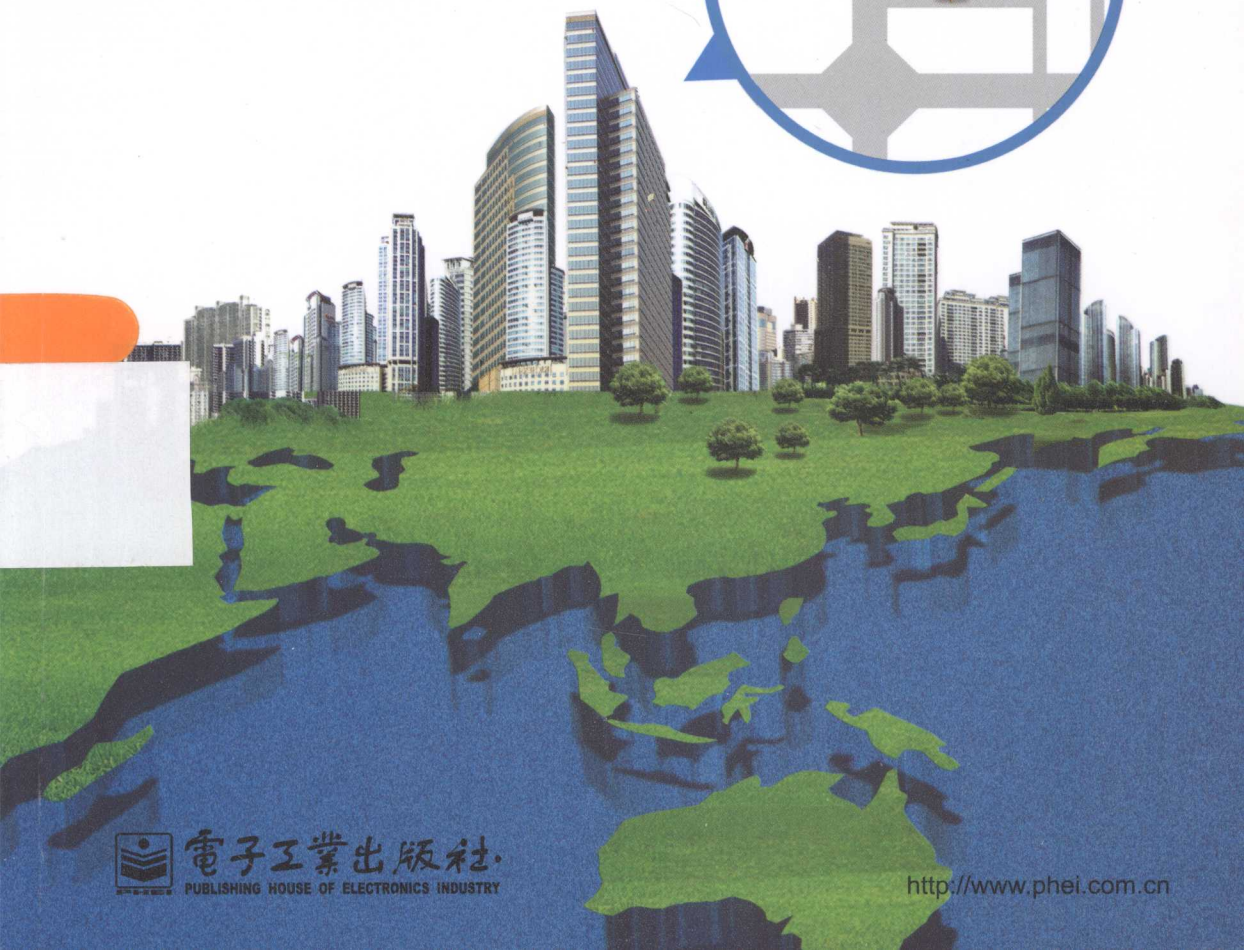


地图投影 与坐标变换

◎ 主编：王美玲 付梦印 ◎ 参编：刘彤 郭志强



014007533

P282.1
02

地图投影与坐标变换

主 编 王美玲 付梦印
参 编 刘 彤 郭志强



P282.1
02

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING



北航

C1694496

8825888

内 容 简 介

本书根据导航定位、GIS及大地测量学科的发展和应用需要,以简明易学的方式,系统阐述了地图投影、坐标变换的基本理论,坐标变换与转换的方法和公式,并对常用方法给出实例。对当前我国导航定位等领域所用的等角圆柱投影、等角圆锥投影及其正反解运算等,作为重点详加论述。本书计算实例、插图与数表的配备齐全,将知识与实用融于一体。

本书内容新、覆盖面广、通俗易懂,有较强的理论性和实用性,可作为导航、GIS、测绘工程等专业本科生、研究生教材或教学参考书,也可供从事相关领域及专业的科技人员和研究人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

地图投影与坐标变换 / 王美玲, 付梦印主编. —北京: 电子工业出版社, 2014.1
ISBN 978-7-121-19805-2

I. ①地… II. ①王… ②付… III. ①地图投影 ②坐标换算 IV. ①P282.1②P21

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第048281号

责任编辑:董亚峰 特约编辑:王纲

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:720×1000 1/16 印张:13.75 字数:272千字

印 次:2014年1月第1次印刷

定 价:38.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

