

国家安全地球物理丛书（十三）



军民融合与地球物理

刘代志 主编



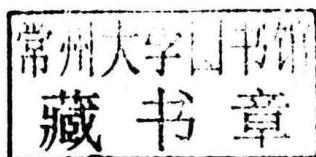
西安地图出版社

《国家安全地球物理丛书》(十三)

军民融合与地球物理

中国地球物理学会国家安全地球物理专业委员会
陕西省地球物理学会军事地球物理专业委员会

刘代志 主编



 西安地图出版社

©刘代志 2017

图书在版编目(CIP)数据

军民融合与地球物理/刘代志主编. —西安:西安地图出版社, 2017. 10

(国家安全地球物理丛书;十三)

ISBN 978-7-5556-0365-8

I. ①军… II. ①刘… III. ①地球物理学—研究
②军事地理学—研究 IV. ①P3 ②E993

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 218191 号

著作人及著作方式:刘代志 主编

责任编辑:陈扬眉

书 名 军民融合与地球物理

出版发行 西安地图出版社

地址邮编 西安市友谊东路 334 号 710054

印 刷 西安地质矿产研究所印刷厂

规格开本 787mm×1092mm 1/16

印 张 21.25

印 数 200

字 数 500 千字

版 次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5556-0365-8

定 价 60.00 元

版权所有 侵权必究

凡购本社图书,如有印装问题,请联系发行部调换。服务热线:029-87604375

《国家安全地球物理丛书》(十三) 编委会

主 编：刘代志

副 主 编：李夕海 刘志刚

编 委：(按姓氏笔划为序)

王仕成 龙 凡 刘代志 刘怀山

刘志刚 李夕海 张金城 牛 超

《国家安全地球物理丛书》编审委员会

顾 问：刘光鼎 (院士) 何继善 (院士) 许绍燮 (院士)

魏奉思 (院士) 万卫星 (院士) 徐文耀 (研究员)

主任委员：刘代志

副主任委员：龙 凡 靳 平 王仕成 刘怀山 张金城

秘 书 长：李夕海

委 员：(按姓氏笔划为序)

于德浩 王仕成 王庆宾 王晓航 龙 凡 边少锋 刘 刚

刘代志 刘光斌 刘怀山 刘志刚 刘 波 孙凤华 孙更文

孙新利 朱培民 杜爱民 李夕海 李天河 李艾华 李学正

李卧东 吴时国 何 彬 余志勇 张玉兔 张全虎 张金生

张金城 陈 洁 姜素华 查石祥 查亚兵 周坚鑫 徐白山

陶 勇 童思友 曾新吾 韩天成 靳 平

前 言

国家安全(军事)地球物理学不仅是一门应用领域广阔的学科,而且是军民两用特色十分鲜明的应用学科,它在民用领域中发展的一系列方法理论、技术与设备亦可以解决国防和军事应用中的各种问题。

去年八月中旬,我们在东北老工业基地——鞍山召开了第十二届国家安全(军事)地球物理学术研讨会,主题是“地球物理与信息感知”,主要研讨了固体地球物理、国防工程地球物理、海洋地球物理、空间环境地球物理、遥感地球物理、军控核查中的地球物理信息感知与应用,以及与国家安全地球物理相关的其它内容。今年,我们将在彩云之南的腾冲——既是中国远征军抗战故地,又是火山地貌发育之地,召开第十三届国家安全(军事)地球物理学术研讨会。目前,军民融合发展已上升为国家战略,而国家安全地球物理专业委员会本身就是一个促进军民融合发展的平台,为了与国家和军队发展改革大策相配合,今年的会议主题是“军民融合与地球物理”,旨在把国防和军队现代化建设深深融入经济社会发展体系之中,全面推进经济、科技、教育、人才等各个领域的军民融合,在更广范围、更高层次、更深程度上把国防和军队现代化建设与经济社会发展结合起来,为实现国防和军队现代化提供丰厚的资源和可持续发展的后劲。

本集收录论文 55 篇,主要涉及固体地球物理、国防工程地球物理、海洋地球物理、空间环境地球物理、遥感地球物理等领域,同时包含数据探测处理和新方法新技术等军民两用地球物理方法理论与技术及其应用成果。

国家安全(军事)地球物理学科发展与学术交流,一直得到中国(陕西省)地球物理学会的指导,火箭军工程大学对学术研讨会的召开和《国家安全地球物理丛书》的出版一直予以大力支持。值此本辑丛书出版之际,谨向各位领导、专家和同行们表示最诚挚的谢意,我们将继续推动国家安全(军事)地球物理学科建设在军民融合的道路上向前发展。

