

地震地球物理台网背景场 图像处理模型、软件系统及实例

李正媛 刘春国 王 军 黄经国 刘高川
周克昌 赵 刚 张素琴 韦 进 吕品姬 著
叶 青 郝洪涛 赵 斌 李胜乐



地震出版社

地震地球物理台网背景场图像处理 模型、软件系统及实例

李正媛 刘春国 王 军 黄经国 刘高川
周克昌 赵 刚 张素琴 韦 进 吕品姬 著
叶 青 郝洪涛 赵 斌 李胜乐



地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震地球物理台网背景场图像处理模型、软件系统及实例/李正媛等著.

—北京:地震出版社,2018.11

ISBN 978-7-5028-4996-2

I. ①地… II. ①李… III. ①地球物理场-地震观测-图像处理-研究

IV. ①P315.63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 246079 号

地震版 XM2482

地震地球物理台网背景场图像处理模型、软件系统及实例

李正媛 刘春国 王 军 黄经国 刘高川 周克昌 赵 刚 著
张素琴 韦 进 吕品姬 叶 青 郝洪涛 赵 斌 李胜乐

责任编辑:张宝红

责任校对:凌 樱

出版发行:地震出版社

北京市海淀区民族大学南路9号

邮编:100081

发行部:68423031 68467993

传真:88421706

门市部:68467991

传真:68467991

总编室:68462709 68423029

传真:68455221

专业部:68721991 68467982

<http://seismologicalpress.com>

经销:全国各地新华书店

印刷:北京鑫丰华彩印有限公司

版(印)次:2018年11月第一版 2018年11月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:330千字

印张:13.25

书号:ISBN 978-7-5028-4996-2/P (5701)

定价:100.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

前 言

我国地震地球物理台网在长期观测发展中，广泛融入多行业地球科学观测技术，形成具有地震行业特色的地磁地电、地下流体、地壳形变三大台网体系，拥有地磁、重力、GNSS、水位、水温、地电、地倾斜、地应变等多种观测手段。基于我国地震地球物理台网长期观测数据进行加工处理，展示全国地球物理、地球化学动态变化图像（下称：背景场图像），有利于挖掘台网探测成果，更好服务于地震预报与地球科学研究促进台网发展优化。

建立科学、系统的地震地球物理台网背景场图像处理模型与处理软件尚属首次，具有较强的探索性，主要思路是：①选择物理属性明确、辨识性强的图像要素，使图像能够反映地壳形变、地磁地电、地下流体台网观测获得的运动与变化信息，体现高分辨力的观测特点，充分体现台网探测的时空覆盖范围。②吸纳学科长期观测研究成果，沉淀学科长期研究获得的形变、重力、地磁、地电、水温、水位的成场模型算法，满足地球科学观测与地震预报研究的背景场态势描述需要。③紧密衔接地震地球物理台网观测数据与处理、绘图的工作链，有利于台网观测与产品图像制作常态化，形成可持续性、规范性的台网监测、产出、应用工作新流程。

依据中国地震台网中心承担的“十一五”中国地震背景场探测项目，基于现有的我国数字化地震地球物理台网观测技术系统，研究建立了图像处理模型、产品加工、汇集存储、展示与服务等功能模块为一体的“背景场图像处理软件系统”。系统分布式部署在国家前兆台网中心、地磁台网中心、重力台网中心、形变台网中心、地电台网中心、地下流体台网中心节点，构成我国地震地球物理台网背景场图像处理技术平台系统。该系统建成后，通过规范台网产出，得到了以下专业图件：①中国基本磁场各要素动态变化图像；②重力场动态变化图像；③GNSS 台网水平运动速度场，垂直形变场图像；④微动态地倾斜图、地

