



全国高职高专工程测量技术专业规划教材



控制测量

KONGZHI CELIANG

许加东 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



全国高职高专工程测量技术专业规划教材

控制测量

KONGZHI CELIANG

许加东 主 编

郝亚东 朱恩利 黎 曦 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为全国高职高专工程测量技术专业规划教材。全书共分 11 章,包括绪论、平面控制网布设、精密角度测量、精密测距仪器与距离测量、导线测量外业观测、精密水准测量、三角高程测量、地面观测值归算至椭球面、椭球面元素归算至高斯平面、控制网平差计算、GPS 控制测量等。

本书可作为高职高专工程测量技术专业及测绘类相关专业的教材,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制测量/许加东主编. —北京:中国电力出版社,2011.11
全国高职高专工程测量技术专业规划教材
ISBN 978-7-5123-2333-9

I. ①控… II. ①许… III. ①控制测量-高等职业教育-教材
IV. ①P221

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 233083 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:王晓蕾 责任印制:简义舟 责任校对:焦秀玲

北京丰源印刷厂印刷·各地新华书店经售

2012 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787×1092 16 开本·16 印张·392 千字

定价:35.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

《控制测量》是高职高专工程测量技术专业核心课程之一。根据生产一线对工程测量技术专业应用型高技能岗位人才的要求，通过课程教学，学生应掌握控制测量的基本理论、方法，能运用其知识、技能解决实际工程问题，并具备一定的工程素质和应用及可持续发展能力，为工程建设提供测绘控制保障。

本书在编写过程中，充分考虑高等职业教育的特点，理论知识以“必需、够用”为度，重点突出实践技能的培养。随着测绘理论、技术和设备的发展进步，本书在内容选取方面进行了调整，删去了部分过时内容，增加了运用全球定位系统（GPS）进行控制测量的内容。测量过程的操作要求和精度指标都与现行的国家、行业规范相一致。为突出教材的实用性，在该书的附录部分介绍了目前测量平差的常用软件。本教材适用于高职高专工程测量技术专业及测绘类相关专业，也可供相关工程技术人员参考。

本书由许加东任主编，郝亚东、朱恩利、黎曦任副主编。参加编写人员有：王百勇、李永川、郭玉珍。全书共分 11 章和 2 个附录。第 1 章、第 2 章由许加东编写，第 3 章由郝亚东编写，第 4 章、第 5 章由王百勇编写，第 6 章、第 10 章由朱恩利编写，第 7 章、第 9 章由李永川编写，第 8 章由黎曦编写，第 11 章由郭玉珍编写。附录 A 由郭玉珍编写，附录 B 由朱恩利编写。

在本书的编写过程中，查阅和参考了大量的文献资料，在此谨向有关作者表示衷心感谢！同时对中国电力出版社为本书的出版所做的辛勤工作表示衷心感谢！

由于作者水平所限，加之时间仓促，书中难免有疏漏和不足之处，恳请广大教师、同行专家和读者提出宝贵意见并批评指正，以利日后进一步修订完善。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 控制测量的任务、作用和主要内容	1
1.2 地球形体与测量的基准面	3
1.3 控制测量常用坐标系	5
1.4 控制测量的发展现状与展望.....	12
习题	15
第 2 章 平面控制网布设	16
2.1 平面控制网的布设形式.....	16
2.2 国家平面控制网的布设原则和布设方案.....	18
2.3 工程平面控制网的布设原则和方案.....	22
2.4 平面控制网精度估算与优化设计.....	24
2.5 平面控制网技术设计.....	30
习题	37
第 3 章 精密角度测量	39
3.1 精密光学经纬仪及使用方法.....	39
3.2 全站仪角度测量.....	46
3.3 精密角度观测方法.....	53
3.4 精密光学经纬仪的仪器误差及其检校.....	62
3.5 水平角观测主要误差和操作基本规则.....	77
习题	84
第 4 章 精密测距仪器与距离测量	85
4.1 电磁波测距的基本原理.....	85
4.2 电磁波测距仪的分类.....	92
4.3 电磁波测距的误差来源及影响.....	94
4.4 电磁波测距要求与测距成果归算.....	98
习题.....	102
第 5 章 导线测量外业观测	104
5.1 导线的边长观测及水平角观测	104
5.2 全站仪垂直角观测	108
5.3 偏心观测与归心改正	111
习题.....	117
第 6 章 精密水准测量	118
6.1 高程基准建立与水准网布设	118

