

卫星导航定位与北斗系统应用

GNSS LBS and BeiDou System Applications

深化北斗应用 开创中国导航新局面

2017

中国卫星导航定位协会 编



测绘出版社

卫星导航定位与北斗系统应用

GNSS LBS and BeiDou System Applications

——深化北斗应用 开创中国导航新局面

(2017)

中国卫星导航定位协会 编

测绘出版社

·北京·

© 中国卫星导航定位协会 2017
所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航定位与北斗系统应用·深化北斗应用 开创
中国导航新局面:2017/中国卫星导航定位协会编·—北
京:测绘出版社,2017.9
ISBN 978-7-5030-4065-8

I. ①卫… II. ①中… III. ①卫星导航—全球定位系
统 IV. ①TN967.1 ②P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 205082 号

责任编辑	李 伟	执行编辑	侯杨杨	封面设计	潘玉洁	责任校对	赵 瑗	责任印制	陈 超
出版发行	测绘出版社			电 话	010—83543956(发行部)				
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010—68531609(门市部)				
邮政编码	100045				010—68531363(编辑部)				
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com				
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店				
成品规格	210mm×297mm								
印 张	18.75			字 数	581 千字				
版 次	2017 年 9 月第 1 版			印 次	2017 年 9 月第 1 次印刷				
印 数	0001—1500			定 价	120.00 元				

书 号 ISBN 978-7-5030-4065-8
本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

目 录

第一部分 我国导航卫星技术和产业的总体发展

北斗导航卫星系统在航天中的应用展望 刘基余 (3)

第二部分 CORS 系统建设和高精度定位应用

长距离跨海工程精密高程传递研究 曾旭平,马鑫程 (11)

基于 GNSS 后处理软件的对流层模型精度评定 陈 晨,张 阳,付丹丹,周 立 (17)

载波相位差分定位模块定位性能对比分析 陈石平,庄桂玉,丁 榕,徐彬雄 (22)

基于共模误差的四川 CORS 站坐标时序特征
分析 刘宗强,党亚民,杨 强,张光茹,王 健,韩德强 (27)

基于小波多尺度分析的动态变形预报模型研究 许长辉,刘 超,王 坚,姚丽慧 (34)

GNSS 零基线参考站间模糊度解算方法研究 丁乐乐,王 珍,潘宇明,李 蕾 (42)

利用 CORS 数据分析武汉区域地壳运动 夏传义,郭启幼,张顺期,帅勤辉 (47)

重庆市北斗卫星地基增强导航定位服务系统的
测试分析与探讨 夏定辉,杨 宁,田 强,袁烽迪,张士勇,刘邢巍 (55)

广州市连续运行卫星定位服务系统优化整合研究 程晓晖 (61)

大数据视角的 RTK 轨迹数据挖掘尝试 杨 宁,安丽超,夏定辉,刘邢巍 (67)

贵州省中小河流水文监测项目 GNSS 高程测量 吴恒友 (72)

矿山开采地表移动自动化监测系统研究 余学祥,吕伟才,方新建,黄 晖,刘可胜 (78)

GNSS 连续运行参考站网数据档案管理系统建设研究 宋鸿运,张江齐 (84)

第三部分 导航与位置服务技术研究和行业应用成果

关于车联网本地化服务的探讨与研究 李兆荣 (93)

基于北斗导航卫星与位置服务技术的生态物联网应用模式 王让会 (96)

基于中国沿海无线电指向标的多站联合伪距差分增强系统设计 吴功栋,王 成,王玉林 (99)

基于北斗卫星导航的精准农业应用技术研究 赵悦璇,张朋永,周 全,沈 洋,王吉旭 (104)

基于社交媒体地理数据挖掘的游客时空行为特征分析 施蓓琦,王丽鲲,田冬迪,王 冕 (110)

一种改进的行人航位推算算法研究 叶佳蕊,修春娣,杨 威,林志兴 (117)

基于 IMU 的室内行人航位推算算法研究 漆钰晖,郭 杭 (125)

浅谈高精度地图在自动驾驶中的应用 陈 颖 (129)

基于单帧图像的室内定位方法研究 李海雷,郭 杭,万 旻,Clifford Mugnier (133)

电力物联网通信规约的设计与实现 秦晓敏,赵力钊,高 宇,李 明,何 剑 (137)

导航接收机自动化测试系统的软件设计与实现 王立敏 (142)

基于 IEC 61850 的电力物联网的建模与实现 赵力钊,秦晓敏,李 明,高 宇,何 剑 (150)

云眼看车联 马 森 (155)

北斗多媒体信息传输系统..... 李明凡,李孟阳 (161)

基于双 MCU 智能 GNSS 移动导航定位系统设计开发..... 王 超,肖 璨 (168)

北斗农机作业全信息质量在线监测终端..... 王诚龙,王吉旭,葛宝玉,张朋永 (181)

第四部分 北斗卫星导航系统核心研究成果

导航卫星地面基准站的选取策略研究 韩德强,党亚民,薛树强,张龙平,王 虎 (189)

基于测距系统的中继卫星轨道机动检测方法研究..... 郭翔宇,张俊丽 (198)

多 GNSS 环境下卫星导航信号体制研究与设计 孟庆辉,李玉成 (202)

基于 OpenCV 机器视觉的卫星激光测距站自动导星系统的设计与实现 翟鸿飞 (206)

基于北斗星载接收机的空间航天器自主定轨性能分析..... 王 垚,支春阳 (212)

电离层闪烁对北斗单点定位性能的影响研究..... 陈细秋,周海军 (218)

简化卡尔曼滤波和扩展卡尔曼滤波在初始对准中的比较研究 陈新东,郭 杭,邓林坤 (224)

北斗成为全球海上遇险安全系统通信卫星提供商的可行性分析..... 林 悦,陈巍巍 (231)

基于方差分量估计的北斗定位算法研究..... 刘运航,刘雁雨 (235)