应变区域变化图像；⑤地电阻率变化图像；⑥水位、水温、氦、汞变化图像。

“背景场图像处理软件系统”由中国地震台网中心组织专家团队，耗时三年余时间研发完成。李正媛负责组织实施、构架设计、模型遴选等工作，刘春国、刘高川、周克昌完成需求分析和总体设计等工作；王军、黄经国、陶冶、纪寿文等全程跟踪软件构建和联调优化与运行等工作。项目实施中，中国地震局地壳应力研究所赵刚、贾鸿飞、陈军组织学科模型构建及软件开发等工作；中国地震局地震研究所李盛乐、刘珠妹、刘坚完成学科数据处理模块开发和产品数据库建设等工作；中国软件公司谢树平团队完成存储、展示与服务网站平台建设及系统集成等工作。各学科专家在沉淀长期研究成果基础上，完成了图像处理模型及方法的筛选及凝练，其中，定点形变：陈志遥、邱泽华、吕品姬、唐磊；重力：李辉、韦进、郝洪涛；GNSS：赵斌，王东振；地磁：杨冬梅、张素琴；地下流体：刘春国、陈华静、王建国、张彬；地电：叶青、杜学彬、王建军。

为了推进这些图像产品在监测预报、防震减灾以及科学研究中的应用，让地震行业内用户了解这些图像产品的整个加工与制图过程，为从事地球科学相关专业是师生研究与学习提供参考，我们组织编写了《地震地球物理台网背景场图像处理模型、系统及实例》一书。本书共分为三篇，第一篇介绍背景场图像处理模型与处理流程，第二篇介绍背景场图像处理软件系统构成与功能实现，第三篇为背景场图像实例。李正媛、刘春国组织了本书的规划、统稿工作，张宝红完成了本书的编辑。各章主要编写执笔人有刘春国、黄经国、王军、张素琴、韦进、吕品姬、叶青、赵斌、郝洪涛。本书是在中国地震局地震监测预报业务工作改革的背景下，在监测预报司领导下，在形变、电磁、流体学科组及相关单位的支持参与下，由中国地震台网中心组织编写，在此一并表示感谢！

作者

2018年10月

目 录

第一篇 地震地球物理台网背景场图像处理模型

第 1 章 连续重力台网	3
1.1 台网概况与基本定义	3
1.2 观测数据预处理	4
1.2.1 常规预处理	4
1.2.2 数据归算	4
1.3 基于重力台站观测的重力场连续变化动态图像	9
1.3.1 成图要素	9
1.3.2 处理模型	9
1.3.3 制图流程	10
1.4 重力台网 M_2 波潮汐因子动态变化空间图像	11
1.4.1 成图要素	11
1.4.2 处理模型	11
1.4.3 制图流程	11
1.5 重力台站观测数据时频变化图像	12
1.5.1 成图要素	12
1.5.2 处理模型	13
1.5.3 制图流程	13
第 2 章 流动重力台网	15
2.1 台网概况与基本定义	15
2.2 流动重力数据处理	16
2.3 重力场动态变化图像	17
2.3.1 成图要素	17
2.3.2 处理模型	17
2.3.3 制图流程	18
2.4 重力值时间序列图像	18
2.4.1 成图要素	18
2.4.2 处理模型	19
2.4.3 制图流程	19

2.5 重力变化速率背景图像	20
2.5.1 成图要素	20
2.5.2 处理模型	20
2.5.3 制图流程	20
第3章 GNSS 台网	21
3.1 台网概况与基本定义	21
3.2 GNSS 数据处理	21
3.3 GNSS 基准站坐标时间序列图	23
3.3.1 成图要素	23
3.3.2 处理模型	23
3.3.3 制图流程	23
3.4 水平运动速率图	24
3.4.1 成图要素	24
3.4.2 处理模型	24
3.4.3 制图流程	24
3.5 垂直运动速率图	25
3.5.1 成图要素	25
3.5.2 处理模型	25
3.5.3 制图流程	25
第4章 地倾斜、地应变台网	26
4.1 台网概况与基本定义	26
4.2 数据预处理	27
4.3 微动态倾斜矢量变化图	28
4.3.1 成图要素	28
4.3.2 处理模型	28
4.3.3 制图流程	29
4.4 洞体应变月变化空间分布图	30
4.4.1 成图要素	30
4.4.2 处理模型	30
4.4.3 制图流程	31
4.5 地倾斜地应变 M_2 波潮汐因子相对月变化空间分布图	31
4.5.1 成图要素	31
4.5.2 处理模型	31
4.5.3 制图流程	34
4.6 应变参数变化图	35
4.6.1 成图要素	35
4.6.2 处理模型	35
4.6.3 制图流程	39