6.2	精密水准仪、水准尺结构分析与使用	126
6.3	二等水准测量外业观测与记录	140
6.4	水准测量外业概算	145
6.5	精密水准测量的误差来源及影响	149
	习题	153
第7章	三角高程测量	155
7.1	三角高程测量计算公式	155
7.2	球气差系数 C 值和大气垂直折光系数 K 值的确定	157
7.3	全站仪三角高程测量	160
7.4	三角高程测量的精度评定	162
7.5	三角高程导线测量方法	164
7.6	三角高程测量软件平差算例	168
	习题	172
第8章	地面观测值归算至椭球面	173
8.1	地球椭球的基本几何参数	173
8.2	椭球面上的几种曲率半径	176
8.3	椭球面上的常用坐标系及其转换	179
8.4	将地面观测的水平方向归算至椭球面	185
	习题	188
第9章	椭球面元素归算至高斯平面	189
9.1	高斯投影概述	189
9.2	椭球面元素归算至高斯平面	192
9.3	高斯换带计算	197
9.4	地方坐标系的建立	198
9.5	高斯投影算例与软件介绍	200
	习题	203
第10章	控制网平差计算	204
10.1	测量平差的数学模型与基本公式	204
10.2	平面控制网平差计算	207
10.3	高程控制网平差计算	212
	习题	215
第11章	GPS 控制测量	216
11.1	GPS 控制网布设	216
11.2	GPS 控制网数据采集	222
11.3	GPS 控制网数据处理	225
	习题	232
	附录	233
	附录 A 清华山维平差软件 NASEW 的使用	233
	A.1 软件简介	233

A.2	平面控制网平差	234
A.3	高程控制网平差	241
附录 B	华测静态数据处理软件的使用	243
B.1	任务的建立	243
B.2	坐标系统的建立	243
B.3	数据的导入	243
B.4	数据检查	244
B.5	基线的处理	245
B.6	网平差——已知点的输入	247
B.7	成果检查——基线向量及改正数、 τ 检验	247
B.8	成果提交	248
参考文献	250

第 1 章 绪 论

1.1 控制测量的任务、作用和主要内容

控制测量是运用大地测量的基本理论和方法，直接为工程建设提供测绘基础保障，精度相对较高的一种测量工作。具体来说，就是在一定的区域内，精确测定地面标志点空间位置（水平位置、高程）及其变化的测量工作。精确测定的地面标志点称为控制点，通过对角度、距离或高差的测量，将控制点用一定的几何图形连接起来，称为控制网。控制网分为平面控制网和高程控制网。

1.1.1 控制测量的任务和作用

控制测量的服务对象主要是各种工程建设、城镇建设和土地规划和管理等，这就决定了它的测量范围比大地测量要小，并且在观测手段和数据处理方法上具有多样化的特点。控制测量面向的对象主要是工程控制网，与大地测量主要研究国家大地控制网建立相比，既有区别又有联系。在全国广大区域内，按照国家统一颁发的法律、规范进行的控制测量称为大地控制测量。大地控制测量主要解决国家一、二等控制网建立的问题，但工程控制网与国家控制网又有不可分割的地方，如国家控制网中三、四等控制点本身就是为工程建设勘测规划设计阶段的测图服务的，而在一些城市或工矿区建立的边长较短、精度较高的工程控制网，也应与高等级的国家控制点联测，以便统一到国家控制网中去。所以在讨论工程控制网如何建立和实施时，必然要涉及国家控制网建立的原理与方法，在这一层面上它们是类似的。

控制测量的目的是建立各种控制网，作为控制测量主要服务对象的工程建设项目，在进行过程中，大体上可分为勘测规划设计、工程施工、工程运营管理三个阶段。每个阶段都对控制测量提出了不同的要求和任务，具体如下。

1. 在工程勘测规划设计阶段为测绘各种大比例尺地形图建立必要精度的测图控制网

各种比例尺地形图是工程勘测规划设计的依据。在这一阶段，设计人员要在大比例尺地形图上进行建筑物的设计或区域规划，以求得设计所依据的各项数据。我们知道，工程设计所需的数据应有必要的精度，以保证所设计工程项目的技术、经济等指标的先进性，因此要求提供的各种比例尺地形图应有必要的精度。为保证地形图的质量，要求为测绘各种比例尺地形图而建立的控制网应有必要的精度。为保证地形图的拼接和使用，还要求建立的控制网应在统一的坐标系下。

2. 在工程建设施工阶段建立施工控制网

施工控制网是工程施工放样的依据。施工放样是按照设计与施工的要求，将在图上设计好的建筑物的位置、形状、大小及高程在地面上标定出来，以便进行施工的过程。在这一阶段，控制测量的主要任务是，建立必要精度的施工控制网，满足施工放样的需要。施工控制网的建立，应使控制点误差所引起的放样点位的误差相对于施工放样的误差来说小到可以忽略不计。因此，对特定工程来说，施工控制网需要进行专门的设计，以满足精度、费用和时

间的需要。

3. 在工程建设运营管理阶段建立服务于建筑物变形监测的专用控制网

变形监测控制网是进行建筑物变形观测的依据。工程建筑物及其设备在施工或运营过程中都会产生变形,这种变形在一定限度以内可认为是正常现象,但如果超出了规定的限度,就会影响建筑物的正常使用,严重时甚至会危及建筑物的安全,给人民群众的生命、财产安全带来巨大隐患。因此,在工程建设的施工和运营管理阶段,必须对它们进行监视观测。工程建筑物变形监测的主要内容有水平位移监测、垂直位移监测、倾斜监测、裂缝监测等,其外在表现形式为,在某一方向(水平、竖直)上移动了多少距离或偏离了多大角度。因此,需要建立专用控制网,通过在控制网点上进行观测,取得这些原始数据。由于这种变形的数值一般都很小,为了能够足够精确地测量,要求变形观测控制网具有较高的精度,以使得观测数据具有科学上的意义。

