

GPS-RTK 技术在道路定测中的应用

刘道荣 常增亮

山东电力工程咨询院, 济南 250013

摘要: 探讨了 RTK 技术道路定测中应用的有关问题, 包括适用于 GPS-RTK 作业的道路中线任意点坐标的计算, 坐标转换, 高程计算等; 建立了相应的数学模型及处理方法, 为改进道路勘测手段, 拓展 RTK 技术的应用领域起到促进作用。

关键词: GPS; RTK 技术; 定测; 坐标; 高程

1 引言

RTK 是 GPS 应用中的最新技术, 它是实时载波相位测量的简称。利用 RTK 技术进行测量有如下优点: 具有 GPS 测量所有的特点, 如全球适用, 不受气候、时间影响, 不需通视。

可实时警告得具有厘米级精度的点位坐标。以往都是通过后处理获得厘米级的点位坐标, 实时处理大大提高了作业的效率, 并且保证了数据的质量, 同时扩大了 GPS 应用的领域, 比如施工放样等。可在运动过程中连续高精度采样。

首先需要根据设计数据连续计算线路上各点在线路坐标系中的坐标。其次, 把 GPS 测量的 WGS-84 坐标化为线路坐标进行比较。另外, 对于中线测量获得的结果需要进一步进行处理以获得中桩的高程。

2 线路坐标系中中线点位坐标计算

2.1 坐标计算的数学模型

目前的道路设计中主要使用直线、圆曲线、缓和曲线三种线型, 其中直线的曲率 $K=0$, 圆曲线的曲率 $K=1/R$ (R 为设计半径), 缓和曲线设计时遵循 $RL=A^2$ (A^2 为常数) 的原则, 距起点 L 处的曲率 $K=1/R=L/A^2$, 即与线路的长度成比例发生变化。因此整个线路上各点的曲率随里程变化的函数可根据设计数据获得, 即 $K=f(S)$ 。若将曲率沿线路作积分就得出线路上方位角的变化, 即曲线切线的方位角随弧长的变化

$$d = \int_0^s K ds \quad (1)$$

由直线、圆曲线、缓和曲线的曲率特性可知, 直线的方位角不变, $d = 0$, 圆曲线的方位角线性变化。 $d = L/R$, 缓和曲线上各点切线方位角按照二次抛物线变化, $d = L^2/2A^2$, 若曲线起点在线路坐标系中的坐标为 X_A 、 Y_A , 过切点的方位角为 α_A , 则曲线上任一点的坐标可通过方位角沿线路的积分获得, 即

$$X_B = X_A + \int_{s_A}^{s_B} \cos(\alpha + d) ds \quad (2)$$

$$Y_B = Y_A + \int_{s_A}^{s_B} \sin(\alpha + d) ds$$

对于直线段有

$$X_B = X_A + S \cos \alpha_A \quad (3)$$

$$Y_B = Y_A + S \sin \alpha_A$$

对于圆曲线有

$$X_B = X_A + 2R \sin \frac{d\alpha}{2} \cos \left[\alpha_A + \frac{d\alpha}{2} \right] \quad (4)$$

$$Y_B = Y_A + 2R \sin \frac{d\alpha}{2} \sin \left[\alpha_A + \frac{d\alpha}{2} \right]$$

对于缓和曲线则必须采用积分式，借助于数值解法求得。

2.2 实用公式与计算步骤

前面给出了各种线型在起点坐标及过该点切线方位角已知时点位坐标的计算公式，通过曲率的积分来获得方位角，对方位角积分获得坐标增量。因此，若要按里程的顺序进行坐标的连续计算，首先应根据设计数确定出各种线型衔接点处的里程及曲率。例如某段起点里程 S_A ，曲率 K_A ，终点里程 S_B ，曲率 K_B ，则该段内任一点 S_I 处曲率的计算公式为

$$K_I = K_A + \frac{K_B - K_A}{S_B - S_A} (S_I - S_A) \quad (5)$$

方位角

$$d_i = \int_{S_A}^{S_B} k_i ds = k_A (S_I - S_B) + \frac{k_I - k_A}{2} (S_I - S_A) \quad (6)$$