工作近 20 年了，一直从事于车辆定位定向导航方面的研究，承担过多个国家的地图投影、坐标转换与处理任务，心里一直有个愿望，那就是将研究成果与大家分享，但由于工作繁忙，思绪未理清楚，因此未能了却心愿。有一天突然得到国际石油和天然气生产国（International Association of Oil & Gas Producers）的《坐标变换与坐标转换（包含公式）》，如获至宝，下定决心，着手出版此书。

本书共分 3 篇，第 1 篇为地图投影与坐标变换所涉及的基础知识，包括基本概念及常用投影的定义等，为后两篇提供理论参考；第 2 篇为地图投影及其转换公式，该篇对 17 种地图投影进行了详细描述，每种投影都给出了实例；第 3 篇为除地图投影外的坐标转换公式，该篇介绍了地理坐标、地心坐标等各种坐标之间的不同转换方法。

本书涵盖了绝大多数的地图投影和坐标转换方法，对各投影和方法都给出了实例，并给出了计算过程中的重要中间变量的取值以及最后解算结果，具有“拿之即用”的特点，因此实际应用价值高。

本书由北京理工大学王美玲和付梦印主编，负责全书的组织、安排及统稿。前两篇由王美玲编写和翻译，第 3 篇由刘彤翻译。

由于作者水平有限，书中难免有错误及不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2013 年于北京理工大学北院 6 号教学楼

目 录

第 1 篇 基础知识

第 1 章 基本概念	3
1.1 坐标	3
1.2 坐标参考系	4
1.3 坐标系	8
1.4 坐标轴	10
1.5 大地基准	11
1.6 椭球	12
1.7 本初子午线	13
1.8 真北、格网北与磁北	14
第 2 章 大地坐标系与空间直角坐标系	15
2.1 参心坐标系	15
2.2 地心坐标系	15
2.3 大地坐标系	16
2.4 空间直角坐标系	18
第 3 章 地图投影	19
3.1 投影方法	19
3.2 地图投影变形	20
3.3 地图投影分类	21
3.3.1 按投影性质分类	21
3.3.2 按转换法则分类	22
3.3.3 按投影轴与地轴的关系分类	27
3.4 常用地图投影	28
第 4 章 坐标操作	32
4.1 概述	32
4.2 坐标操作方法	33

4.3	坐标操作方法所需参数	33
4.4	坐标操作的参数值	33
4.5	转换的多重性	33
4.6	操作的可逆性	34
4.7	级联操作	34
4.8	应用软件产生的级联操作	35