从控制测量的工作性质来说,其主要作用在于:

(1) 控制网是进行各项测量工作的基础,控制网的建立是为完成具体测量任务而进行的前期准备工作。为满足地形图测绘需要,建立测图控制网;为满足工程施工需要,建立施工控制网;为满足工程运营管理需要,建立变形监测控制网。

(2) 控制网具有控制全局的作用。测量的基本原则,要求“从整体到局部,先控制后碎部”,对测图控制网而言,要求所测的各幅地形图具有一定的精度,能够相互拼接成为一个整体;对施工控制网而言,为保证建筑物各轴线之间相关位置的正确性,施工控制网要满足施工放样的精度要求。

(3) 控制网具有限制测量误差的传递和积累的作用。建立控制网时所采用的分级布网、逐级控制的原则,就是从技术上考虑限制测量误差的传递和积累。

从控制测量的服务对象来说,其主要作用在于:

(1) 在国民经济建设和社会发展中,发挥着基础性的重要保证作用。随着国民经济和社会事业的进步,我国的交通运输事业、资源开发事业、水利水电工程事业、工业企业建设事业、农业生产规划和土地管理、城市建设及社会信息管理等进入高速发展阶段。这些事业的建设都离不开作为规划设计依据的地形图。可以说,地形图是一切经济建设规划和发展必须的基础性资料。为了测绘地形图,就要布设全国范围内及区域性的大地测量控制网,以此为基础布设满足各种比例尺地形图测绘的测图控制网。因此可以说,控制测量在国民经济建设和社会发展中发挥着决定性的基础保证作用。

(2) 控制测量在防灾、减灾、救灾及环境监测、评价与保护中发挥着特殊作用。地震、洪水和强热带风暴等自然灾害给人类社会带来巨大灾难和损失。利用先进的 GPS、甚长基线干涉(VLBI)、激光测卫(SLR)等现代测量技术,可自动连续监测全球板块之间的运动,为人类准确预防地震造福。控制测量还可在山体滑坡、泥石流及雪崩等灾害监测中发挥作用。世界每年都发生多种灾难事件,如空难、海难、陆上交通事故、恶劣环境的围困等,国际组织已建立了救援系统,其关键是利用 GPS 快速准确定位及卫星通信技术,将遇难的地点及情况通告救援组织,以便及时采取救援行动。

(3) 控制测量在发展空间技术和国防建设中,在丰富和发展当代地球科学的有关研究中,以及在发展测绘工程事业中的地位和作用显得越来越重要。

1.1.2 控制测量的主要内容

把控制测量看作一项工程,从完成工程项目的角度来说,控制测量的主要工作内容有:

(1) 控制网的技术设计。主要对控制网的精度指标、工艺技术流程、工程进度、质量控制等进行设计。

(2) 控制网的施测。依据技术设计报告和文件,完成控制网的选点、埋石、外业观测和数据处理。

(3) 控制网的使用与维护。主要是对控制网成果进行有效管理,为工程建设项目的后续工作提供有用资料,并对控制网进行维护,必要时进行复测或补测。

把控制测量看作研究对象,从科学研究的角度来说,控制测量的主要研究内容有:

(1) 研究建立和维持高科技水平的工程和国家水平控制网和精密水准网的原理和方法,以满足国民经济和国防建设以及地学科学研究的需要。

(2) 研究获得高精度测量成果的精密仪器和科学技术的使用方法。

(3) 研究地球表面测量成果向椭球及平面的数学投影变换及有关问题的测量计算。

(4) 研究高精度和多类别的地面网、空间网及其联合网的数学处理的理论和方法、控制测量数据库的建立及应用等。

1.2 地球形体与测量的基准面

1.2.1 地球的基本形状

我们研究地球的形状主要是指弹性地球外壳的自然形状、陆地及海洋(底)的表面形状。由于地球自然表面的复杂性,为准确研究它的形状,就必须把地球表面划分为若干个区域,在每个区域内仔细地研究表面点的坐标,最后再把它们综合起来。这样做虽然是合理的,但有许多问题不好解决,不好实现。但从总体形状来看,地球的形状可用大地水准面包围的形体——大地体来表述,也可用旋转椭球体、三轴椭球体等几何形体来描述。对于旋转椭球体,亦即选取合适的长半轴(a)、短半轴(b)的椭圆绕其短轴旋转一周而得到的形体。理论上证明,由于地球自转的原因,它的形状不可能是球形,而只能是在两极地区呈扁平状、在赤道突出的旋转椭球体的形状,这里关键是选择和确定 a 、 b 及 α 。关于地球形状的另外一种表述就是所谓略显“梨形”,这是利用对人造地球卫星轨道摄动的观测资料的分析,反求解出地球的形状。近年来的研究,比如美国斯密松天文台给出的大地水准面的全貌认为,两极地区略扁的情况不完全一样,北极部分比南极部分略高一些,大约有20m的差异。由此证明,大地水准面总的形状是略显“梨形”。

除几何性质外,对它们还应赋予引力参数,比如质量、旋转角速度、地心引力常数、引力位、重力位等。此外,还应研究地球岩石圈、水圈及大气圈的几何物理方面的动力性质,应把太阳、地球、月球紧密联系在一起,还要研究地球重力场、磁场、热场及其他物理场,地球的自转和公转等。

