,第3章的译者为陈博,第4章的译者为薛炳森、郭建广和闫小娟,第5章的译者为宗位国、杨光林、牡丹和唐伟,第6章的译者为李嘉巍和陈安芹,第7章的译者为黄聪、刘丹丹和乐贵明,第8章的译者为赵海娟。吕建永负责概述至第3章的统稿工作,张效信负责第4章至第6章的统稿工作,王劲松负责第7章和第8章的统稿工作,王劲松和张效信对全书进行了多次统稿。原版附录部分主要介绍了此次空间天气与社会经济研讨会的

主题、会议日程、部分会议报告的摘要,以及研讨会特别委员会一些成员的简介等内容。考虑到其主要内容均已在正文中体现,本书未将附录翻译为中文,而只给出原文,有兴趣的读者可参阅英文附录。

本书的主要校对者:王劲松、张效信、吕建永、郭建广、牡丹、李嘉巍、陈安芹等。郭建广为本书做了大量细致和烦琐的整理、修改及其他辅助工作。

本书的翻译得到了魏奉思院士、涂传诒院士、肖佐教授、杨军研究员等专家和领导的指导及关心,在此一并致以诚挚的谢意。

由于译者水平有限,书中错漏之处在所难免,敬请读者予以批评指正。

译者

2011年6月

原版前言

2003年10月30日白宫科学委员会的环境、科技和标准分会举办了一次听证会,讨论与空间天气有关的组织机构,以及在空间天气数据收集、分发和使用等各个环节涉及的相关单位的职责和义务。来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)、美国国家航空航天局(NASA)、美国空军(USAF)及不同工业部门的一些代表出席了听证会。听证会主要针对的问题包括,应该对从事空间环境预报的机构给予多大力度的资金支持?空间环境预报对工商业究竟有多重要?

在听证会召开的同一时间,太阳发生了几乎是近30年来最强烈的爆发活动,从2003年10月底到11月初这段时间内,太阳释放出了巨大的能量,产生了超强的太阳粒子事件,引起了剧烈的地磁暴,而其带来的影响范围则非常广泛:瑞典的Sydkraft公用事业集团报告称,强大的地磁感应电流导致欧洲北部区域的变压器出现问题,引起系统故障和停电事故;由于空间辐射的水平很高,NASA的官员不得不发出飞行指令要求国际空间站的宇航员躲进屏蔽舱中;高纬度地区的航线要改变飞行线路,以避免辐射水平高的区域以及可能发生通信中断的区域,而每次飞行由于更改航线要多耗费1万~10万美元;许多深空探测项目和在轨卫星都出现了运行状态异常现象,戈达德航天飞行控制中心(GSFC)的空间科学项目运行组估计大约有59%的地球和空间科学项目受到影响;一颗价值约6.4亿美元的ADEOS-2卫星的丢失也被认为和这次太阳风暴有关,ADEOS-2卫星上搭载有NASA研发的价值约1.5亿美元的海风探测器;由于此次太阳爆发活动的强度大、范围广,很多对空间天气变化敏感的工商业的业务运行都不同程度地受到了影响^①。

这些事件的发生提醒着科学家以及政府决策部门,空间环境对人类社会以及所依赖的天基和地基技术有着非常显著的影响。受2003年10—11月份一系列事件(或称2003万圣节磁暴)推动,美国国家研究理事会(the National Research Council,NRC)太阳和空间物理委员会(the Committee on Solar and Space Physics,CSSP)开始考虑系统评估“空间天气”对经济和社会影响的需求。

国家对空间天气影响的脆弱性越来越受到关注^②。例如,横跨不同地理区域的长距离电力网络可能会受到磁暴引起的感生电流的影响。类似的,航天器使用小型化的电子元件也很容易受到空间天气扰动期间高能电子的损坏。美国也将持续不断地有宇航员在国际空间站工作,而总统和NASA也计划拓展美国作为航天大国的活动范围,在月球上建立永久居住点,并最终在火星上定居。尽管这些计划都容易受到空间天气的影响,相对详尽地研究恶劣空间天气事件对社会经济的影响却还没有展开。

① NOAA. Intense Space Weather Storms October 19-November 07, 2003, NOAA National Weather Service, Silver Spring, Md., April 2004.

