

现代测绘科技丛书

GPS坐标系统的变换

朱华统 杨元喜 吕志平 编著



XIANDAICEHUI
KEJICONGSHU

测绘出版社

P228
04

HK10/16

现代测绘科技丛书

GPS坐标系统的变换

朱华统 杨元喜 吕志平 编著

测绘出版社

(京) 新登字 065 号

内 容 简 介

本书系统、完整地阐述了 GPS 采用的地心坐标系统 WGS-84 和我国参心坐标系统 1980 年国家大地坐标系、1954 年北京坐标系。论述了上面两类坐标系间的变换理论与方法：相似坐标变换法、回归坐标变换法和抗差坐标变换法。此外，还简要介绍了 SLR、VLBI 坐标系。附录中列出了 124 种地球椭球几何参数和 97 种参心大地坐标系至 WGS-84 的变换参数。

本书可供所有从事 GPS 测量的科技人员使用。也可供有关专业的教学和科研参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

GPS 坐标系统的变换/朱华统编著. -北京: 测绘出版社, 1994

ISBN 7-5030-0752-4

I. G… II. 朱… III. 全球定位系统-大地坐标系-坐标换算-研究 IV. P228

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 03625 号

GPS 坐标系统的变换

朱华统 杨元喜 吕志平 编著

*

测绘出版社出版

大兴星海印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 850×1168 1/32·印张 5.5·插页 1·字数 123 千字

1994 年 12 月第一版·1994 年 12 月第一次印刷

印数 0 001—2 500 册·定价 5.70 元

《现代测绘科技丛书》

编委会委员名单

主任委员：陈俊勇

副主任委员：宁津生 高俊 张祖勋
楚良才 陈永奇 华彬文

委员：（以姓氏笔划为序）

于来法	方恒	田应中
朱华统	李德仁	陈绍光
张清浦	林宗坚	陶本藻
钱曾波	黄杏元	梁宜希
喻永昌	廖克	潘正风

出版说明

《现代测绘科技丛书》是经国家测绘局批准列入我社“八五”重点出书规划的选题之一。其编写宗旨是对80年代以来测绘科技领域在新理论、新技术、新工艺等方面所取得的成果进行总结，整理成册，以期对改造传统测绘生产技术，提高劳动生产率和产品质量，形成我国现代测绘技术体系，发挥科技图书应有的作用；同时也为反映我国测绘科学研究水平，丰富我国测绘学术专著宝库服务。出版本套丛书也是为适应加速测绘科技成果转化成为现实生产力的需要。

本套丛书按专题成册。专题有两种类型：一类偏重学术性，主要反映我国测绘各专业近十年来在理论研究方面所取得的、能代表我国先进水平的新成就和某些老专家毕生研究成果的专著，以及测绘前沿填补国内空白的著作；另一类偏重应用技术，是本丛书的主体，其内容是在理论指导下以新技术、新工艺、新材料、新产品研究成果的推广应用为主，个别的配有实用软件。

由于GPS（全球定位系统）涉及测量界多方面的应用，内容较多，丛书中将分册配套编写，各册主题明确，内容相辅相成，组合起来GPS测量内容就显得比较完整，又发挥了各作者的专长。

丛书编委会于1992年1月成立，全体编委对丛书出版意图、读者对象，乃至每个选题及其内容都作了充分研究和讨论，在全国测绘界选择了有代表性的专家参加各个分册的撰写和审稿工作。按照计划，这套丛书的各分册将根据撰写完成情况先后定稿出版，陆续与读者见面。

前 言

《现代测绘科技丛书》关于 GPS 方面共有好几本书，本书是其中的一本。本着编委会关于各书必需统筹安排，各自突出主题，避免相互重复，严格控制规定字数等要求而撰写的。因此，全书的指导思想着重于讲清 GPS 坐标系统变换的基本概念、原理、方法及其应用，充分反映我国现代在这方面的科技水平，尽可能吸收国内外一些行之有效的成果。

本书第一章、第二章、第三章、第四章、第七章和附录 A、B、C、D 由朱华统教授编写；第五章由吕志平副教授编写；第六章和附录 E 由杨元喜教授编写。朱华统教授作了总的校订。承蒙中科院院士陈俊勇同志审阅并提出了宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于水平所限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

