

制项目 (2017YFB0503700)

高校创新能力提升计划项目 (PXM2016_014210_000060)

计划一般项目 (SQKM201710016005)

北京市优秀人才培养资助项目 (2014000020124G058)

建筑塔式起重机智能指挥防碰撞 预警监控系统开发与应用

Intelligent Anti-collision Monitoring and Warning Command System
Development and Application for Construction Tower Crane

周命端 郭际明 吕京国◎著

中国建筑工业出版社

建筑塔式起重机智能指挥防碰撞 预警监控系统开发与应用

周命端 郭际明 吕京国 著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑塔式起重机智能指挥防碰撞预警监控系统开发与应用/周命端, 郭际明, 吕京国著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018.5
ISBN 978-7-112-21999-5

I. ①建… II. ①周… ②郭… ③吕… III. ①建筑机械-塔式起重机-避碰-预警系统-监视控制 IV. ①TH213.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 058370 号

本书系统地针对基于卫星导航定位方法(GNSS)的建筑塔式起重机智能指挥、防碰撞预警等监控技术和方法及其系统集成开发与应用作了深入研究与总结。主要包括以 GPS 为例阐述了导航卫星监控信号实时交换与并行解码技术和方法, 提出了一种利用数据流方式与多线程技术相结合的原始二进制数据实时并行在线解码方法, 解决了多路信号同步采集与实时处理问题; 以 GPS 为代表, 分析了导航卫星伪距差分信号的智能指挥与防碰撞预警的监控精度, 重点研究了 GPS 单历元双差整周模糊度快速确定算法, 提出了一种基于双频相关法(DUFCON)与直接计算法(DC)组合的整周模糊度快速确定算法(FARSE), 该方法可作为 GNSS 建筑塔式起重机智能指挥与防碰撞预警监控分析的一个实时算法, 并提出了单历元直接确定 GPS L_2 、 L_n 和 L_w 相位观测值整周模糊度的扩展 DUFCON 方法(E_DUFCON), 工程实践表明 L_n 定位解具有优越性; 发明公开了一种用于建筑塔式起重机的 GNSS 健康监测预警系统和方法, 发明创造了一种建筑塔式起重机及其吊装定点放样辅助系统和一种 GNSS 双流动站建筑塔式起重机, 在此基础上, 又发明公开了一种建筑塔式起重机群及吊装作业防碰撞预警系统和方法, 研制了一套集多传感器于一体的建筑塔式起重机群智能指挥防碰撞预警监控系统(GNSS_TCIAC), 包括两个主要系统模块(GNSS_PLS 和 GNSS_ACS), 经多次实验测试与工程应用实践, 验证了其工程应用能力。

责任编辑: 石枫华 王 磊
责任设计: 李志立
责任校对: 王 瑞

**建筑塔式起重机智能指挥防碰撞
预警监控系统开发与应用**
周命端 郭际明 吕京国 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路 9 号)
各地新华书店、建筑书店经销
北京红光制版公司制版
廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 9¼ 字数: 231 千字
2018 年 5 月第一版 2018 年 5 月第一次印刷
定价: 36.00 元
ISBN 978-7-112-21999-5
(31779)
版权所有 翻印必究
如有印装质量问题, 可寄本社退换
(邮政编码 100037)

前 言

为加快中国城市化的发展进程和提高中国城市化的发展水平,缓解人们住房的刚需问题,改善人们的居住环境,我国如火如荼地大力开展房地产工程项目建设。随着我国建筑工程楼宇群建设规模及密集程度的逐渐扩大和先进高新科学技术及手段的进步,建筑工程行业里使用较多的建筑施工塔式起重机群安全运行智能指挥与防碰撞预警监控技术、方法将会或已经走向现代化高新科学技术和手段代替传统人工值守模式的发展道路。针对建筑施工塔式起重机群智能指挥与防碰撞预警监控技术、方法的研究一直是建筑工程行业施工和监管部门长期关注且亟需解决的焦点课题。

针对建筑施工塔式起重机群在狭小的施工场地高密度布放、重强度作业、大重量承载、全方位范围内吊装运行,在高空交叉重叠混杂,一旦发生机械故障、吊运物件脱落、塔式起重机群之间或塔式起重机与建筑物之间发生相互碰撞,都将可能造成重大的人员伤亡和严重的经济损失,严重影响建筑工程项目施工进度,造成不良社会影响。目前,对建筑施工塔式起重机群安全运行状态的指挥与防碰撞监控正处于传统的人工值守模式,这种模式一定程度上缺乏实时性、自动化和智能化,建筑施工塔式起重机群的安全监控也难以得到保障。为攻克这一科学技术难题,考虑到卫星导航定位方法(GNSS)具有先天独特的优势,且它是伴随着现代科学技术的发展而建立起来的新一代全球卫星导航定位系统,目前包括美国的GPS、俄罗斯的GLONASS、中国的BDS以及欧盟的GALILEO,这类卫星导航定位系统在定位原理和系统组成等方面具有许多相似之处。考虑到GPS系统建成最早,拥有全球最多用户,本书在阐述部分内容及原理时将以GPS为代表,将卫星导航定位方法(GNSS)集成于建筑施工塔式起重机群智能指挥与防碰撞预警监控的工程应用中,为建筑工程施工吊装作业全过程监控安全运行状态提供一种有效的新型解决方案,同时对于提高建筑施工塔式起重机群智能管理的现代化水平,具有先进创造性与技术推广价值。

本书共分八章:

第1章:绪论。系统地阐述基于卫星导航定位方法(GNSS)的智能指挥与防碰撞预警监控建筑施工塔式起重机群安全运行与智能管理的研究背景和先进意义,综述相关技术与方法的国内外研究现状及未来发展趋势。以GPS为代表分析目前现有的高精度GPS实时动态监控理论和方法中存在的不足或尚待改进、完善的科学技术问题以及开展本书研究工作的必要性和先进性,最后简要介绍本书的研究目的、研究内容、技术路线和全书的组织结构。

第2章:导航卫星监控信号实时交换与并行解码技术和方法。以GPS为代表,从用户终端串口通信、监控信号无线传输与多路接收以及用户端与服务器端通信软件设计等三个角度系统地阐述导航卫星监控信号实时交换技术;提出一种基于数据流方式和多线程技术相结合的导航卫星监控信号原始二进制数据实时并行在线解码方法,以某GPS-OEM板

为例,对其 OEM 板的数据结构进行了解析,利用多线程技术对多路 OEM 板输出的原始二进制数据(包括观测值文件和广播星历文件)向标准 RINEX 格式实时并行在线格式转换进行程序实现与验证。

第 3 章:导航卫星伪距差分智能监控精度分析。以 GPS 为代表概述导航卫星信号的基本观测量(包括伪距观测值、载波相位观测值和多普勒频观测值),对 GPS 伪距观测值的概念作了详细介绍。重点探讨 DGPS 计算模式和平滑 DGPS 计算模式的 GPS 实时动态监控方法,给出了详细的算法公式,分别从静态模拟动态、实际动态两个角度的试验对 DGPS 计算模式和平滑 DGPS 计算模式的智能监控精度作比对分析。比较分析伪距观测值(C/A 码、 P_1 码和 P_2 码)在 DGPS 计算模式下的差分观测值精度和实时动态监控精度,同时为 GPS 单历元双差整周模糊度快速确定算法中整周模糊度初值确定的方法优选提供参考依据。

第 4 章:GPS 单历元双差整周模糊度快速确定算法。介绍 GPS 单历元整周模糊度的概念,推导简要的计算公式。分析已有的几种典型 GPS 双差整周模糊度快速确定算法,重点分析 DUFCOM 方法和 DC 算法的提出背景,并详细地推导算法公式,在此基础上,提出一种新的基于 DUFCOM 和 DC 算法的 GPS 单历元双差整周模糊度快速确定组合算法(FARSE),并进行实验验证新方法的可行性和有效性,实践表明该方法可作为建筑施工塔式起重机群智能指挥与防碰撞预警监控的一个实时算法,为 GNSS 建筑施工塔式起重机群智能指挥与防碰撞预警监控系统开发与应用研究奠定坚实的算法基础。

第 5 章:E_DUFCOM 方法提出及其效能分析。在分析已有的 DUFCOM 方法单历元确定 GPS L_1 载波相位观测值整周模糊度理论的基础上,对其进行衍生与方法扩展,首次提出一种单历元直接确定 GPS L_2 、 L_n 和 L_w 相位观测值整周模糊度的新方法,即 Extension DUFCOM 方法,统一原有的 DUFCOM 方法,概括为 E_DUFCOM 方法,并给出 E_DUFCOM 方法的特征值条件。然后,基于 E_DUFCOM 方法,从理论和实践角度对四种相位观测值(L_1 、 L_2 、 L_n 和 L_w)在整周模糊度解算效率和定位解精度两方面进行效能分析。

第 6 章:建筑施工塔式起重机与系统。发明公开一种用于建筑施工塔式起重机的 GNSS 健康监测预警系统和方法,在确保建筑施工塔式起重机自身健康的前提下,发明创造一种建筑施工塔式起重机及其吊装定点放样辅助系统,该建筑施工塔式起重机包括横臂、吊绳和吊钩,该建筑施工塔式起重机与一吊装定点放样辅助系统配合,辅助建筑塔式起重机实施精准定点、放样工作,开发相应的系统模块(GNSS_PLS),实现智能指挥建筑塔式起重机吊装作业功能,而后又发明创造一种 GNSS 双流动站建筑施工塔式起重机,根据应用环境的不同对系统模块(GNSS_PLS)进行完善和优化,在此基础上,又发明公开一种建筑施工塔式起重机群及吊装作业防碰撞预警系统和方法,开发相应的系统模块(GNSS_ACS),实时监控建筑施工塔式起重机群的吊绳及横臂的空间距离,实现建筑施工塔式起重机群防碰撞预警功能,智能监控建筑施工塔式起重机群的安全运行,全方位、多角度、高准确度避免建筑施工塔式起重机群因吊装作业工作区域交叉重叠而可能发生的碰撞事故。依据上述发明创造的技术方案,能够减少人工值守方法的过程环节,提高建筑施工塔式起重机吊装作业操作的安全性、直观性、简利性、准确性和高效性。

第 7 章:GNSS 建筑塔式起重机智能指挥与防碰撞预警监控系统。系统地研究基于高

采样率($\leq 1\text{s}$)卫星导航定位方法(GNSS)的建筑施工塔式起重机群智能指挥与防碰撞预警系统(GNSS_TCIAC)的总体设计思路(主要包括 GNSS_PLS 和 GNSS_ACS 开发思路)、吊装定位放样元素计算方法及防碰撞预警计算模型建立思想、遵循原则以及告警距离确定方法;然后从建筑工程施工需求层面上模拟设计一种应用试验,从试验方案设计、信号(微弱)干扰下导航卫星信号动态监控精度以及防碰撞预警效果等三个角度对 GNSS_TCIAC 系统的主要功能及工程应用潜力进行试验测试与验证;最后,将 GNSS_TCIAC 系统应用于周口店遗址保护建筑工程施工塔式起重机监控中,通过实际工程应用检验与测试,获得了满意结果,验证了 GNSS_TCIAC 系统具备了工程应用能力。