第 2 篇 地图投影及其转换公式

第 5 章	地图投影概述	41
第 6 章	地图投影参数	43
第 7 章	地图投影公式	50
7.1	兰波特正形圆锥投影	51
7.1.1	兰波特正形圆锥投影 (2SP)	53
7.1.2	兰波特正形圆锥投影 (1SP)	55
7.1.3	兰波特正形圆锥投影 (1SP, 坐标轴指西)	57
7.1.4	兰波特正形圆锥投影 (2SP, 比利时)	57
7.1.5	兰波特准正形圆锥投影	58
7.2	捷克-斯洛伐克投影	62
7.2.1	捷克-斯洛伐克投影	63
7.2.2	捷克-斯洛伐克投影 (坐标轴指北)	67
7.2.3	修正的捷克-斯洛伐克投影	68
7.2.4	修正的捷克-斯洛伐克投影 (坐标轴指北)	71
7.3	墨卡托投影	72
7.3.1	墨卡托投影 (球体)	78
7.3.2	可视化伪墨卡托投影	80
7.3.3	卡西尼-索尔特奈投影	82
7.3.4	双曲线卡西尼-索尔特奈投影	85
7.4	横轴墨卡托投影	87
7.4.1	一般情况	87
7.4.2	横轴墨卡托分带格网系统	98
7.4.3	横轴墨卡托投影 (坐标轴指南)	99
7.5	斜轴墨卡托投影	101
7.5.1	霍廷斜轴墨卡托投影	103

7.5.2	拉波得斜轴墨卡托投影	108
7.6	赤平投影	113
7.6.1	赤道斜轴赤平投影	113
7.6.2	极地赤平投影	117
7.7	新西兰地图格网投影	125
7.8	突尼斯矿业格网投影	126
7.9	美国多圆锥投影	127
7.10	兰波特等积方位投影	129
7.10.1	斜轴情况	129
7.10.2	极地情况	131
7.10.3	兰波特等积方位投影(球体)	132
7.11	兰波特等积圆柱投影	132
7.12	阿尔伯斯等积投影	133
7.13	等距圆柱投影	134
7.13.1	等距圆柱投影(球体)	137
7.13.2	伪 Plate Carrée 投影	138
7.14	彭纳投影	138
7.14.1	一般情况	139
7.14.2	坐标轴指南情况	140
7.15	等距方位投影	140
7.15.1	修正的等距方位投影	140
7.15.2	关岛投影	143
7.16	透视投影	146
7.16.1	概述	146
7.16.2	垂直透视投影	147
7.16.3	垂直透视投影(正交情况)	149
7.17	正交投影	150

第3篇 除地图投影外的坐标转换公式

第8章	地理坐标、地心坐标及站心坐标之间的转换	157
8.1	地理坐标与地心坐标之间的转换	157
8.2	地心坐标与站心坐标之间的转换	159
8.3	地理坐标与站心坐标之间的转换	162
8.4	三维地理坐标与二维地理坐标之间的转换	165

第 9 章 坐标操作方法	166
9.1 多项式变换方法	166
9.1.1 一般情况	166
9.1.2 复数多项式变换方法	173
9.1.3 西班牙多项式变换方法	175
9.2 各种线性坐标操作方法	176
9.2.1 仿射参量变换方法	176
9.2.2 一般仿射几何变换方法	177
9.2.3 相似变换方法	181
9.2.4 UKOOA P6 地震格网变换方法	184
第 10 章 坐标变换	189
10.1 偏移量-概述	189
10.2 垂直坐标参考系之间的变换	190
10.2.1 垂直偏移量	190
10.2.2 格网数据插补的垂直偏移量	191
10.2.3 垂直偏移量和斜率	192
10.3 地心坐标参考系之间的变换	193
10.3.1 地心坐标系的变换	194
10.3.2 赫尔默特 7 参数变换	194
10.3.3 莫洛坚斯基-巴德卡斯变换	197
10.4 地理坐标参考系之间的变换	198
10.4.1 采用地心坐标变换方法	198
10.4.2 简化的莫洛坚斯基变换	202
10.4.3 地理坐标偏移量	204
10.4.4 格网数据插补的地理坐标偏移量	205
10.5 大地水准面与高程修正模型	206
10.5.1 三维地理坐标到重力相关高程的变换	206
10.5.2 三维地理坐标到二维地理坐标+重力相关高程的变换	207
10.5.3 带有高程偏移量的二维地理坐标变换	208