刘代志

2017年9月22日

目 录

中低纬电离层闪烁与地磁场相关性分析及闪烁形态预测研究*	刘代志 李义红 卢世坤 侯维君 徐步云(1)
空间地球物理环境对空天作战的影响分析	任留成 郭俊晖 吕泗洲(13)
空间天气效应分析现状与发展研究	王胜国 孙泽中 许丽人 陈润强 宿兴涛 孙海洋(18)
电离层 TEC 周日变化的峰值特性分析*	李义红 徐步云 侯维君 刘代志(23)
基于样本熵的全球电离层 TEC 复杂度分析*	卢世坤 李夕海 李义红 牛 超 刘代志(31)
肇庆台站地磁场 SqD 与电离层 TEC 的同步分析*	徐步云 牛 超 侯维君 李义红 刘代志(37)
中低纬度电离层暴对磁暴的响应分析初探*	李祥雨 牛 超 徐步云 刘代志(44)
国际数据中心 (IDC) 审查事件公报质量初步评估	王 娟 王晓明 李 健 张 波 邱宏茂 许朝阳 商 杰(50)
国际数据中心次声数据处理流程简介	许 伟 林源根 李虹轶 宋天莉(55)
“天舟一号”飞船发射次声信号分析	许 伟 林源根 王晓航 李虹轶(59)
空间扰动引力点质量模型在远程飞行器控制与导航中的应用	翟振和 孙中苗 王兴涛 肖 云(62)
航空磁力矢量仪初样机飞行试验数据精度评估*	刘晓刚 肖 云 管 斌 吴 娟(66)
“天舟一号”飞船发射次声信号中趋势项去除方法对比研究	康志谦 李夕海 杨婷婷(73)
用于惯导系统补偿的扰动重力基准图精度需求仿真	管 斌 孙中苗 刘晓刚 肖 云(81)
联合野外工作方法初探*	杨清雷 于德浩 李远华 宋光源 王 康 李 霞(86)
基于四重计数率的快中子多重性测量模型模拟验证	张全虎 庄 琳 左文明 陈 晨(93)
快中子多重性方法探测效率与散射串扰的模拟刻度	庄 琳 张全虎 黎素芬 侯素霞 左文明 陈 晨 杨婷婷(100)

多波段 SAR 图像变化检测问题研究*	黄世奇 张宇婷 苏培峰 刘代志	(107)
基于 SARscape 软件的 InSAR 相位解缠算法研究	孙永进 徐白山 杨旭 梁晓强 潘庆芳 穆合塔尔·麦合木提	(113)
基于遥感影像分类的城镇建成区变化检测方法研究	王长海 陈文静	(119)
离散双边滤波算子半群性浅析*	苏培峰 刘代志 李夕海 刘志刚	(127)
军用地质信息要素分类与编码探讨*	杨清雷 于德浩 王康 张垚 杨彤 李霞	(130)
利用重力测量技术搜索、探测人工地下空洞的技术与策略研究*	王庆宾 张超 黄佳喜 冯进凯 吴亮 黄炎	(134)
地下工程厚层钢筋混凝土被覆的质量检测	钟世航 王荣 王泽峰	(150)
工程地震冲击震源在城市管道勘探中的应用	王兴 张进 申鹏 郭旭兵 陈松	(154)
极低频探地工程及其发展应用	刘勇 张杨勇 孔亚丽 曾歌明 丁葵	(158)
EGM2008 地球重力场模型在大地水准面计算中的应用	吴晓阳 姜效典	(163)
虚地磁坐标系原理及应用——对郝晓光博士新编世界地图的深化与扩展*	骆遥 李敬敏 张文志 舒晴	(168)
直流联合剖面法探测深度的影响因素研究	许颢砾 王大庆 邓正栋 刘志新 段化杰 王光远	(175)
锤击能量与 SV 波地震测深关系的研究	邱路之 徐白山 李峰 景宣乔 何浩琛	(181)
基于地震转换横波法界定含水地质灾害区域的研究	李峰 徐白山 景宣乔 何浩琛 邱路之	(188)
基于相关算法的地震干涉成像	杨求亮 王林飞 葛学胜	(193)
转换横波地震图像信息提取的数据处理研究与应用	何浩琛 徐白山 李峰 景宣乔 邱路之	(197)
岩体基本质量野外快速判定方法*	于德浩 宋清波 王康 杨清雷 李霞 徐兴宇	(202)
土介质的地震波幅值衰减与品质因子	李学政 潘常周 张阿瑶	(209)
特定工程岩石坚硬程度划分探讨*	于德浩 宋清波 肖辉 王康 宋光源 胡畔	(216)
套管井瞬变电磁电阻率计算方法研究	刘思慧 臧德福 张守伟 张付明 黄玉科	(222)
基于最小二乘方法的点质量模型构建*	冯进凯 王庆宾 黄佳喜 张超 黄炎	(227)

基于小波变换研究山东半岛地区构造特征	李聪颖(233)
西藏东南缘居里面分析	杨凯(238)
利用重力异常推估海底地形*	范雕 孟书宇 邢志斌 曲政豪 冯进凯(242)
同步挤压小波变换在面波压制中的应用*	吴卫华 刘怀山 焦静娟(248)
非地震检测海洋油气烃渗漏的地球物理技术	夏玲燕 肖梦楚 胡悦(253)
利用坡印廷矢量压制逆时偏移成像噪声*	葛林苾 童思友 陈明(258)
利用 Fisher 判别分析进行油气预测*	刘张聚 张进(263)
基于混合 Radon 变换在海洋垂直缆资料的噪声压制*	吴树梁 刘怀山 王春霖(268)
不同震源对天然气水合物的响应特征分析*	张建国 刘怀山 岳家彤(273)
大数据时代对地质灾害防治的探究	
..... 杨旭 徐白山 孙永进 梁晓强 潘庆芳 穆合塔尔·麦合木提(278)	
基于 QR-CKF 的 BDS/GPS 精密单点定位算法	
..... 张兆龙 王跃钢 腾红磊 张复建(283)	
基于低秩流形的高光谱条带噪声去除算法*	姜江军 刘志刚 鞠荟荟(290)
基于模态分解和奇异谱熵的次声信号分类对比分析	
..... 杨婷婷 李夕海 康志谦 庄琳(295)	
一种用于负电晕放电信号探测的 VHF 接收机	白帆 崔占忠(302)
基于单片机的地震数据采集器计时精度测量	
..... 王敏超 沈旭峰 肖卫国 张阿谣 张诚塗 卢娜 崔甲甲(307)	
美国 UXO 地球物理探测技术最新进展	孟庆奎 高维 王晨阳(314)
一种用于实时地震监测的宽带信号检测方法研究	
..... 李健 王晓明 邱宏茂 王娟 张波(320)	
附录:第十二届国家安全地球物理专题研讨会会议纪要	(328)