② Office of the Federal Coordinator for Meteorology (OFCM), Report of the Assessment Committee for the National Space Weather Program,FCM-R24-2006, OFCM, Silver Spring, Md., 2006, p. 1, available at <http://www.ofcm.gov/r24/fcm-r24.htm>.

2007年美国科学院空间研究组(the Space Studies Board,SSB)资助成立了恶劣空间天气事件对社会和经济影响委员会,并发起研讨会,邀请各界专家评估美国目前和未来应对空间天气事件以及对社会和经济的影响的能力。虽然,对地球天气监测系统和减灾计划的风险收益评估分析有着相当长的历史,但是对空间天气类似的研究还很缺乏。研讨会的主题是回顾历史上曾发生的空间天气事件的影响,特别是2003年10—11月之间太阳爆发活动产生的各种影响记录,以推断出未来还有哪些可能的影响,历史事件的回顾对于把握空间天气影响的范围非常重要(不同事件的影响范围也不尽相同)。研讨会的另一个目标,就是讨论在非太阳爆发期间空间天气的影响。此外,会议还讨论了随着技术演化和新技术的出现,空间天气的影响方式可能发生的变化。

为了满足NRC的指导原则,委员会邀请了各界专家参加了于2008年5月23日在华盛顿召开的为期一天半的研讨会。与会专家涵盖了恶劣空间天气可能直接和间接影响的各个领域,包括空间天气服务的政府机构、工业企业和私人业主。这次研讨会搭建了初步的平台搜集空间天气影响的信息、空间天气预报的现有水平、以及未来需要应对的挑战。与会专家报告的网址为http://www7.nationalacademies.org/ssb/spaceweather08_presentations.html。

因为该研讨会的最初计划覆盖了多个部门,在计划的讨论主题中有这样的问题,地基(美国国家科学基金会支持)观测系统如何预报和减轻空间天气的影响。然而,随着计划的进行,需要做的工作也逐渐清楚起来,为了利用现有的资源,实现任务的主要目标——空间天气对社会经济的影响,工作的重点应该集中在空间天气对社会、军事和商业的影响,以及根据这些部门的运行能力而建立的减灾战略。研讨会也反映了这个趋势,它引出了一些有关航天器的讨论,例如,NASA的监测太阳风的ACE卫星。而研讨会则很少提到,甚至没有涉及类似分布式小型化仪器(DASI,Distributed Arrays of Small Instruments)、频率灵活的太阳射电望远镜(FASR,Frequency-Agile Solar Radiotelescope)和先进的模块化相干散射雷达(AMISR,Advanced Modular Incoherent Scatter Radar)等还分别处在概念设计、初步设计阶段以及建设阶段的仪器。在以往的国家研究理事会报告中,可以找到这些仪器的相关内容^{①~③},而它们在空间天气方面的使用仍是美国国家科学基金会有一个活跃的方向。

这次研讨会的报告由会议的组委会整理,内容概括介绍了研讨会的内容,但是没有给出任何建议和措施。实际上研讨会的主要宗旨是帮助收集信息,讨论和明确下一步的研究方向,以便为未来空间天气项目的发展和资源需求以及在受空间天气影响的领域内通过跨机构合作提高服务和科普水平等方面提供一些建议。

组委会对来自企业、政府和科学界的与会者的参与和努力表示非常感谢。组委会希望这份报告能够促进政府决策部门和公众更好地理解 and 认知空间天气对社会和经济的广泛影响,并为将来的影响分析和评估提供一些帮助。

① National Research Council, Distributed Arrays of Small Instruments for Solar—Terrestrial Research: A Workshop Report, The National Academies Press, Washington, D. C., 2006.

② National Research Council, The Sun to the Earth and Beyond: A Decadal Research Strategy in Solar and Space Physics, The National Academies Press, Washington, D. C., 2003.

③ National Research Council, Ground-Based Solar Research: An Assessment and Strategy for the Future, National Academy Press, Washington, D. C., 1998.