第 1 篇

基础知识

地图投影是利用一定的数学法则把地球表面的经线、纬线转换到平面上的理论和方法。将坐标值从一个坐标系转换到另一个坐标系时则可实现坐标变换。

本篇主要涵盖了地图投影和坐标变换所涉及的基础知识，其中包括坐标、坐标系、大地基准等基本概念；介绍了参心坐标系、地心坐标系、大地坐标系以及空间直角坐标系的定义和特点；按投影性质、转换法测、投影轴与地图关系等对地图投影进行了分类，对墨卡托投影、通用横轴墨卡托投影（UTM）、高斯-克吕格投影和兰波特投影等常用地图投影进行了说明；最后简单介绍了坐标转换与坐标变换的方法、所需参数和特点。

1.1 坐标

坐标 (Coordinate) 是用于描述实体位置的一系列数值。坐标隶属于坐标系 (Coordinate System, CS), 坐标系为控制坐标的数学法则, 其中包括坐标轴的个数、名称、方向、单位及其顺序。当坐标用于描述地图上实体的位置时, 坐标则隶属于或者基于坐标参考系 (Coordinate Reference System, CRS), 坐标参考系是与物理对象无关的抽象数学概念, 通过大地基准与地球或其他载体 (如船舶等) 相关联, 坐标参考系是针对地球时的坐标系。坐标操作 (Coordinate Operation) 用于将基于一个坐标参考系的坐标值转换到相对于另一个坐标参考系的坐标值。

由坐标表示的空间参考抽象模型框图如图 1-1 所示。

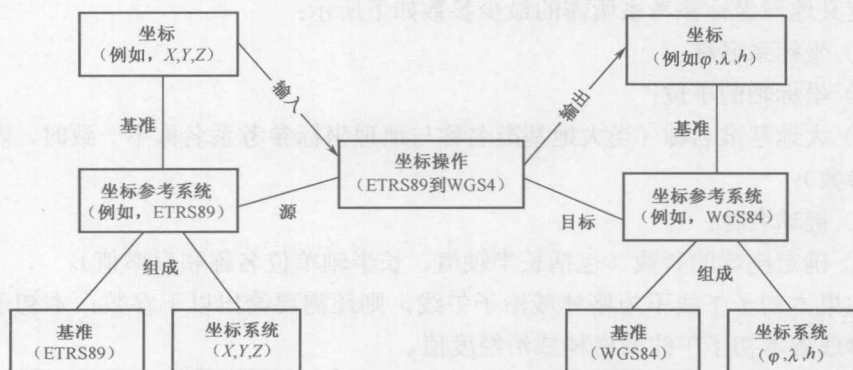


图 1-1 空间参考抽象模型框图

1.2 坐标参考系

通过大地基准与真实世界或者说地球相关联的坐标系称为坐标参考系。多数坐标参考系包含坐标系。坐标系是对包含测量单位在内的坐标轴的定义，是与地球没有确定联系的数学抽象概念。提到坐标系时一般都是指坐标参考系。

坐标系通过大地基准与地球相关联。大地基准用于确定坐标系与地球之间的关系，它是将坐标系的数学抽象概念以坐标形式描述地球上或者近地球实体位置的基础。

坐标参考系、坐标系和大地基准都包含几类，每种坐标系都与特定的坐标参考系类型相对应，同样每种大地基准也都与特定的坐标参考系类型相对应。因此，每种坐标系都与特定的大地基准相对应。

依据对地球曲率的处理方式，坐标参考系一般分为地理、地心、投影、工程、影像、参数和复合等多种类型。

1. 地理坐标参考系 (Geographic CRS)