第5章 地磁台网	41
5.1 台网概况与基本定义	41
5.2 一般预处理	43
5.3 中国基本磁场各要素动态变化图像	44
5.3.1 算法模型	44
5.3.2 处理模型	44
5.3.3 制图流程	45
5.4 地磁日变化相关参数空间分布图像	46
5.4.1 算法模型	46
5.4.2 处理模型	46
5.4.3 制图流程	47
5.5 地磁日变畸变空间分布图像	48
5.5.1 算法模型	48
5.5.2 处理模型	48
5.5.3 制图流程	50
5.6 磁扰事件相关参数空间分布图像	50
5.6.1 算法模型	50
5.6.2 处理模型	51
5.6.3 制图流程	52
5.7 地磁低点位移空间分布图	53
5.7.1 算法模型	53
5.7.2 处理模型	53
5.7.3 制图流程	54
第6章 地电台网	55
6.1 台网概况与基本定义	55
6.2 数据预处理	56
6.2.1 一般预处理	56
6.2.2 插值	56
6.3 地电阻率相对变化分布图	57
6.3.1 成图要素	57
6.3.2 处理模型	58
6.3.3 制图流程	58
6.4 地电阻率归一化变化速率等值线分布图	60
6.4.1 成图要素	60
6.4.2 处理模型	60
6.4.3 制图流程	62
6.5 地电流场空间分布图	64
6.5.1 成图要素	64

6.5.2 处理模型	64
6.5.3 制图流程	65
第7章 地下流体台网	66
7.1 台网概况与基本定义	66
7.2 数据预处理	67
7.2.1 一般预处理	67
7.2.2 测量单位修正	68
7.2.3 标定误差分配	68
7.2.4 水位高程校正	69
7.2.5 缺数插值	70
7.3 水位、水温变化图制作	70
7.3.1 成图要素	70
7.3.2 处理模型	71
7.3.3 制图流程	72
7.4 水位潮汐因子月变化图	73
7.4.1 成图要素	73
7.4.2 处理模型	74
7.4.3 制图流程	75
7.5 氦、汞相对变化图	76
7.5.1 成图要素	76
7.5.2 处理模型	76
7.5.3 制图流程	77
7.6 水位、水温同震变化图	78
7.6.1 成图要素	78
7.6.2 处理模型	78
7.6.3 制图流程	79

第二篇 地震地球物理台网背景场图像处理软件系统

第1章 系统总体架构	83
1.1 系统概述	83
1.2 系统设计	83
1.2.1 总体架构设计	83
1.2.2 总体功能设计	85
1.3 系统流程	87
1.3.1 产品交换、存储、管理流程	88
1.3.2 产品定制、展示、服务流程	89
1.3.3 数据产品处理与加工流程	90

1.4 数据流程	91
1.4.1 数据流程原则	91
1.4.2 基本数据流程	91
1.4.3 A类产品数据流程	92
1.4.4 B类产品数据流程	92
1.4.5 C类产品数据流程	93
1.4.6 D类产品数据流程	93
1.5 系统运行	95
1.6 系统安全	96
1.6.1 认证授权机制	96
1.6.2 密码安全设计	96
1.6.3 功能访问控制	97
1.6.4 数据访问控制	98
1.6.5 内外网访问控制	98
1.6.6 审计功能	98
第2章 系统分项功能	100
2.1 产品存储交换与管理	100
2.1.1 数据交换配置项	100
2.1.2 数据库管理配置项	100
2.1.3 系统管理配置项	102
2.1.4 数据统计配置项	104
2.1.5 系统运行监控配置项	104
2.2 产品可视化展示	106
2.2.1 图形可视化展示配置项	106
2.2.2 学科图形产品定制展示配置项	107
2.2.3 产品服务配置项	109
2.3 数据处理与加工	109
2.3.1 模块总体设计	110
2.3.2 数据处理模块	111
2.3.3 数据产品加工模块	113
2.3.4 图形产品加工模块	113
2.3.5 时序分析通用功能子系统	114
第3章 系统数据结构	116
3.1 数据的存储策略	117
3.2 结构化数据	117
3.2.1 数据库设计规范	117
3.2.2 数据库建立与命名	117
3.2.3 数据表建立与命名	118