目 录

前 言

原版前言

0 概 述	(1)
0.1 社会背景	(1)
0.2 空间天气的影响	(1)
0.2.1 空间天气对特定行业的影响	(2)
0.2.2 空间天气的间接影响	(2)
0.2.3 未来的脆弱性	(3)
0.3 空间天气机构	(3)
0.4 解读恶劣空间天气对社会与经济的影响	(4)
0.5 总 结	(4)
注 释	(5)
1 引 言	(6)
1.1 历史背景	(6)
1.1.1 1859 年 8—9 月的超级磁暴(卡林顿事件)	(6)
1.1.2 空间天气:“联系太阳黑子和地球磁场的神秘力量”	(8)
1.2 空间天气效应及其对社会经济的影响	(11)
1.3 研讨会安排和报告结构	(11)
注 释	(12)
2 空间天气的影响回顾	(15)
2.1 空间天气和电网	(15)
2.1.1 背 景	(15)
2.1.2 研讨会报告	(16)
2.2 空间天气和航空航海	(18)
2.2.1 背 景	(18)
2.2.2 研讨会报告	(19)
2.3 空间天气与卫星	(22)
2.4 空间天气和 GPS 服务	(23)
2.4.1 背 景	(23)
2.4.2 研讨会报告	(24)
2.5 总 结	(24)
注 释	(25)

3 空间天气和社会	(27)
3.1 空间天气、基础设施和社会	(27)
3.2 风险评估	(29)
3.3 低概率/高风险事件	(29)
3.4 复杂自适应系统的研究	(30)
3.5 总 结	(30)
注 释	(31)
4 当前空间天气服务基础设施结构	(32)
4.1 用于空间天气态势感知和预报的空间天气数据、基础设施结构和服务	(32)
4.1.1 NASA 和 NOAA 的职责	(32)
4.1.2 国防部的研究成果	(39)
4.1.3 欧洲项目	(41)
4.2 空间天气模型和工具	(42)
4.3 目前的空间天气用户	(44)
4.4 服务和预报窗口的滞后时间	(45)
4.5 NASA 探测任务的空间天气监测器	(46)
4.6 NASA 的理论和模式的应用转化	(46)
4.7 问题和讨论	(46)
4.8 总 结	(47)
注 释	(48)
5 从用户角度透视空间天气产品	(49)
5.1 航空业角度	(49)
5.2 电力行业角度	(52)
5.3 精密地理定位服务产业角度	(56)
5.4 卫星制造和运营行业角度	(59)
5.5 美国空军角度	(62)
5.6 总 结	(64)
注 释	(65)
6 满足空间天气用户需求	(66)
6.1 美国国家空间天气计划机构组成	(66)
6.2 空间天气预报中心的核心任务和现有能力	(67)
6.3 空间天气预报中心未来工作方向	(69)
6.4 小组成员和听众反馈	(69)
6.5 总 结	(71)
注 释	(71)
7 解决方案,安全隐患以及风险	(72)
7.1 电 网	(72)
7.1.1 未来的安全隐患	(72)
7.1.2 未来的解决方案	(75)

7.2	全球定位系统与航空	(75)
7.2.1	未来的安全隐患	(75)
7.2.2	未来的解决方案	(76)
7.3	卫 星	(78)
7.3.1	未来的安全隐患	(78)
7.3.2	未来的解决方案	(78)
7.4	风险及对未来极端事件的预测	(79)
7.5	总 结	(80)
	注 释	(81)
8	与会者开放性讨论:路在何方	(82)
8.1	仪器和监测:空间天气观测系统	(82)
8.2	我们认识和预报空间天气的能力	(83)
8.3	面临风险的国家?——评估恶劣空间天气事件可能导致的基础设施崩溃	(83)
8.4	风险分析与风险管理	(84)
8.5	谁应该对此负责?——管理空间天气监测和应对系统	(84)
8.6	教育,培训与公众认知	(85)
8.7	前进的道路	(85)
	注 释	(86)
附录 A	研讨会主题	(87)
附录 B	研讨会日程和与会代表名单	(88)
附录 C	研讨会报告摘要	(93)
附录 D	研讨会特别委员会成员简介	(130)
附录 E	缩写和名词	(137)