地理坐标参考系基于大地基准，采用地球的椭球或球体模型，对较大范围的地球表面采用精确地理实体的几何描述。地理坐标可以为二维 (2D)，也可以为三维 (3D)。二维地理坐标采用经纬度表示椭球表面点的位置；三维地理坐标用于表示地球外部、地球表面以及地球内部的点的坐标，此坐标中包含高程信息。椭球高不单独使用，与三维地理坐标不可分离。椭球高不能作为垂直坐标参考系的基准。

定义地理坐标参考系所需的最少参数如下所示：

- ① 坐标系名称；
- ② 坐标轴的单位；
- ③ 大地基准名称（当大地基准名称与地理坐标参考系名称不一致时，需要提供此参数）；
- ④ 椭球名称；
- ⑤ 确定椭球的参数（包括长半轴值、长半轴单位名称和扁率值）。

如果本初子午线不为格林威治子午线，则还需要给出以下参数：本初子午线的名称或者本初子午线的格林威治经度值。

如果地理坐标参考系是三维的，则还需要给出椭球高的单位。

2. 地心坐标参考系 (Geocentric CRS)

地心坐标参考系基于大地基准，采用三维空间观点来处理地球曲率，从而避开曲率建模。地心坐标参考系的原点为地球质心。

ISO 19111 将地理坐标参考系和地心坐标参考系统一归类为地心坐标参考系。

3. 投影坐标参考系 (Projected CRS)

投影坐标参考系基于地理坐标参考系，采用地图投影将坐标转换到平面上以得到格网坐标 (Grid Coordinates)，也就是说投影坐标参考系用二维平面坐标值来描述地球。此种方法存在变形问题，通常采用变形修正来计算相对观察区域的方位和距离。一种地图投影可分别用于多种地理坐标参考系。

投影坐标参考系将地理坐标通过数学方式映射到平面上，使距离和面积的计算变得更容易。投影坐标通常包括北向坐标和东向坐标，单位为米。地理坐标网 (经纬度构成的格网) 不能无变形地投影到平面上，这就像剥掉橘子皮并试图将其展开到平面上一样，结果是橘子被撕破、弯曲，并且产生变形，如图 1-2 所示。投影时，当一方面的特性得以保留时，另一方面的特性则可能会失真。随着地图的延伸，距离上的差异会随之改变；只有沿着中央子午线的距离才是真实的 (没有变形)。为了控制投影一个或多个特性 (面积、形状、方位和长度等) 的变形，便产生了多种投影方法，如图 1-3 所示。