1993 年 12 月

目 录

第一章	绪论	(1)
第二章	GPS 坐标系	(11)
§2.1	WGS-84 定义	(11)
§2.2	WGS-84 椭球及有关常数	(13)
§2.3	WGS-84 椭球重力公式	(22)
§2.4	WGS-84 地球重力场模型 (WGS-84EGM)	(23)
§2.5	WGS-84 大地水准面	(30)
§2.6	全世界各种参心坐标系至 WGS-84 的变换	(33)
§2.7	NNSS 各坐标系间以及和 WGS-84 的变换	(37)
第三章	参心坐标系	(42)
§3.1	建立参心大地坐标系的基本原理.....	(42)
§3.2	1980 年国家大地坐标系	(44)
§3.3	1954 年北京坐标系	(48)
§3.4	相对独立平面坐标系.....	(51)
第四章	相似坐标变换法	(54)
§4.1	欧勒角.....	(54)
§4.2	不同三维空间直角坐标系的变换模型.....	(55)
§4.3	不同三维大地坐标系的变换模型.....	(58)
§4.4	不同二维大地坐标系的变换模型.....	(63)
§4.5	不同二维高斯投影平面坐标系的变换模型.....	(65)
§4.6	GPS 水准法中不同坐标系的变换	(66)

§4.7	结语	(67)
第五章	回归坐标变换法	(70)
§5.1	坐标变换问题的相关关系	(70)
§5.2	坐标变换的回归模型	(71)
§5.3	坐标变换模型的统一表示	(82)
§5.4	相似变换条件的检验	(85)
§5.5	平面坐标以及高程系统变换的回归模型	(90)
第六章	抗差坐标变换法	(95)
§6.1	概述	(95)
§6.2	抗差性度量	(97)
§6.3	极大似然型估计 (M 估计) 原理	(100)
§6.4	坐标变换模型的抗差解算原理	(105)
§6.5	高崩溃污染率抗差解	(112)
§6.6	计算与分析	(117)
第七章	SLR、VLBI 坐标系	(121)
附录 A	地球椭球几何参数	(127)
附录 B	各参心大地坐标系至 WGS-84 的变换参数	(141)
附录 C	大地坐标系和空间大地直角坐标系间的变换公式	(153)
附录 D	大地坐标和高斯投影平面坐标间的变换公式	(155)
附录 E	GPS 网与地面网联合平差模型	(158)
参考文献		(164)

第一章 绪 论

1958 年 12 月，美国海军武器实验室和詹斯·霍布金斯大学应用物理实验室开始研制第一代卫星导航系统，简称 NNSS (Navy Navigation Satellite System)，于 1964 年 1 月研制成功。1967 年 7 月，对其广播星历解密，交付民用。该系统在全球范围内首次实现了全天候导航和定位，显示了很大的优越性。但是，它存在有卫星数量较少、运行轨道较低、无法进行全球性实时导航和定位的缺陷。为了克服 NNSS 的局限性，美国海军的“Timation”和空军的“621B”计划，都采用了多星、高轨的新体制。1973 年，美国国防部批准成立一个联合计划局，吸收了 Timation 和 621B 两个计划的优点，在 NNSS 的基础上，开始建立第二代卫星导航系统，即导航卫星测时和测距 / 全球定位系统 (Navigation System Timing and Ranging / Global Positioning System—NAVSTAR/GPS)，简称 GPS。从而满足了全球范围、全天候、连续实时以及三维导航和定位的要求。

为了描述卫星运动，处理观测数据和表示测站位置，需要建立坐标系统。在 GPS 测量中，通常采用两类坐标系统，即协议天球坐标系和协议地球坐标系。

由于卫星不随地球自转，它只是在地球的引力作用下绕地球旋转，因此，采用天球坐标系描述卫星的运行和状态是方便的。严格说来，卫星的运动理论应该在惯性坐标系中建立，但是实际上通常只能用协议的准惯性坐标系来实现，简称协议惯性坐标系 (Conventional Inertial System—CIS)。协议惯性坐标系又可称协议天球坐标系，即取标准历元 (J2000.0) 的平天球坐标系。标准历元 J2000.0 相应的儒略日为 2451545.0 日。

天球坐标系与地球自转无关，地球上任一观测站在天球坐标系中的坐标，将随地球的自转而变化，显然这将给实用带来不便。为此，需要建立一个和地球相固联的坐标系，即地球坐标系。