把以上各方面的研究成果综合起来,才算比较全面地做到地球外壳形状的研究。从上可见,地球形状的研究是一个极为复杂的科学问题,涉及许多相关学科,只有互相协助和合作,才是解决此问题的最佳途径。

1.2.2 大地水准面

地球上的任意一点都同时受到两个力的作用,即地球自转的离心力和地心引力,它们的

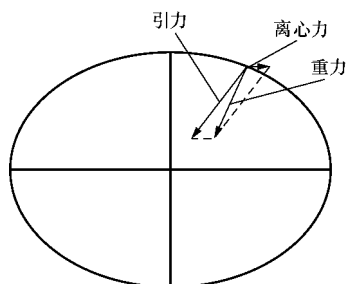


图 1-1 重力方向线

合力称为重力，重力的方向即为铅垂线方向，如图 1-1 所示。

处于静止状态的水面，例如平静的湖泊水面，即表示一个水准面。水准面必然处处与重力方向（即铅垂线方向）垂直，否则水就要流动，处于运动状态。在地球引力起作用的空间范围内，通过任何高度的点都有一个水准面。

观测水平角时，置平经纬仪就是使仪器的纵轴位于铅垂线方向，从而使水平度盘位于通过度盘中心水准面的切平面上。因此，所测的水平角实际上就是视准线在水准面上的投影线之间的夹角。

此外，用水准测量所求出的两点间的高差，就是过这两点的水准面间的垂直距离。对于边长的观测值，也存在化算到哪个高程水准面上的问题。

上述 3 类地面观测值，除水平角外，都同水准面的选取有关，特别是水准测量的结果，更是直接取决于水准面的选择。于是，为了使不同测量部门所得出的观测结果能够互相比较、互相统一、互相利用，有必要选择一个最具有代表性的水准面作为外业成果的统一基准。

我们知道，海洋面积约占地球总面积的 71%，从总体上来说，海水面是地球上最广大的天然水准面。设想把平均海水面扩展，延伸到大陆下面，形成一个包围整个地球的曲面，则称这个水准面为大地水准面，它所包围的形体称为大地体。由于大地水准面的形状和大地体的大小均接近地球自然表面的形状和大小，并且它的位置是比较稳定的，因此我们选取大地水准面作为测量外业的基准面，而与其相垂直的铅垂线则是外业的基准线。

1.2.3 总的地球椭球与参考椭球

虽然大地水准面最适合于作为测量外业的基准面，但控制测量的最终目的是精确确定控制点在地球表面上的位置，为此必须确知所依据的基准面的形状，也就是说，基准面的形状要能用数学公示准确地表达出来。大地水准面是否能满足这一要求呢？研究表明，大地水准面是略有起伏的不规则曲面，无法用数学公示把它精确地表达出来，因而也就不确知其形状。这是地表起伏以及地层内部密度的变化造成质量分布不均匀的结果。

随着科学技术的发展，人类逐渐认识到地球的形状极近于一个两极略扁的旋转椭球（一个椭圆绕其短轴旋转而成的球体）。对于这个椭球的表面，可用简单的数学公示将它准确地表达出来，因而世界各国通常都采用旋转椭球代表地球。它的形状和大小与椭球的长短半径 a 、 b 有关，也可用和这两个量有关的其他量来表示。

选好一定形状和大小的椭球后，还不能直接在它上面计算点的坐标，这是因为我们的测量成果不是以这个表面为根据的，而应该首先将以大地水准面为基准的外业观测成果化算到这个表面上。要做到这一点只选定椭球的形状和大小是不够的，还必须将它与大地水准面在位置上的关系确定下来，这个工作称为椭球定位。

综合以上所述，我们把形状和大小与大地体相近并且两者之间的相对位置确定的旋转椭球称为参考椭球。参考椭球面是测量计算的基准面。世界各国都根据本国的地面测量成果选择一种适合本国要求的参考椭球，因而参考椭球有许多个。这样确定的参考椭球在一般情况下和各国领域内的局部大地水准面最为接近，对该国的常规测绘工作来说较为方便。然而，当我们将各国的测量成果联系起来进行国际间的合作时，则参考椭球的不同又带来了不便，

因此,从全球着眼,必须寻求一个和整个大地体最为接近的参考椭球,称为总地球椭球。

总地球椭球的确定必须以全球范围的大地测量和重力测量资料为依据才有可能。然而,由于地球上海洋面积约占地球总面积的 71%,因而过去只根据占少数的陆地测量成果推算总地球椭球是不可能的。近年来,由于人造地球卫星大地测量技术的发展,已根据人造卫星和陆地大地测量的成果求出一些总地球椭球的近似数据供使用。人们最终将使用总地球椭球。

1.3 控制测量常用坐标系

坐标系是测量工作中处理观测数据和表达测站位置的数学和物理基础。点的位置可用坐标系来表示。同一个点的位置,在不同的坐标系中可有不同的表达方式和数据,而不同的坐标系则是由不同的坐标原点位置、坐标轴的指向和尺度比例所决定的。

