

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

高等学校测绘工程专业核心教材



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

国家精品课程教材

(第三版)

GPS 测量与数据处理

GPS Surveying and Data Processing

李征航 黄劲松 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
国家精品课程教材

高等学校测绘工程专业核心教材

GPS测量与数据处理

GPS Surveying and Data Processing

(第三版)

李征航 黄劲松 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

GPS 测量与数据处理/李征航,黄劲松编著. —3 版. —武汉:武汉大学出版社,2016. 5

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材 国家精品课程教材 高等学校测绘工程专业核心教材

ISBN 978-7-307-17680-5

I. G… II. ①李… ②黄… III. ①全球定位系统—测量学—高等学校—教材 ②全球定位系统—数据处理—高等学校—教材 IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 050955 号

责任编辑:王金龙

责任校对:汪欣怡

版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北民政印刷厂

开本:787×1092 1/16 印张:29.25 字数:689千字

版次:2005年3月第1版

2010年9月第2版

2016年5月第3版

2016年5月第3版第1次印刷

ISBN 978-7-307-17680-5

定价:48.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

第三版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材和“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。自 2005 年出版以来,先后印刷 14 次,印数已超过 5 万册,被很多高校选用作为教材。自 2010 年第二版面世以来,卫星导航定位系统及卫星导航定位技术已有了不少发展和改进,有必要对本书再次进行修订。在第三版中除了删去一些陈旧过时的内容,对一些资料和数据进行了修改和更新外,还在下列几个方面作了较大幅度的补充和修改:

(1) 卫星信号的内部时延差 T_{cd} 及 ISC 对卫星钟差的影响及电离层延迟改正的影响,这部分属于较难理解的内容,在第二版中只给出了相应的公式(引自 GPS 的空间部分与导航用户间的接口文件 IS-GPS-200, IS-GPS-705 等相关文件),这次我们又对上述公式进行了推导,有助于学生的理解。

(2) 在 5.7 单点定位这一节中增补了精度衰减因子 DOP 以及广域实时精密定位等内容,对精密单点定位部分进行了扩充,补充了硬件延迟及基于互联网的在线 PPP 服务系统等相关内容,使之能更全面地反映单点定位的发展现状。

(3) 对 5.5 周跳的探测及修复、5.6 整周模糊度的确定两节重新进行了梳理和分类,使之尽可能显得有条理和系统化。考虑到 LAMBDA 法在确定模糊度中的重要作用,对该方法的原理及具体做法进行了说明,并增加了一个案例,以加深学生对该方法的理解。

(4) 北斗卫星导航系统 BDS 已正式向中国及其周边地区提供导航、定位、授时服务。这一由我国自行研制、组建和管理的卫星导航系统必将对我国的国防建设和经济建设产生巨大影响。为此我们依据手上可收集到的公开资料编写了“北斗卫星导航系统”这一章。考虑到本书的书名为《GPS 测量与数据处理》,将其作为正文似不太合适,故暂列于附录中。今后将根据形势的发展将其单独列为一门课程或将本书改名为“GNSS 测量与数据处理”。建议各位老师将 BDS 的内容正式列入教学计划,以利于学生学习、应用及推广 BDS。

我们希望这本新版的教材既能较为系统的介绍 GPS 测量与数据处理中涉及的基本原理与主要方法,也能较为全面地反映出本领域国内外的最新进展及发展趋势,成为一本深受广大师生喜欢的教材。然而由于能力有限,恐不能如愿。真诚希望广大读者批评指正。

作者

2015 年 10 月

第二版修订说明

自 2005 年本书第一版发行以来,该书重印多次,发行量超过 2 万册。该书已被多所大学用作本科教学的教材,同时也成为研究生及专业技术人员广为阅读的一本参考书。基于以下原因,我们对第一版进行了较大幅度的修改和补充:

(1) 5 年来,全球定位系统本身已作了重要改进,GPS 导航定位技术也有了新的发展。

(2) 经多年使用后,有必要根据广大师生的意见对第一版的内容作一些增补和调整,以便更好地满足教学的需要。

(3) 本书的修订版已被批准为普通高等学校“十一五”国家级规划教材。

本版主要修订内容为:

(1) 对第一版的结构作了部分调整。新增加了一章《GPS 测量中涉及的时间系统和坐标系统》,并将“全球定位系统的应用”抽出来单独作为一章。此外,在导航电文前增补了有关卫星轨道根数及轨道摄动的内容,使教材的结构更为合理,也便于缺乏相关预备知识的学生使用本教材。