0 概 述

0.1 社会背景

现代社会在很大程度上依赖于极易受到恶劣空间天气影响的种种技术。极端空间天气是指太阳磁场活动导致的高层大气和近地空间环境的剧烈扰动。强极光电流会中断甚至摧毁现代电网,并加速对石油和天然气管道的腐蚀;磁暴引起的电离层密度的扰动会影响高频无线电波通信和全球定位系统(GPS)卫星的导航信号,而极盖吸收(PCA)事件会降低、严重时甚至会完全中断穿越两极的航空路线的高频通信,因此航班需要调整到低纬度飞行;太阳高能粒子事件和辐射带增强会使暴露在高能粒子环境中的航天器出现暂时的运行异常,损坏关键电子元器件,降低太阳能电池阵列效率,破坏光学系统(如成像仪、星敏感器)并使之不能正常工作。

技术文献和科普报告都很好地阐述过空间天气对现代技术系统的影响。其中经常提及的应该是,1989年3月特大地磁暴导致加拿大东北部的魁北克省(Hydro-Quebec)电网在90 s内突然瘫痪,数百万人遭遇长达9 h的停电。这一事例证明了恶劣空间天气对现代社会极大程度依赖的技术所产生的严重影响。

1989年3月的事件已经过去将近20年了,在此期间,受影响行业对极端空间天气风险的认识逐渐增强,采取了一些减缓策略,获得了新的数据源(如ACE卫星的上游太阳风测量数据),开发了空间环境的新模式,建立了国家级的空间天气机构,为逐渐增加的用户提供数据、警报和预报。

20年后的今天,在新的太阳活动峰年到来之际,我们是否已做好应对空间天气影响的准备?最新的科技发展是否使得我们的关键技术不那么易受攻击?我们对极端空间天气事件造成的更广泛的社会和经济影响的理解程度有多深?我们的机构准备好应对“空间天气卡特里娜”——一种罕见的但据历史记载并非不可能发生的事件了吗?2008年5月22—23日,美国国家研究理事会召集工业界、联邦政府以及社会科学团体的代表们在华盛顿召开了一次研讨会,探讨这些问题及相关问题。这份报告由组织研讨会的特别委员会成员所编写,历时1.5 d,总结了专题报告和讨论中出现的关键主题、想法以及见解。

0.2 空间天气的影响

现代科技社会的特点是对关键基础设施的依赖以及关键基础设施之间具有相互依存的复杂交织关系。恶劣空间天气对社会经济影响的完整描述,包括直接影响、对特定行业的影响(如电网瘫痪和航天器异常)以及由于空间天气引起的基础设施和服务技术故障而产生的间接影响。

0.2.1 空间天气对特定行业的影响

恶劣空间天气主要会对电力、航天器、导航和基于 GPS 的定位等业务造成不利影响。1989 年 3 月的加拿大魁北克省停电事件和美国东北部电力设施烧毁事件,仍是恶劣空间天气事件影响电力行业的经典事例。空间天气对其他行业造成影响的几个事例如下:

(1)1994 年 1 月,在地球同步轨道高能电子流量增强期间,加拿大两颗通信卫星出现故障,导致全国范围的通信中断,第一颗卫星在几小时后恢复正常,而修复另一颗卫星用了长达 6 个月的时间,花费 5 千万~7 千万美元。

(2)2005 年 1 月,由于连续几天空间天气的扰动,26 架美联航航班改航为非极区或非最佳极区飞行路线。航班改航是为了规避 PCA 事件期间高频电波通信中断的风险。改变航线增加了航班飞行时间,航班需要额外的起飞和降落,从而增加燃油消耗,提高飞行成本,而航班延误还会打乱乘客的换乘计划。

(3)2003 年 10—11 月恶劣的空间天气事件期间,美国联邦航空局最新使用的基于 GPS 的广域增强系统(Wide Area Augmentation System, WAAS)失效达 30 h。

