

同频参考信号的相位的差拍称为该颗卫星的相位观测值，这一观测值中包含了待定的初始整周模糊度参数、卫星轨道误差、卫星钟与 GNSS 标准时间的钟差、传播路径中的电离层延迟和对流层延迟、接收机钟与 GNSS 标准时间的钟差、接收机的热噪声误差等。为了克服这些误差的影响，常常通过基线两端测站的原始相位观测值的线性组合构成所谓差分观测值来削弱或抵消某些误差的影响。两测站对同一颗卫星在同一时刻的原始相位观测值之差称为站间单差相位观测值，它几乎完全抵消了卫星钟差的影响，当两站相距不太远时，大大地削弱了卫星轨道误差和电离层对流层延迟的影响。两个测站相对于两颗不同卫星的站间单差相位观测值之差就称为双差相位观测值，在削弱和抵消上述误差影响的基础上，它又进一步地几乎完全抵消了接收机钟差的影响和大大削弱了接收机热噪声误差的影响。因此，双差相位观测值是一种误差影响很小的观测值，但是双差相位观测值中仍然包含了由初始整周模糊度线性组合形成的双差整周模糊度这一待定参数。解算出这一模糊度参数需要有一定的几何条件和观测条件，一是基线不能太长；二是每颗卫星在空中被基线两端站同时观测的时间不能太短，对于常规静态 GNSS 相对定位，不应短于 15min，对于快速静态定位，目前也不应短于 3min（取决于可见卫星数和软件性能和接收机的特性）；三是观测值中的周跳应消除干净。对于大多数用于城市控制网的基线解算商用化软件来说，由于其采用的处理多种误差的模型和消除周跳的方法都较为简单，长度超过 30km 的基线要解算出其模糊度参数的整数是十分困难的。由于整周模糊度参数在不发生失锁和周跳的情况下具有数值不变特性，因此将一条基线相对于两颗卫星在不同时刻的双差相位观测值再相减一次。组成所谓三差相位观测值，则整周模糊度参数就被消去了。由于没有整周模糊度参数，三差相位观测值对各种长度的基线解算十分简便可行。但是由于从 8 个原始相位观测值中才能形成一个三差相位观测值，观测量大大减少，其解算基线的精度是不高的。考虑到城市控制网的特点、

GNSS 技术的发展和城市 CORS 系统的建设，本次修订将原规程中规定边长超过 30km 的基线解算的有关内容删除。

5.4.3 数据检验包括合格数据采用率、GNSS 网的同步观测环闭合差、异步环闭合差的检验。

1 基线处理中的数据剔除率是指在所采用的双差相位解算模型中，平差剔除的实际不合格观测量与进入平差的总观测量之比。20%是一个经验值，同时，这一比值还受平差中预先选择的控制参数 RMS 的阈值大小的影响。因此，本条只作为一种参考执行的指标，不作为必须执行的硬性规定。

2 本条规定了重复测量的基线的长度较差的限差。两次独立观测基线的长度差的限差公式是按误差传播定律导出的，这一公式是完全严密的公式，式中， σ 也是按式(4.1.3)和表 5.1.3 的规定计算。

3 对采用同一处理数学模型的单基线解产生的同步环闭合差，理论上，在有误差甚至粗差（如仪器高量错）存在的前提下，同步环闭合差也应为零，不存在规定其闭合差限差的依据。但在实际上，同步环中各条基线单独解算时，由于基线间不能做到完全严格的同步，一同步图形中各条基线处理时对应的起算点坐标不是从同一起算点导出的，而是各自端点 C/A 码伪距单点定位值，都可能产生较大的同步环闭合差。若一个等边形的三角形同步环，各基线处理时采用各自端点 C/A 码伪距定位值作起算点，若起算点坐标分量误差为 $\pm 20\text{m}$ ，则可能引起基线各分量 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 的相对误差，三角形坐标分量闭合差则可达 $\pm \sqrt{3} \times 10^{-6}$ ，顾及同步环闭合差理论上应为零，故式(5.4.3-2)～式(5.4.3-5)规定城市各等 GNSS 网坐标分量闭合差限差。

同步环中超过三角形的多边形同步环，都可由三角形同步环组合得到，故可不重复检核。

4 由独立基线组成的闭合环称为独立环或异步环，在有误差的前提下，异步环闭合差不可能为零，因此它是 GNSS 网质量检核的主要指标。限差式(5.4.3-7)～式(5.4.3-11)把组

成异步环的基线看成是彼此独立的，以 GNSS 基线的边长各等级规定的精度指标为依据，按误差传播定律导出。公式中，限差标准取 2 倍中误差，比较严格，但却是容易实现的。

5.4.4 一个 GNSS 控制点最终不能与两条合格的独立基线相连接，表明该点是一个 GNSS 支线点，其位置可靠性没法检验，因此在城市和工程控制网中，无论哪一等级都是不能允许的。必须进行重测或补测，使这一点至少能与两条合格基线相连接。

允许在复测基线比较检核和异步环检核中有超限的情况存在，在网平差前或平差中，允许舍去这些超限基线而不予重测或补测，但舍去超限基线后，异步环中所含独立基线边数不应超过表 5.1.6 的规定。因为异步环中所含独立基线数太多，将导致这一局部观测基线可靠性降低，平差后间接基线边的相对精度降低。

点位不符合 GNSS 测量要求，将引起失锁、周跳、多路径误差，GNSS 观测中粗差和劣值观测值增多，即使重测因客观条件差也不能补救，因此只能放弃该点位而另设新点。