第 8 章:总结与展望。对本书研究工作进行系统总结,给出本书的研究结论,并凝炼本书的特色与创新之处,最后对今后的研究工作做了展望。

本书可以面向高等学校测绘类专业师生,可为高校师生研究卫星导航定位方法(GNSS)的监控理论与技术提供有益参考,也可为高校师生研究卫星导航定位技术在建筑行业的应用提供一个有益的参考案例;可以面向建筑工程行业相关技术人员及施工监管人员,本书关于建筑施工塔式起重机智能指挥与防碰撞预警监控的技术与方法可为他们提供参考;可以面向对塔式起重机安全监控领域感兴趣的科技工作者,本书关于集成卫星导航定位方法(GNSS)、计算机网络技术和无线通信技术以及多传感器集成于一体的相关技术与方法可为他们提供有益参考。

本书的出版得到了国家重点研发计划项目(项目编号:2017YFB0503700)、北京市教委市属高校创新能力提升计划项目(项目编号:PXM2016_014210_000060)、北京市教委科技计划一般项目(项目编号:SQKM201710016005)和北京市优秀人才培养资助项目(项目编号:2014000020124G058)等的联合资助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在诸多不足和不妥之处,敬请各位师者批评指正。本书是以作者几年来的科研成果为主体内容撰著的。值此本书付梓之际,衷心感谢在科研成果研究过程中给予宝贵建议和意见的武汉大学的黄声享教授、罗年学教授、巢佰崇教授和赵建虎教授,感谢在工作岗位上给予大力支持和无私帮助的北京建筑大学的杜明义教授、王晏民教授、赵西安教授、罗德安教授、陈秀忠教授、霍亮教授、石若明教授、王坚教授、黄明教授和张健钦教授。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 选题背景和研究意义	1
1.2 国内外研究现状及趋势	4
1.2.1 高精度 GPS 动态定位两大关键问题的研究进展	5
1.2.2 高采样率 GPS 数据传输与接收技术研究	8
1.2.3 建筑施工机械安全监控预警机制构建方法研究	9
1.3 研究目标	10
1.3.1 研究目的	10
1.3.2 研究内容	10
1.3.3 技术路线	12
第 2 章 导航卫星监控信号实时交换与并行解码技术和方法	13
2.1 概述	13
2.2 GPS 监控信号实时交换技术与方法	13
2.2.1 GPS 接收机串口通信	13
2.2.2 监控信号传输与接收	15
2.2.3 用户端与服务器端通信软件设计	16
2.3 实时并行在线解码技术与方法	19
2.3.1 概述	19
2.3.2 某 GPS 信号采集终端数据结构解析	19
2.3.3 观测值数据和导航电文的解码实现	21
2.4 试验测试与分析	23
2.5 本章小结	24
第 3 章 导航卫星伪距差分智能监控精度分析	25
3.1 GPS 基本观测值的概念	25
3.2 GPS 伪距差分监控方法	26
3.2.1 概述	26
3.2.2 DGPS 计算模式原理	27
3.2.3 平滑 DGPS 计算模式原理	30
3.3 试验与分析	32

3.3.1 静态模拟动态试验分析·····	33
3.3.2 实际动态试验分析·····	36
3.3.3 试验总结·····	38
3.4 基于 DGPS 计算模式的伪距码精度比较·····	38
3.4.1 概述·····	38
3.4.2 试验与分析·····	39
3.4.3 试验总结·····	41
3.5 本章小结·····	41
第4章 GPS 单历元双差整周模糊度快速确定算法·····	43
4.1 GPS 单历元整周模糊度的概念·····	43
4.2 几种典型 GPS 双差整周模糊度快速确定算法·····	45
4.2.1 概述·····	45
4.2.2 双频 P 码伪距方法·····	46
4.2.3 LAMBDA 方法·····	46
4.2.4 DUFCOM 方法·····	48
4.2.5 DC 算法·····	51
4.3 一种新的单历元快速确定整周模糊度的组合算法(FARSE)·····	54
4.3.1 提出背景·····	54
4.3.2 快速组合算法思想·····	54
4.3.3 快速组合算法实现·····	55
4.3.4 程序实现·····	57
4.3.5 试验与分析·····	57
4.3.6 试验总结·····	60
4.4 本章小结·····	60
第5章 E_DUFCOM 方法提出及其效能分析·····	61
5.1 GPS 相位观测值的基本概念·····	61
5.1.1 基本相位观测值·····	61
5.1.2 宽巷相位观测值·····	61
5.1.3 窄巷相位观测值·····	62
5.1.4 消电离层组合相位观测值·····	62
5.2 GPS SeOTF 计算模型·····	62
5.2.1 函数模型·····	62
5.2.2 随机模型·····	63
5.3 E_DUFCOM 方法·····	63
5.3.1 提出背景·····	64
5.3.2 E_DUFCOM 方法典型系列·····	64
5.4 程序实现·····	65