任一种地球坐标系的建立，若用空间直角坐标形式表示，离不开坐标系坐标轴的指向，而坐标轴中Z轴的指向则与地球极点相关。鉴于极移，通常选取某一平均极点为地极原点。1967年在意大利斯特米萨国际天文联合会（IAU）和国际大地测量与地球物理联合会（IUGG）共同召开的第32次讨论会上，建议地球平（均）极（点）的位置用国际纬度服务（ILS）五个台站的“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)，叫做国际协议（习用）原点(Conventional International Origin)，简称CIO。应该指出，由于ILS，国际极移服务（IPMS）和国际时间局(BIH)等机构都先后用不同的光学仪器台站与数学处理方法，分别保持这个地极原点，故有不同的CIO系统。在现今空间大地测量中，普遍采用CIO作为协议地球极（Conventional Terrestrial Pole—CTP）。以协议地球极作为基准极点的地球坐标系称为协议地球坐标系（Conventional Terrestrial System—CTS）。属BIH系统的CIO有 $BIH_{1968.0}$ 、 $BIH_{1979.0}$ 和 $BIH_{1984.0}$ 系统。 $BIH_{1979.0}$ 是在 $BIH_{1968.0}$ 基础上，采用了人卫多普勒和激光测月（LLR）等观测资料加以改正得出的，它们间有一定的关系^[75]。 $BIH_{1984.0}$ 则是由许多装备激光测卫（SLR）、甚长基线干涉（VLBI）等新技术的台站，采用它们的观测资料来定义的。为了保持CIO的连续性，所以对于 $BIH_{1968.0}$ 系统来说没有跳跃，但是，严格说来它和最原先的CIO早期定义则是不同的。目前，由国际地球自转服务（International Earth Rotation Service—IERS）确定的地球极则是一个更加稳定和更为精密的系统。

GPS 采用的 1984 年世界大地坐标系 (World Geodetic System 1984—WGS-84) 是一个协议地球坐标系, 其空间直角坐标系的 Z 轴指向 BIH_{1984.0} 定义的地极方向。

鉴于卫星位置通常是在 CIS 中给出, 故需要将卫星在 CIS 中的坐标变换为 CTS 中的坐标; 反之, 当利用地面监控站对卫星的观测资料计算卫星轨道时, 又要求将监控站在 CTS 中的坐标和卫星坐标统一在 CIS 内, 这就产生由 CTS 中的坐标变换为 CIS 中坐标的问题。

构成 CIS 和 CTS 间的相互变换公式是:

$$CTS = [ABCD]CIS \quad (1-1)$$

$$CIS = [ABCD]^T CTS \quad (1-2)$$

式中: A 为极移矩阵, B 为恒星时矩阵, C 为天文章动矩阵, D 为岁差矩阵。其中各个矩阵的详细表达式, 读者可参考文献 [8]、[62]。关于 CIS 和 CTS 坐标间变换不是本书讨论的重点, 因此不予赘述。

GPS 采用的 WGS-84 系的原点是地球的质心, Z 轴指向 BIH_{1984.0} 定义的 CTP 方向, X 轴指向 BIH_{1984.0} 定义为零度子午面和 CTP 赤道的交点, Y 轴和 Z 、 X 轴构成右手坐标系。WGS-84 是 CTS, 系地心地固坐标系 (Earth-Centered, Earth-Fixed—ECEF), 它是在修正 NNSS 参考系 NSWC9Z-2 的原点和尺度变化, 并旋转其零度子午面与 BIH 定义的零度子午面相一致而得到的。有关 GPS 坐标系将在本书第二章作详细介绍, 该章将详述其定义; WGS-84 椭球及有关常数; WGS-84 椭球重力公式; WGS-84 地球重力场模型 (Earth Gravitational Model—EGM); WGS-84 大地水准面; 以及全世界各种参心坐标系 (又称局部坐标系) 至 WGS-84 的变换公式; NNSS 各坐标系间以及和 WGS-84 的变换等。

第三章将讨论参心坐标系。该坐标系最显著的特点是它和参考椭球的中心有密切的关系。可以细分为参心大地坐标系和参心

空间大地直角坐标系两种。“参心”两字意指参考椭球的中心。由于参考椭球的中心一般和地球质心不一致，故参心坐标系又称非地心坐标系、局部坐标系。

地面一点的参心大地坐标系用大地经度 L ，大地纬度 B 和大地高 H 表示。这种坐标系是经典大地测量的一种通用坐标系。为了满足各种工程测量和大、中比例尺地形图制图的需要，根据地图投影的理论，参心大地坐标系可通过某种投影（当前世界上多数国家采用的三种投影是：高斯—克吕格投影，兰勃特正形圆锥投影和通用横墨卡托投影）转化为某投影平面上的平面坐标系。在我国采用高斯—克吕格投影，简称高斯投影。虽然，对于各种先进的空间大地测量技术均采用地心坐标系，然而极大多数国家仍采用各自的参心大地坐标系作为测制各种大、中比例尺地形图的控制。由于所采用的地球椭球的不同，或地球椭球虽相同，但椭球定位和定向不同，在全世界有百余种参心大地坐标系。解放后，在我国则有1954年北京坐标系，1980年国家大地坐标系（又称1980年西安坐标系）和1954年北京坐标系（整体平差转换值）三种。