中低纬电离层闪烁与地磁场相关性 分析及闪烁形态预测研究*

刘代志 李义红 卢世坤 侯维君 徐步云
(火箭军工程大学, 陕西西安 710025)

摘要 电离层闪烁与地磁场的相关性问题是电离层物理和空间天气领域广受关注的一个科学问题。大量统计和物理机理研究表明,二者之间的依赖关系复杂,尤其是在磁暴期间。但是,如何定性定量地描述这种相关性,目前并没有得到好的方法,这个问题也制约了电离层闪烁的预测。此外,电离层闪烁还存在复杂的逐日变化,也是造成闪烁形态短时预测困难的一个重要因素。从数据挖掘的角度研究闪烁与地磁之间的相关性,在对电离层闪烁和地磁场进行联合观测的基础上,对获取的数据进行深度挖掘,结合物理机理,提取特征参量,建立各种特征量之间的相关性模式,可综合描述闪烁与地磁的相关性。以此为基础,用采人工智能方法深入学习闪烁形态时空变化,建立我国中低纬地区的电离层闪烁形态预测模型,不仅可为战区尺度空间环境监测与保障提供理论基础和技术支持,还为深入理解电离层闪烁和不规则体演化机制提供参考。

关键词 电离层闪烁 地磁变化场 时空相关性分析 闪烁形态预测 数据挖掘

Study on Relativity Analysis of Ionospheric Scintillation and Geomagnetic Field and Forecasting of Scintillation Morphology in Mid-low Latitudes Region

LIU Dai-Zhi LI Yi-Hong LU Shi-Kun HOU Wei-Jun XU Bu-Yun
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an, 710025, China)

Abstract The relativity of ionospheric scintillation and geomagnetic field is a key scientific problem in ionospheric physics and space weather fields. A large number of statistical and physical mechanism research show that there is a complicate relativity between ionospheric scintillation and geomagnetic field, especially during magnetic storms. But, how to describe the relativity quantitatively and qualitatively has not been well resolved yet. This problem also restricts the forecasting of ionospheric scintillation. Furthermore, the day-to-day variation of ionospheric scintillation is an important factor causing difficulties of scintillation morphology forecasting. To study the relativity of ionospheric scintillation and geomagnetic field using the data mining method. Based on the joint observation of ionospheric scintillation and geomagnetic field, the acquired data is deep mined. Then, combining with physical mechanism, the feature parameters are extracted to establish the relativity model and describe the relativity of ionospheric scintillation and geomagnetic field comprehensively. Furthermore, the spatiotemporal variation of scintillation morphology is deeply studied and modeled for forecasting in mid-low latitudes in China. We can not only provide theoretical basis and technical support for space envi-

* 基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (41374154)。

ronment monitoring and protection in heater scale, but also can offer reference for deep understanding of evolution mechanism of ionospheric scintillations and irregularities.

Key Words Ionospheric scintillation Geomagnetic variation field Spatiotemporal relativity analysis Forcasting of scintillation morphology Data mining

1 引言

电离层闪烁是无线电波在电离层中传播时,受电离层电子密度不规则结构影响,产生的信号振幅、相位、到达角和极化状态等快速随机起伏现象。引起电离层闪烁的不规则结构的尺度从几十厘米至上千千米,赤道附近和极区夜间最为严重,我国南方的大部分地区位于中低纬的磁赤道异常区,是全球范围内电离层闪烁的多发区域之一,主要受R-T不稳定性(Rayleigh-Taylor instability)触发形成扩展F(SF)导致。电离层闪烁不仅反映了电离层中不规则结构及其变化的物理特性,还造成卫星导航定位、卫星通信、空间目标监视雷达、测控等地空无线电系统的工作性能下降,严重时会造成系统中断。因此,电离层闪烁是电离层物理、空间天气和无线电波传播等领域的重要研究对象,也是空间环境作战保障的重要内容。

地磁场作为电离层电动力学过程的背景磁场,对全球电离层发电机过程以及电离层电场、电流的分布有着决定性的影响。地磁场在电离层不规则体的形成机制和时空演变中扮演着重要角色,是纬圈电场形成和等离子体垂直漂移的背景场。一般认为,低纬赤道地区扩展F起因于等离子体中的R-T不稳定性。由于低纬和赤道地区的地磁场近似水平,白天,E层中性风拖曳等离子体切割磁力线形成东向纬圈电场,并沿磁力线映射到F层。日落之后,在F层底部形成陡峭向上的电离密度梯度,与重力指向相反,因为重力场中密度大的流体处于密度小的流体上部,等离子体呈不稳定的状态。在重力与磁场的共同作用下,将产生东向电流。如果存在一个小的初始扰动,该东向电流将产生电荷积累,生成扰动的极化电场,该极化电场增强了东向纬圈电场,并与磁场共同作用在低电离密度区产生向上的力 $E \times B$,导致低电子密度区域上升,在抬升的过程中沿着磁力线扩展,形成等离子体泡和羽状不规则结构。磁暴期间,太阳风和磁层相互作用,导致极盖电势变化,电场迅速渗透到低纬,引起纬圈电场的扰动,此外极区焦耳加热导致的全球热层环流产生长时间的电离层风场发电机也会导致中低纬电场的扰动,这种电场扰动对扩展F的产生可能增强,也可能抑制。根据观测和统计分析,地磁活动对扩展F以及闪烁的影响随磁暴类型、地方时、季节、太阳活动、纬度以及经度等变化而变化,不规则体的产生和闪烁现象对地磁活动的依赖性复杂多变。因此,电离层闪烁与地磁场之间存在相关性,尤其是在磁暴期间,电离层闪烁与地磁的关系更为复杂。那么,二者到底如何相关,相关性有多大,受哪些因素影响?科学家们进行了大量的观测和研究,通过多种观测手段获取数据,采用统计分析、个例事件分析等方法研究磁暴期间的电离层不规则体和由此引发的电离层闪烁,加深了对磁暴期间不规则体和闪烁的形态、产生和演化机制的认识。在一些电离层闪烁模型的建立中,也考虑了地磁变化的因素。但是,对于闪烁和地磁相关性的定量和定性分析上,研究较少,而建立明确描述二者相关性的模式,对于建立电离层闪烁模型、提高闪烁的预测预报能力至关重要。