5.5 效能分析	66
5.5.1 试验方案设计	66
5.5.2 单历元 $\nabla\Delta N$ 解算结果分析	66
5.5.3 单历元 $\nabla\Delta N$ 解算效率分析	67
5.5.4 定位解精度分析	68
5.5.5 试验总结	70
5.6 本章小结	70
第6章 建筑施工塔式起重机与系统	71
6.1 建筑施工塔式起重机 GNSS 健康监测预警系统	71
6.1.1 背景技术	71
6.1.2 发明内容	71
6.1.3 具体实施方式	72
6.1.4 权利要求书	76
6.1.5 本节小结	79
6.2 建筑施工塔式起重机及其吊装定点放样辅助系统	80
6.2.1 背景技术	80
6.2.2 发明内容	80
6.2.3 具体实施方式	81
6.2.4 权利要求书	86
6.2.5 本节小结	88
6.3 一种 GNSS 双流动站建筑施工塔式起重机	89
6.3.1 背景技术	89
6.3.2 发明内容	89
6.3.3 具体实施方式	91
6.3.4 权利要求书	95
6.3.5 本节小结	97
6.4 建筑施工塔式起重机群防碰撞预警辅助系统	97
6.4.1 背景技术	97
6.4.2 发明内容	97
6.4.3 具体实施方式	98
6.4.4 权利要求书	103
6.4.5 本节小结	106
6.5 本章小结	106
第7章 GNSS 建筑塔式起重机智能指挥与防碰撞预警监控系统	107
7.1 GNSS_TCIAC 系统简介	107
7.2 GNSS_TCIAC 系统总体设计	109
7.3 吊装定点放样辅助系统	110

7.3.1 GNSS_PLS 开发思路	110
7.3.2 定点放样元素计算	111
7.4 吊装作业防碰撞预警系统	112
7.4.1 GNSS_ACS 开发思路	112
7.4.2 防碰撞计算思想	113
7.4.3 预警计算遵循原则	114
7.4.4 告警距离确定	116
7.5 应用试验模拟设计	117
7.5.1 模拟塔式起重机与塔式起重机之间的运动	117
7.5.2 试验总结	119
7.6 GNSS_TCIAC 在周口店遗址保护工程施工塔式起重机监控中的初步应用 ...	119
7.6.1 工程简介	119
7.6.2 工程初步应用	120
7.7 本章小结	125
第 8 章 总结与展望	126
8.1 全书总结	126
8.2 创新点与特色	128
8.3 研究展望	129
参考文献	130

第 1 章 绪 论

1.1 选题背景和研究意义

近年来,为缓解各种能源紧缺问题,我国相继开展了众多大型工程项目的建设,如以三峡工程、南水北调等为代表的大型水利水电工程建设(田雪冬等,2009;郭际明等,2009;周命端等,2011);如以苏通大桥、港珠澳大桥等为代表的大型桥梁工程建设(黄声享等,2009;郭际明等,2012);如以武广(深)线、京沪线等为代表的高速铁路工程建设(李明军,2009;李建,2011);如以鸟巢、周口店遗址等为代表的特大异型建(构)筑物工程建设(高树栋等,2008;钱桂峰,2015)等。随着我国大型工程项目建设规模的扩大和科学技术的进步,大型工程项目质量安全监管手段将会或已经走向现代化高新技术(如GNSS、自动化设备等新型传感器)代替传统技术(如人工值守、手工方式等)的发展趋势(Rutledge David R., et al, 2005)。对于工程项目施工阶段,为保证工程项目施工质量,提高工程施工效率,势必会引进昂贵的大型吊装等机械自动化设备,例如在广西龙滩水电站建设中,采用了两台缆机、两台塔式起重机(又名塔吊机)、一台塔带机和一台顶带机等共六台大型施工机械设备(汪伟等,2005;Wang Wei, et al, 2006),这些施工机械设备在实际应用中一般具有作业区域广、设备集中、环境恶劣、流动性大等特点,对其施工运行状态的智能指挥与防碰撞预警监控显得十分必要;对于运行管理阶段,比如大跨度桥梁工程结构在车辆行驶、环境干扰等作用下会产生一定的形变或位移,如果形变或位移偏大将会导致车辆无法正常行驶,严重者甚至会影响桥梁工程结构自身的安全,对结构会造成损伤(过静琚等,2001),例如美国金门大桥于1951年遭受4h的持续旋风,加劲梁竖向振幅达3.3m;香港青马大桥在85m/s风速下加劲梁侧移4.7m(Satoshi Kyashima, et al, 2001);等。因此,无论是施工阶段还是运行管理阶段,对于大型工程项目的质量监控管理(包括安全或变形)体系的研究一直是施工和监管部门亟待解决的科学技术难题。随着全球导航卫星定位系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的出现和通信技术的发展进步,特别是美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)的建成并投入使用,为这一科学技术难题的解决带来了新的机遇和挑战,例如1996年清华大学用GPS系统监测了深圳地王大厦在台风作用下的实时变形情况(钱稼茹等,1998);1997年英国HUMBER大桥曾试验用GPS系统实时动态测量大桥形变情况(Ashkenzai V., 1997)等。众所周知,卫星导航定位技术具有实时性、全球性、全天候、高精度的定位和测速功能(周忠谟等,1995;李征航等,2010;王坚等,2017),以及高度自动化的巨大潜力,30多年来其在理论算法的研究、新应用领域的开拓、软硬件的开发等方面取得了突出成就,促进了卫星导航定位技术的迅速发展,使其广泛渗透到人们的