5.4.5 本条规定了 GNSS 网应完成平差工作。

1 以网中一个点的已知地心坐标作为无约束平差的起算点，实际上是对网的一个位置约束，又称最小约束平差，它与完全无约束的亏秩自由网平差是等价的，通过平移变换可互相转换，因此我们不加区分地都称为无约束平差。无约束平差的观测量是独立基线向量及其方差-协方差阵，待定未知数是 GNSS 网控制点的地心系三维坐标。三维无约束平差唯一起算点的地心系坐标应按第 5.4.2 条第 3 款优先选择。作为观测量的基线应是经过第 5.4.3 条检核后的合格基线。无约束平差的目的一是提供全网平差后的地心系三维坐标，这些坐标是进一步用 GNSS 定位方式加密或补充城市控制网的起算依据；二是考察 GNSS 网有无残余的粗差基线向量和其内符合精度。因此进行无约束平差的软件应有剔除粗差基线的能力。为了检验精度和可靠性，无约束平差后应输出各基线向量的改正数，基线边长、方位、点位的精度

信息。

检验无约束平差的基线观测测量是否包含粗差，这里提供了一个简单的实用的检验标准。即基线向量每一坐标分量的改正数不应超过本规范规定的该等级基线距离中误差的 3 倍值。而该基线距离中误差的计算仍按本规范式 (4.1.3) 和表 5.1.3 进行。较为严密的粗差检验公式是按式进行：

$$T_i = \frac{V_i}{\sigma_{v_i}} \quad (28)$$

当取置信水平为 95% 时， $T_i > 2$ ，即 V_i 大于其中误差的 2 倍时，即被认为与它相应观测测量是一个粗差。在平差中，改正数的精度一般相当于且略高于其对应观测测量的精度。因此作为规范标准，我们用基线的距离分量的中误差取代上式的改正数中误差是可行的和合理的。再考虑到减少弃真概率，上式中取 $T_i > 3$ ，相当于置信水平接近 99.7%，由此便得到本规范式 (5.4.5-1) ~ 式 (5.4.5-3) 的限差公式。

2 GNSS 网在国家或城市坐标系下的平差因为要引入这些坐标系的已知数据或观测数据而称为约束平差。约束平差可以三维方式进行，也可二维方式进行。在三维方式中，观测测量是经三维无约束平差检核过的原始基线向量，约束量是三维大地坐标或三维直角坐标、斜距、大地方位角或法截弧方位角。在二维方式中，观测测量是已经转换投影到国家或城市坐标系的高斯或 UTM 平面坐标系的二维基线向量及其转换后的方差-协方差阵，作为已知数据的约束值是平面坐标系中的点的坐标、平面距离和坐标方位角。约束平差可以是强制性约束，即所有起算数据的约束值均作为固定值参与平差，亦即不顾及这些起算数据的误差；约束也可以是松弛的，即估计所有或部分约束值的误差，按其精度的高低定权参与平差并在平差中给予适当的修正。作为强制性约束的起算数据应有很好的内符合精度，即自身是兼容的，否则将引起 GNSS 网的扭曲和变形，损害 GNSS 网精度。在松弛性约束中，约束值的权的确定须尽力做到符合约束值的实际精度，偏高

可能会引起 GNSS 网的变形，偏低可能起不到提供基准的作用。

检核作为约束值的起算数据误差及其引起的 GNSS 网的变形。无约束平差的基线向量各分量的改正数反映了 GNSS 网基线本身的内部符合程度，是不受起算数据误差影响的，约束平差后，同名基线在约束平差和无约束平差中的两类改正数差太大，则说明起算数据误差引起了 GNSS 网变形，变形超过一定程度，就会明显降低 GNSS 网的精度，是不能接受的。对于各等级城市 GNSS 网，由起算数据误差引起的 GNSS 网最大变形，原则上说，应不超过本规定关于 GNSS 网最弱边相对精度的要求（参见本规范表 5.1.3），式（5.4.5-4）~式（5.4.5-6）的两类平差法的改正数较差变化的限差正是基于这一原则确定的。表 5、表 6 分别列出了当较差取 2σ 、 3σ 时，各等级 GNSS 网相对应的边长相对中误差。

表 5 取 2σ 时各等级 GNSS 网相对应的边长相对中误差

| 等 级 | 平均距离 (km) | 2σ (mm) | 相应边长相对中误差 |
|-----|-----------|----------------|-----------|
| 二等 | 9 | 2×21 | 1/21.4 万 |
| 三等 | 5 | 2×27 | 1/9.2 万 |
| 四等 | 2 | 2×22 | 1/4.5 万 |
| 一级 | 1 | 2×14 | 1/3.5 万 |
| 二级 | 0.6 | 2×19 | 1/1.6 万 |

表 6 取 3σ 时各等级 GNSS 网相对应的边长相对中误差

| 等 级 | 平均距离 (km) | 3σ (mm) | 相应边长相对中误差 |
|-----|-----------|----------------|-----------|
| 二等 | 9 | 3×21 | 1/14.3 万 |
| 三等 | 5 | 3×27 | 1/6.2 万 |
| 四等 | 2 | 3×22 | 1/3.0 万 |
| 一级 | 1 | 3×14 | 1/2.4 万 |
| 二级 | 0.6 | 3×19 | 1/1.0 万 |