一种基于本地滤波的矢量跟踪环路技术研究 颜舒琳,张玉国,黄 胜 (240)

动中通天线自动寻星策略研究 张仲毅,徐 韬,郝凯旋,王 宇,刘宝帝 (247)

GNSS 接收机检定系统的设计 郑广伟,刘 兵,徐思达,王丽红 (255)

基于信号载噪比估计加权的北斗单点定位方法..... 陈细秋,钟 涛 (259)

基于北斗的电磁干扰源定位查找系统设计..... 刘运航,钟 涛 (264)

北斗、LTE 专网和移动警务网多网融合的移动核查指挥车载系统设计及应用 刘 丹 (269)

一种基于北斗 RDSS 通信的多网融合技术 王 召 (276)

ADAS&AV 仿真模拟测试的研究与发展..... 张晓华 (280)

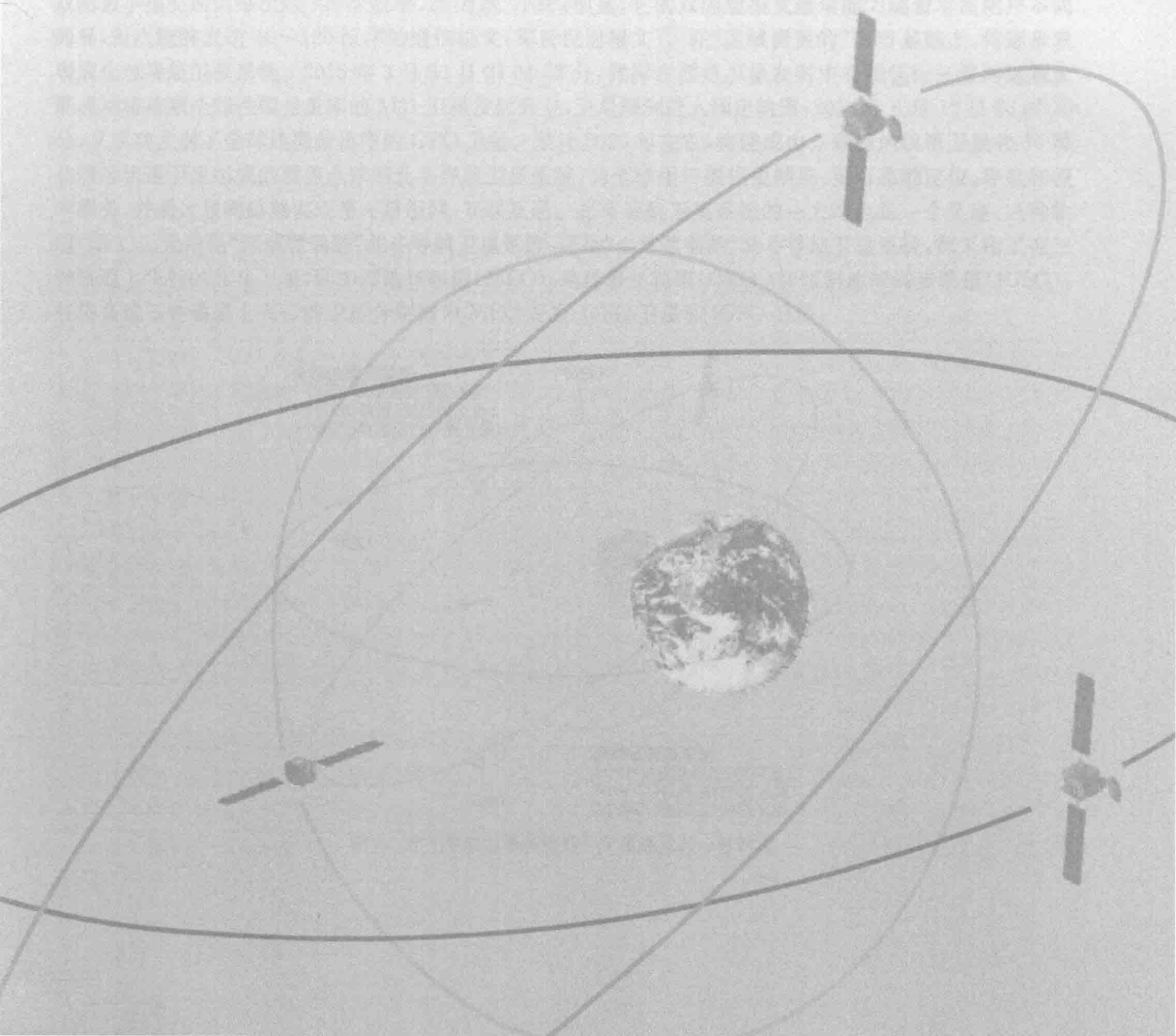
卫星战术数据链在潜艇通信中的应用..... 赵国艳,葛 杨 (283)

基于车辆移动性的 VANETs 网络单跳链路连通性能分析 郑洪江,陈 伟,王会鲜 (289)

北斗导航卫星系统在航天中的应用展望

第一部分

我国导航卫星技术和产业的总体发展



北斗导航卫星系统在航天中的应用展望

刘基余

(武汉大学测绘学院,湖北 武汉 430079)