随着对空间天气影响技术系统的认识 and 理解的日益深入,各行业通过改进业务流程和技术水平来应对恶劣空间天气的威胁。如上所述,航空公司在剧烈的太阳高能粒子事件期间调整极区航线的飞行路线,以保证可靠的通信。通过美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下属的空间天气预报中心(Space Weather Prediction Center, SWPC)对即将发生的磁暴的预警,以及对地面电流的实时监测,电网运营商可以采取防御措施,保护电网不受地磁感生电流(geomagnetically induced currents, GICs)的影响。同样,在不利的空间天气条件下,发射人员可能推迟发射,卫星操控者可能会推迟某些操作(如推进器点火)。而对航天器行业来说,减轻空间天气影响的主要手段是改进设计,在成本和资源的限制下尽可能地使得卫星能够运行在恶劣空间天气环境中。GPS 现代化则是通过增加两个新的导航信号和新代码,有助于减轻空间天气的影响(如电离层闪烁导致的距离修正误差和信号衰减),尽管目前尚不清楚能减轻到何种程度。在未来 15 年,新的 GPS 卫星投入运行,这些技术也将逐步投入使用。而美国联邦航空局将保留非基于 GPS 的“legacy”导航系统作为备份,其他的 GPS 用户(如海上钻井公司)将推迟需要精确位置信息的行动,直到电离层扰动结束。

0.2.2 空间天气的间接影响

由于现代社会关键基础设施相互关联,恶劣空间天气事件的影响不仅仅体现在破坏现有的技术系统,还将间接影响短期以及长期的社会经济。电力是现代社会的基础技术,几乎是所有其他基础设施和服务所依赖的技术。虽然由恶劣空间天气事件引起大面积停电的可能性较低,但这样的事件一旦发生,后果将极为严重,因为它将影响一连串的其他相关系统。长期的间接影响可能包括:破坏运输、通信、银行和金融系统以及政府服务;抽水泵故障使得自来水无法输送;无法制冷将导致食物和药物变质。最终一个地区相当长时间的服务缺失将影响整个国家,甚至全球。

恶劣空间天气事件是低概率/高风险(LF/HC)型事件,而且当前这一事件潜在和广泛的间接影响,给公众(和私人)机构及管理部门带来了一系列特殊的问题,与传统的、可预见的、频繁发生而经常经历的事件所产生的问题大不相同。因此,应对 LF/HC 型事件的间接影响需

要不同的预算投入和管理能力,这将挑战传统政策和风险管理策略的基础,即假定宇宙守恒或可靠的条件。此外,由于系统会以开发者和用户并不了解,也预想不到的方式迅速依赖于新的科学技术,那么,对广泛意义上的系统的某一部分的攻击将会传播到其余部分。所以,很难了解,也无法预测将来 LF/HC 型事件的后果。为应对此类事件,在未来几年内持续地做好准备和计划也同样困难。

0.2.3 未来的脆弱性

我们对恶劣空间天气影响现代技术设施的知识与理解,以及减轻这些影响的措施,很大程度上都基于过去 20 年或 30 年,从 1989 年 3 月和 2003 年 10—11 月发生的超级地磁暴期间获得的经验与知识。历史记录表明,更早以前也曾出现过同样甚至更为恶劣的空间天气,例如 1859 年的卡林顿事件^[1]以及 1921 年 5 月的特大地磁暴。可见,尽管这种极端事件极为罕见,但很可能在未来的某个时间再次发生。虽然很难预测未来的卡林顿事件对社会经济的影响,但若现代基于电力基础的科学技术仍处于初级阶段,我们有理由认为,这种规模的事件与 1859 年相比,将对社会经济产生更深入、更广泛的影响。

在对像 1921 年 5 月这样规模的超级磁暴对当前的电力设施的影响进行研究之后,对特大空间天气事件潜在影响的评估更为量化。尽管从 1989 年大磁暴事件中得到了经验教训,并在 2003 年 10—11 月磁暴中成功地应用,但是国家电网仍然因受到恶劣空间天气影响而瘫痪和毁坏。而大范围停电以及永久的设备损坏都需要长时间的修复,从这一层面上来说,当前的电网更易受到影响。Metatech(麦特)科技公司的研究表明,若 1921 年的磁暴发生在今天,将导致大规模停电,超过 1.3 亿的人会受到影响,超过 350 台变压器可能永久被损坏。