生活、生产、科研以及军事等诸多领域，在众多方面产生了深刻的影响，成为继移动通信技术、互联网技术之后世界第三大信息产业（刘经南，1999），这为大型工程项目建设在各个阶段的工程质量安全监管体系的深化改革与发展以及监管手段的更新与进步带来了新的机遇和挑战。

为加快中国城市化的发展进程和提高中国城市化的发展水平，缓解人们住房的刚需问题，改善人们的居住环境，我国如火如荼、大力开展房地产建筑工程项目建设，建筑施工的机械化、自动化程度要求也越来越高，建筑施工塔式起重机已经成为建筑工地必不可少的大型施工机械设备之一，但建筑施工塔式起重机安全事故屡屡发生，如2013年8月9日，盐城一在建楼盘发生塔式起重机倒塌事故，致3人死亡；2015年7月19日，广州增城区一企业在建厂房发生塔式起重机倒塌事故，造成4人死亡；2017年7月22日，广州海珠区某项目部发生塔式起重机倾斜倒塌事故，造成7人死亡，2人受伤，等等。因此，建筑施工塔式起重机的安全运行及智能管理越来越得到施工和监管部门的关注和重视，全国各地已相继下发关于塔式起重机安全管理的相关文件，建筑施工塔式起重机的智能化安全管理已经成为建筑行业未来发展的大趋势。随着我国建筑工程楼宇群建设规模及密集程度的逐渐扩大和先进高新科学技术和手段的不断进步，建筑工程行业里使用较多的建筑施工塔式起重机群安全运行智能指挥与防碰撞预警监控技术、方法将会或已经走向现代化高新科学技术和手段代替传统人工值守模式的发展道路。针对建筑施工塔式起重机群智能指挥与防碰撞预警监控技术、方法的研究一直是建筑工程行业施工和监管部门长期关注且亟需解决的焦点课题。

针对建筑施工塔式起重机群在狭小的施工场地高密度布放、重强度作业、大重量承载、全方位范围内吊装运行，在高空交叉重叠混杂，一旦发生机械故障、吊运物件脱落、塔式起重机群之间或塔式起重机与建筑物之间发生相互碰撞，都将可能造成重大的人员伤亡和严重的经济损失，严重影响建筑工程项目施工进度，造成不良社会影响。目前，对建筑施工塔式起重机群安全运行状态的指挥与防碰撞预警监控正处于传统的人工值守模式，这种模式在一定程度上缺乏实时性、自动化和智能化，塔式起重机群的安全监控也难以得到保障。如果能将塔式起重机的安全装置变成数字信息化集成，通过多传感器实时监控塔式起重机的运行状态，则可为塔式起重机安全运行及智能管理提供技术支撑和安全保障，势必会减少或杜绝安全事故隐患。为攻克解决这一科学技术难题，考虑到卫星导航定位方法（GNSS）具有先天独特的优势，且它是伴随着现代科学技术的发展而建立起来的新一代全球卫星导航定位系统，目前包括美国的GPS、俄罗斯的GLONASS、中国的BDS以及欧盟的GALILEO，各类系统在定位原理和系统组成等方面具有许多相似之处。考虑到GPS建成最早，拥有全球最多用户，本书在阐述部分内容时将以GPS为代表，将卫星导航定位方法（GNSS）集成于建筑施工塔式起重机群智能指挥与防碰撞监控系统开发及工程应用中，为建筑工程施工吊装作业全过程监控安全运行状态提供一种有效的新型解决方案，同时对于提高建筑施工塔式起重机群智能管理的现代化水平，具有前瞻性、先进性、创造性及重要的技术推广价值。

在过去的30多年里，国内外众多专家学者们已对全球定位系统的相关理论算法、方法与技术应用开展了广泛而深入的研究工作，取得了众多成就，极大地推动了全球卫星导航定位系统的发展与完善。近年来，随着卫星导航定位产业的发展，人们对其的应用要求越来越高，迫使对现有的卫星导航定位理论和方法提出了新的研究方向和课题。根据不同

的工程实际应用需求,随之发展了相应的理论与方法体系。因此,结合实际产业应用需求,进一步深入研究卫星导航定位的理论与方法,显得十分的重要和迫切。本书在充分了解国内外研究现状的基础上,建立完善的高精度卫星导航定位单历元实时监控理论与方法体系,将现有的高精度卫星导航定位实时动态监测理论与方法应用于建筑施工塔式起重机群智能指挥与防碰撞预警监控中还存在的关键技术问题具体体现为以下几个方面。

1. 实时动态周跳探测与处理问题

由于载体(GNSS接收机)的运动规律复杂,高精度的载波相位观测值发生整周跳变(简称周跳)现象是很难避免的,这使得周跳的探测与修复工作成为GNSS数据预处理的主要内容,这一关键内容的顺利完成,可为后续的GNSS数据处理提供“干净”的高精度载波相位观测值。由于目前比较成熟的诸多整周模糊度快速固定算法一般都需要利用多个历元的观测数据来实现,且在解算过程中必须保证无周跳现象发生,否则将导致整周模糊度解算失败,这让周跳探测与处理工作为快速整周模糊度的成功解算奠定了先决条件。在动态测量环境中,如何充分利用有限的观测数据信息,正确、高效地实时探测与处理周跳问题有着重要的理论意义和实用价值,是现有高精度GNSS动态监测理论与方法中仍尚未完全解决的关键问题之一。目前,针对这一问题的研究,探讨较多的主要是基于事后的周跳探测和修复,而对于实时的周跳探测与处理问题还需要作进一步的深入研究(方荣新等,2009)。