摘 要:北斗导航卫星系统,一个星座、三种轨道的特点,能够为我国的航天飞行器在轨飞行发挥重大作用,本文展望了它的主要应用。

关键词:BDS; 航天飞行器; 卫星自主导航

2012年12月27日,我国宣布建成了区域覆盖的北斗导航卫星系统,并将它的英文名定为 BeiDou navigation satellite system,缩写为 BDS;它是中国自主建设、独立运行,与 GPS 等系统兼容的导航卫星系统。BDS 免费地向中国及周边地区提供连续的导航定位和授时服务,即能够在东经 $55^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 地区(即可覆盖西起伊朗、东达中途岛、南含新西兰、北至俄罗斯等地区),提供二维位置测量误差为 $\pm 10\text{m}$ 、高程测量误差为 $\pm 10\text{m}$ 、速度测量误差为 $\pm 0.2\text{m/s}$ 的导航定位服务,并能够提供精密授时和双向短报文通信服务。双向数字报文通信每次约 120 个汉字,70 万次/小时;但是,它的双向短报文通信能力随着军民用户不同而异,每次能够发送 40~120 汉字的通信报文(军长民短报文)。在“区域覆盖的”BDS 基础上,将逐步发展成全球导航卫星系统。2015年3月30日21时52分,我国在西昌卫星发射中心用长征三号丙运载火箭成功将首颗全球性覆盖星座的 M01 卫星发射升空,卫星顺利进入预定轨道;2016年6月12日23时30分,又成功发射了全球性覆盖星座的 GEO 卫星。预计 2020 年左右,将建成由 5 颗静地轨道卫星和 30 颗非静地轨道卫星组成的覆盖全球的北斗导航卫星系统,为全球用户提供更精准、更可靠的定位、导航和授时服务,并通过星间链路实现星—星组网、互联互通。北斗导航卫星系统的一大特色是一个星座、三种轨道(图 1)。无论是“区域覆盖的”北斗导航卫星系统,还是“全球覆盖的”北斗导航卫星系统,都采用了在三种轨道上飞行的北斗卫星,即中圆地球轨道(MEO)、地球静止轨道(GEO)和倾斜地球同步轨道(IGSO),并将在这三种轨道上飞行的卫星分别称为 MEO 卫星、GEO 卫星和 IGSO 卫星。

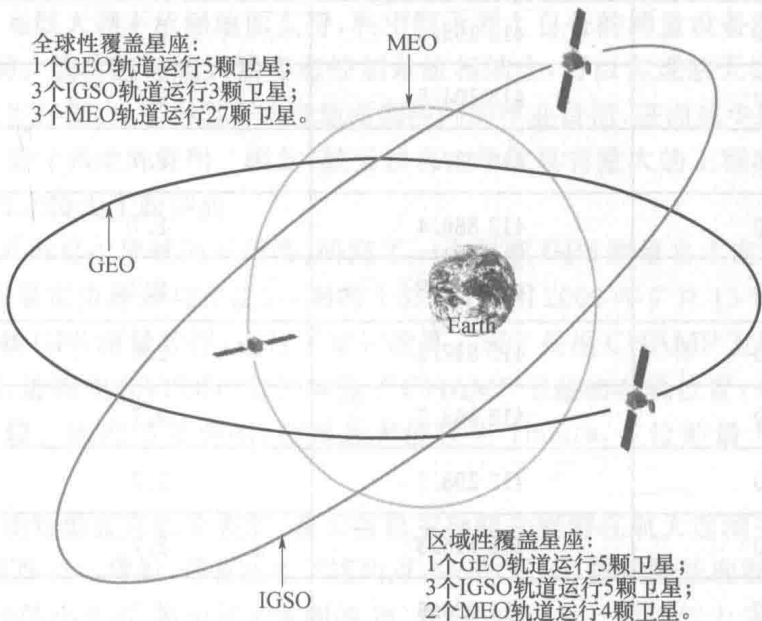


图 1 北斗导航卫星系统的一个星座及其三种轨道

如何利用北斗导航卫星信号为我国航天飞行器服务,是一个业界同行们积极探索的重大问题,本文拟用 GPS 在航天应用的实例为例,对此提出几种应用建议,以供研讨。

1 GPS 技术在航天应用中的实例

近年来的 GPS 实用证明,从几百千米高的低轨航天器,直到几万千米高的高轨航天器(如地球同步卫星,但它利用在地球另外一面与该卫星相对的 GPS 导航定位信号),都能够采用 GPS 技术进行导航定位测量;即使是航天器的交会与对接或航天飞机的入轨飞行和变轨返航,都成功地应用了 GPS 技术。美国正在设计研制中的用于取代航天飞机的乘员探索飞行器(crew exploration vehicle, CEV),也将采用 GPS 自主导航定位技术。实用表明,航天器所载 GPS 测量具有下列优越性:① 能够精确而自主地测定卫星在轨飞行时的实时位置与速度,甚至姿态参数;② 能够实现在轨卫星的自主导航,显著减少对地面测控系统的依赖;③ 能够为星上其他设备提供高精度的时间基准,取代地面测控系统的时统子系统。如果能够自主测定航天飞行器的位置、速度及其对应时间,就可以使它自主地完成有效载荷或者姿轨控系统在特定的位置、速度及其对应时间需要完成的任务;可以使它自主地维持所需要的飞行轨道;若是小卫星编队飞行,则能够自主地提供相对位置、速度及其对应时间。

为了实时了解航天器的飞行状况,评价飞行任务的完成情况,需要实时测控航天器的飞行轨道和飞行姿态等飞行参数。GPS 技术的问世,为此开创了新的技术途径。例如,GPS 用于弹道导弹的飞行轨道测量,表 1 和图 2 给出了一个实测的案例。因不能够公开更多的细节,仅供应用北斗卫星做类似测量参考。

表 1 弹载 GPS 测得的弹道导弹飞行的实时点位

时间	高度/m	GDOP	卫星数/颗
54451 07:31.0	413 376.3	2.7	6
54452 07:32.0	413 324.6	2.7	6
54453 07:33.0	413 261.1	2.7	6
54454 07:34.0	413 192.4	2.7	6
54455 07:35.0	413 104.5	2.7	6
54456 07:36.0	412 997.8	2.7	6
54457 07:37.0	412 886.4	2.7	6
54458 07:38.0	412 757.8	2.7	6
54459 07:39.0	412 617.8	2.7	6
54460 07:40.0	412 463.5	2.7	6
54461 07:41.0	412 298.5	2.7	6
54462 07:42.0	412 115.3	2.7	6
54463 07:43.0	411 920.6	2.7	6