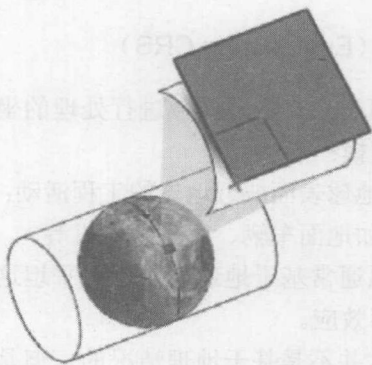


图 1-2 地图投影变形示意图

定义投影坐标参考系所需的最少参数如下所示：

- ① 坐标参考系名称；
- ② 参见地理坐标参考系定义的参数，但不需要坐标轴单位的定义；
- ③ 地图投影 (坐标转换) 名称；

- ④ 地图投影（坐标操作）方法名称；
- ⑤ 地图投影（坐标操作）参数、参数值及单位；
- ⑥ 投影坐标参考系坐标轴名称。

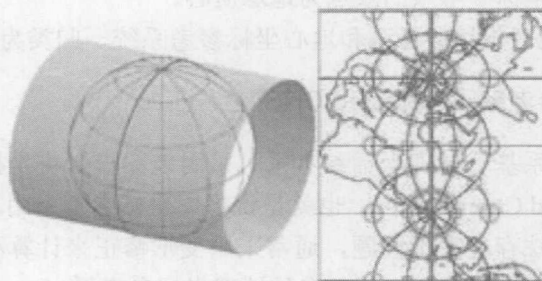


图 1-3 地图投影示意图

地图投影方法不同，所需的参数也有所不同，如“横轴墨卡托”或“兰波特圆锥正形（1SP）”投影，需要如下 5 个参数：

- ① 自然原点纬度；
- ② 自然原点经度；
- ③ 自然原点处的比例因子；
- ④ 东向偏移；
- ⑤ 北向偏移。

4. 工程坐标参考系（Engineering CRS）

工程坐标参考系是用于只对本区域进行处理的坐标参考系。一般用于如下两种当地坐标参考系的建模：

- ① 地固系统，用于地球表面或近地球的工程活动；
- ② 移动载体坐标，如地面车辆、船只或飞机等。

地固工程坐标参考系通常基于地球表面近似平坦这一简化的工程观点，并忽略了特征几何的地球曲率效应。

工程坐标参考系通常并不是基于地理情况的，但是二维工程坐标参考系在下列条件下可以间接地变成基于地理情况：对投影坐标参考系定义了仿射或类似的变换，并且投影坐标参考系如上述“投影坐标参考系”所定义。

定义仿射变换时，必须确定从工程格网到投影坐标参考系的变换系数。不同的投影变换方法所需的参数也不相同，因此还应提供输出坐标与输入坐标相对应的一个实例。

5. 影像坐标参考系 (Image CRS)

影像坐标参考系为用于影像的坐标参考系。

6. 参数坐标参考系 (Parametric CRS)

参数坐标参考系为坐标轴采用参数或参量函数的坐标参考系。

7. 垂直坐标参考系 (Vertical CRS)

垂直坐标参考系用于高程。高程包括两类：椭球高和重力相关高程。高程可能是相对于大地水准面的，也可能是相对于椭球的，并作为三维地理坐标参考系的一部分。椭球高自身并不存在，只能作为具有确定的测地基准的三维地理坐标参考系垂直方向的参数。测量椭球高时应垂直于对应点处的椭球表面。

测量重力相关高程时应沿着地球重力场的方向，并基于垂直坐标参考系，如图 1-4 所示。垂直坐标系是一个基于垂直基准面和垂直坐标系的一维坐标参考系。垂直基准定义了一个与高程所参考的重力场相垂直的平面。一般情况下，参考面与海平面一致，由于潮汐引起水平面不断变化，通常取某一区域一些特定时间的潮汐高的平均值作为海平面。例如，英国的垂直基准面基于 1915—1921 年间纽林 (Newlyn) 的平均海拔高。从海岸观察点角度来说，垂直基准面通常与天文最低潮汐 (Lowest Astronomic Tide, LAT) 一致。从工程应用来看，采用平均海平面 (Mean Sea Level, MSL) 则更合适。区域扩展时，由于潮汐的动态引起潮汐范围变化，从而使得最低潮汐随着与平均海平面的距离不同而有所不同。因此，除了局部外，地球不再是一个平坦的平面。