由于磁暴期间,各种空间环境参量都发生了变化,且相互作用,电离层与磁层和大气层

耦合, 电场变化、大尺度波结构以及电离层电子密度耗尽导致的电离层暴等都可能对电离层不规则结构的形成以及闪烁现象的触发产生影响, 且随着时空发生变化, 因此, 要考虑这些相关因素, 分析地磁变化对电离层闪烁产生的直接或间接影响, 从而确定二者之间的相关性, 确实难度很大。此外, 电离层闪烁不仅在磁暴期间的变化较为复杂, 在平静时期其出现率和强度的逐日变化对闪烁的短时预测也是一大制约, 而引起逐日变化的物理机制目前还没有完全清楚。因此, 电离层闪烁与地磁的相关性问题, 以及电离层闪烁的预测问题, 既是电离层物理和空间天气学中极其重要的科学问题, 也是制约电离层天气预报的瓶颈问题。在国家自然科学基金课题——“辅助导航地球变化磁场区域模型研究”和“中纬度局地电离层 TEC 与地磁变化场时空相关性分析与建模研究”中, 我们开展了地磁场、电离层 TEC 的联合观测, 并用现代信号处理和人工智能相结合的方法分析了地磁变化场以及 TEC 的非线性、非平稳性、复杂度、时频特性等, 研究 TEC 与地磁变化场的相关性, 建立了基于神经网络、支持向量机等方法的预测模型, 可实现 TEC 与地磁变化场的高精度短时预测。在以往研究的基础上, 拓展思路, 结合电离层闪烁的产生和演化特点, 我们考虑从数据挖掘的角度研究闪烁与地磁之间的相关性, 在对电离层闪烁和地磁场进行联合观测的基础上, 对获取的数据进行深度挖掘, 结合物理机理, 提取特征参量, 利用机器学习方法建立各种特征量之间的相关性模式, 综合描述闪烁与地磁的相关性。以此为基础, 建立电离层闪烁的形态预测模型。这是一种突破瓶颈、精确快速保障电离层空间天气的最佳研究途径之一。因此, 我们认为, 开展“中低纬电离层闪烁与地磁场相关性分析及闪烁形态预测研究”, 不仅对深入研究闪烁与地磁相关性这一科学问题具有重要意义, 而且为战区空间环境作战保障提供理论基础和技术支持, 为深入理解电离层闪烁和不规则体演化机制以及提高电离层天气预报能力提供参考。

2 国内外研究现状及发展动态分析

2.1 电离层闪烁形态统计分析

长期的观测资料表明, 磁赤道附近低纬地区和极区附近高纬地区电离层闪烁现象严重且频繁出现, 中纬地区电离层闪烁较弱而且出现的概率较小^[1-2]。Basu 等^[3]根据卫星 VHF/UHF 信号的闪烁数据研究了电离层闪烁形态, 结果表明太阳活动高年的闪烁强于太阳活动低年。Muella 等^[4]根据巴西 7 个台站的 GPS 闪烁数据进行研究, 发现在不同的区域, 闪烁的发生率、TEC 的变化以及不规则体的漂移速度都差别很大。Gwal 等^[5]研究了泰国 Chiang Rai 台站 (19.57°N, 99.52°E) 的相位和幅度闪烁, 发现相位闪烁必定伴随幅度闪烁, 而反之不然; 相位和幅度闪烁发生率, 在午夜的地方时 21:00~22:00 时最强, 在春秋季节高而在冬夏季低, 并且发生率随 A_p 指数增大而降低。Jiao Y 等^[6]比较了赤道和高纬度地区的电离层闪烁在 24 太阳活动周极大年的不同特性, 统计分析结果表明闪烁在赤道地区一般比高纬度地区的强且持续时间长, 高纬度闪烁更多是中等强度, 且主要是相位闪烁。Karasawa Y 等^[7]研究了中纬度地区的电离层闪烁, 发现日本 Yamaguchi 地区 MARISAT 卫星 1.5 GHz 信号发生了峰值超过 30 dB 的严重闪烁。我国南方大部分地区处在磁赤道北异常峰附近, 电离层闪烁的发生率和幅度都非常显著^[8], 我国学者对中低纬度地区的电离层闪烁进行了大量的