0.3 空间天气机构

美国的空间天气服务主要由 NOAA 下属的 SWPC 和美国空军(USAF)气象局提供,二者紧密合作,分别满足民用和军用的需求。SWPC 利用多种数据资源,包括天基和地基数据来为民间用户和商业用户提供预报、监测、预警、警报、综述和业务性的空间天气产品。SWPC 关于太阳活动、上游太阳风状态以及地球空间环境的信息,主要来源于 NASA 的 ACE 卫星、NOAA 的 GOES 和 POES 卫星、磁力计以及 USAF 的太阳观测网;其次来源于 SOHO 卫星、STEREO 卫星和许多地基设备。尽管少量的、不稳定的预算投入(每年大约 6 百万~7 百万美元)限制了其能力,但 SWPC 的用户仍呈稳定增长态势,甚至在太阳极小年,太阳活动水平低的时候也是如此。USAF 在空间天气方面则专注于提供实时空间天气环境的状态,以及评估空间天气对国防任务中不同部门的影响。USAF 使用的是 NOAA 的数据,同时结合其自有设备,如“国防气象卫星计划”的卫星,通信/导航中断预报系统,太阳电子光学观测网,数字电离层探测系统以及 GPS 网。

NASA 是美国国家级空间天气机构的第三个重要成员。虽然 NASA 更偏向于科学而不是业务机构,但 NASA 的科学任务(如 ACE 卫星)提供了关键的空间天气信息,NASA“与星同在计划”的研究目标和技术也与业务相关。NASA 开发的产品也考虑进行由科研转向业务应用,包括传感器技术和可转化为业务工具进行预报及状态描述的空间天气物理模式。

其他关键的美国国家级空间天气机构的成员,还包括太阳和空间物理研究团体,以及新兴

的空间天气商业机构,这部分成员在模式开发方面的努力尤其重要。

空间天气预报:能力与局限性

虽然预报的重要性对不同的行业会有所不同^[2],但国家级空间天气机构的重要职能之一是提供可靠的长期预报。通过误报^[3]率极低的长期(1~3 d)预报,不同的用户都能采取行动减轻即将到来的太阳扰动造成的损失,将经济影响最小化。目前,SWPC 预报空间天气事件发生概率的水平不尽相同。例如,SWPC 可以提前 1~3 d 预报地磁暴或 X 级耀斑的发生概率,具有中等置信度,但其预报更短(小于 1 d)或长期的电离层扰动的能力还很贫乏,而电离层扰动信息对 GPS 用户极为重要。SWPC 已经明确了一些关键步骤来提高它的预报能力,如使之能够提供高置信度的长期和短期的地磁暴预报及电离层扰动预报。这些步骤包括确保 L1 点存在有效的太阳风监测器,将科研模式(如日冕物质抛射的传播模式,地球空间辐射环境模式,磁层、电离层、中高层大气耦合系统模式)业务化,以及开发精确的 GPS 预报和修正工具。对 L1 点的太阳风监测器的需求尤其重要,因为 SWPC 唯一的实时上游太阳风和行星际磁场数据源——ACE 卫星已经超期服役,但目前并没有可取代 ACE 卫星的数据源。

0.4 解读恶劣空间天气对社会与经济的影响

研讨会的主题——“恶劣空间天气对社会与经济的影响”是这份报告的基点,也许其中还包含了许多报告无法完全传递的内容。研讨会上的专题报告和讨论,体现出特邀专家们至少对于中度恶劣的空间天气对特定技术的影响有了较深理解,很多情况下也知道采取何种措施以减轻影响,如增强预报和监测能力,使用新的技术(新的 GPS 信号和代码,新一代抗辐射加固电子元器件)或改进业务流程。这份报告中还收录了研讨会上提到的一些以前未曾公开的信息——空间天气引起的故障损失(如恢复耗资 2.9 亿美元的 Anik E2 卫星回到运行状态花费了 5 千万~7 千万美元)与空间天气并非直接相关,但由恶劣空间暴事件间接引起的损失(如 2003 年 8 月的停电事件损失 40 亿~100 亿美元),而“假如发生恶劣地磁暴”,导致的社会和经济损失仅在第一年就估计为 1 万亿~2 万亿美元,并需要 4~10 a 的时间来恢复。