2. 快速动态整周模糊度解算问题

高精度卫星导航定位一般是利用载波相位观测值来实现的,而利用载波相位信号进行测量,只能精确测量相位中不足一整周的小数部分,历元间整周部分的连续变化值由多普勒计数得到,但载波相位观测值的初始整周数则是未知的,这个初始整周数即为整周模糊度值。正确、有效地确定整周模糊度值的过程即为整周模糊度解算,这是实现高精度卫星导航定位的关键点之一(李征航等,2010)。这一关键问题的解决,可为后续的卫星导航定位数据处理提供“准确”的高精度观测值,也使得为实现高精度卫星导航定位变成可能。由于卫星导航定位技术在动态环境中的应用范围比静态环境应用广泛得多,所以在GNSS动态定位中,寻求一种有效且快速的整周模糊度动态解算方法成为近年来人们关注的焦点,是现有高精度GNSS动态定位理论与方法中仍尚未完全解决的关键问题之一。据众多文献资料分析可知,解决这一关键问题的难点在于:一是动态定位中载体(GNSS接收机)的位置随时间在不断地变化,而整周模糊度参数和空间位置参数又高度相关,这导致在动态定位中很难像静态定位那样将其分离;二是受动态环境误差的干扰导致不精确的整周模糊度初值和较大的搜索空间,进而影响整周模糊度的搜索效率,甚至导致其搜索失败(王潜心,2011)。因此,如何解决GNSS动态定位中的这些遗留问题对补充和完善现有的卫星导航定位理论与方法具有重要的理论意义和实际应用价值。

3. 高采样率GNSS观测数据采集与精密处理的实时性问题

实时动态定位服务是当今卫星导航定位技术应用发展的研究热点之一,近年来人们对其的实时性需求越来越高,促使GNSS应用从传统的卫星定位数据后处理技术发展扩充至实时处理技术,这种发展趋势是时代需求的必然,将涉及两方面的内容:实时数据处理和实时数据采集与传输。这不仅涉及周跳的实时处理和整周模糊度的实时快速解算问题,而且涉及观测数据的实时质量控制和高采样率GNSS数据高速通信等问题,这对现有的

GNSS 观测数据采集与处理理论方法提出了更高的要求。目前,广泛应用的单基站 RTK 技术中数据的传输技术采用的是电台视距传输数据方式。近几年来,计算机网络技术和无线通信技术发展迅猛,有关学者提出了基于中间服务器模式的逆向(双向)方式代替原有的基准站单向 UHF 无线发射方式(范千,2009),打破了传统的电台视距传输数据特征而带来的时空局限性。目前,将计算机网络技术和无线通信技术作为 GNSS 数据传输链路来实现实时动态定位成为国内外一项新兴的研究课题,具有非常广阔的应用前景(王华,2006)。

4. GNSS 技术用于机械安全监控中的预警计算模型构建问题

利用全球卫星导航定位系统的高精度观测值,不仅可以获取运动载体的精确位置信息,而且可以获得运动载体精确的速度信息、加速度信息和运动信息。根据相关文献资料分析可知,目前关于卫星导航定位技术与应用的研究,致力于确定载体位置信息(定位功能)的研究要远远多于确定载体速度信息、加速度信息和运动信息(测速定姿功能)的研究,这与实际应用需求有着必然的联系。事实上,GNSS 测速定姿也是获取运动载体空间信息中不可或缺的重要组成部分,且准确获得运动载体的位置、速度、加速度信息是卫星导航定位技术用于大型施工机械设备安全监控与防碰撞预警计算模型构建中非常重要的基础数据来源,并集成无线通信技术和计算机网络技术,建立高精度 GNSS 大型施工机械设备安全预警监控系统,可为大型工程项目高空施工机械设备实现智能指挥与防碰撞预警目的,是一种可为人们提供决策的有效技术手段(李振洪,1999;吴晓铭,2000)。因此,如何实现高精度 GNSS 大型施工机械设备防碰撞预警计算模型构建,对于大型工程安全监控与灾害预测预警警报机制构建理论和方法的发展有着重要的理论意义和实际应用价值。

综上所述,随着人们对卫星导航定位技术动态定位的精度、可靠性以及实时性要求的不断提高,高精度 GNSS 单历元实时监控理论与方法的研究成为近年来国内外 GNSS 应用研究的热点之一,且如何进一步补充和完善现有的高精度 GNSS 动态定位理论与方法,能够满足人们新的需求,也显得十分的紧迫和必要。因此,本书致力于基于 GNSS/GPRS 的高精度大型施工机械设备(如建筑塔式起重机)安全智能指挥与防碰撞预警建模监控关键技术研究,建立高精度 GNSS 单历元实时动态监控理论与方法体系,能够满足工程质量监管体系中大型施工机械设备如吊装设备的实时安全监控、桥梁工程的实时动态监测、高速铁路工程的铁轨平顺性实时动态检测等方面的工程安全监控与灾害预警将具有广阔的应用前景,将会是一种全新的、有效的工程安全智能监控与灾害预警集成技术,与传统方法相比,其优越性表现在:①安全监控精度更高,效果更好;②可实现全天候自动化安全监测;③社会效益广,经济效益强,节省成本,费用仅为常规方法的 1/6~1/3;等等(田雪冬等,2009)。

1.2 国内外研究现状及趋势

本书拟通过对高精度 GNSS 单历元实时动态测量理论与方法的探索,来建立基于 GNSS/GPRS 的高精度实时动态(安全或形变)监测集成技术体系,其中,高精度 GPS