观测和统计分析研究。甄卫民^[9]、龙其利^[10]、尚社平^[11-12]、王国军^[13]、胡连欢^[14]等对海南地区电离层闪烁形态和扩展 F 发生率进行了统计,发现闪烁主要发生在日落后到午夜附近,在春秋分附近出现在地方时 22:00LT 附近,在夏季出现的时间在午夜附近。林果果^[15],王斯宇等^[16]对华南地区的闪烁进行了研究,分析了深圳地区夜间电离层 TEC 耗尽事件与闪烁的相关性,结果表明,TEC 耗尽主要发生在春秋分季节;华南地区晚间多次观测到电离层 TEC 耗尽和闪烁同时发生的现象。徐继生^[17],周彩霞等^[18]对中纬度和低纬度的闪烁进行了比较,结果表明武汉闪烁出现率峰值的出现时间平均滞后于桂林 1~2 小时;低纬地区的昆明站和海口站电离层闪烁事件主要发生在春秋分的夜间时段;中纬地区的西安站电离层闪烁事件主要集中在夏季夜间时段,西安站闪烁事件发生时间比昆明站推迟大约 1 小时,比海口站推迟大约 2 小时。

综上所述,电离层闪烁形态变化的一般规律:闪烁主要发生在日落后至午夜,中纬度地区的闪烁一般滞后于低纬地区;低纬地区的电离层闪烁春秋分比冬夏季的发生率和强度高,而中纬度地区夏季闪烁发生率较高;太阳活动周期以及地磁活动对闪烁影响规律性较弱;闪烁与 TEC 耗尽、TEC 变化率有一定的相关性。也有一些个例情况,与一般规律相左,因此,对闪烁形态的观测和研究还需要广泛深入地开展。

2.2 磁暴期间的电离层闪烁研究

磁暴期间的电离层不规则体演化和电离层闪烁特点是电离层物理和空间天气研究的重点内容。国内外学者进行了大量的统计分析和个例事件研究。Basu 等^[19]认为磁暴对电离层闪烁有时触发,有时抑制,与磁静日相比,磁扰期间,赤道 F 层的电场、等离子体漂移和不稳定性的触发都出现复杂的变化,因此,Abdu^[20-22],Dabas 等^[23]在分析由磁暴产生的电场和扰动风场对赤道扩展 F 形成的影响时指出,不同相位的磁暴对赤道扩展 F 起到激发或者抑制作用。Aarons 和 DasGupta^[24]通过使用赤道台站电离层闪烁数据,认为当恢复相发生的地方时(LT)处于午夜至午夜后期间,午夜后闪烁将增强。Huang 等^[25]利用太阳高年附近 DMSP 卫星的观测数据,发现赤道地区等离子体泡在磁暴期间(特别是在初相和主相)有规律地出现,而在磁暴的恢复相,午夜前的赤道等离子体泡将受到抑制。Chandra^[26],Kumar^[27]等的研究也表明磁暴对闪烁的影响与观测站的地理位置、观测季节和磁暴不同发展阶段的地方时有关。Basu 等^[19]认为环电流对赤道 F 层不规则结构的产生/抑制有着直接或间接的重要影响。Ma Guanyi 等^[28]利用东亚中纬度地区的 GPS 电离层观测网分析了 2000 年强磁暴期间的超大尺度电子密度不规则结构的特征。李国主^[29]研究了 2002—2006 年磁暴对海南三亚地区电离层闪烁的影响,指出磁暴对电离层闪烁会产生促进或抑制作用,这取决于 Dst 指数变化率达到最大值所处的时间段。王国军^[13]选取了 2002 年 2 月—2007 年 12 月期间 159 个具有完整形态的磁暴事件,统计分析了磁暴期间海南地区电离层扩展 F 现象与磁暴相位的关系。孙文杰^[30]首次采用基于北斗同步卫星 TEC 组网观测开展电离层暴研究,分析了 2015 年爆发的本太阳活动周最大的地磁暴期间,中低纬电离层闪烁随磁暴相位变化的演化特点。

一般认为,中纬度地区的电离层闪烁很少发生,但是一些个例研究表明,中纬地区远比以前所认知的要复杂得多。Perkins^[31]提出了一种模式,用于解释中纬不规则体的形成,被称为 Perkins 不稳定性。Tsunoda^[32],Stephan 等^[33]认为偶发 E 层可能通过改变 Pedersen

电导率从而影响 R-T 不稳定性。Foster^[34] 在中纬地区观测到羽状的 TEC 增强, Ledvina 等^[35] 认为这种暴时密度增强 (SED) 结构在不规则结构的形成中发挥着重要作用。Li G 等^[36] 通过研究我国武汉地区 2002 年和 2004 年 2 次磁暴期间的电离层响应, 发现明显的扩展 F 现象, 且一直持续到午夜后, 而在 2003 年的 2 次磁暴期间, 却没有观测到闪烁, 但是在 F 层抬升期间, 都伴随有偶发 E 层。程光晖等^[37] 利用武汉电离层闪烁和 TEC 的观测数据, 分析了发生在 2004 年 7 月下旬和 11 月上旬的 2 次超强磁暴期间, GPS 信号振幅闪烁和 TEC 起伏的响应特征。杨升高等^[38] 利用赤道地区 Vamimo 站闪烁数据, 选取 2 次典型大磁暴时段重点分析 (一个触发闪烁发生, 一个抑制闪烁发生), 对比分析了磁暴发生前、发生时以及发生后连续几天电离层幅度闪烁强度和发生率的变化。Li J. 等^[39] 发现 2001 年 3 月 19 日磁暴期间, 中纬度电离层不规则体持续到次日早晨, 这是首次报道低纬到中纬度日出后的强电离层闪烁现象。在国家自然科学基金支持下, 李国主开展了“暴时东亚中低纬度电离层不规则体变化特性研究”, 利用东经 120° 附近 6 个观测站的多种观测数据, 分析了 2001—2004 年东亚地区电离层不规则体的发生时间与纬度变化特征。研究认为磁暴期间磁层/高纬产生的快速渗透电场在日落时分, 增强东向电场反转幅度, 触发不规则体发生, 而其他时段会抑制东向电场, 抑制不规则体发生。但是个例研究表明影响机制不尽相同, 2004 年 7 月的一次大磁暴期间, 暴时长时间磁层高纬渗透电场与电离层扰动发电机电场可触发产生大范围的电离层不规则体, 闪烁发生经度覆盖范围超过 180°; 而在 2004 年 11 月 7—11 日连续型强磁暴期间, 我国中低纬度不规则体分布特征在相邻经度区表现出明显的差异^[40-41]。