在宇宙中,地球有两种不同的运转方式,就是围绕地球旋转轴的自转和围绕太阳的公转。同理就有两种不同的坐标系,一类是与地球体相固连的坐标系,称为地固坐标系;另一类是与地球自转无关,在空间固定的坐标系,称为空固坐标系。地固坐标系描述地球表面上点的位置比较方便,空固坐标系用来描述卫星运行的位置和状态极其方便。控制测量中常用的坐标系是地固坐标系,也称为地球坐标系,它是固定在地球上与地球一起旋转的坐标系。如果忽略地球潮汐和板块运动,地面上点的坐标值在地固坐标系中是固定不变的。根据坐标系原点位置的不同,地固坐标系分为参心坐标系(原点与参考椭球中心重合)和地心坐标系(原点与地球质心重合)。前者以参考椭球为基准,后者以总地球椭球为基准。无论是参心坐标系还是地心坐标系,均可分为大地坐标系和空间直角坐标系两种形式。

1.3.1 参心坐标

在经典大地测量中,为了处理观测成果和传算地面控制网的坐标,通常须选取一参考椭球面作为基本参考面,选一参考点作为大地测量的起算点(大地原点),利用大地原点的天文观测量来确定参考椭球在地球内部的位置和方向。参心坐标系中的“参心”二字意指参考椭球的中心,所以参心坐标系和参考椭球密切相关。由于参考椭球中心无法与地球质心重合,故又称其为非地心坐标系。参心坐标系按其应用又分为参心大地坐标系和参心空间直角坐标系两种。

参心大地坐标系的应用十分广泛,它是经典大地测量的一种通用坐标系。根据地图投影理论,参心大地坐标系可以通过高斯投影计算转化为平面直角坐标系,为地形测量和工程测量提供控制基础。由于不同时期采用的地球椭球不同或其定位和定向不同,中国历史上出现的参心坐标系主要有 BZ54(原)、GDZ80 和 BZ54 三种。

参心空间大地直角坐标系使用三维坐标 x 、 y 、 z 表示点位,它可按一定的数学公式与参心大地坐标系相互换算。通常在计算参心大地坐标系时作为一种过渡换算的坐标系。

建立一个参心大地坐标系,必须解决以下问题:①确定椭球的形状和大小;②确定椭球中心的位置,简称定位;③确定椭球中心为原点的空间直角坐标系坐标轴的方向,简称定向;④确定大地原点。解决这些问题的过程也就是建立参心大地坐标系的过程。

1. 1954 年北京坐标系 [BZ54(原)]

解放初期,中国大地坐标系采用河北省石家庄市的柳新庄一等天文点作为原点的独立坐标系,采用改点的天文坐标作为其大地坐标,以海福特椭球进行定位。

随着中国大地网的扩展,采用海福特椭球元素误差太大,且没有顾及垂线偏差影响的缺点越来越明显。为此,1954年总参谋部测绘局在有关方面的建议与支持下,采取先将中国一等锁与苏联远东一等锁相连接,然后以连接呼玛、吉拉林、东宁基线网扩大边端点的苏联1942年普尔科沃坐标系的坐标为起算数据,平差中国东北及东部地区一等锁。这样传算过来的坐标系定名为1954年北京坐标系。该坐标系是以苏联当时采用的1942年普尔科沃坐标系为基础建立起来的,所不同的是1954年北京坐标系的高程异常是以苏联1955年大地水准面差距重新平差结果为起算值,且以1956年青岛验潮站求出的黄海平均海面为基准面,按中国天文水准路线推算出来的。

几十年来,中国在该坐标系上完成了大量的测绘工作,实施了天文大地网局部平差,通过高斯-克吕格投影,得到点的平面坐标,测绘了各种比例尺的地形图。但是随着测绘新理论、新技术的不断发展,人们发现了该坐标系存在如下缺点:

(1) 因1954年原北京坐标系采用了克拉索夫斯基椭球,与现在的精确椭球参数相比,长半轴约长109m。

(2) 参考椭球面与中国所在地区的大地水准面不能达到最佳拟合,在中国东部地区大地水准面差距自西向东增加最大达+68m。

(3) 几何大地测量和物理大地测量采用的参考面不统一。中国在处理重力数据时采用赫尔默特1900~1909年正常重力公式,与公式相适应的赫尔默特扁球和克拉索夫斯基椭球不一致。

(4) 定向不明确。椭球短轴未指向国际协议原点CIO,也不是中国地极原点JYD1968.0,起始大地子午面也不是国际时间局BIH所定义的格林尼治平均天文台子午面。

(5) 椭球只有两个几何参数(长半轴、扁率),缺乏物理意义,不能全面反映地球的形状和物理特征。同时,1954年北京坐标系的大地原点在普尔科沃,是苏联进行多点定位的结果。

另外,该坐标系是按分区平差逐步提供大地点成果的,在分区的结合部产生了较大的不符值。

2. 1980年国家大地坐标系(GDZ80)

为了进行全国天文大地网整体平差,采用新的椭球参数和进行新的定位与定向,来弥补1954年北京坐标系存在的椭球参数不够精确、参考椭球与中国大地水准面拟合不好等缺点,所以建立中国新的大地坐标系是必要的、适时的。