3.2.4 其他设计规范	119
3.2.5 数据库逻辑设计	119
3.3 非结构化数据	123
3.3.1 数据格式设计	124
3.3.2 存储目录划分	124
第4章 系统集成接口	125
4.1 数据集成	125
4.1.1 系统分包数据访问接口设计	125
4.1.2 门户网站数据集成设计	126
4.2 应用集成	126
4.2.1 系统监视集成设计	126
4.2.2 图形可视化展示集成设计	126
4.2.3 算法集成设计	126
4.3 界面集成	126
4.3.1 门户网站界面集成设计	126
4.3.2 系统分包界面集成设计	127
4.4 架构集成	127
4.5 系统接口	127
第5章 系统使用基础	130
5.1 系统部署	130
5.1.1 硬件部署	131
5.1.2 软件部署	133
5.2 存储与交换备份	136
5.2.1 数据交换配置	136
5.2.2 数据备份配置	136
5.2.3 数据表订阅	137
5.2.4 数据交换监控	138
5.2.5 数据备份与恢复	138
5.3 可视化展示（前兆门户网站）	139
5.3.1 内容发布	139
5.3.2 数据服务	141
5.3.3 台网运行	143
5.3.4 专业产品	144
5.3.5 网站管理	146
5.4 数据处理与加工	147
5.4.1 数据处理与加工操作（示例）	147
5.4.2 十三张图	155
5.4.3 交互制图	155

第三篇 地震地球物理台网背景场图像实例

第 1 章 重力台站	159
1.1 重力场动态变化图像	159
1.2 重力台网 M_2 波潮汐因子动态变化空间图像	160
1.3 重力台站观测数据时频变化图像	161
第 2 章 流动重力	163
2.1 新疆西部重力场动态变化图像	163
2.2 点值时间序列图像	164
2.3 重力场变化速率背景图像	165
第 3 章 GNSS	167
3.1 坐标时间序列	167
3.2 水平运动速度图	167
3.3 垂直形变场	170
第 4 章 倾斜应变	171
4.1 微动态地倾斜空间分布图	171
4.2 洞体应变月变化分布图	171
4.3 地倾斜、应变 M_2 波潮汐因子变化空间分布图	172
4.4 应变参数月变化空间分布图	173
4.4.1 面应变变化空间分布图	173
4.4.2 最大主应变变化空间分布图	174
第 5 章 地 磁	176
5.1 中国地磁基本磁场各要素动态变化图像	176
5.2 地磁日变化相关参数空间分布图像	180
5.3 地磁日变畸变空间分布图像	181
5.4 磁暴急始幅度空间分布图	182
5.5 地磁低点位移空间分布图	183
第 6 章 地 电	184
6.1 地电阻率相对变化分布图	184
6.2 地电阻率归一化速率等值线分布图	185
6.3 大地电流场空间分布图	187
第 7 章 地下流体	189
7.1 水位、水温变化空间分布图	189
7.2 水位潮汐因子月变化图	192
7.3 氦、汞相对变化图	192
7.4 水位、水温同震变化图	192
参考文献	196

第一篇 地震地球物理台网背景场图像处理模型

第1章 连续重力台网

1.1 台网概况与基本定义

地球时变重力场包括地球系统物质分布及运移的丰富信息,它直接反映了地球各圈层最基本的物质及其变化特性。高精度连续重力观测为我们提供了研究地球时变重力场的有效手段,记录了在日月等天体力源和各种区域及全球物理场变化的作用下,地球圈层间自由或受迫运动所导致的重力场潮汐和非潮汐变化。