(2) 增补了有关系统本身近年来所作改进的相关内容:

- 广播星历精度改进计划 L-ALL;
- 有关 L_2C 码和 L_5I 码, L_5Q 码的相关内容;
- 调制在 L_2C 码和 L_5I 码上的导航电文;
- 信号在卫星内部的时延差 TGD、ISC 及其对卫星钟改正数和电离层延迟改正数的影响;
- 在导航电文中引入地球自转参数及其产生的影响。

(3) 增加或补充了有关 RTK、网络 RTK 及 CORS 的相关内容,对卫星相位中心偏差 PCO 及相位中心变化 PCV 以及天线相位缠绕等内容也作了增补。

(4) 对第一版的“第二编 技术设计与数据采集”和“第三编 数据处理”进行了大幅度的调整,主要调整的内容如下:

- 将第一版中第二编与第三编合并成为一编——“测量与数据处理”,重点介绍 GPS 网建立的全过程及各个环节中的质量控制问题。

- 将原第 7 章、第 8 章和第 10.3~10.7 节的内容删除,对剩余章节进行了重新编排和补充,使本编的内容更侧重于工程应用。

本学科仍然处于迅速发展的阶段,知识更新速度很快,因而在修订过程中,我们继续坚持下列原则:既要讲清 GPS 测量与数据处理的具体方法、步骤和要求,并通过必要的实习使学生具备外业观测和数据处理的能力,以满足生产单位的需要;又要讲清楚基本原理,使学

生明白为什么要这么做(这一点对于迅速发展中的学科来讲可能更为重要),以培养学生的创新能力,为今后卫星导航定位事业的发展作出贡献。

2010年7月

第一版前言

全球定位系统在交通、运输、测绘、通信、军事、石油勘探、资源调查、农林渔业、时间比对、大气研究、气象预报、地质灾害的监测和预报等部门和领域中有广泛的应用前景。全球定位系统的出现使导航技术和定位技术产生了一场深刻的变革,促进了相关行业的整体技术进步。因而 GPS 导航定位技术已成为高等学校各相关专业中的一门重要课程。

自 20 世纪 70 年代起,我院(系)就紧跟学科发展前沿,用空间大地测量技术对原专业进行改造和建设,对旧的课程体系进行了大规模的调整。在培养具有新的知识结构的符合社会需要的大批人才的同时,我院(系)还承担了大量的科研项目和科技开发(生产)项目,将一个逐渐老化且生源和需求都严重不足的老专业改造建设成为一个欣欣向荣、充满活力的用高新技术武装起来的新专业。“跟踪学科发展前沿,改造和建设大地测量专业的研究和实践”获湖北省和国家教学成果一等奖。目前,“GPS 测量原理及其应用”不仅是武汉大学测绘学院、遥感信息工程学院、资源和环境学院中相关专业的必修课程,而且也成为面向全校的一门公选课。

本书是武汉大学“十五”规划教材,其内容涵盖“GPS 测量原理及其应用”(省级优质课程)和“GPS 数据处理”两门课程。根据我们的经验,这两门课程的难点为:载波相位测量的原理,观测值的线性组合,周跳的探测修复,整周模糊度的确定以及网平差(无约束平差、约束平差、联合平差)等内容,因此本教材对这些问题作了较为详细的阐述。考虑到卫星导航定位系统正处于迅速发展和变革的时期,所以在教材中对 GLONASS 系统、伽利略系统、我国的北斗系统以及 GPS 的现代化等内容也作了简要介绍。按武汉大学测绘学院的教学计划,有关时间系统、坐标系统、卫星轨道理论的基本知识和卫星应用等方面的内容已在“大地测量学基础”、“空间大地测量理论基础”和“卫星应用概论”等前期课程中讲过,故本书中不再作介绍,以免造成过多的重叠。但为了顾及外校和其他相关专业学生使用的需要,对一些必要的内容仍作了简单介绍。此外,为了保持两门课程相对的独立性和完整性,编写时允许有极少量内容相互交叉和重叠。