综上分析, 磁暴对闪烁的影响复杂多变, 既与观测季节有关, 也与磁暴不同发展阶段的地方时有关, 还可能受 E 层影响, 大量不符合统计规律的个例事件也说明对电离层闪烁发生的物理机制目前还缺乏清楚的认识, 深入研究磁暴对闪烁的影响机制对于闪烁的预报至关重要, 同时也说明, 目前很难从电动力学过程出发来建立完备的闪烁物理分布模型。

2.3 电离层闪烁的逐日变化

闪烁活动或赤道扩展 F (ESF) 出现率的逐日变化是闪烁预测的难题, 逐日变化的物理机制是日地空间物理的一个突出问题。Mendillo 等^[42] 研究了 ESF 逐日变化的热层中性风压缩机制。Tsunoda 等^[43-44] 探究了 ESF 逐日变化的起源, 认为 F 层底部的大尺度波结构 (Large Scale Wave Structure, LSWS) 与纬向漂移剪切一起作用, 产生 ESF 逐日变化, 并讨论了 R-T 不稳定性的线性增长率和极化电场对 ESF 出现率日变化的控制作用。Dabas 等^[23] 研究了印度扇区赤道和低纬度电离层闪烁出现的逐日变化, 分析了日出之前 F 层虚高及其上升率的变化与闪烁活动的关系, 闪烁出现率的日变化似乎主要受电场、中性风和地磁活动的影响。Carter 等^[45] 对平静时期东南亚地区日落后赤道等离子体泡的逐日变化信息进行了分析。

2.4 电离层闪烁模型

目前较为常用的模式有 NWRA (Northwest Research Associates, Inc) 提出的宽带电离层闪烁模式 WBMOD (Wide Band Model), 和 Béniguel^[46] 提出的全球电离层闪烁模式 GISM (Global Ionospheric Scintillation Model)。WBMOD 模式用来评估在用户指定的系统和特定条件下 (地点、时间、日期、地球物理条件等) 电离层闪烁效应的严重程度。该模式

由一个电子浓度不规则模式和一个电波传播模式组成。Groves 等^[47]将此模式应用在 SCIN-DA (Scintillation Network Decision Aid) 系统上,向通信和导航用户提供实时区域性电离层闪烁状况预报。NWRA 也提供多种电离层空间环境预报服务 (http://www.nwra-az.com/ionoscint/sp_services.html),比如全球各地每日电离层闪烁等级预报和 GPS 电离层闪烁影响图例。GISM 模式中同样包含了 2 个模式。第一个模式是 NeQuick^[48],第二个模式是多重相位屏 MPS 技术^[49-50]。在欧洲空间局的 COST271 工作组中,俄罗斯圣彼得堡大学、英国利兹大学电子与电气工程系和国际理论物理中心 (ICTP) 提出另一个结合了复相位方法与随机相位屏技术的电离层闪烁模式^[51]。在国内,肖佐和张天华,汪四成和方涵先等^[52-53],研究了 SF 现象的物理机制,建立了全球形态特性的理论模型,并通过数值模拟对赤道附近地区和中纬度地区扩展 F 特点进行了比较。罗伟华等^[54]建立了三维广义 R-T 不稳定性线性增长率的理论统计特征模型。张红波等^[55]对信号的幅度闪烁功率谱进行分析,用相位屏理论和冻结场假设条件,反演出不均匀体的特征,建立谱指数的经验模型,用于电离层闪烁发生概率的预测。

WBMOD 模型和 GISM 模型都是大尺度全球模型,其预测结果与实际观测往往存在差异,王国军^[13]讨论了 WBMOD 的缺陷,建立了一个海口单站闪烁模型。胡连欢等^[56]讨论了 GISM 在我国海南的适用性,指出有较大误差。Pierrick Hamel 等^[57]经过研究发现,由 GISM 模型对闪烁活动的预测经常出现高估和低估的情况,提出采用 Kriging 方法对电离层闪烁指数 S4 进行空间插值。Rezende 等^[58]基于数据挖掘技术对 S4 指数的时间序列进行预测,可以提前几个小时甚至 1 天。DeLima 等^[59]用神经网络预测巴西赤道纬度区域的电离层闪烁水平,根据观测数据,提前 1 小时预测夜晚 17:30LT 至 19:30LT 的闪烁水平。在国家自然科学基金的支持下,张东和开展了“磁暴期间我国低纬度地区电离层闪烁形态与机理研究”,对地磁活动与电离层闪烁发生率的关系进行了研究,结果表明,磁暴对低纬地区的电离层闪烁总体上具有抑制作用。并开展了周跳与地方时、季节、太阳活动以及地磁指数之间的研究,得出仰角大于 25°的 GPS 周跳可以作为电离层闪烁研究的替代参量,并以周跳作为主要参量,建立了一个我国低纬度地区的电离层闪烁效应模式^[60],并应用于我国低纬度地区电离层闪烁效应的预报。