由表 5、表 6 看出，取 2σ 是较为合理的，若取 3σ 时，三、

四等 GNSS 网边长相对中误差将超过本规范表 5.1.3 对最弱边精度的要求。

在已有的 GNSS 网平差软件中，部分软件不能提供基线量的改正数，为此用上述方法就不能检核起算点之间的兼容性，则规定对 GNSS 网应进行不少于 2 个已知点的部分约束平差，在部分约束平差结果中未作为约束的已知点的坐标，其相对于约束点的相对中误差应不低于表 5.1.3 规定的上一等级控制网中最弱边相对中误差。

5.4.6 本条规定了 GNSS 网完成平差后应输出的成果信息，以便对网的整体质量进行评价。

5.5 质量检查与技术总结

5.5.1 本条规定了城市 GNSS 控制网测量质量检查的主要内容。根据 GNSS 控制网测量的特点，按工序流程设计了质量检查点。质量检查不可能进行全部重复作业过程，也不可能进行破坏性检查，过程成果的质量主要依靠作业员在作业过程中严格按照规范、设计来作业，检查只是一种质量保证的手段。

5.5.2 本条规定了城市 GNSS 控制网测量技术总结应包含的主要内容。GNSS 测量从数据接收、数据处理到成果输出，自动化程度较高，可供检查的记录不多。所以，技术总结对作业过程的描述对检查至关重要，应全面、翔实。

5.5.3 城市 GNSS 控制网测量成果是基础性的测量成果，一般是长期保存的资料，是成果使用者追溯的唯一依据。所以，工作完成后，提交成果应齐全。

6 城市 GNSS RTK 测量

6.1 一般规定

6.1.1 本条对于 RTK 测量的方法进行了说明。单基站 RTK 测量方式是临时架设 1 个（或多个）基准站，在小区域范围内采用电台或 GPRS、CDMA 等无线通信方式向流动站用户发播差分改正数的一种测量方式。与网络 RTK 测量作业方式比较，单基站 RTK 的作业受距离制约，存在定位精度不均匀、可靠性差等缺点。在一些通信信号较弱或覆盖不到的困难地区，无法实时进行单基站 RTK 和网络 RTK 测量，现场可以采用后处理动态测量的模式进行 RTK 测量，内业用最近的基准站数据和外业数据进行处理，获得各流动站坐标。

6.1.2 城市 GNSS RTK 平面测量具有高精度、测点间相互独立等技术特点，根据 GNSS 测量的精度要求和 GNSS RTK 的测量特点，本规范对 GNSS RTK 测量的等级划分为一、二、三级和图根、碎部五级，对应于 GNSS 控制网的一、二、三级及地形测图的图根和碎部等级，并根据各等级的精度要求制定了最小边长，而不是平均边长。为了保证高等级控制测量的精度均匀性，本条对一级 GNSS 控制点布设强调了应采用网络 RTK 进行测量。根据城市测绘的特点，规范对于在对天通视困难地区，对相邻点间距离可以缩短至表中的 $2/3$ ，但应使用常规方法检测边长，使两者之间的边长较差不大于 2cm，以满足常规测量对控制点几何条件的要求。

对于表 6.1.2 中的相邻点间距离和边长相对中误差的规定是总结了城市测量中布设等级导线的经验，结合满足常规测量对边长相对关系的要求后制定的。《城市测量规范》CJJ 8 中对布设一、二、三级导线的测距精度优于 15mm，边长最大限差放宽 2

倍。再根据 GNSS RTK 测量绝对定位精度可靠、点间相对精度较差的特点，相对于《城市测量规范》CJJ 8 对边长的要求进行适当的放宽，规定了相应等级的相邻点间距离和边长相对中误差。

6.1.3 图根和碎部 RTK 测量是布设最底层的控制点和测设地形、地物特征点，实测点位的选择受到很大限制，满足最低测量条件即可，以工作需要为主。一、二、三级 RTK 控制点测量要照顾到下一级控制布设的需要，精度要求较高。所以，本条控制点的点位选择要求应与 GNSS 网点相同。

6.1.4 RTK 测量精度很大程度受到卫星分布状况影响。这里的卫星为 RTK 流动站和基准站的共视卫星，为保证流动站和基准站收到足够多数目的卫星信号，单基站 RTK 测量时，基准站要选择空旷平地或者地势高处。

6.1.5 静态 GNSS 控制网测量可以通过基线精度、重复基线差及环闭合差和平差等作业过程对成果进行检验；RTK 测量每个测设点都是相互独立的，点与点之间没有直接关系，对于因意外产生的粗差无法发现。因此，为提高 RTK 测量的可靠性，保证仪器各种设置正确，测量过程中应选择一定数量的已知坐标点进行测量校核，以检查用户站设备的可靠性以及坐标转换参数的准确性。本条规定作业前应在测区内或周边至少校核一个已知点，并记录和计算校核结果。控制点校核较差，依据新布设的控制点相对于上一级控制点的点位误差不应超过 5cm；碎部点校核较差，依据不同比例尺地形图的要求来制定。

6.1.6 已有的 RTK 控制点，可以作为 RTK 测量的校核点，也可以作同级布设的控制点，当需要作为控制点使用时，为保证与新布设的控制点统一，应统一进行控制点间的边长、角度以及坐标检核，并应符合表 6.3.11 要求。

6.2 仪器设备

6.2.1 单基站 RTK 和网络 RTK 使用的设备有些不同，但流动

站设备都具备通信、接收卫星信号和差分数据处理的基本功能，只是进行数据通信的方式不同。流动站设备的选用是根据国内外主要仪器生产厂家的精度指标制定的，一般均可满足 RTK 定位测量相对于基准站精度在 5cm 之内的要求。