1954年北京坐标系是解放后第一个参心坐标系，所提供的点的坐标是局部平差的成果，随着我国天文大地网整体平差的完成，在使用过程中将逐渐被淘汰。1980年国家大地坐标系是利用我国天文大地测量资料，根据建立参心大地坐标系的原理得出的，在该坐标系中所提供的是全国天文大地网整体平差的成果。1954年北京坐标系（整体平差转换值）是由1980年国家大地坐标系派生出来的一种坐标系。前者和后者的区别，对于空间直角坐标系来说，仅仅相差三个平移量；对于大地坐标系来说，还包含有椭球元素的不同。显然，1954年北京坐标系（整体平差转换值）也是整体平差的成果。

参心坐标系的又一表示形式是参心空间大地直角坐标系，通常用大写英文字母 X ， Y ， Z 表示点的坐标，它们可由参心大地

坐标按一定的数学公式计算得到，参见附录C。 X ， Y ， Z 坐标的表现形式在经典大地测量中很少用到，它的出现是和空间大地测量相关联的。例如，利用GPS测量，一般所得的是地心空间大地直角坐标，经过一定的数学模型及其变换参数，可以获取点的参心空间大地直角坐标，进而换算成参心大地坐标和高斯投影平面直角坐标，从而可以用来检核、加强和扩展地面大地网，进行远离陆地的岛屿联测等，使传统的建立大地测量控制网的方法发生了新的变化。我国各有关部门正在及已经布设和施测的全国GPS网、地区性的GPS网和城市GPS网等，为开展地面网和空间网联合平差、研究地壳形变、保障弹道导弹和各种飞行器的发射、以及满足城乡规划、勘察设计、地籍测量和土地管理等，均在不同程度上取得了十分可喜的结果。

应该指出，在1980年国家大地坐标系中，并没有采用协议地极原点CIO，而是采用以1968.0年平北极为原点的地极坐标系，用极原点三字的汉语拼音缩写并下角加注历元表示，即JYD_{1968.00}。

众所周知，高斯投影没有角度变形，但除中央子午线外均存在有长度变形。为此，在一些城市或工矿部门，为了减小长度变形，采用自选的中央子午线、自选的计算基准面，从而构成了一些城市、工矿等使用的独立坐标系。

在第三章中，首先阐述建立参心大地坐标系的基本原理，着重介绍1980年国家大地坐标系及派生出来的1954年北京坐标系(整体平差转换值)的由来，并说明它们间的差别。最后，说明一些城市、工矿等所使用的相对独立平面坐标系的特点。

在掌握了GPS采用的属于地心坐标系WGS-84和应用大地测量采用的属于参心坐标系的基础上，本书将在第四章、第五章和第六章等三章全面讨论两类坐标系间的变换理论及其方法。

WGS-84的坐标和1980年国家大地坐标系、1954年北京坐标系(整体平差转换值)的坐标以及一些城市、工矿使用的独立坐

标系的坐标间的变换，在应用中可分两种情况：一种是前者变换至后者，例如，在我国近些年来布设的北京、深圳、大连、武汉、抚顺、唐山、沧州、诸暨、海口、厦门、开封、南海诸岛等 30 多个各个等级的 GPS 控制网，它的主要作用是建立新的地面控制网或改善、加强、补充和加密已有的原地面控制网。各城市 GPS 控制网的实践结果表明，利用 GPS 测量建立的城市平面控制网，平面位置相对精度约为 $1\sim 2\text{ppm}$ ，大地高差精度与测站间距离之比约为 $2\sim 3\text{ppm}$ ，可以满足现代城市测量、规划、建设和管理等多方面的需求，是当前 GPS 技术在我国应用的一个热点。另一种是后者变换至前者，鉴于我国天文大地网经过整体平差，平差后点位的相对精度甚高，通过选择一定的变换模型和方法，可以获得网点在 WGS-84 中的地心坐标（以空间直角坐标形式表示），任一分量中误差约为 $1\sim 2\text{m}$ 左右^[12]。这种通过间接方法，无需直接测量而获得我国原地面大地控制网大量的点在 WGS-84 中的地心坐标，无疑的对于在空间技术和军事上的应用，其意义是十分明显的。为此，研究两类坐标系的变换模型的理论及其方法，其作用是不言而喻的；此外，变换模型也是进行全国或地区的 GPS 卫星网与地面网联合平差的前提。