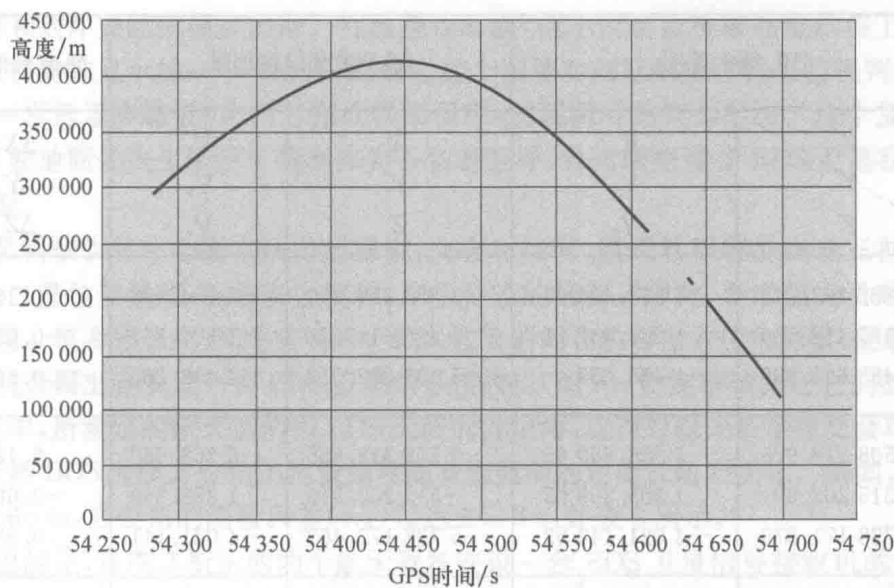


图2 弹载 GPS 测得的弹道导弹飞行的高度变化

2 航天器自主导航的仿真验证

2001 年 1 月,美国国会航天委员会发布了题为“涉及美国国家安全的航天组织与管理”的报告,再次强调了夺取制天权的重要性。夺取了制天权,既可以随时切断敌方的指挥、控制和通信联系,使敌人变成“聋子”和“瞎子”,又可以随心所欲地实施侦察、预警、监视、定位、通信及弹道导弹拦截,进而用航天武器系统消灭敌人的陆、海、空、天设施。美国将坚定不移地夺取制天权,控制天空,不仅要强化进攻性的天空控制战略,而且会努力开发防御性的卫星安全与防护技术。不管是“进攻”,还是“防御”,航天器轨道的精确测定,是一个事关全局成败的关键问题;可以认为,不能精密定轨,就无法实现控制天空,就无法实现航天武器系统的精确攻防,而提高航天器的自我生存能力,也成为 一个重大课题。

航天器自主导航,是航天器不依赖地面支持,利用航天器上自备的测量设备实时地测定自身的在轨位置、速度、姿态和时间。该功能与航天器姿态控制系统相结合,可以实现航天器轨道和姿态的自主维持,提高航天器的自我生存能力,这将显著减轻地面测控网的作业负担,进而减少地面测控网站的布设数量,降低航天器的运行管理和维持费用。因此,航天器自主导航具有重大的工程实用价值和军事战略意义。它也给遥测遥控技术提出了新挑战。

我们为了验证航天器自主导航的可行性,研究了一个星载 GPS 测量自主定轨软件 SATODS(详见刘基余的《GPS 导航卫星定位原理与方法》一书的 § 5.5),并用 2000 年 7 月 15 日发射的 CHAMP 卫星等对地观测卫星的星载 GPS 测量数据,进行了比较验算。表 2 是用 CHAMP 卫星于 2006 年 4 月 30 日的星载 GPS 实测数据,进而用 SATODS 软件解算了 CHAMP 卫星的在轨位置,并与美国 JPL 高精度轨道测量成果进行了比较。比较结果表明,速差最大值仅为 1mm/s,点位差最大值为 0.882m,如表 2 所示。

上述星载 GPS 实测数据验算成果表明,航天器自主导航是能够在航天遥测中发挥重要作用的。但是,实施(航天)器载 BDS 自主导航,需要注意下述两点:一是(航天)器载微处理器的计算能力,它们的计算能力要远远低于地面的小型机,甚至低于常用的 PC 机,要成功设计航天器上运行的自主定轨软件,就必须要考虑软件运行的这种工作条件;二是(航天)器载 BDS 伪距测量容易出现粗差,严重损失定轨精度,必须予以实时剔除与补偿。