信号单历元数据实时处理分析是本书的研究重点。因此,本节将从高精度 GPS 动态定位两大关键问题、GPS 数据传输与实时接收技术、安全监控与灾害预警机制构建方法等三个方面阐述国内外相关研究现状及趋势。

1.2.1 高精度 GPS 动态定位两大关键问题的研究进展

自从 20 世纪 80 年代以来,国内外众多专家学者们对 GPS 定位理论和方法作了深入研究,取得了一系列的成就,促使测绘地理信息领域发生了重大变革。通过对 GPS 测量中数据处理理论方法的深入分析可知,高精度 GPS 动态定位的关键问题在于周跳探测与处理和整周模糊度快速确定。针对这两大关键问题,学术界进行了广泛而又深入的研究,至今仍是 GPS 基础理论算法研究与卫星导航定位技术应用研究中的难点和热点问题之一。

1.2.1.1 动态周跳探测与修复方法的研究

使用高精度载波相位观测值进行 GPS 定位的一个关键问题在于周跳探测与修复,这是高精度 GPS 动态定位关注的焦点之一。在动态定位环境中,由于接收机在不断地运行,周跳探测与修复工作相比静态定位环境中要困难得多。经过学术界 30 多年的努力,学者们在动态定位中探测与修复周跳方面作了大量研究,取得的具有代表性的方法有:多项式拟合法(Mader, 1986; 陈小明, 1996)、卡尔曼滤波法(Bastos L., et al, 1988)、多普勒观测值法(Schwarz K. P., et al, 1989)、观测值序列作时间差分法(Lichtenegger H., et al, 1989; 刘基余等, 1993)、宽巷窄巷组合法(Geoffrey Blewitt, 1990; Gao Y., et al, 1999)、电离层残差法(Bisnath S. B., 2000; Donghyun Kim, et al, 2001)、三差解法(Donghyun Kim, et al, 2001; 袁洪等, 1998)、利用其他传感器的观测值辅助 GPS 周跳探测与修复(Altmaver, 2000)、高动态情况下的周跳探测与修复问题(Bisnath S. B., 2000)等等。纵观分析上述方法可知,这些方法大部分主要是基于事后的周跳探测,对于实时的周跳探测与处理问题还需进一步研究,自 2005 年以来较为有代表性的方法有:

(1) Cai Yanju 等人(2005)提出了一种基于双频观测数据的单历元周跳探测和修复方法。基本思想是首先将上一历元的整周模糊度代入当前历元的观测方程,消去整周模糊度参数,然后利用拟准检定法检测当前历元是否有异常观测。若有,则判断出发生周跳的卫星,再利用 LAMBDA 方法计算出周跳,与前一历元的整周模糊度相加,即为当前历元的整周模糊度。该方法能判定出发生周跳的卫星。

(2) 王贵文等人(2007)提出了一种基于三差观测量的实时动态周跳修复方法。该方法无需对观测值进行预报,适用于连续周跳的探测。但是该方法需要前面若干历元组成三差观测值和各种误差三差残差的统计性质,要求观测量的残差很接近随机噪声,且对于很长的基线、高速运动的流动站(如星载 GPS)情况下这一假设不一定成立。对于顾及实际的基线长度、流动站的运动速度等因素方面没有进行相关研究。

(3) 方荣新等人(2009)实现了非差载波相位周跳的实时探测,能实时地探测出 1 周的 GPS 非差载波相位周跳。

(4) Liu Zhenkun 等人(2009)提出了一种附有基线约束的 GPS 动态周跳探测和修

复方法,基本思想是首先利用三差观测值进行周跳的探测,然后利用附有基线条件进行周跳的修复。

(5) 何海波等人(2010)提出了一种最小二乘周跳搜索算法,不需要经过最小二乘平差计算,利用残差平方和搜索并确定周跳,计算速度快。但是该方法要求周跳搜索范围较小。

(6) 贾媛等人(2011)提出了整周模糊度直接求解算法用于 GPS 周跳的探测与修复,利用基线约束条件直接求解各个历元的整周模糊度,通过比较历元间整周模糊度的跳变来探测与修复周跳,但基线约束条件限制了其在动态 GPS 定位中的应用。

(7) 高书亮等人(2011)提出了一种适用于单频 GPS 用户的周跳探测方法。该方法对传统的伪距与载波相位组合周跳探测方法作出了改进,通过对观测量的噪声水平进行实时估计,在一定程度上避免了观测量噪声对周跳探测的影响,进而提高了周跳探测的灵敏度,可以准确地发现较小的周跳。

(8) Zhizhao Liu (2011) 提出了一种新的自动周跳探测和修复方法,适用于单双频 GPS 接收机。该方法联合使用 TECR 和 M-W 宽巷组合来探测 L_1 和 L_2 频率的周跳,如果发生周跳, M-W 宽巷整周模糊度将会变化,且 TECR 通常会被放大,利用 TECR 值来探测周跳。该方法是逐星探测和修复周跳,且卫星间是完全独立,不受其他卫星数据影响,但是该方法不适合实时周跳探测。

(9) 伍岳等人(2012)提出了利用各频率观测值间物理上的相关性,采用数学变换得到一个含有双频原始载波观测信息的虚拟观测值,与双频数据按长波长特性进行多频组合来放大周跳,再利用两个判别条件来甄选,达到实时修复大采样率原始观测值小周跳的目的。