6.2.2 GNSS 接收机的检验除应满足静态测量的技术内容外，还应满足数据通信链路的检验，稳定的通信链路是 RTK 测量时保证精度和速度的基本关键因素。

6.3 单基站 RTK 测量

6.3.1 单基站 RTK 测量的基准站设置是关键性的第一步，基准站的选择直接影响到作业半径和效率。若基准站选择不当，基准站观测数据质量和无线通信信号传播质量无法保证，该基准站支持的所有流动站都不能顺利作业，或者造成基准站频繁迁站，影响工作进程。基准站的设置要与当前作业方式匹配，还要与流动站的模式匹配。

6.3.3 坐标系统转换参数的获取有多种方式，可视具体情况灵活采用。根据目前仪器设备使用的情况，主要提供 3 种转换参数的作业方式。一是已有该区域的坐标转换参数；二是事先可以收集到足够数量的同时具有地心坐标和参心坐标成果的控制点；最后是事先只收集到足够数量的具有参心坐标成果的控制点，其地心坐标需要实地采集获取。从使用方便和精度考虑，应按上述 3 种方式顺序选择。

由于收集到的控制点来源、精度不一定统一，其相互间的符合性很难一致，坐标系统转换参数是通过一定的数学模型利用重合点来拟合计算的，参与拟合控制点的分布对于参数计算、测量成果的精度都有很大影响，由于无法准确规定拟合的控制点分布，只能用均匀分布来限制拟合误差在作业过程中的扩大。同时，为了控制转换参数的精度，依据测设的 RTK 点的点位精度相对于基准站不超过 5cm 的要求，拟合控制点能控制作业区域前提下，转换参数残差应小于点位误差的 1/3，综合考虑其他因

素，本条规定了平面坐标转换的残差应不大于 2cm。对于高程转换，可根据实际资料和测量的目的进行设计，本规范不作规定。

6.3.4 基准站架设在未知点上，经过各项设置启动后与流动站建立了通信关系，流动站通过在已知点上采集地心坐标，然后求解坐标转换参数，再进行 RTK 作业。这种作业方式一般适用于小区域范围，由于在小区域内很难同时具有两个以上的高等级控制点，因此，求出来的坐标转换参数精度不高，本条规定了采用这种作业方式的 RTK 测量成果最高等级为图根。

6.3.5 RTK 作业受到地形、地物和电磁波等诸多外界环境因素影响，有些因素是作业员现场可以识别的，还有很多因素是无法现场判定，对观测结果的影响很难通过判断来确定。为了保证成果数据的质量，通过观测前对仪器的精度指标进行设置来获得可靠的结果，因为在周围观测情况不利于 RTK 作业的条件下，也可以获得 RTK 固定解，但获得的多次坐标成果相互间跳动大、不稳定，有存在粗差的可能性。如果在这种情况下进行 RTK 作业，那么 RTK 定位的精度、可靠性会很差。因此，根据 RTK 测量水平精度高、垂直精度低的特性，按照 1/3 点位误差的水平精度、水平精度 1.5 倍的垂直精度收敛阈值进行设置。

6.3.6 本条规定 RTK 一测回观测的技术要求。RTK 测量是一种连续测量，流动站接收机一旦锁定卫星，获得初始化，确定了载波相位观测量的整周模糊度，在每个历元解算过程中是不重新确定整周模糊度，如果初始化时的整周模糊度错误，连续观测多长时间结果都无法纠正。所以，一测回开始测量时，必须重新搜索、锁定卫星，进行初始化，以此来保证各测回间的相互独立、相互校核。

6.3.7 RTK 一测回观测需要搜索、锁定卫星，进行初始化，稳定收敛后才可进行观测，根据多种类型仪器的测试结果，完成测前的一系列准备工作平均在 40s 以上，为了保证测回间的初始化时间，制定了本条。同时，测回间隔一段时间可以消除因卫星分布不同、差分信号不同、电离层扰动影响等产生单次整周模糊度

确定不可靠的影响，从而保证各测回间的相互独立。

6.3.8 经过大量试验统计，RTK 测量的平面点位中误差优于 $\pm 3\text{cm}$ ，坐标分量应优于 $\frac{3}{\sqrt{2}} = 2.1\text{cm}$ ，因此，本规范规定测回间的

的平面坐标分量较差应小于 2cm （或小于 $0.0007''$ ）。

6.3.9 RTK 解算时是通过无线通信链路获取差分数据，有些地区通信条件较差或者存在未知干扰源，将导致 RTK 测量初始化困难；有时这种影响是短时间的，经过重新启动 GNSS 接收机，可能会恢复正常，当重新启动 3 次仍不能获得固定解时，表明此处不适合进行 RTK 测量，应选择其他位置进行测量以提高工作效率。

6.3.10 后处理动态测量不同于实时单基准 RTK 和网络 RTK 测量，首先要求流动站在静止状态下对卫星进行观测一段时间，获得初始化，这个初始化结果是后续测量的起算数据，在测量过程中不能丢失，一旦丢失，就需要重新初始化。

6.3.11 RTK 测量的精度会受到各种因素的影响，由于载波相位进行测量具有多值性，初始化过程中各种误差以及数据链传输过程中外界环境、电磁波干扰产生的误差的影响，可能导致整周未知数解算不可靠。同时，RTK 测设点间的相互独立，与传统测量强调的相邻点间相对关系有着根本上的区别。为了满足常规测量对控制点几何关系的要求，制定了本条规定。