第四章将讨论相似坐标变换法。当前国内外实施两种三维坐标系统变换的模型主要有布尔莎—沃尔夫（Bursa—Wolf）模型、莫洛琴斯基—巴代卡斯（Molodensky—Badekas）模型和范士（Veis）模型。这些模型虽然表示形式略有差异，但从坐标变换的最终结果而言，它们都是等价的。这类模型共有七个变换参数，即三个平移参数，三个旋转参数和一个尺度变化参数。当顾及到地面网可能存在有一定的系统性误差的影响，为了分离系统性误差和坐标系本身的定向误差，从而产生了多于七参数的其它模型，如霍蒂内（Hotine）模型、克拉基弗斯基—汤姆森（Krakiwsky—Thomson）模型等。

对于三种七参数模型的解释、它们间的区别和联系，以

及在此基础上又提出的一些新的模型，读者可参阅有关文献〔7〕、〔20〕、〔31〕、〔37〕。对于多于七参数的一些模型，在形式上也只是大同小异。研究结果表明，在一定的条件下，用于坐标变换和布尔莎模型也是等价的〔14〕，况且为了获得全部参数解，往往要加入一定的约束条件，如将两类坐标系中的公共（重合）点分成“内带”和“外带”等。由于受本书篇幅所限，加之从坐标变换结果等价性这一观点出发，在本章中则主要介绍布尔莎模型，其中包含采用空间直角坐标和大地坐标表示的两种形式。鉴于地面网中大地高（主要是高程异常）的精度不高，加之一些应用部门有时难以获取此项数据，所以往往也有采用二维坐标的变换模型，本章中也将对它们作必要的介绍。

GPS 测量获得的是三维坐标，为此开辟 GPS 大地高程的应用已越来越引起人们的重视。众所周知，在高程方面有一个重要的关系式，即大地高等于正高和大地水准面高之和；或大地高等于正常高和高程异常之和。所以，利用 GPS 测量所得大地高的资料和水准测量所得正高或正常高的资料可以确定大地水准面高或高程异常，这种方法称之为 GPS 水准法。此外，利用 GPS 测量所得大地高的资料和天文、重力测量所得大地水准面高或高程异常（即天文水准和天文重力水准）的资料可以确定正高或正常高，这种方法有的称之为另一种意义的 GPS 水准法，有的另起名称称之为 GPS 高程法。一些中外实践结果表明，利用 GPS 水准法所得高程异常的精度至少可以保证达到分米级，甚至还可达到厘米级，所以它是精化大地水准面、似大地水准面的一个有效途径；利用 GPS 高程法所得正高、正常高，已经达到三、四等水准测量的精度指标，个别的试验甚至接近二等水准测量的精度。应该指出，GPS 水准法和 GPS 高程法的实际精度比较复杂，它取决于施测地区的地形、天文和重力资料的分布、水准测量资料的多少以及 GPS 点本身的密度等多种因素。在全国范围，GPS 水准用以精化我国似大地水准面，正是国家八·五攀

登计划《现代地壳运动和地球动力学研究》中的一个子课题，目前正在深入研究中。

应该指出，无论在 GPS 水准法或 GPS 高程法中，都将涉及到不同坐标系统变换问题。因为高程异常是以椭球面为基准面的似大地水准面的高程，某点高程异常值的大小显然取决于地球椭球的元素及其定位和定向。例如，利用 GPS 水准法获得的高程异常是相对于地心系统 WGS-84 椭球的，若要求得在非地心系统 1980 年国家大地坐标系相应于 IUGG1975 椭球的高程异常，则应该顾及不同坐标系统所产生的高程异常差。

关于 GPS 高程法中内插高程异常的回归方程将在第五章中介绍。

前已指出，两种地球坐标系间的变换可由平移、旋转和尺度变化等七个参数加以描述，呈现为相似变换关系。但是，当按一种坐标系所施测的大地网存在有一定的系统误差时，则利用两种坐标系所构成的网中一定数量的公共点求解的七个参数就不能完全反映两种坐标系的定义差。为此，有关国内外文献 [6]、[53]、[91] 提出采用回归模型及多项式模型，从而能使大地网存在局部变形的情况下，获得较高的坐标变换精度。