(10) 刘柳等人(2017)针对使用组合观测值探测周跳存在不敏感周跳且难以修复的问题,在分析三频周跳探测与修复几何原理的基础上,从几何角度探讨了多个相位无几何组合(GF)探测周跳的异同以及加入 M-W 组合后的效果,并搜索了相应的不敏感周跳,最后使用 BDS 三频实测数据验证了相关结论,对 GPS 亦适用。

综上,不难发现在众多的周跳探测与修复方法中大多是致力于提高计算效率和可靠性的研究。在动态定位环境中,由于接收机在不断地运动使得周跳的探测与修复工作较为困难,目前没有哪一种方法能适用所有的情况。另一方面,如果能利用单历元数据有效解算 GPS 整周模糊度值,则可不考虑上述周跳探测与处理问题,进而成为近年来专家学者们致力研究的热点课题之一,但单历元解算整周模糊度需要对每个历元的整周模糊度进行实时解算,势必导致解算效率过低而影响 GPS 高采样率数据实时动态解算;反之,如果能通过正确且高效的周跳探测与修复后,再实现历元间整周模糊度的正向传递,则可显著提高解算效率,有利于 GPS 高采样率数据的实时动态快速处理。因此,在实际应用中,究竟采用哪种方法进行周跳探测与处理,可根据具体情况而定,或采用几种方法联合来探测与修复周跳(谢翔等,2012)。

1.2.1.2 动态整周模糊度快速解算方法的研究

GPS 动态整周模糊度的快速确定,特别是整周模糊度的实时动态解算,一直是高精度 GPS 动态测量的关键问题之一。GPS 整周模糊度一旦确定,利用载波相位观测值进行差分定位的过程类似于利用高精度的码伪距观测值进行差分定位。因此,如何正确、快速

地确定整周模糊度一直是从事高精度 GPS 动态测量理论与方法研究这一课题的学者们致力于解决的研究热点。在过去的 30 多年中,国内外学者们对其作了大量的研究,促进了 GPS 快速动态定位技术的发展,整周模糊度的确定(初始化)所需要的时间经历了由原来的几个小时缩短到几分钟即多历元 OTF (On The Fly) 算法,而后再缩短至单个历元时间即单历元 OTF (Single-epoch On The Fly, SeOTF) 算法。严格意义来说,SeOTF 算法是 OTF 算法的一种,即利用单个历元的观测数据确定整周模糊度参数,无需考虑观测过程中是否发生周跳现象。

顾名思义,多历元 OTF 算法是利用多个历元的观测数据快速确定整周模糊度。这类算法中较为具有代表性的算法有:整周模糊度函数法 AFM (Counselman C. C., 1981)、最小二乘搜索法 LAST (Hatch R., 1989, 1990)、快速整周模糊度算法 FARA (Frei E., 1990)、Cholesky 分解算法 (Euler H. J., 1994)、快速整周模糊度搜索滤波算法 FASF (Chen D. S., 1994)、最小二乘降相关算法 LAMBDA (Teunissen P. J. G., 1995)、附加整周模糊度参数的卡尔曼滤波法 (陈小明, 1997)、Tikhonov 正则化结合 LAMBDA 法 (欧吉坤等, 2003)、动对动定位中双空间搜索算法 (喻国荣, 2004)、分步消元法 (唐卫明, 2006)、DC 算法 (邱蕾等, 2009) 等。对于短基线情况,多历元 OTF 算法快速动态确定整周模糊度参数的技术与方法较为成熟,但在确定整周模糊度的过程中必须保证观测卫星一直锁定,并且无周跳现象发生,否则将使得整周模糊度搜索失败,这使得多历元 OTF 算法在实际 GPS 动态定位中的应用受到一定的限制,比如在飞机的精密进场着陆或陆地车载定位中,会经常发生卫星失锁和整周跳变,产生很多不连续的短时间接收时段,使得上述方法难以成功解算整周模糊度。因此,多历元 OTF 算法的应用受限于实时周跳处理结果的影响。

而 SeOTF 算法仅需要单个历元的观测数据来求解固定整周模糊度参数,即所谓的单历元解 (王新洲等, 2007)。国内外的学者们对整周模糊度的单历元解法作了大量的研究,较为有代表性的解法有:

(1) 双频 P 码伪距法 (Hatch R., 1982, 1986, 1994) 是使用双频的载波相位形成宽巷组合观测值,通过扩大组合观测值的波长之后,再利用 P 码伪距观测值辅助来解算组合观测值的整周模糊度,然后求解固定 L_1 和 L_2 的整周模糊度,实现单历元解算。该方法只利用原始观测值,卫星间相关性不大,计算较为简单。但该方法不适用于无高精度 P 码伪距观测值的普通接收机 (胡丛玮等, 2001)。

(2) 整周模糊度函数法 (Counselman C. C., 1981; Remondi, 1991; Mader, 1992) 是利用双频观测值,在同步观测 7~8 颗卫星的情况下,使用一个历元确定整周模糊度,但解算效率过低,难以达到实时解算的目的;而后对其在效率上作了改进 (Shaowei Han, et al, 1996),但在实际应用中,由于受各种误差源的影响,一般难以达到单历元实时快速解算。

(3) 局部最小值法 (M. Partt, et al, 1997a, 1997b, 1998) 是通过构建成本函数,使用距离约束条件,对投影矩阵零空间的整数标识进行搜索,进而快速确定整周模糊度。该方法仅对 GPS-GLONASS 静态数据作了试验,获得了较高的成功率,但未对动态数据进行试验。

(4) 最小二乘降相关方法 (LAMBDA) 由 Teunissen 教授提出 (Teunissen, 1993,