RTK 测量时，仪器对中误差、测量天线高的误差，都将影响 RTK 测量的成果，因此应对三脚基座和仪器上的水准器进行检查校正，以尽量减少系统误差的影响。

RTK 平面控制点应采用常规方法进行边长、角度检核，表 6.3.11 中各项限差的规定是依据《城市测量规范》CJJ 8 中检测限差可在原精度要求上放宽 $\sqrt{2}$ 倍规定的，导线联测按相应的下一个等级要求执行。当采用导线联测的方法进行检核时，该导线同时可以应用于相应工程，不必另行布设导线。

6.3.12 RTK 碎部测量主要测设地形点和地物点，测量精度较

低，同时，作业环境可能满足不了控制点的点位要求，对其作业设备的要求相应放松，只需要用带圆气泡的对中杆架设天线即可，保证在测点上能够进行初始化。但在作业过程中应注意检查测设点的相对关系，以及地形点、地物点的几何形状。

6.3.13 RTK 定桩因需要定位、钉桩和校核，确定一点时间较长，建议使用三角支架方式架设天线。其他要求执行《城市测量规范》CJJ 8 的有关规定。

6.4 城市网络 RTK 测量

6.4.1 城市 CORS 系统是动态的、连续的空间数据参考框架，是一种快速、高精度获取空间信息的重要基础设施。可以为用户提供事后静态定位和实时动态定位服务。安全、有序和合理使用是系统稳定运行的基础。系统用户需要经过申请、登记、注册，并获得系统的授权后，方可登录系统，得到系统提供的服务。

6.4.2 城市 CORS 系统在建设时设计了网络的有效覆盖区域，用户应在该区域进行作业。如果在城市 CORS 系统覆盖区域之外作业，有可能得不到固定解，即使得到固定解，其解的精度和可靠性无法得到保证。

6.4.3 网络 RTK 测量和单基站 RTK 测量，主要在定位方法、通信手段和相应的设置等方面不一样。但两者在 RTK 测量时对流动站的操作程序、作业方法和技术要求基本一致。

6.5 数据处理与检验

6.5.1 RTK 测量仪器是一种常用设备，其内存是临时存储观测数据，不应作为保存资料的空间。RTK 测量的原始观测数据作为资料应存档保存，从安全角度考虑，外业数据采集器中数据应及时导出。

6.5.2 RTK 测量数据输出时一般采用接收机随机配备的商用软件，需要根据本条要求的输出内容进行设置输出，便于检查人员对外业采集的信息进行相应的检查。

6.5.3 这条规定是要求 RTK 测量人员严格按照规范的要求进行作业，对原始观测记录不得进行任何剔除或修改，防止伪造数据。

6.5.4 网络 RTK 测量时，流动站可能获得的是地心坐标系下的定位结果，而实际应用的是参心坐标系和正常高系统的成果，因此需要进行坐标转换。

6.5.5 RTK 测量因缺少相互间的校核关系，外业检查时要加大抽检比例。

6.5.6 RTK 测量过程基本是自动完成的，人工干预的机会很少，数据输出时考虑到了质量控制的因素，可对照有关规定进行检查。

6.5.7 RTK 测量应有一定数量的检核点，检核点应均匀分布于作业区的中部和边缘，以保证测量成果的可靠性。检核时常采用以下几种方法进行。已知点比较法：用 RTK 测出已知控制点的坐标进行比较检核，发现问题即采取相应措施予以改正。重测比较法：每次初始化成功后，先重测部分已测过的 RTK 测量点，确认无误后才进行 RTK 测量。常规测量方法：用常规仪器对 RTK 测量的点进行边长、角度检核，使其满足相应几何条件，并对检核点的平面坐标进行精度统计。

6.6 成果提交

6.6.1 可根据工程项目的实际情况，结合本条的内容确定 RTK 测量应提交的成果。

7 城市 GNSS 高程测量

7.1 一般规定

7.1.1 高程系统中最常用的有正高系统（以大地水准面作为参考基准面）和正常高系统（以似大地水准面为参考基准面），我国使用的高程系统是正常高系统。采用 GNSS 测量技术测定地面点的高程是以地心坐标的地球椭球面为基准的大地高 H ，大地水准面和似大地水准面相对于地球椭球面有一个高度差，分别称为大地水准面差距 N 和高程异常 ζ 。

大地高 H 、正高 H_g 和正常高 H_γ 之间的高程关系按下列公式计算：

$$H = H_g + N \quad (29)$$

$$H = H_\gamma + \zeta \quad (30)$$

如果能够比较精确地确定地面点的高程异常，则用 GNSS 测量方法可精确测定地面点的正常高。

确定地面点高程异常的方法主要有：大地水准面模型法、重力测量法、绘等值线图法、区域几何内插法、转换参数法、整体平差法、区域似大地水准面精化法等。不管采用哪种方法，均是利用已知点的数据，建立高程异常的改正模型，从而计算待求点的高程异常。

本条规定了 GNSS 高程测量分为高程异常模型的建立、GNSS 高程测量和高程计算三部分。

7.1.2 GNSS 测量得到的是测量点的三维坐标，受技术条件的限制，从 20 世纪 80 年代末 GPS 技术引进后，只是使用了 GPS 测量的平面二维成果，高程测量成果一直没有大量使用。随着全球高精度重力场模型的确定及基础理论上的突破，经过大量的实验，GNSS 测量求取正常高成为现实。按照《城市测量规范》

CJJ 8 中高程测量的精度等级，本条规定了城市 GNSS 高程测量分为四等、图根和碎部三个等级。GNSS 高程测量由于受到自然地理环境的影响以及当前技术手段的限制，各等级又划分为平原及丘陵和山区两种不同的情况，并分别制定了各等级的高程异常模型内符合中误差、高程测量中误差、检测较差等精度指标。