0.5 总 结

这类关于损失的信息有意思也很有用,但研讨会的成果和这份报告的阐述表明,要回答主题中所包含的问题,这仅仅是个开始。恶劣空间天气对社会与经济的影响是什么?为了定量地回答这个问题,需要考虑很多方面,包括规模、持续时间和事件的发生时间特性;性质、严重程度和由于社会相互依存的特性引起的一系列间接影响;受影响设施的坚固性和适应性;公众机构、私人机构的风险管理策略和政策是否到位;联邦政府、州政府和当地政府机构对恶劣空间天气事件影响的反应能力。而这次研讨会以及这份报告将当前对社会与经济方面的影响的了解与疑问都集中起来,也许成功解决了许多相关问题,但知识方面的缺口不能通过一次研讨会而全部得到解决,仍需要深入研究。而定量、全面地评估恶劣空间天气对社会与经济造成的影响的确是一项艰巨的任务,还将涉及这份报告中许多没有提到的问题。

注 释

[1] 卡林顿事件是历史记录中最恶劣的一次空间天气事件。当时天空出现了几天极为壮观的极光景象,甚至罕见地在低纬度地区也能看到,引起全球范围电报服务的中断。该事件以英国天文学家理查德·卡林顿(Richard Carrington)的名字命名,因为他观测到了与随后发生的地磁暴相关联的强白光耀斑。

[2] 例如,对航天器行业而言,空间天气预报不如气候学知识,尤其是气候记录中的极端现象的知识更重要。

[3] 误报将会引起混乱和造成浪费。准确预报恶劣地磁暴,将使得电力公司通过取消计划的维护工作,来降低风险,并可以额外增加人员应对不利影响,减少电网中相邻系统之间的电力传输。但正如研讨会所指出的,假如警报是个误报,而计划的维护任务被取消,大型起重机、大型设备、大量材料和人力的闲置带来的花费将极为庞大。

1 引言

1.1 历史背景

正如古代传说以及历史文献记载的那样,人类的生产生活和技术发展始终受到干旱、洪水、冰雹、暴风雪、飓风和台风等极端天气的影响。在 19 世纪中叶,人类社会科技发展较快的部分领域,已经受到极端的地面天气事件以及由太阳活动驱动的近地空间环境和高空大气的的影响和损害。虽然日地空间环境的自然规律在那时还没有被人理解,但随着电报通信网络灾难的不断周期性出现,人们逐渐认识到太阳活动及其引起的空间环境扰动是这些灾害的罪魁祸首。在随后的一个半世纪,随着电力网络、电话和无线电通信、天基通信和导航系统的迅猛发展,现代社会及其科技体系在“空间天气”面前,脆弱性显著增加。

大量的事件使得人们逐步广泛地认识到恶劣空间天气对现代技术体系(如电力供应故障、高频通信中断)有严重的影响,而新近发展的全球定位系统(GPS)和航天飞行器的快速发展,使得这种影响和危害雪上加霜。空间天气的物理机制也被广泛地研究和认识,但我们对极端事件的预报能力还处于非常初级的阶段。另一方面,关于空间天气导致重要技术系统崩溃,从而对人类社会产生影响,这一方面的记载尚不全面,也是我们需要加强理解和认识的。这些影响和定量评估给我们提出了一系列具有挑战性的课题,例如,收集资料的手段和途径,开展极端空间天气扰动相关的低概率/高风险事件的评估方法,提高政策制定者和利益相关人员的风险意识,以及研究制定恰当的风险管理和应对战略措施。