表 2 CHAMP 卫星自主定轨与美国 JPL 精密星历的比较

时元 (2006.4.30)	JPL 精密星历		SATODS 定轨结果		轨道差值/m	速度差值 (mm/s)
	X	V _x	X	V _x	ΔX	ΔV _x
	Y	V _y	Y	V _y	ΔY	ΔV _y
	Z	V _z	Z	V _z	ΔZ	ΔV _z
1,50:00.0	3 882 363.349	−6 094.496 23	3 882 363.240	−6 094.496	0.109	−0.23
	−595 418.955	1 287.837 11	−595 418.331	1 287.837	−0.624	0.11
	−5 483 691.955	−4 458.259	−5 483 692.512	−4 458.260	0.557	1.00
1,51:00.0	3 508 318.976	−6 368.660 45	3 508 318.855	−6 368.660	0.121	−0.45
	−515 203.609	1 385.369 65	−515 202.910	1 385.369	−0.699	0.65
	−5 738 171.879	−4 021.140 62	−5 738 172.462	−4 021.141	0.583	0.38
1,52:00.0	3 118 734.313	−6 612.318 9	3 118 734.152	−6 612.318	0.161	−0.90
	−429 258.183	1 478.722 98	−429 257.397	1 478.722	−0.786	0.98
	−5 965 857.823	−3 565.474 39	−5 965 858.421	−3 565.475	0.598	0.61
1,53:00.0	2 715 471.860	−6 824.424 74	2 715 471.746	−6 824.424	0.114	−0.74
	−337 854.322	1 567.202 75	−337 853.496	1 567.202	−0.826	0.75
	−6 165 700.28	−3 093.384 1	−6 165 700.906	−3 093.385	0.626	0.90
1,54:00.0	2 300 452.431	−7 004.081 33	2 300 452.423	−7 004.081	0.008	−0.33
	−241 304.965	1 650.127 2	−241 304.161	1 650.127	−0.804	0.20
	−6 336 779.194	−2 607.059 63	−6 336 779.852	−2 607.060	0.658	0.37
1,55:00.0	1 875 646.107	−7 150.542 54	1 875 645.978	−7 150.542	0.129	−0.54
	−139 963.457	1 726.832 01	−139 962.595	1 726.831	−0.862	1.01
	−6 478 307.657	−2 108.748 14	−6 478 308.311	−2 108.749	0.654	0.86
1,56:00.0	1 443 063.230	−7 263.214 24	1 443 063.093	−7 263.214	0.137	−0.24
	−34 222.393	1 796.673 95	−34 221.511	1 796.673	−0.882	0.95
	−6 589 635.241	−1 600.751 54	−6 589 635.907	−1 600.752	0.666	0.46

对于(航天)器载 BDS 信号接收机而言,需要具备下述特性:①在秒速十几千米的高动态环境条件下,能够稳定地捕获、跟踪和测量在视北斗卫星所发送的导航信号;②具有不低于 10Hz 的数据更新率,以便获得密度适当的航天器在轨点位;③具有 1s 脉冲输出功能,以便为航天器上的所有电子设备建立统一的时间标准。此外,还需要着力削弱多路径误差。(航天)器载 BDS 导航信号测量的多路径效应,主要来自所在星体及其星上设备对 BDS 导航信号的反射,以及传播界质的散射波(详见刘基余的《GPS 导航卫星定位原理与方法》一书的 § 8.5 所述)。以上才能够达到预期目的。

3 笔者建议用 BDS 实现两个载人航天器的在轨自主方位角测量 促成两个航天器的快速接近对接

2012 年 6 月 24 日,在航天员刘旺的手动操纵下,神舟九号飞船与天宫一号目标飞行器成功地实现了

手控交会对接。据报道,在两者相距 140m 处,航天员刘旺才开始手动控制对接。当刘旺进行手动控制交会对接时,景海鹏和刘洋要给他很多协助。特别是景海鹏,他不仅要监视液晶显示器上拍到的天宫一号图像,而且还要监视前方显示的一个作业图像,通过这个图像对刘旺的操作做出监视判断,以便刘旺能够控制“神九”一米一米地逐步靠近“天宫”,完成锁紧程序,实现两者的交会对接。这个复杂的手控交会对接过程,能否尽可能地简化人工干预? 笔者作为一名老卫导,自然联想到了 BDS 卫星在载人航天器交会对接中的应用问题。

据中国航天员科研训练中心副主任白延强说,交会对接时,航天器很容易出现三种偏差:“一是左右上下的俯仰偏差;二是位置偏差;三是发生旋转,产生姿态的偏离。”因此,要求航天员对这六个自由度的偏离有很好的把握。笔者建议用 BDS 实现两个载人航天器的在轨自主方位角测量,促成两个航天器的快速接近。当两个航天器上各安设一台 BDS 卫星信号接收机(图 3),便能精确测定它们的七维状态参数和三维姿态参数;其中,所测定的航天器两根 BDS 天线的方位角,应该对航天员手控交会对接很有帮助。研究表明,两个航天器 BDS 天线方位角的测量精度随着天线间的距离长短而变化。例如,当两根 BDS 天线之间的距离 D 为 60 m,方位角的测量误差(m_A)仅达 ± 5.8 s,如表 3 所示。

值得特别指出的是,在图 3 所示的两个航天器各安设一台 BDS 卫星信号接收机的情况下,还可以精确测量航天器的运行速度。笔者于 20 世纪 90 年代中期率队进行(飞)机载 GPS 测量试验的成果表明,用 DGPS 数据解算的飞机运行速度达到了每秒毫米级的测量精度。在载人航天器的交会对接中,精确测量运行速度能够减轻航天员的人工干预,有益于交会对接。