GNSS 高程测量中误差可按式计算：

$$m_k = \sqrt{m_H^2 + m_i^2 + m_g^2} \quad (31)$$

式中： m_k ——GNSS 点正常高中误差；

m_H ——GNSS 点大地高测量中误差；

m_i ——GNSS 测量仪器高测定中误差；

m_g ——模型中误差。

依据《城市测量规范》CJJ 8 中高程测量的规定，水准网中最弱点的高程中误差不得大于 20mm。两个高程点的高差中误差应不超过 28mm，四等 GNSS 高程测量按四等 GNSS 测量规定执行，平均边长 2km，大地高测量中误差按本规范式 (4.1.3) 的基线长度精度计算，结果为 14mm，每站仪器高测定中误差 3mm，两站取 $2\sqrt{3}$ ，约为 4mm。按式 (31) 计算模型中误差为 24mm，可见模型内符合中误差和模型中误差是有一定区别的，因此，本规范规定了四等 GNSS 高程测量的高程异常模型内符合中误差为 20mm。

依据《城市测量规范》CJJ 8 中地形图测绘图根控制点高程中误差应不大于测图等高距的 1/10，碎部点的高程中误差应不大于测图等高距的 1/3，1:500 测图比例尺基本等高距 0.5m。平原地区图根控制点高程中误差不大于 50mm、碎部点的高程中误差应不大于 150mm。使用 RTK 测量方法，距基站距离不应超过 6km，依据本规范第 7.2.7 条第 3 款的仪器标称精度和式 (4.1.3) 计算，大地高测量中误差为 23mm，作业时对中杆量高误差 1mm，按式 (31) 计算图根控制点模型中误差为 44mm、碎部点模型中误差为 148mm。考虑到模型内符合中误差和模型

中误差的区别、模型选择的差异以及 RTK 测量条件的限制，模型内符合中误差按模型中误差的 2/3 计算。山区的各项技术指标在平原的基础上放宽 1.5 倍执行。

由于在山区大地水准面变化复杂，目前还没有足够的实验数据证明可以利用 GNSS 高程测量来代替四等水准测量，故表 7.1.2 中没有作出规定。

7.1.3 对于小区域的 GNSS 高程测量，一般是与 GNSS 平面控制测量同时布设、施测，根据区域情况和工程特点，控制点中测设部分 GNSS 水准点，通过数学拟合的方法获得高程异常模型，再利用模型计算其他控制点的高程，该高程异常模型可以应用于后续的 GNSS 高程测量中。

7.1.4 本条规定了作业员在进行 GNSS 高程测量时，应至少有一个以上的已知高程控制点进行检核，一方面可以检核该区域高程异常模型的正确性；另一方面可以检核 RTK 作业时各项设置的正确性和 RTK 作业的规范性。

7.2 技术要求

7.2.1 本条规定了高程异常模型的选取的技术要求。

1 对于区域范围大或地形地质情况复杂地区，只依靠 GNSS 测量、水准测量资料确定高程异常模型比较困难，需开展专项的区域似大地水准面精化工作，制定详细的技术设计，收集重力、水准、地形等大量资料，并结合 GNSS 测量、水准测量和重力测量，利用重力场模型和先进的计算方法获得区域高程异常模型成果。在该区域进行 GNSS 高程测量时，可根据精度要求直接使用该模型。

为了推广 GNSS 高程测量技术，国内已完成了十多个省级、三十多个大、中型城市的区域似大地水准面精化工作，为这些区域的 GNSS 高程测量提供了基础。同时，区域似大地水准面精化工作是一个综合了多种测量手段、使用了大量已有的数据、进行了复杂的数据处理的成果，技术难度大，资料、测量成果的互

补性很强，数据处理技术过程繁琐。因此，本规范没有对区域似大地水准面精化进行规定，只规定了使用模型的精度。对于似大地水准面精化工作，建议应另行进行技术设计，由专业的技术人员来完成。四等 GNSS 高程测量应使用区域似大地水准面精化成果。

2 对于测区面积不超过 100km^2 、地形较为平坦的地区或对于一些线形工程项目，可以直接使用水准测量、GNSS 测量资料，通过相对简单的平面或二次曲面高程拟合等数学模型，获取该区域的高程异常模型。区域高程异常模型的正确选取是进行 GNSS 高程测量的先决条件。

7.2.2 参与拟合计算的 GNSS 水准点应能反映区域重力异常变化情况，高程异常模型的精度主要取决于这些拟合点的分布和测量精度。由于重力异常变化人为无法确定，为了真实反映区域的重力异常变化情况，作业时只能覆盖作业区域，根据地形特征均匀布点。拟合计算范围的边沿应具有足够的已知点，以确保内插计算，避免外推。GNSS 水准点的拟合稳健性对拟合精度的影响较大，计算中应进行稳健性分析，筛选出模型兼容性较好的已知点进行。

7.2.3 本条规定了求取模型时 GNSS 测量和水准测量的精度等级。GNSS 测量和水准测量的等级按高于需要进行 GNSS 高程测量的等级来执行。

7.2.5 本条规定了采用数学拟合法建立高程异常模型技术要求：

1 测区面积小、地形较为平坦、重力梯度分布平缓时，高程异常模型可采用曲面拟合方法。

2 GNSS 高程控制网布设成线状或带状时，可采用曲线拟合。

3 测区面积较大（超过 100km^2 ）、没有似大地水准面精化工作的地区或呈大跨度带状分布时，为了控制高程拟合的误差传递，应根据地形地质情况、高程异常变化梯度合理地划分区域，进行分区拟合计算。