文献 [15] 在将相似变换表示为具有约束的回归模型前提下，总结性地提出了把众多的相似变换模型和非相似变换模型均统一为回归模型。为此，本书用第五章专门讨论回归坐标变换法。

在第五章中除了讨论统一的回归模型外，还阐述了关于坐标变换模型的假设检验方法，并将模型的检验问题统一于线性约束的回归检验。从而，使两种坐标系所施测的两个网间的坐标变换最佳模型得以实现。具体实施过程的框图如图 1-1 所示，其过程已编有一定的软件系统可付诸实施。

在我国按两代卫星系统所布设的全国范围的 NNSS 网和 GPS 网，利用回归坐标变换法，经实践计算表明均提高了坐标变换的精度，取得了较好的效果。

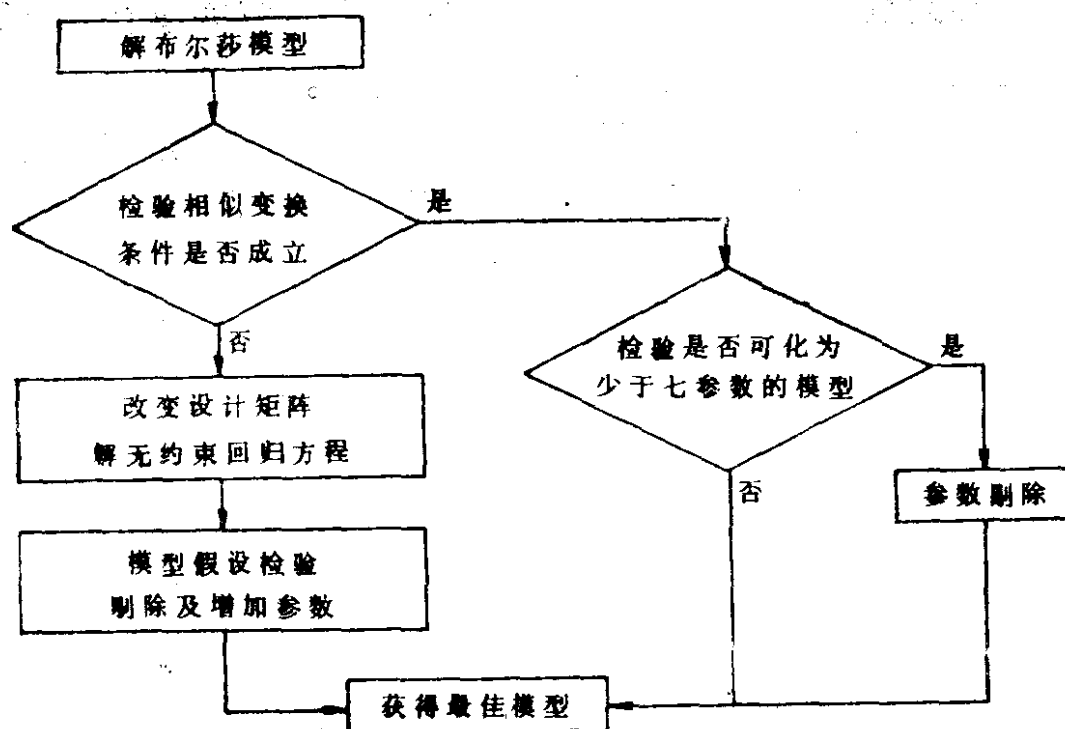


图 1-1

本书第六章将介绍坐标变换中的另一种方法，即抗差坐标变换法。

抗差估计理论自 60 年代问世以来，尤其是经过统计学界的努力，现已逐渐形成一个体系。将抗差估计理论用于坐标变换，从理论到实践，都取得了一些可喜的成果^[25]，

众所周知，我国地面大地网布设时间已长达 40 余年，鉴于自然条件的变化、地球物理方面的动态变迁，以致使局部点位产生位移实有可能；对于空间网来说，由于我国面积辽阔、地形复杂，在数据处理中均采用某一种模型（如 GPS 测量中，采用某一对流层效应改正模型）是否对所有地区均合适，对个别点是否会带来较大的误差，也值得研究。为此，产生了如何在有位移点、观测粗差以及较大偶然误差和系统误差积累的情况下，求得比较可靠的坐标变换参数的问题。显然。抗差坐标变换法无论是在相似坐标变换法还是回归坐标变换法中均可使用。本书不可能