(1) 椭球的参数。

在几何大地测量学中,通常用椭球长半轴 a 和扁率 f 两个参数表示椭球的形状和大小,但从几何和物理两个方面来研究地球,仅有两个参数是不够的。

在物理大地测量中研究地球重力场时,需要引进一个正常椭球所产生的正常重力场。关于物理的重力场,有著名的斯托克斯定理:如果物体被水准面 S 包围,已知它的总质量为 M ,并绕一定轴以常角速度 ω 旋转,则 S 面上或外部空间任一点的重力位都可以唯一确定。

正常重力位的球函数展开式为

$$U = \frac{GM}{\rho} \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n} \left(\frac{a}{\rho} \right)^{2n} P_{2n}(\cos\theta) \right] + \frac{\omega^2}{2} \rho^2 \sin^2\theta$$

式中 ρ ——地心矢径;

θ ——余纬度；

$P_{2n}(\cos\theta)$ ——勒让德多项式；

α, J_2, GM, ω ——正常椭球的 4 个参数。

式中其他的偶阶带谐系数 J_4, J_6, \dots 可根据这 4 个参数按一定的公式算得。1975 年国际大地测量与地球物理联合会 (IUGG) 第十四届大会上, 开始采用这 4 个参数全面描述地球的几何特性和物理特性。

这 4 个量通常称为基本大地参数, 在 4 个基本参数中, 长半轴 a 通常由几何大地测量提供, 地球自转角速度 ω 由天文观测确定, 它们的精度都比较好。地球质量 M 虽难测定, 但是 GM (G 是地球引力常数) 利用卫星大地测量可以精确至千万分之一。通过观测人造地球卫星, 确定与 a 等价的二阶带谐系数 J_2 , 其精确度提高了两个数量级。这些参数可以充分地确定地球椭球的形状、大小及其正常重力场, 从而使大地测量学与大地重力学的基本参数得到统一。

(2) 极移和地极原点。

地球自转轴与地球表面的交点叫做地球极点。由于地球内部和外部的动力学因素, 地球极点在地球表面上的位置随时间而变化, 这种现象叫做极移。随时间而变化的极点叫瞬时极, 某一时期瞬时极的平均位置叫做平地极, 简称平极。

极移运动是比较复杂的, 主要由张德勒运动和受迫季节性运动两项周期性运动所合成, 包括 1.2 年、1.0 年和 0.5 年三种周期, 另外还有一些不规则的变化。

在 1967 年国际天文学联合会和国际大地测量学与地球物理学联合会共同召开的第 32 次讨论会上, 建议平极的位置用国际纬度服务站 5 个台站的“1900~1905 年新系统”的平均纬度来确定。平极的这个位置相对于 1900~1905 年平均历元 (1903.0) 称为国际协议原点, 简称 CIO。

1977 年中国极移协作小组利用 1949~1977 年期间的国内外 36 个台站的光学仪器的测纬资料, 分别就地极的长期与周期分量进行分析研究后, 确定了中国的地极原点, 记为 JYD1968.0 (历元平极)。

在 1979 年 4 月前的国际时间局 (BIH) 数据均相对于 1968 年 BIH 系统。此后, 因加入了美国国防部测绘局 (DMA) 的多普勒极移成果而改用 1979 年 BIH 系统。随着观测技术和手段的发展, 以及观测台站和数据的增加, 国际极移服务机构 (IPMS) 所定期公布的瞬时地极坐标, 严格地说, 已不再是以原来所定义的 CIO 为极移原点。国际时间局所建立的 1979BIH 系统作为协议地面参照系以及所发布的瞬时地极坐标已加入了卫星多普勒及激光测月技术来求定极移, 其地极原点与原有的 CIO 自然也不一致, 1988 年后完全摒弃了天文光学观测成果, 国际协议原点 (CIO) 作为历史上曾沿用过的名词已失去原有的意义。目前可以这样认为, 由国际时间局所公布的瞬时地极坐标所相应的坐标原点即为 BIH 系统中的协议地极原点。

(3) 起始天文子午线。

1884 年国际经度会议决定, 以通过英国格林尼治天文台艾黎仪器中心的子午线作为全世界计算天文经度的起始天文子午线。起始天文子午线与赤道的交点 E 就是天文经度零点。

但是地极位置的变化势必引起起始子午线的变化。加之格林尼治天文台已于 1959 年搬迁至 75km 以外的赫斯特莫尼尤克斯, 新的格林尼治天文台已经失去了它的特殊意义。

考虑到极移的影响和格林尼治天文台迁址，为使沿用成习的经度计算尽量不变，1968年国际时间局（BIH）决定，采用通过国际协议原点（CIO）和原格林尼治天文台的经线为起始子午线。起始子午线与相应于 CIO 的赤道的交点 E 为经度零点。这个系统称为“1968BIH”系统。

显然，起始子午线或经度零点只靠一个天文台是难以保持的。所以，国际时间局的 1968BIH 系统是由分布在世界各地的许多天文台所观测的经度，反求出各自的经度原点，取它们的权中数，作为平均天文台所定义的经度原点。国际时间局再根据 1954~1956 年的观测资料求出格林尼治天文台所定义的经度零点 E 与平均天文台所定义的经度原点的经度差值，来修订各天文台的精度值，从而保持了用 E 点作为经度零点。