高程异常模型建立的数学拟合的方法如下：

1 GNSS 高程异常曲线拟合法可分为包括多项式曲线拟合法、三次样条曲线拟合法和阿克玛 (Akima) 拟合法。

1) 若拟合曲线不长且高程异常平缓时可用多项式曲线拟合法，并按式 (32) 计算：

$$\begin{cases} \xi(x_i) = a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 + \dots + a_nx_i^n + \dots \\ \xi(x_i) = H_i - h_i \end{cases} \quad (32)$$

式中： $\xi(x_i)$ ——拟合点的高程异常；
 x_i ——拟合点在测线上的长度值；
 $a_0、a_1、a_2 \dots、a_n、\dots$ ——各阶拟合系数；
 H_i ——拟合点的 GNSS 测量高程；
 h_i ——拟合点的实测高程。

按最小二乘原理使 $[\xi(x_i)\xi(x_i)]$ 最小，求出式 (32) 中的 $a_0、a_1、a_2 \dots、a_n、\dots$ 等各系数后，可按式 (32) 根据测线的长度值求出测线方向上任一点的高程异常值 ξ 。

2) 当测线过长、已知点较多时，宜采用三次样条曲线拟合法拟合，并按式 (33) 计算。

设测线的 n 个已知点， ξ_i 和 x_i (拟合坐标) 在区间 $[x_i, x_{i+1}]$ ($i=0, 1, 2, \dots, n-1$) 存在下式的三次样条函数关系：

$$\begin{cases} \xi(x) = \xi(x_i) + (x-x_i)\xi(x_i, x_{i+1}) + (x-x_i)(x-x_{i+1})\xi(x, x_i, x_{i+1}) \\ \xi(x_i, x_{i+1}) = [\xi(i+1) - \xi(i)] / (x_{i+1} - x_i) \\ \xi(x, x_i, x_{i+1}) = 1/6[\xi''(x_i) + \xi''(x) + \xi''(x_{i+1})] \end{cases} \quad (33)$$

$\xi''(x_i)$ ($i=1, 2, \dots, n-1$) 满足系数矩阵为对称三角阵的线性方程组如下式：

$$\begin{cases} (x_i - x_{i-1})\xi''(x_{i-1}) + 2(x_{i+1} - x_{i-1})\xi''(x_i) + (x_{i+1} - x_i)\xi''(x_{i+1}) \\ = 6[\xi(x_i, x_{i+1}) - \xi(x_{i-1}, x_i)] \\ \xi''(x_0) = \xi''(x_n) = 0 \end{cases} \quad (34)$$

按下式可以求出 $\xi''(x_i)$ 和 $\xi''(x_{i+1})$ ：

$$\xi''(x) = \xi''(x_i) + (x_i - x_{i-1})\xi''(x_i, x_{i+1}) \quad (35)$$

式中: $\xi(x)$ ——拟合点的高程异常;

x ——待求点坐标;

x_i, x_{i+1} ——待求点两端已知点的坐标;

$\xi(x_i, x_{i+1})$ ——一阶差商;

$\xi(x, x_i, x_{i+1})$ ——二阶差商。

3) Akima 曲线拟合

用 Akima 法进行曲线拟合, 在两个已知点间内插时, 还需用另外两点确保曲线光滑、函数连续。

设给定 n 个不等距 GNSS 测点为 $x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1}$, 相应的高程异常值为 ξ_i ($i=0, 1, 2, \dots, n-1$)。

若在子区间 $[x_k, x_{k+1}]$ ($k=0, 1, 2, \dots, n-2$) 上两个端点处满足下式 4 个条件:

$$\begin{cases} \xi_k = f(x_k) \\ \xi_{k+1} = f(x_{k+1}) \\ \xi'_k = g_k \\ \xi'_{k+1} = g_{k+1} \end{cases} \quad (36)$$

式中, g_k, g_{k+1} 可由 Akima 条件唯一确定。

则在区间 $[x_k, x_{k+1}]$ ($k=0, 1, 2, \dots, n-2$) 上可以唯一地确定一个三次多项式如下式:

$$\xi(x) = p_0 + p_1(x - x_k) + p_2(x - x_k)^2 + p_3(x - x_k)^3 \quad (37)$$

式中: $\xi(x)$ ——拟合点的高程异常;

x_k, x_{k+1} ——两端已知点的坐标;

p_0, p_1, p_2, p_3 ——拟合系数。

由式 (37) 即可计算该子区间插值点 t 处的高程异常值 $\xi(x)$ 。

2 GNSS 高程异常曲面拟合方法可分平面拟合法、多项式曲面拟合法、多面函数拟合法等。

1) 平面拟合

对于较小范围的平坦且地势平坦时, 其似大地水准面可以近

似看成平面。这样就可以用一个平面函数来近似拟合出似大地水准面，进而求出测点的正常高。

设已知点 i 的高程异常为 ξ_i ，平面坐标为 (x_i, y_i) ，则平面模型可表示如下：

$$\xi_i = a_1 + a_2 x_i + a_3 y_i \quad (38)$$

式中： ξ_i ——拟合点的高程异常；

a_1 、 a_2 、 a_3 ——未知参数。

求解时至少需要 3 个公共点，在最小二乘法的准则下，就可求得参数的最佳估计，并进而回代得到未知点的高程异常值 ξ 。

2) 多项式曲面拟合

当测区范围较大时，应采用曲面模型来对似大地水准面进行拟合。设测点的高程异常 ξ_i 和坐标 (x_i, y_i) 之间存在下式函数关系：

$$\xi_i = f(x_i, y_i) + \epsilon_i \quad (39)$$

式中： $f(x_i, y_i)$ ——空间曲面函数；

ϵ_i ——误差。

通常， $f(x_i, y_i)$ 可选用多项式空间曲面表达式如下式：

$$f(x_i, y_i) = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i + b_3 x_i^2 + b_3 y_i^2 + b_4 x_i y_i + b_5 y_i^2 + b_6 x_i^3 + b_7 x_i y_i^2 + b_8 x_i^2 y_i + b_9 y_i^3 + \dots \quad (40)$$