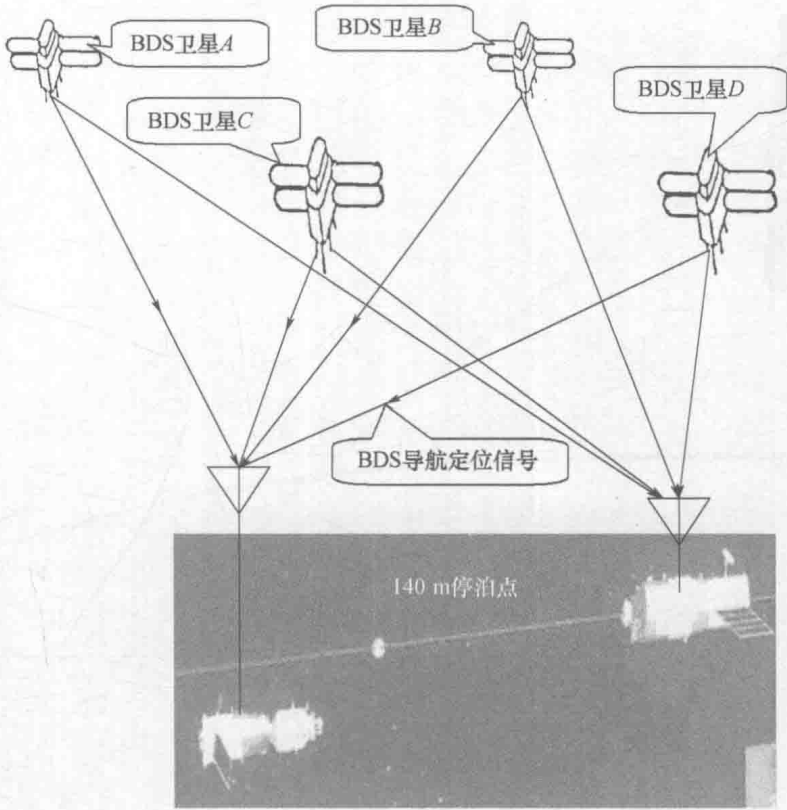


图 3 两个航天器各安设一台 BDS 卫星信号接收机

表 3 两个航天器 BDS 天线方位角的测量误差

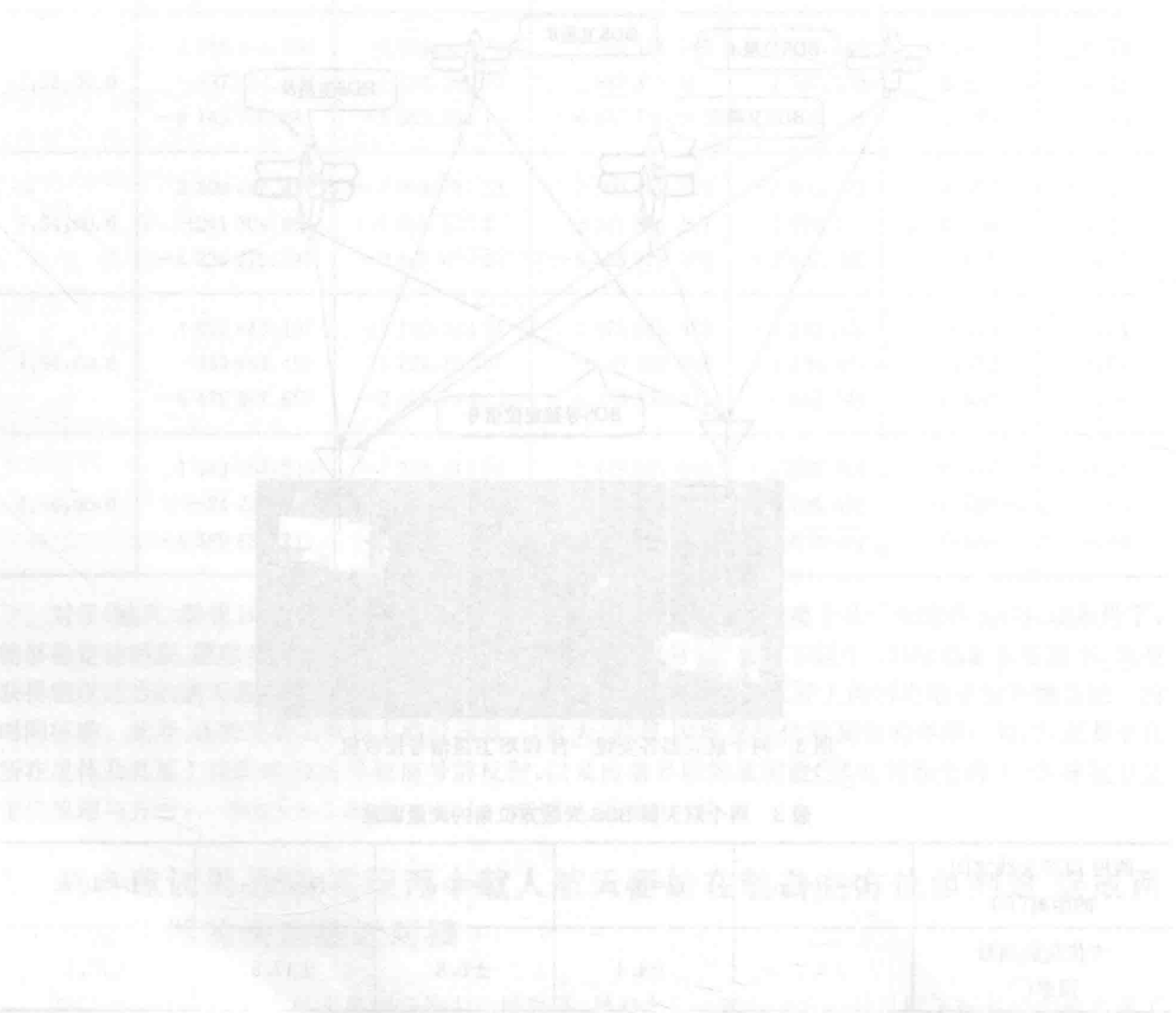
两根 BDS 天线之间的 距离(D)	$D=100$ m	$D=80$ m	$D=60$ m	$D=20$ m	$D=10$ m
方位角的测量 误差($^{\circ}$)	± 3.5	± 4.4	± 5.8	± 17.5	± 35.1

4 结 语

BDS在航天中的应用,具有广阔的应用前景。本文以GPS实用为例,展望了BDS在航天中的应用,并提出了BDS在载人航天器交会对接的应用方案,对将于2020年前后建成的中国空间站任务,也许能够给予一点启迪。

参考文献:(略)

作者简介:刘基余,男,1936年生,武汉大学测绘学院教授、博士生导师,兼任美国纽约科学院(New York Academy of Sciences)外籍院士、中国电子学会会士,主要研究方向是GNSS导航卫星定位/卫星激光测距技术,在国内外30余种中英文学术期刊上发表了280余篇相关研究论文,获得国家科技进步二等奖等十余项科技奖励。