由于上述原因，国际时间局的 1968BIH 系统改为以平均天文台为准，习惯上仍称以“格林尼治平均天文台”为准。自然，这种称呼事实上已经和格林尼治没有直接的关系。

通过投影计算可以证明，虽然地极位置发生改变，起始子午线的定义发生了变化，导致了不同赤道上的经度零点发生变化，但这种变化是很小的，实际上仍然可以认为不变。中国采用 JYD1968.0 作为地极原点，其对应的经度零点和 1968BIH 系统的零点相比较差异很小，实际上可以认为是一样的。

起始天文子午线和起始大地子午线紧密相关，后者直接关系到大地坐标系的定义和不同系统的大地坐标换算。

(4) 1980 年国家大地坐标系的建立。

1978 年 4 月，中国在西安召开了全国天文大地网整体平差会议，在会议上决定建立中国新的国家大地坐标系。有关部门根据会议纪要，开展并进行了多方面的工作，建成了 1980 年国家大地坐标系（GDZ80）。

1980 年国家大地坐标系采用了全面的描述椭球性质的 4 个基本参数（ a 、 GM 、 J_2 、 ω ），这就同时反映了椭球的几何特性和物理特性。4 个参数的数值采用 1975 年国际大地测量与地球物理联合会第十六届大会的推荐值。

椭球长半径 $a=6\ 378\ 140\text{m}$ ；

地球引力常数（含大气层） $GM=3\ 986\ 005\times 10^8\text{m}^3/\text{s}^2$ ；

二阶带谐系数 $J_2=1082.63\times 10^{-6}$ ；

地球自转角速度 $\omega=7\ 292\ 115\times 10^{-11}\text{rad/s}$ 。

大地坐标系的原点设在中国中部陕西省泾阳县永乐镇，在西安以北 60km，简称西安原点。

1980 年国家大地坐标系的椭球定位，是按局部密合条件实现的。依据 1954 年北京坐标系大地水准面差距图，按 $1^\circ\times 1^\circ$ 间隔，在全国均匀选取 922 个点，列出高程弧度测量方程式，按 $\sum_1^{922}\zeta^2$ 为最小，求得椭球中心的位移 Δx_0 、 Δy_0 、 Δz_0 ，进而可以求出大地原点上的垂线偏差分量（ η_k 、 ξ_k ）和高程异常（ ζ_k ）。再由大地原点上测得的天文经纬度（ λ_k 、 φ_k ）和正常高（ H_k ）以及至另一点的天文方位角（ α_k ），即可算得大地原点上的大地经纬度（ L_k 、 B_k ）和大地高（ h_k ）以及至另一点的大地方位角（ A_k ），以此作为 1980 年国家大地坐标系的大地起算数据。

1980 年国家大地坐标系的椭球短轴平行于由地球质心指向中国地极原点 JYD1968.0 的

方向,起始大地子午面平行于中国起始天文子午面。

大地点高程以1956年青岛验潮站求出的黄海平均海水面为基准。

3. 1954年新北京坐标系(BJZ54)

尽管1980年国家坐标系具有先进性和严密性,但1954年原北京坐标系毕竟在中国测绘工作中潜移默化,影响深远。40年来,数十万个国家控制点都是在这个系统内完成计算的,一切测量工程和测绘成果均无例外地采用着这个系统。

为了既体现1980年国家大地坐标系的严密性,又照顾到1954年北京坐标系的实用性,有关部门想出一种两全齐美的办法,于是就产生了1954年新北京坐标系。

1954年新北京坐标系的成果,就是将1980年国家大地坐标系的空間直角坐标经3个平移参数平移变换至克拉索夫斯基椭球中心,就成了新北京坐标系的成果。所以说,新北京坐标系的成果实际上就是从1980年国家大地坐标系整体平差成果转换而来的。

因此,1954年新北京坐标系的成果既有整体平差成果的科学性,其坐标精度和1980年国家大地坐标系的坐标精度是一致的,改变了1954年原北京坐标系局部平差成果的局限性;同时,由于参考椭球又恢复成克拉索夫斯基椭球,使新北京坐标系内的坐标值与原北京坐标系内的坐标值相差很小。

据统计,新北京坐标系与原北京坐标系相比较,就控制点的平面直角坐标而言,纵坐标差值在 $-6.5\sim+7.8\text{m}$ 之间,横坐标差值在 $-12.9\sim+9.0\text{m}$ 之间,差值在5m以内者约占全国80%地区。这样的差异没有超过以往资用坐标与平差坐标差异的范围,反映在1:50 000比例尺地形图上,绝大部分不超过0.1mm。

1.3.2 地心坐标系

地心坐标系分为地心空间大地直角坐标系和地心大地坐标系等。地心空间大地直角坐标系又可分为地心空间大地平直角坐标系和地心空间大地瞬时直角坐标系。通常所说的地心坐标系是指地心空间大地平直角坐标系,简称地心直角坐标系。

1. 建立地心坐标系的意义和方法

地心坐标系中的“地心”二字意指地球的质心。在地心空间平直角坐标系中用 X_D 、 Y_D 、 Z_D 表示点的位置,地心大地坐标系中用 L_D 、 B_D 、 H_D 表示点的位置。