写成矩阵形式： $\xi = XB + \epsilon$

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_n \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_0 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & \dots \end{bmatrix} \quad (41)$$

对于每一个已知点，都可列出以上方程。在 $\sum \epsilon^2 = \min$ 条件

下,可解出参数 b_i , 并进而回代得到未知点的高程异常值 ξ 。根据的测区的不同情况,可在式(41)中选用不同的参数进行拟合。选用的参数不同,拟合出的空间曲面形式也不同。

3) 多面函数拟合

当测区地势复杂、高差较大时,似大地水准面的起伏也随之增大,单一的数学曲面不再适用。此时可采用多面函数模型进行拟合。其理论根据是:任何一个圆滑的数学表面总可以用一系列有规则的数学表面总和,以任意的精度逼近。多面函数拟合的基本思想是:在每个插值点上,同所有的已知数据点分别建立函数关系(多面函数),通过将这此多面函数的值叠加起来,获取最佳的曲面拟合值。

设测点的高程异常 ξ_i 和坐标 (x_i, y_i) 之间存在下式函数关系:

$$\xi = f(x, y) = \sum_{i=1}^n a_i Q(x, y, x_i, y_i) \quad (42)$$

式中: a_i —— 待定系数;
 x, y —— 待求点的坐标;
 x_i, y_i —— 已知点的坐标;
 $Q(x, y, x_i, y_i)$ —— 二次核函数。

核函数一般可选用下式:

$$Q(x, y, x_i, y_i) = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + \delta]^{1/2} \quad (43)$$

其中, δ 为光滑系数,应在试算后加以确定。

当待求点数等于已知点数时,任一点 ξ_p 为:

$$\xi_p = Q_p Q^{-1} \xi = (Q_{1p}, Q_{2p}, \dots, Q_{np}) \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Q_{n1} & Q_{n2} & \dots & Q_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_n \end{bmatrix} \quad (44)$$

其中 $Q_{ij} = Q(x, y, x_i, y_i)$

当待求点数多于已知点数时应用下式:

$$\hat{\xi}_p = Q_p (Q^T Q)^{-1} Q^T \xi \quad (45)$$

7.2.6 本条规定了高程异常模型确定后,还应有一定数量的GNSS水准点作为检测。检测点也应分布均匀,检验点数不少于5个,做到同时兼顾检测工作量和检测的效果质量。检验结果应符合本规范表7.1.2的规定。

7.2.7 GNSS高程测量时应严格满足GNSS外业选点、埋石、观测时间、观测环境和仪器高丈量等各方面的要求。对于四等GNSS高程测量,应选用双频接收机和性能较好的天线,观测中应分测前、测后量取仪器高,量取准确到毫米,较差小于 $\pm 3\text{mm}$ 时可取其平均值作为结果。外业观测中应注意选择良好的观测窗口,以选择较佳的PDOP值时段,同时避开电离层、对流层活跃的时段。

7.2.8 区域高程异常模型均有一定的覆盖范围。采用高程异常模型进行GNSS高程测量时,应确保GNSS点完全分布在高程异常模型区域范围以内,进行内插计算,不能外推,以确保GNSS高程点的精度。

7.3 数据处理与检验

7.3.4 GNSS高程拟合的各种模型都各有其优势与缺陷,有其一定的适用范围,且不同拟合模型可能对高程异常模型的影响差异较大,关键在于模型函数能否最佳地表达出整个区域的高程异常变化。因此新建立的GNSS高程异常模型应进行模型的精度评定。

7.3.5 新建立的GNSS高程异常模型是否合理,需要一定数量的已知点来进行模型外符合检核,检测点的数量较少没有统计意义,只有检测点大于20个时才有统计意义,才能够较好地检验高程异常模型的实际精度。

7.3.6 GNSS高程测量工作完成后,需要对成果进行精度评定。进行一定量的外业抽检,抽检比例应大于常规测量的外检比例,本规范规定外业抽检比例不能低于10%。通过外部的实测结果

来评定 GNSS 高程测量的精度，已参与模型拟合的 GNSS 水准点不得参与检测计算。本条还规定了可以采用的检测方法。

7.3.7 GNSS 高程测量成果应与区域的高程控制网系统一致，为了避免出现独立的高程系统，本条规定了任何检测方法都要至少联测一个已知高程点。

7.3.8 依据《城市测量规范》CJJ 8 的规定，水准测量同精度检测已测测段高差之差按原等级水准测量限差的 $\sqrt{2}$ 来执行，三角高程测量按对向观测高差或单向两次高差较差执行，碎部检测较差按高程中误差的两倍执行。

7.3.9 按同精度两次观测计算 GNSS 高程测量的高程中误差。

7.4 成果提交

7.4.1 可根据工程项目的实际情况，结合本条的内容确定 GNSS 高程测量应提交的成果。