长距离跨海工程精密高程传递研究

第二部分

曹旭东, 陈嘉庚

中国地质大学(北京)测绘工程研究所, 北京 100083

摘要: 长距离跨海工程精密高程传递, 主要依靠卫星定位系统(全球定位系统)及在大地水准面附近布设的精密水准网。本文研究了长距离跨海工程精密高程传递的精度问题, 并提出了长距离跨海工程精密高程传递的精度控制方法。本文研究了长距离跨海工程精密高程传递的精度问题, 并提出了长距离跨海工程精密高程传递的精度控制方法。

关键词: 长距离跨海工程; 精密高程传递; 精度控制

CORS 系统建设和高精度定位应用

曹旭东

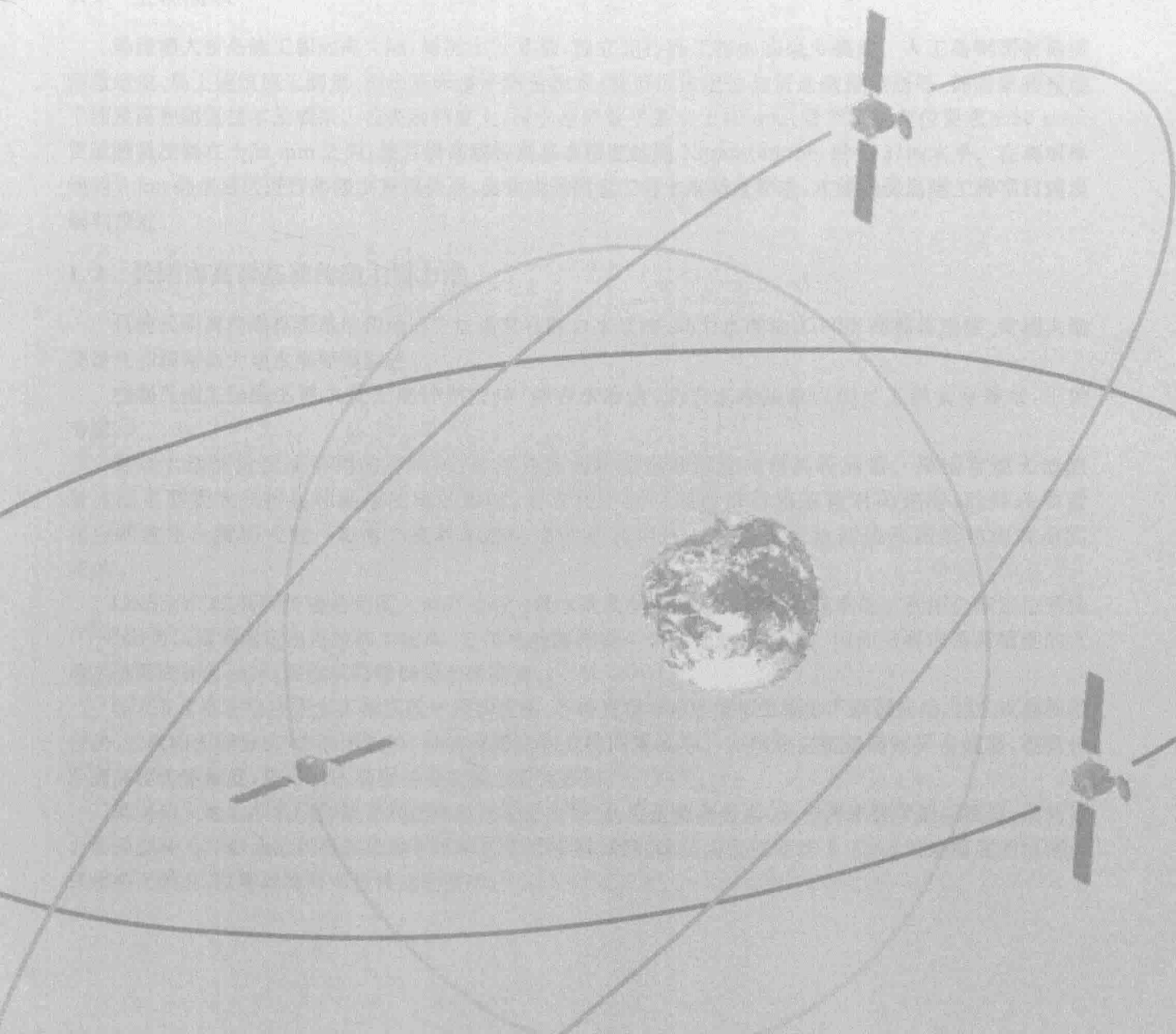
1. 引言

随着大规模跨海工程建设的开展, 对跨海工程精密高程传递的要求越来越高。本文研究了长距离跨海工程精密高程传递的精度问题, 并提出了长距离跨海工程精密高程传递的精度控制方法。本文研究了长距离跨海工程精密高程传递的精度问题, 并提出了长距离跨海工程精密高程传递的精度控制方法。

1.1 长距离跨海工程精密高程传递的精度问题

长距离跨海工程精密高程传递的精度问题, 主要取决于卫星定位系统的精度和地面控制网的精度。本文研究了长距离跨海工程精密高程传递的精度问题, 并提出了长距离跨海工程精密高程传递的精度控制方法。

长距离跨海工程精密高程传递的精度问题, 主要取决于卫星定位系统的精度和地面控制网的精度。本文研究了长距离跨海工程精密高程传递的精度问题, 并提出了长距离跨海工程精密高程传递的精度控制方法。



长距离跨海工程精密高程传递研究

曾旭平,马鑫程

(中交公路规划设计院有限公司,北京 100088)

摘要:本文通过 GNSS(BDS)高程传递法、光学测量法(经纬仪倾角法)及似大地水准面模型法等三种不同长距离精密高程传递方法的综合应用,为宽海域跨海工程建立了陆海统一高程基准,通过外符合检校,其成果精度优于国家二等水准精度,满足外海工程施工的需要。