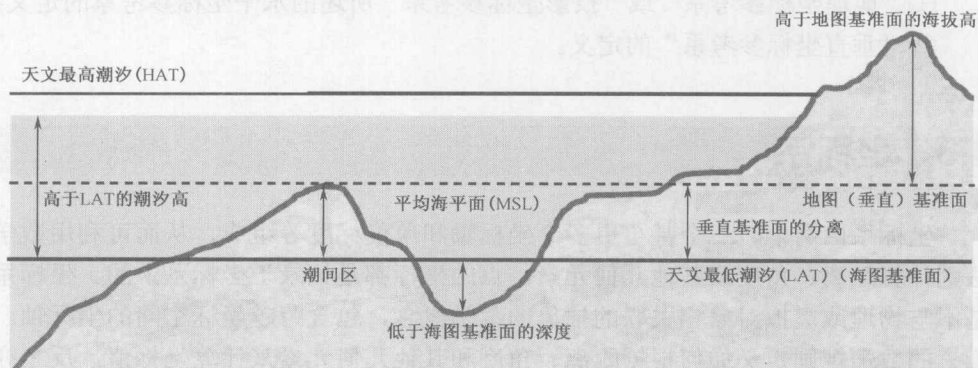


图 1-4 重力相关高程示意图

定义垂直坐标参考系所需的最少参数如下所示：

- ① 坐标参考系名称；
- ② 高度系统或深度系统（如果坐标参考系名称不能清晰地说明此系统是一个高度系统还是一个深度系统，则应在此处进行声明）；
- ③ 垂直大地基准名称（当垂直大地基准名称与垂直坐标参考系名称不一致时需要此参数）；
- ④ 垂直坐标参考系坐标轴名称。

8. 复合坐标参考系（Compound CRS）

历史上，水平与垂直位置是分别定义的，一般将一个点的水平坐标与来自不同坐标参考系的高度或深度进行组合使用。这导致坐标参考系中出现了二维和一维这两种情况，它们与真正的三维坐标参考系是有所不同的。因此，二维与一维的组合（2D+1D）是不同坐标参考系的水平坐标与垂直坐标的组合，此组合被称为复合坐标参考系。

复合坐标参考系的常用组合包括以下几种：

- ① 地理二维+垂直；
- ② 地理二维+工程一维（近垂直）；
- ③ 投影+垂直；
- ④ 投影+工程一维（近垂直）；
- ⑤ 工程（水平二维）+垂直
- ⑥ 工程（一维线性）+垂直。

定义复合坐标参考系所需的最少参数如下所示：

- ① “地理坐标参考系”或“投影坐标参考系”所述的水平坐标参考系的定义；
- ② “垂直坐标参考系”的定义。

1.3 坐标系

坐标系由两个、三个甚至更多个坐标轴和单位标度等组成，从而可利用数学法则计算距离、角度或其他几何元素。点的坐标都是记录于坐标系中的。坐标系是不与物理或虚拟对象相关联的抽象的数学概念，包含跨越坐标空间的坐标轴。隐含的数学规则定义如何根据距离、角度和其他几何元素来计算坐标值，反之亦然。根据跨越坐标空间的几何特性、坐标轴的几何特性的不同（直线还是曲线，以及是否为直角），坐标系分类如下。

1. 椭球坐标系 (Ellipsoidal CS)

椭球坐标系为二维或三维坐标系。系统中的位置由地理经纬度以及三维情况下的椭球高组成，椭球高的方向与椭球平面垂直。椭球坐标系可与一个或多个地理坐标参考系相关联。

2. 重力相关坐标系 (Gravity-related CS)

重力相关坐标系为一维坐标系。它与地球重力场相关，用于记录点的高度或深度信息。通常，重力场与用于地球建模的椭球平面并不完全垂直。重力相关坐标系可与一个或多个垂直坐标参考系相关联。

3. 笛卡尔坐标系 (Cartesian CS)

笛卡尔坐标系为一维、二维或三维坐标系。一维坐标系只包含一个垂直轴。二维和三维系统的位置相对于两个正交坐标轴。多维时，所有坐标轴的单位应该相同。笛卡尔坐标系可与一个或多个地心、投影或工程坐标参考系相关联。

4. 仿射坐标系 (Affine CS)

仿射坐标系为二维或三维坐标系。其坐标轴不一定正交。仿射坐标系可与一个或多个工程坐标参考系相关联。

5. 线性坐标系 (Linear CS)

线性坐标系为一维坐标系。坐标点落于如管线等线性要素的轴上。线性坐标系可与一个或多个工程坐标参考系相关联。

6. 球状坐标系 (Spherical CS)

球状坐标系为三维坐标系。坐标由与原点的距离和两个角度组成。不要将此坐标系与用球体替代椭球的椭球坐标系相混淆。球状坐标系可与一个或多个地心或工程坐标参考系相关联。

7. 极坐标系 (Polar CS)

极坐标系为二维坐标系。点的坐标由该点与原点的距离、该点和原点的连线与参考方向的夹角组成。极坐标系可与一个或多个工程坐标参考系相关联。