通过多年的建设,中国地震局、中国科学院和教育部等多部委共同建成了一个覆盖中国大陆的、集数据自动汇集与数据库式管理、仪器远程监控和数据图形化分析处理为一体的连续重力观测台网。其平均空间分辨率约 400km。观测仪器包括 GWR 超导、PET/gPhone、DZW、GS15 和 TRG-1 在内的分布在近 78 个台站的 84 套高精度的连续重力观测仪。产出的观测数据可用于活动断层、地壳运动、地震监测和海潮等地球动力学现象的深入研究。

目前连续重力观测台网产出主要有:“基于连续重力观测站测定的重力场动态变化图像”、“重力固体潮 M_2 波潮汐因子动态变化图像”、“重力台站观测数据时频变化图像”,有关上述 3 类图像涉及到的定义约定如下:

连续重力观测:利用高精度数字化相对重力仪在固定台站进行重力观测,连续记录观测站点的重力相对变化。

重力基准:利用高精度绝对重力仪和相对重力仪所获得的重力起算值和尺度因子。

重力潮汐基准:利用高精度重力潮汐观测仪器精密测定重力基准站的重力潮汐基准值。

连续重力观测的要素:连续重力观测到的时变重力场和时变潮汐场是一个矢量场。它是空间位置和时间的函数。首先是时变重力场,它是重力的垂直方向时变过程。影响时变重力场的因素有很多,包括潮汐、大气、海洋、陆地水等。将扣除潮汐影响后的要素作为研究对象。其次是时变潮汐场。潮汐场由潮汐参数来描述,潮汐参数为潮汐因子和相位滞后。潮汐因子是一个变化较为缓慢的物理矢量,是衡量地壳粘弹性变化的重要物理量之一。

连续重力观测数据预处理:指对连续重力观测相对记录变化曲线上非天然重力场变化这部分内容的去除,预处理包括尖峰的剔除、台阶的改正、错误数据的删除。进行过数据预处理的整时值数据称为预处理时数据。

基于连续重力观测站测定的重力场变化:也称为重力非潮汐变化。它是形成时变重力场的基本要素。对预处理后的“预处理时数据”利用消去-恢复法的方法归算数据,并进一步进行固体潮和零漂改正得到基于连续重力观测站测定的重力场变化。

重力固体潮 M_2 波潮汐因子的背景观测值：是重力固体潮潮汐参数中一个最为重要的要素。它是形成时变重力潮汐场的基本要素。对预处理后的所有有效“预处理时数据”利用调和分析方法进行潮汐分析。并提取 M_2 波的潮汐因子作为背景观测值。

重力固体潮 M_2 波潮汐因子的变化观测值：是描述重力潮汐因子变化的要素。对指定时间长度（月、季和年）的“预处理时数据”利用调和分析方法进行潮汐分析，并计算其中 M_2 波潮汐因子的值和背景观测值的差值，作为重力固体潮 M_2 波潮汐因子的变化观测值。

1.2 观测数据预处理

1.2.1 常规预处理

对观测数据进行产品数据加工处理之前，必须根据产品需求进行数据预处理，得到能够正确反映研究对象的预处理数据后方可用于产品加工。输入数据为原始观测数据，输出时值数据为常规预处理数据。