关键词:高程传递;高程基准;GNSS(BDS);似大地水准面模型

1 引言

1.1 工程需求

港珠澳大桥岛隧工程远离大陆,海况十分复杂,独立先行施工将面临诸多挑战。人工岛钢圆筒振沉测量定位、岛上建筑施工测量、深水基床整平测量技术、管节沉放定位与贯通测量控制等,都需要高精度平面及高程测量技术及成果。在高程精度上,深水基床整平要求 ± 40 mm、管节沉放定位要求 ± 50 mm、贯通测量控制在 ± 50 mm之内,使首级高程控制基准精度达到13 mm(40 mm的1/3)的水平。在离海岸线约9 km的水域区进行高精度高程传递,必须满足国家二等水准精度要求,才能确保岛隧工程项目建设顺利推进。

1.2 长距离高程基准传递主要方法

目前长距离跨海高程基准传递的方法通常有静力水准法、动力水准法、GNSS高程传递法、常规大地测量法和精密似大地水准面模型法。

根据岛隧工程施工要求及工期计划安排,静力水准法、动力水准法难以满足工程实际需求,不做考虑。

常规大地测量方法常用的有两种:经纬仪倾角法测量和测距三角高程测量。采用常规大地测量方法主要受大气折射和地球曲率的影响,要求在不同时间段进行垂直角对向观测,此外还需做相应的改正。我国大陆—海南岛高程基准传递就是利用这一方法以大地四边形图形结构观测实施的。

GNSS(BDS)高程传递是利用大地高差与大地水准面差距之差传递高程基准的。利用全球定位系统(GNSS)可以精确确定出点位的大地高,它与水准高相差一个大地水准面高。因而只要求得高精度的大地水准面高相对差异,便能求得精确的水准高差。

GNSS水准法已在很多工程实践中得到应用,各种高程异常差值拟合模型不断被提出,如二次曲线拟合法、二次曲面拟合法、多面函数法、神经网络法和支持向量机等。如何建立精确高程异常模型,提高长距离高程传递精度,是GNSS高程传递的重点研究方向。

精密似大地水准面模型法是利用密集地面重力数据、卫星测高数据、高分辨率数字地面模型、最新重力场模型和GNSS水准的已知数据和实测数据等资料,研究确定高程精度优于1 cm级别精度的精密大地水准面模型,以实现跨海高程传递的目的。

2 技术实施路线

根据岛隧工程施工要求,采用光学测量法(经纬仪倾角法)、GNSS(BDS)高程传递法及似大地水准面模型法共计 3 种方法在业内首次实现海中测量平台高程精密传递。项目研究的技术工作流程如图 1 所示。

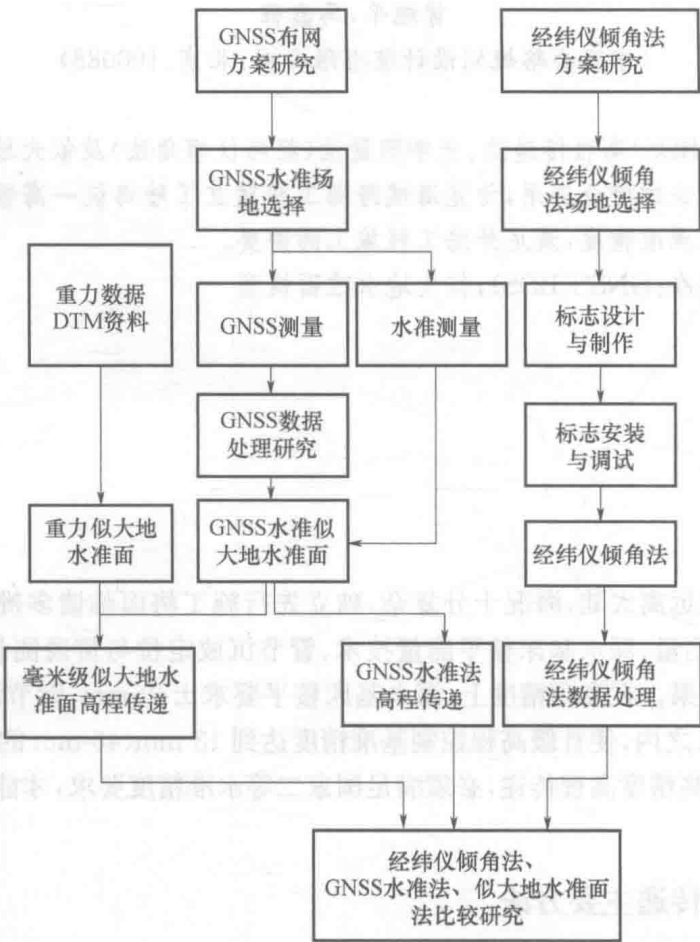


图 1 技术工作流程

2.1 GNSS 长距离精密高程传递技术研究

基于高精度 GNSS 测量和精密水准测量的 GNSS 高程传递法,通过采用适当的数学方法,利用大地高差与大地水准面差距之差实现高程基准的传递。

利用全球定位系统(GNSS)可以精确确定出点位的大地高,它与水准高(正常高)或海拔高(正高)之间存在如下关系

$$\left. \begin{aligned} h_{\text{正高}} &= H - N \\ h_{\text{正常高}} &= H - \zeta \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

式中, H 为大地高, N 为大地水准面差距, ζ 为高程异常。

同时,根据以上关系,不同的 GNSS 水准点之间有

$$\left. \begin{aligned} \Delta N &= \Delta H - \Delta h_{\text{正高}} \\ \Delta \zeta &= \Delta H - \Delta h_{\text{正常高}} \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

式中, ΔH 为大地高差, Δh 为水准高差, ΔN 为大地水准面高差, $\Delta \zeta$ 为高程异常之差。

由于区域大地水准面变化的不规则性,通常情况下不平行于参考椭球面,不同 GNSS 水准点之间高程异常差值是不相同的;但另一方面,对于较长距离的跨海高程传递(距离范围 5~20 km),可以认为局部