全书共分三编。第一编为 GPS 定位原理、方法与数学模型,共分 4 章。第 1 章绪论简要介绍了全球定位系统的产生、发展、前景以及各个领域中的应用,对其他卫星导航定位系统也作了简要介绍。第 2 章介绍了全球定位系统的组成和信号结构以及卫星位置的计算。第 3 章介绍了影响 GPS 定位的各种误差源以及消除或削弱误差影响的方法。第 4 章介绍了测定卫地距的方法以及 GPS 定位的方法。第二编为技术设计与数据采集,共分 2 章。第 5 章介绍了技术设计的依据和方法。第 6 章介绍了选点与埋石、接收机检验、外业观测、成果验收等内容。第三编为数据处理,共分 5 章。第 7 章介绍了常用的时间标示方法及相互换算的方法。第 8 章介绍了 GPS 测量中常用的坐标系和参考框架。第 9 章介绍了

GPS 数据处理中常用的 RINEX 格式和 SP3 格式。第 10 章介绍了 GPS 基线向量解算和网平差中的各种问题。第 11 章介绍了 GPS 高程测量。其中第一、二编(前 6 章)由李征航编写,第三编(后 5 章)由黄劲松编写,最后由李征航负责统稿。其中部分标注有“* *”的内容主要供研究生学习和相关科研人员参考,不一定作为本科生学习的内容。

由于作者水平有限,谬误不当及疏漏之处在所难免。当前 GPS 定位技术仍处于迅速发展阶段,虽然我们力求与时俱进,反映该领域中的最新成果,但未必如愿。真诚希望广大读者批评指正。

作 者

2005 年 1 月

目 录

第一篇 GPS 定位原理、方法与数学模型

第 1 章 绪论	3
1.1 全球定位系统的产生与发展	3
1.1.1 子午卫星系统及其局限性	3
1.1.2 全球定位系统的产生和发展	6
1.2 美国政府的 GPS 政策	7
1.2.1 早期的 GPS 政策	7
1.2.2 GPS 政策的变化	8
1.3 其他卫星导航定位系统概况	9
1.3.1 全球导航卫星系统(GNSS)	9
1.3.2 区域性卫星导航定位系统	13
第 2 章 GPS 测量中所涉及的时间系统和坐标系统	17
2.1 有关时间系统的一些基本概念	17
2.2 恒星时与太阳时	20
2.3 原子时、协调世界时与 GPS 时	22
2.4 建立在相对论框架下的时间系统	25
2.5 GPS 中涉及的一些长时间计时方法	27
2.6 天球坐标系	30
2.6.1 岁差	31
2.6.2 章动	34
2.6.3 天球坐标系	35
2.7 地球坐标系	36
2.7.1 极移	36
2.7.2 瞬时(真)地球坐标系	37
2.7.3 协议地球坐标系	37
2.8 ITRS 与 GCRS 之间的坐标转换	40
第 3 章 全球定位系统的组成及信号结构	42
3.1 全球定位系统的组成	42

3.1.1	空间部分	42
3.1.2	地面监控部分	45
3.1.3	用户部分	47
3.2	载波与测距码	49
3.2.1	载波	50
3.2.2	测距码	50
3.3	导航电文	58
3.3.1	导航电文的总体结构	58
3.3.2	第1子帧(第一数据块)	59
3.3.3	第2、3子帧(第二数据块)	66
3.3.4	第4、5子帧(第三数据块)	69
3.4	卫星信号调制	73
3.5	GPS 卫星位置的计算	75
3.5.1	用广播星历计算卫星位置	75
3.5.2	用精密星历计算卫星位置	78
第4章	GPS 定位中的误差源	79
4.1	概述	79
4.1.1	误差分类	79
4.1.2	消除或削弱上述误差影响的方法和措施	81
4.2	相对论效应	82
4.2.1	近似公式	82
4.2.2	严格公式	84
4.2.3	需要说明的几个问题	84
4.3	钟误差	85
4.3.1	卫星钟误差	85
4.3.2	由于信号在卫星内的群延差而引起的卫星钟改正	86
4.3.3	接收机钟误差	89
4.3.4	在GPS测量中处理钟差的几种方法	89
4.4	卫星星历误差	90
4.4.1	GPS 卫星的广播星历和精密星历	91
4.4.2	国际GNSS服务	92
4.4.3	IGS的产品及其精度	94
4.4.4	星历误差对定位的影响	96
4.4.5	消除和削弱星历误差影响的方法和措施	98
4.5	电离层延迟	99
4.5.1	电离层的概况	99
4.5.2	电离层模型和经验改正公式	104