仅从地形图测绘来说,地心直角坐标系并不十分需要,因为参考椭球面已经和测区范围的大地水准面达到最佳切合,按参心坐标系测绘地形图还是方便的。但是就整个地球空间而言,参心坐标系就表现出不足,主要是以下三点:

- (1) 不适应建立全球统一坐标系的要求。
- (2) 不便于研究全球重力场。
- (3) 水平控制网和高程控制网分离,破坏了空间点三维坐标的完整性。

在上述这三个方面,地心坐标系就表现出明显的优势。因人造地球卫星围绕地球运转,其轨道平面随时通过地球质心,所以通过对卫星的跟踪观测来处理与观测站位置有关的问题时,就需要建立以地心为坐标原点、与地球相固连的三维空间直角坐标系统。

从理论上讲,建立地心直角坐标系的方法很多,例如可以按重力方法建立,还可以按天文大地测量方法建立,但实际上又各有困难,难以完成,更严重的是椭球中心很难做到和地球质心重合。

建立地心坐标系的最理想方法是采用空间大地测量的方法。20世纪60年代以来,随着

空间技术的发展,美国、前苏联等利用卫星进行洲际联测,并综合天文、大地、重力测量等资料,开展了建立地心坐标系的工作。

2. 地心坐标系的表述形式

地心直角坐标系如图 1-2 所示,它的定义是:原点 O 与地球质心重合; Z 轴指向国际协议原点 CIO, X 轴指向 1968BIH 定义的格林尼治平均天文台的起始子午线与 CIO 赤道交点 E , Y 轴垂直于 XOZ 平面,构成右手坐标系。

地面点 D 的位置用 X_D 、 Y_D 、 Z_D 三个坐标量来表示(图 1-2)。

地心大地坐标系如图 1-3 所示,它的定义是:地球椭球的中心与地球质心重合,椭球的短轴与地球自转轴重合,大地纬度 B 为过地面点的椭球法线与椭球赤道面的夹角,大地经度 L 为过地面点的椭球子午面与 BIH 定义的起始子午面之间的夹角,大地高 H 为地面点沿椭球面法线至椭球面的距离。

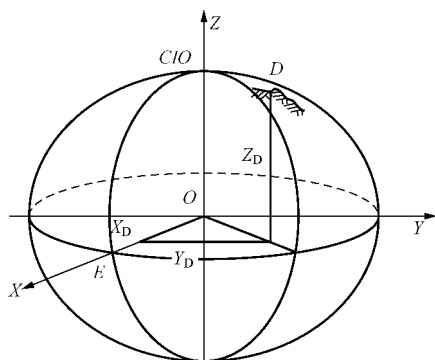


图 1-2 地心直角坐标系

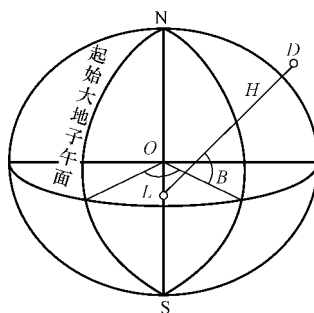


图 1-3 地心大地坐标系

3. WGS-84 大地坐标系

自 20 世纪 60 年代以来,美国国防部制图局(DMA)为建立全球统一坐标系统,利用了大量的卫星观测资料以及全球地面天文、大地和重力测量资料,先后建成了 WGS-60、WGS-66 和 WGS-72 全球坐标系统。于 1984 年,经过多年修正和完善,发展了一种新的更为精确的世界大地坐标系,称之为美国国防部 1984 年世界大地坐标系,简称 WGS-84(图 1-4)。WGS-84 于 1985 年开始使用,1986 年生产出第一批相对于地心坐标系的地图、航测图和大地成果。

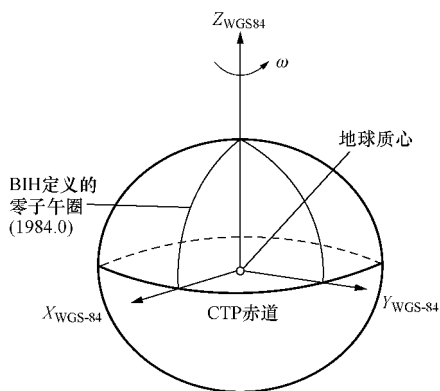


图 1-4 WGS-84

由于 GPS 导航定位全面采用了 WGS-84,用户可以获得更高精度的地心坐标,也可以通过转换获得较高精度的参心大地坐标系坐标。

WGS-84 椭球采用国际大地测量与地球物理联合会第 17 届大会大地测量常数推荐值,采用的 4 个基本参数如下:

椭球长半径 $a=6\ 378\ 137\text{m}$;

地球引力常数(含大气层) $GM=3\ 986\ 005 \times 10^8\ \text{m}^3/\text{s}^2$;

正常化二阶带球谐系数 $\bar{C}_{2,0}=-484.166\ 85 \times 10^{-6}$;

地球自转角速度 $\omega=7\ 292\ 115 \times 10^{-11}\ \text{rad/s}$ 。