预处理内容包括：

（1）观测数据的降采样：利用低通滤波器将原始的高采样率观测数据降低为可用于后续潮汐分析的分钟值或小时值数据，滤波器通常采用平均滤波。

（2）错误数据处理：结合观测日志，对因仪器参数错误或观测系统工作不正常或不稳定产出的错误数据处理为缺记。

（3）突跳数据处理：结合观测日志，对压制曲线动态的不明原因显著单点突跳数据处理为缺记。

（4）台阶数据处理：因仪器参数、仪器状态改变造成的台阶，台阶前后数据存在定量的加减常数关系，根据台阶前或后的数据差，对台阶前数据进行改正消除台阶。

（5）格值系数修正：当仪器产出不是重力加速度而是电压值时，需要根据仪器提供的格值系数将观测数据转换为具有特定物理含义的观测数据序列。

（6）质量审核分类，根据连续重力观测月评比办法，计算数据质量、观测数据等级等，计算各项质量指标及其得分，对于优、良类数据可进行下一步产品加工。

数据处理流程如图 1-1-1。

上述各项预处理内容属于常规性的处理，其处理模型参见《前兆台网数据处理与评价方法理论模型》（周克昌等，2011）；

1.2.2 数据归算

为提高背景场图像绘图参数的精确性和科学性，在考虑重力数据中的线性和非线性零漂的情况下分离重力固体潮观测数据中的潮汐和非潮汐信号，就必须要对常规预处理数据进行数据归算。输入数据为常规预处理数据，输出为归算时值数据。归算方法处理模型由如下 7 个部分组成。7 个部分之间的关系如图 1-1-2。

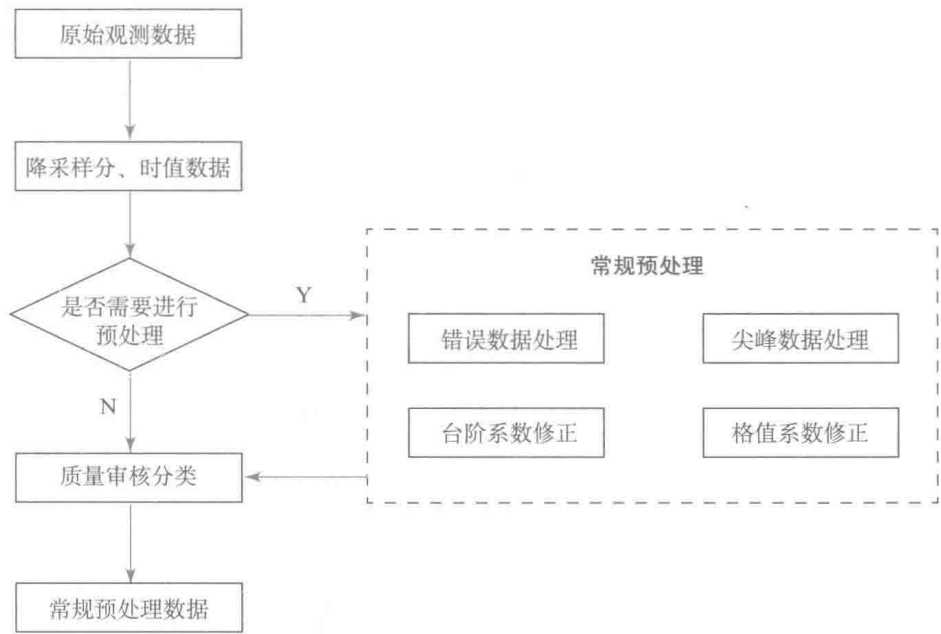


图 1-1-1 重力常规预处理流程

1) 常规预处理数据的潮汐改正

利用经纬度、时区和高程数据，采用重力理论固体潮计算公式改正常规预处理数据，得到重力残差。

输入数据：仪器纬度（Lat）、仪器经度（Lon）、仪器高程（Hig）、观测数据时区（Zone）、常规预处理数据 g_{obs} 。

输出数据：重力残差 g_{res} 。

处理模型：

$$g_{res} = g_{obs} - g_{theory} \tag{1-1-1}$$

式（1-1-1）中 g_{theory} 为理论固体潮，计算模型参见《前兆台网数据处理与评价方法理论模型》（周克昌等，2011）。

2) 重力残差漂移改正

利用多项式拟合的方法对重力残差进行漂移改正，得到漂移改正值。

输入数据：多项式阶数 N 、重力残差 g_{res} 。

输出数据：漂移改正值 g'_{res} 和漂移 g_{drift} 。

处理模型：

$$g_{res} = g'_{res} + g_{drift} \tag{1-1-2}$$