4.5.3	双频改正模型	106
4.5.4	利用 GNSS 双频观测资料建立 VTEC 模型	111
4.5.5	利用三频观测值进行电离层延迟改正	114
4.6	对流层延迟	116
4.6.1	基本原理	116
4.6.2	普通 GPS 测量中常用的几种对流层延迟模型	117
4.6.3	高精度 GPS 测量时所用的对流层延迟改正方法	122
4.6.4	投影函数	122
4.7	多路径误差	125
4.8	其他误差改正	129
4.8.1	地球自转改正	129
4.8.2	天线相位缠绕	130
4.8.3	天线相位中心的误差	131
第 5 章	距离测量与定位方法	136
5.1	利用测距码测定卫地距	136
5.2	载波相位测量	141
5.2.1	概论	141
5.2.2	载波相位测量原理	143
5.2.3	载波相位测量的实际观测值	144
5.2.4	载波相位测量的观测方程	145
5.3	单差、双差、三差观测值	146
5.4	其他一些常用的线性组合观测值	151
5.4.1	同类型不同频率观测值的线性组合	151
5.4.2	不同类型观测值的线性组合	152
5.5	周跳的探测及修复	154
5.5.1	产生整周跳变的原因	154
5.5.2	周跳的探测及修复	155
5.6	整周模糊度的确定	161
5.6.1	模糊度问题的重要性及解决方法	161
5.6.2	用伪距观测值来确定整周模糊度	162
5.6.3	依据较为精确的先验站坐标及卫星星历来确定整周模糊度	164
5.6.4	将模糊度作为待定参数通过平差计算来进行估计	167
5.6.5	其他方法	184
5.7	单点定位	186
5.7.1	坐标系	187
5.7.2	标准单点定位	187
5.7.3	精密单点定位	190

5.7.4 广域实时精密定位技术	194
5.8 相对定位	195
5.8.1 GPS 定位中的几个基本术语	195
5.8.2 静态相对定位	196
5.8.3 动态相对定位	199
5.8.4 RTK	200
5.9 网络 RTK 及连续运行参考系统 CORS	201
5.9.1 网络 RTK	201
5.9.2 连续运行参考系统	203
5.10 差分 GPS	205
5.10.1 概况	205
5.10.2 差分 GPS 原理	206
5.10.3 差分 GPS 的分类	208
5.10.4 差分 GPS 的新进展	212
第 6 章 全球定位系统的应用	214
6.1 GPS 在测量领域中的应用	214
6.1.1 GPS 在大地测量与地球动力学中的应用	214
6.1.2 GPS 在工程测量中的应用	215
6.1.3 GPS 在航测和遥感中的应用	216
6.1.4 GPS 在地籍测量及地形测量中的应用	217
6.2 GPS 在军事中的应用	217
6.3 GPS 在交通运输业中的应用	218
6.4 GPS 在大气科学中的应用	219
6.5 GPS 在其他领域中的应用	221
第二篇 GPS 测量与数据处理	
第 7 章 GPS 网及其建立	225
7.1 GPS 网	225
7.1.1 GPS 静态测量的特点	225
7.1.2 GPS 网	226
7.2 GPS 网的建立过程	227
7.2.1 设计准备	228
7.2.2 测量实施	228
7.2.3 数据处理	229
7.3 GPS 测量中的几个基本概念	230
7.3.1 观测时段	230
7.3.2 同步观测	230

7.3.3	基线向量	230
7.3.4	复测基线及其长度较差	230
7.3.5	闭合环及环闭合差	230
7.3.6	同步观测环和同步环检验	231
7.3.7	独立基线向量	231
7.3.8	独立观测环和独立环检验	233
7.4	GPS网的质量及质量控制	233
7.4.1	GPS网的质量	233
7.4.2	GPS网的质量控制	233
7.4.3	GPS网质量的影响因素	233
第8章	GPS测量的技术设计	235
8.1	概述	235
8.1.1	技术设计及其作用	235
8.1.2	技术设计的依据	235
8.2	GPS网的精度和密度设计	236
8.2.1	GPS测量的等级及其用途	236
8.2.2	GPS测量的精度及密度指标	237
8.2.3	GPS网的精度和密度设计	238
8.3	GPS网的基准设计	238
8.3.1	GPS网的基准设计	238
8.3.2	起算数据的选取与分布	239
8.4	GPS网的布网形式	240
8.4.1	跟踪站式	240
8.4.2	会战式	240
8.4.3	多基准站式	241
8.4.4	同步图形扩展式	242
8.4.5	单基准站式	242
8.5	GPS网的图形设计	243
8.5.1	GPS网图形与质量的关系	243
8.5.2	提高GPS网质量的图形设计方法	244
8.6	GPS网的设计指标	245
8.6.1	GPS网的特征值	245
8.6.2	效率指标	246
8.6.3	可靠性指标	247
8.6.4	精度指标	247
8.7	技术设计书的编写	247