3 研究内容、研究目标及需解决的关键技术问题

3.1 研究内容

进行电离层闪烁、TEC 与地磁场联合观测实验,结合子午工程观测数据,建立中低纬度空间电磁环境数据库,在此基础上,引入数据挖掘技术和人工智能方法提取闪烁与地磁变化的特征(特别是磁暴期间),分析闪烁与地磁变化的相关关系,建立闪烁与地磁变化的时空相关模式,进而建立闪烁的短时预测模型。具体研究内容有以下 3 个方面:

3.1.1 开展电离层闪烁与地磁场观测联合实验,建立数据库

利用现有设备在西安地区和福建地区开展中低纬电离层闪烁和地磁联合监测实验,结合子午工程数据平台提供的电离层和地磁数据以及其他空间环境参数,建立中低纬度空间电磁环境数据库,主要包括地磁场、地磁指数、电离层闪烁指数、闪烁出现率、TEC 以及太阳

辐射通量等参数。对各类数据进行整理和初步处理,通过时空 Kriging 等插值方法获得闪烁和地磁场的时空分布,为中低纬电离层闪烁与地磁变化的相关性分析以及建模预测奠定数据基础。目前子午工程已在中低纬地区包括北京、新乡、武汉、广州以及海南等地区建立台站进行空间环境监测,课题组依托陕西地区的 3 个地磁台站建立了地磁、TEC、闪烁监测网络,在福建地区建立闪烁监测站,可作为子午工程台链数据的补充,以得到更高空间分辨率的中低纬电离层闪烁和地磁监测数据。

3.1.2 电离层闪烁与地磁相关性分析

以中低纬电离层闪烁与地磁监测实验所得数据库为基础,利用数据挖掘技术,探究电离层闪烁与地磁变化之间的相关性,发掘二者之间仅从统计角度难以发现的、隐含的内在联系。由于磁暴期间整个日地空间环境都受到影响,发生扰动,直接或间接影响电离层不规则体产生和演化,进而影响电离层闪烁形态。因此,需要综合考虑各种因素的影响,提取相关特征,建立相关模式,明确地磁变化对闪烁的影响。

3.1.3 电离层闪烁形态建模预测

从电离层空间天气预报以及战区尺度空间环境作战保障的应用背景考虑,我们要建立的电离层闪烁模型,仅为电离层闪烁形态时空变化模型,不同于不均匀体的物理模型,也不同于电波在电离层中的传播模型。该模型用于描述中低纬度地区的电离层闪烁规律。

电离层闪烁的预测难点有两个方面,一是磁暴期间影响因素较多,造成电离层闪烁形态复杂多变,从个例研究情况看,有些影响因素并不清楚,理论上的推测缺少观测作为验证;二是平静时期电离层闪烁的逐日变化,闪烁出现率和闪烁形态每天都有差异,产生差异的物理机制非常复杂,涉及磁层、电离层和大气层的耦合以及电离层的不同分层之间的耦合。

因此,在大量的观测数据中寻找变化规律,建立经验模型是一种有效的研究思路,也是一种很有前景的研究方法。在大量的观测数据不断获取的今天,电离层和空间环境观测数据量在规模上也成为了大数据,通过数据挖掘技术,在大量观测数据中,挖掘有用信息,结合现代信号处理方法,从不同角度提取特征参量,利用人工智能方法(如神经网络、支持向量机等)通过不断训练和测试,建立考虑多种影响因素(包括经纬度、地方时、季节、太阳活动,地磁活动,闪烁与地磁的相关关系等)的电离层闪烁形态模型,实现对闪烁形态的高精度短时预测。

3.2 研究目标及需解决的关键技术问题

希望通过中低纬电离层闪烁与地磁变化的联合观测,并结合我国的“子午工程”等大型观测数据平台,建立闪烁与地磁数据库;通过分析电离层闪烁与地磁变化的时空相关性,建立相关分析模式;建立中低纬电离层闪烁形态的预测模式,对闪烁进行高精度短时预测。

研究中需要解决的关键问题有:(1)如何利用数据挖掘技术,提取闪烁与地磁的那些变化特征,建立何种相关性分析模式;(2)如何利用人工智能方法,建立电离层闪烁形态预测模型。

4 研究的基本思路

用数据挖掘技术从大量的观测数据中提取有效的、反映电离层闪烁与地磁场的变化特性

以及二者之间相关性的信息，发现数据关系，建立描述相关关系的相关模式，建立电离层闪烁短时预测模式（提前几小时、1~2天），并对结果进行实验验证，寻求物理解释。研究从数据入手，到知识结束。参考典型的数据挖掘系统结构，结合目前对电离层闪烁的认知，研究的基本思路有以下几个方面：

4.1 开展电离层闪烁与地磁场联合观测实验

电离层闪烁与地磁变化场的多站区域联合观测实验，拟利用多台电离层闪烁监测系统和多台三分量磁通门地磁仪在中纬度（西安）和低纬度（福建）地区进行观测。子午工程是我国一个大型空间环境地基监测系统，在北京、新乡、武汉、广州、海南等地区设有台站，设有电离层和地磁监测设备。我们在西安和福建建立的观测台站正好可以作为子午工程数据的补充，提高中低纬地区的观测密度。