$$i = \alpha_A + d_i \quad (7)$$

直线段按式 (3) 计算，圆曲线按式 (4) 计算，缓和曲线采用辛普生公式计算相邻点的坐标差，若相邻点弧长小于 100m，则该公式具有足够的精度。

$$X = \frac{\Delta s}{6} (\cos i_{i-1} + 4\cos i_{i-1/2} + \cos i) \quad (8)$$

$$Y = \frac{\Delta s}{6} (\sin i_{i-1} + 4\sin i_{i-1/2} + \sin i)$$

根据上述公式即可算出每一个点的坐标及切线方向的方位角。实际计算时可选较小的间隔进行计算以准确地把中线绘制在屏幕上。在连续计算时线路有左偏、右偏之分，因此左偏曲率取负，右偏曲率取正，以保证积分后对方位角大小的影响的准确性。由上可知其实际计算步骤为：

- (1) 根据设计数据计算各段曲线衔接处的里程并给出其曲率值；
- (2) 由给出路线起始点方位角 α_A 计算 α_i ；

- (3) 计算坐标增量；
- (4) 通过连续累加即可算出各点的线路坐标。

该算法适用于各种线型及其相互组合，如 S 型、凸型及复合型，因其曲率在某一组合段中都是线性变化的，其衔接处的曲率也很容易给出，因此都是适用的。

3 坐标转换与高程计算

道路中线各点的坐标都是有示在线路坐标系中的，而 GPS 卫星采用的是 WGS-84 坐标系，测量的结果也是属于该坐标系的，因此要把该结果实时转换到线路坐标系中才能使两者进行比较。另外，在平面位置满足要求以后还要其高程信息，而 GPS 测得的是大地高，还要将其转换为水准高才能绘制横断面图，下面分别讨论坐标转换与高程计算问题。

3.1 坐标转换

在定测中运用 RTK 技术，应首先建立 RTK 作业的基准站网络，即控制网。点之间的距离可以是几公里或十几公里，这些点构成线路的首级控制网，它不仅具有 WGS-84 坐标，同时也有线路坐标系的坐标。在 RTK 作业时求得转换参数以进行两种坐标系的实时转换，在两个控制点间的线路应选用该两点的两套坐标求转换参数。

设两点的线路坐标为 (x_1, y_1) (x_2, y_2) ，该两点的 WGS-84 坐标为 (B_1, L_1, H_1) (B_2, L_2, H_2) ，将 WGS-84 坐标以与线路坐标系相同的中央子午线和投影面进行高斯投影，求得由 WGS-84 坐标得的坐标差 x 、 y ，距离 $s = \sqrt{\Delta x'^2 + \Delta y'^2}$ ，方位角 θ 满足 $\text{tg} \theta = y \div x$ ，因此得到两个坐标的尺度参数 $\lambda = s \div s'$ ，旋转参数 $\theta = \theta' - \theta_0$ ，两个坐标系的关系式为

$$\begin{vmatrix} x_{i2} \\ y_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_1 \\ y_1 \end{vmatrix} + \lambda \begin{vmatrix} \cos \theta - \sin \theta \\ \sin \theta \cos \theta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \end{vmatrix} \quad (9)$$

若由任一点 GPS 测得的 WGS-84 坐标为 (B_i, L_i, H_i) ，投影后的平面坐标为 (x_i, y_i) 的坐标差 $x_{i1} = x_1 - x_i$ ， $y_{i1} = y_1 - y_i$ ，其相应的线路坐标 (x_{i1}, y_{i1}) 的计算如下

$$\begin{vmatrix} x_i \\ y_i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_1 \\ y_1 \end{vmatrix} + \lambda \begin{vmatrix} \cos \theta - \sin \theta \\ \sin \theta \cos \theta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta x'_{i1} \\ \Delta y'_{i1} \end{vmatrix} \quad (10)$$

因此由上式可计算各点在线路坐标系中的坐标。在进行 RTK 作业时把参数输入到手机中并在已知点进行检核，以确保其准确性。无论线路坐标采用的是国家坐标、城市坐标或工程独立坐标，该模型均适用。同时该模型对中央子午线、投影面高程等参数的不准确性产生的影响不敏感，只是反映在转换参数上有所不同，对转换的结果影响很小。