第 9 章 GPS 测量的外业	249
9.1 选点与埋石	249
9.1.1 选点准备	249
9.1.2 选点	249
9.1.3 埋石	250
9.2 接收机的维护和保养	252
9.3 接收机的检验	253
9.3.1 一般性检视	253
9.3.2 通电检验	253
9.3.3 附件检验	253
9.3.4 试测检验	254
9.3.5 接收机的检验要求	256
9.3.6 野外检定场	256
9.4 观测方案设计	256
9.4.1 基本技术要求	256
9.4.2 观测方案内容	257
9.5 作业调度	259
9.5.1 作业调度的内容	259
9.5.2 同步图形的连接方式	260
9.5.3 迁站方案	262
9.6 观测作业	264
9.6.1 准备工作	264
9.6.2 观测作业	264
9.6.3 记录	265
9.6.4 外业观测成果的质量检核	267
9.6.5 补测和重测	267
9.7 成果验收和上交资料	268
9.7.1 成果验收	268
9.7.2 上交资料	268
9.8 外业进度估算及项目成本预算	269
9.8.1 外业进度估算	269
9.8.2 项目成本预算	269
第 10 章 GPS 测量中的数据格式	270
10.1 RINEX 格式	270
10.1.1 概述	270
10.1.2 文件类型及命名规则	270
10.1.3 文件结构及特点	272

10.1.4	RINEX 2.10 格式说明	272
10.1.5	RINEX 格式文件实例	286
10.2	SP3 精密星历数据格式	292
10.2.1	概述	292
10.2.2	SP3 格式文件实例	293
10.2.3	SP3 格式定义及说明	293
第 11 章	GPS 基线解算	306
11.1	概述	306
11.2	基线的解算模式	307
11.2.1	基线向量解	307
11.2.2	单基线解模式	309
11.2.3	多基线解模式	310
11.2.4	整体解/战役模式	311
11.3	基线解算的过程及结果	312
11.3.1	GPS 基线解算的过程	312
11.3.2	基线解的输出结果	313
11.4	基线解算的质量控制	313
11.4.1	质量的控制指标	313
11.4.2	质量的参考指标	316
11.4.3	基线的精化处理	317
第 12 章	GPS 网平差	321
12.1	网平差的类型及作用	321
12.1.1	网平差的目的	321
12.1.2	网平差的类型	321
12.2	网平差的流程	323
12.2.1	网平差的整体流程	323
12.2.2	无约束平差的流程	324
12.2.3	约束平差的流程	325
12.2.4	联合平差的流程	325
12.3	网平差原理及质量控制	327
12.3.1	基本数学模型	327
12.3.2	三维无约束平差	336
12.3.3	三维约束平差	339
12.3.4	三维联合平差	343
12.4	采用 GPS 技术建立独立坐标系	345
12.4.1	独立坐标系	345

12.4.2 建立独立坐标系基本方法	346
12.4.3 投影面的转换	346
12.4.4 坐标的相似变换	349
12.5 GPS 高程测量	349
12.5.1 高程系统及其相互关系	349
12.5.2 GPS 水准	353
附录 1 调制在 L_2C 码上的导航电文 CNAV	359
附录 2 北斗卫星导航系统	382
附 2.1 系统简介	382
附 2.1.1 北斗系统的发展历程	382
附 2.1.2 北斗系统采用的坐标系统及时间系统	385
附 2.2 北斗卫星导航系统的组成	387
附 2.2.1 空间部分	387
附 2.2.2 地面控制系统	393
附 2.2.3 用户终端	394
附 2.3 BDS 所用的载波与测距码	394
附 2.3.1 载波	394
附 2.3.2 测距码	396
附 2.3.3 信号调制	399
附 2.4 导航电文	400
附 2.4.1 D_1 导航电文	400
附 2.4.2 D_2 导航电文	410
附 2.5 利用导航电文提供的信息进行相关计算	427
附 2.5.1 电离层延迟改正	427
附 2.5.2 计算卫星钟差	432
附 2.5.3 计算卫星位置	432
附录 3 引用的缩写词	437
参考文献	439

第一篇 GPS 定位原理、方法与数学模型