2008 年 5 月 22—23 日,美国国家研究理事会(NRC)空间科学部在华盛顿召开了一次研讨会,作为促进空间天气对经济社会影响的理解和认识、加强空间天气风险的评估和管理等诸多工作的第一步。研讨会聚集了来自于工业界、政府、学术界(附录 B,见原著)的代表,共同研讨以下几个方面的专题:恶劣空间天气事件、空间天气服务体系对美国国家经济和安全的影响、用户对空间天气数据和服务的需求、未来技术发展及空间天气对未来社会的影响。研讨会最后以一个“前进的道路”的主题讨论作为总结。会议一致认为,加强对未知空间天气危害的理解,对现有空间天气服务系统凸显的缺陷提出合理的改进建议,将对空间天气危害管理大有裨益。历时 1.5 d 的研讨会产生了一些有意义的主题、具有前瞻性的思想和丰富信息的讨论,这些重要结果将在本报告中给出,本报告由组织会议的特别委员会成员编写完成,该委员会的任务之一是推进本工作组(附录 D,见原著)的成立并开展工作。为了给后续章节做一个铺垫,我们的故事从 1859 年 8—9 月份的超级磁暴开始讲述,此次磁暴是有记录以来最剧烈的一次,即通常所说的卡林顿事件,作为恶劣空间天气事件的典型例子,对 1859 年的磁暴的引用将贯穿工作组的整个报告,如果此次事件发生在今天,可能造成非常严重的后果及非常复杂的连锁反应。

1.1.1 1859 年 8—9 月的超级磁暴(卡林顿事件)

1859 年 9 月 2 日午夜后,在洛基山地区的露营者被“极光”惊醒,这次“极光”非常明亮,以

至于可以在“极光”下阅读,这是露营者在“洛基山新闻”上的报道。有一些露营者坚持认为已经到了白天并开始准备早餐了^[1]。在 1800 mile^①(英里)以东的马萨诸塞州 Newburyport,著名的医生 Henry C. Perkins 看到:“天空中呈现出变换着红色和绿色的漂亮穹顶”。在古巴的哈瓦那,当晚的“天空被火焰照得通红”(图 1.1)。其实这次神奇的“极光”在 5 d 前已经开始,在 8 月 28 和 29 日晚,“天空像被彩带染了一样,形成深红色、黄色和白色的灿烂波浪一般”(仍然是 Henry C. Perkins 医生的记录),纽约市数千人聚集在路边或屋顶上观看“被绚丽的帷帐装扮过的天空”^[2],在这个星期天的晚上,纽约人见证了这个美丽的“极光”。纽约时报明确地告诉读者“这样神奇的经历一生中可能只能经历一两次”^[3]。



图 1.1 2001 年 11 月 5 日磁暴期间,在加利福尼亚 Napa Valley 拍摄的“极光”照片
天空中红色非常鲜艳,房子和树叶像染上了红色一般(Sam Salvador 1859 年 9 月 21 日
观测的“极光”记录)。复印版权来自于 D. Obudzin Ski, 2001

从 8 月 28 日到 9 月 4 日,整个美洲、欧洲、亚洲和澳大利亚,甚至远到夏威夷、加勒比海、智利圣地亚哥(图 1.2)^[4]的广大地区,都可以看到极其灿烂的极光。在黎明之后,即使极光不可再见了,但仍然可以感受到极光电流的影响。地磁观测记录了地球磁场极端剧烈的地磁扰动,以至于仪器都无法正常工作了,全球电报网络“Victorian Internet”^[5]遭遇到强烈的损害和中断。“这次美丽极光伴随产生的电流在全国电力网络中流动”,费城晚报报道这样说:“大量的电报办公室从电报机器中接收到了令人惊讶的无法读懂的信息,天空中出现不同形状和大小的灿烂火花”^[6]。在很多地方,电报操作者甚至将电报机器的电池取下,直接利用极光产生的电流来工作^[7]。

“极光”是这次太阳活动高峰期发生的两次大磁暴展示给人类可以看得见的自然力量。9 月 1 日,在第二次磁暴发生前一天,英国的业余天文学家 Richard Carrington,观测到太阳中部一个复杂的黑子群产生了一次强烈的爆发, Richard Hodgson 在伦敦也观测到了这次持续了 5 min 的爆发。Carrington 记录了这次太阳爆发——白光耀斑^[8],在此次爆发后的第二天产生了一次磁暴,但是他对这两次事件的联系持怀疑态度,“看到一只燕子,不能代表春天就来了”^[9]。

① 1 mile=1609.344 m,下同。——责任编辑注。