4.2 构建电离层闪烁与地磁场联合观测数据库

构建原始数据库：数据挖掘又称为数据库中的知识发现，因此，首先要建立数据库，是数据挖掘的基础。用观测实验所得数据和从子午工程数据中心网站获取的数据，建立电离层闪烁和地磁联合数据库，包括幅度闪烁指数、相位闪烁指数、电离层 TEC、地磁场 HDZ 三分量等参量。数据库中还应包括地磁活动指数 Dst 和 K_p ，太阳辐射通量 F10.7 指数等影响闪烁变化的环境参量。此外，针对磁暴事件和电离层暴事件建立数据库。

数据预处理：由于硬件和软件的偶发错误，观测实验所收集的电离层闪烁和 TEC 数据、地磁变化场数据并不一定完美，错误数据、空缺值和粗大值均可能出现，所以，在分析、建模前必须非常谨慎地修正这些数据，在数据挖掘中的数据清理包括填补遗漏的数据值、平滑有噪声数据、识别或除去异常值等。

4.3 特征提取，建立数据仓库

网格立方体数据：为了更好地提取信息，首先对数据库中的电离层和地磁监测数据进行时空插值，获得相关性分析和预测建模所需时空分辨率的网格数据，形成地方时、经度和纬度 3 个维度的立方体数据。

提取特征：将数据挖掘中常用的特征量与实际物理意义结合，提取能反映电离层闪烁和地磁变化的特征参量。常用的特征提取方法包括主成分分析（PCA）、线性判别分析（LDA）、局部保留映射（LPP）、局部线性嵌入（LLE）、等距离映射（Isomap）等。用这些方法尝试对描述电离层和地磁的物理量或变换量进行特征提取，包括闪烁出现率、闪烁开始时间、持续时间、闪烁强度峰值时间、TEC、TEC 变化率、TEC 耗尽地方时和持续时间、地磁变化场、地磁 Dst 指数和 K_p 指数、磁暴相位地方时等。还可将闪烁和地磁看作信号，进行信号处理，提取信号特征，如描述信号非线性、非平稳特性的特征，反映信号时频变化的特征，对信号进行多分量分离后的分量特征等。

面向数据分析的数据仓库：为了便于分析，快速获取信息，以网格立方体数据为基础，根据相关分析和预测需求，加入特征参量，并对特殊时期如磁暴期间、电离层暴期间、春秋分、夏至、冬至等进行标注，建立多维度分析型数据库，即数据挖掘中的数据仓库。

4.4 电离层闪烁与地磁场相关性分析

用数据挖掘技术建立电离层闪烁与地磁场的相关模式，按以下技术路线实现：明确相关性挖掘任务，包括分类、聚类、关联规则、时序模式、依赖关系或依赖模型发现、异常和趋势发现，代表个例事件的异常点检测等；根据任务选择数据仓库中的特征参量，分为训练数据集特征数据集，分别用于对模型的训练和测试；选择挖掘方法，包括机器学习方法、统计方法、数据库方法和神经网络方法等。可以选择一种或多种方法联合进行闪烁与地磁的相关性模式建立，用训练集数据训练模型，根据实际物理需求确定判定准则，用测试数据集对模型进行测试，以获得最佳模型；用相关模式进行闪烁和地磁的相关性分析，对分析得到的结果进行合理解释，获得有意义的分析结果；对于分析结果，进行实验验证，使数据分析与实际物理机理相符合。

4.5 电离层闪烁形态预测模型

结合挖掘出的中低纬电离层闪烁特征信息，考虑多种影响因素（包括经纬度、地方时、季节、太阳活动，地磁活动，闪烁与地磁的相关关系，利用人工智能方法（如神经网络、支持向量机等）通过不断训练和测试，建立电离层闪烁形态模型，实现对闪烁形态的高精度短时预测。电离层闪烁形态预测模型分为单站模型和区域模型。单站模型利用站点上空的闪烁指数时间序列建立模型，可对时间序列用小波分解、经验模态分解（EMD）等时频分析方法，分解为表达不同时频变化尺度的多分量序列，对各分量分别建立预测模型，最后将各分量预测结果进行信息融合。区域模型对闪烁网格立方体数据建立模型，利用时空 kriging、张量秩分解等方法结合人工智能方法建立闪烁形态的区域时空预测模型。

5 结 语

鉴于地磁变化对电离层闪烁影响的复杂性，以及闪烁的逐日变化性，单纯的统计分析不足以描述电离层闪烁和地磁变化的相关性，而从物理机制上建模又较为困难。本文利用数据挖掘和人工智能方法，以大量观测数据为驱动，探究电离层闪烁与地磁变化之间的相关性，训练电离层闪烁形态模型，以期能够深入细致地描述闪烁与地磁相关性和实现闪烁形态短时高精度预测，为电离层闪烁和不规则体的研究提供了新的思路，也为战区尺度区域空间天气和电离层电波传播环境保障提供了理论基础和技术支持。

参考文献

- [1] Jules Aarons. Global Morphology of Ionospheric Scintillations [J]. Proceedings of the IEEE, 1982, 70 (4): 360-378
- [2] Jules Aarons. 50 Years of Radio — Scintillation Observations [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1997, 39 (6): 7-12
- [3] Basu S., MacKenzie E., and Basu S. Ionospheric constraints on VHF/UHF communications links during solar maximum and minimum periods [J]. Radio Sci., 1988a, 23: 363-378
- [4] Muella M. T. A. H., Paula E. R. D., Kantor I. J., Batista I. S., Sobrala J. H. A., Abdua M.