3.2 高程计算

在线路工程中完全用 GPS 替代基平测量尚有一定的困难，基平仍由水准或测距三角高程来完成，基平一般每 1-2km 布设一个水准点，在基平点选择及 GPS 线路控制时应顾及两者有足够多的重合点，这样保证每 2-3km 有一个重合点，这时采用拟合模型其误差就能得到有效

的控制,拟合后相对于在平不准点高程中可在 2-3 cm 以内,这样的精度可以满足中平测量以及野外地形数据采集对高程的精度要求。

线性带状工程(如铁路、公路)在纵向有时可达到几百公里,在横向上却一般只有几百米,在 GPS 高程转换过程中若是利用所有点建立统一的拟合公式于整个测区,由于线路在某个方向上伸展的范围较大,其高程异常的变化也就复杂得多,因此无论采用何种拟合算法其整体拟合的精度都不会很高。若是采用分段拟合,即先进行人为分段,把整个测区人为划分阶段几个区域,利用各个区域内的重合点建立拟合模型,进而计算该区域内 GPS 点的正常高程,显然在各区之间的接合部 GPS 点高程的转换只利用一侧的重合点,具有一定的缺陷,且采用人为分区具有一定的盲目性。因此对于定测高程的计算应采用动态的拟合模型,即无论采用何种拟合算法都首先找出距该点最近的几个点,利用这几个点来计算拟合参数,当点位发生变化则其相当的 GPS 水准重合点也发生变化,避免了人为分区的缺陷。例如当采用两个点的直线拟合模型时,任何一个点其高程转换利用的是该点两侧的 GPS 水准重合点,由于采用的重合点随转换点的位置而变化,因此称其为动态拟合。

从济南至菏泽高速公路段 GPS 加密网的计算可以看出:直线及曲线模型其拟合的误差较小,而平面、曲面其精度相对要差一些,这主要是由于线性工程本身的特点所决定的。对于线性带状工程其各 GPS 高程点的位置往往处于一条直线上,当各点位于同一直线上时,不能建立平面、曲面等面状拟合模型。这是由于当近似于直线时,其面状拟合模型具有较大的不稳定性,即当某点位置或高程有一些微小的变化时,拟合的结果极不稳定。线性模型只顾及了纵向高程异常的变化,而没有考虑横向的变化,对带状区域其拟合高程比面状模型稳定,适用于线性带状工程的 GPS 高程拟合。对于面状区域则应采用一面、曲面拟合模型。从计算结果可以看出直线模型当利用的重合点增加时其拟合的精度反而降低,这说明在整个线路采用统一的拟合模型是不合理的,而平面模型适当地增加一些重合点则有利于抑制重合点高程误差的影响,精度有所提高。

4 在定测中就用 RTK 技术

根据首级控制网,和 RTK 作业基准站网络及 GPS 水准点;利用 RTK 技术进行坐标放样、直线及圆曲线测设等功能,即进行定线工作。

首先应在室内根据设计数据计算出各待定点的坐标,包括整桩、曲线主点、桥位等加桩,然后将这些数据送到手持机中,有了坐标以后在实测前还应作坐标转换参数的计算,以便把 GPS 测量结果转换到工程采用的坐标系统。有了转换参数便可在野外进行测设工作。

2004 年 3 月 8 日在济南至菏泽高速公路 K121 路段进行了定线测量的试验。当时该路段已进入施工阶段。具体步骤如下:

(1) 计算各待定点的坐标。根据线形设计数据及待定点的里程按本文阐述的线路中线点位坐标计算的模型可计算出各整桩和加桩的设计坐标。采用的坐标数据由设计单位提供。

(2) 将测设点的坐标输入到手持机中。设计坐标数据 Leica Survey Office 软件输送到手持机中。

(3) 转换参数计处。采用试验路段附近的四个线路控制点 JH06、JH08、JH10、JH12 进行转换参数的计算,这些点都具有线路坐标和 WGS84 坐标。在桩定线路时一般实时只考虑平面位置,可把平面位置和高程分开处理,平面采用平面转换的模型,后处理高程计算采用动态拟合模型。采用随机软件进行计算。

(4) 野外实测。基准站设置于已知点 JH06,流动站首先从另一已知点进行验证已知坐标、转换参数及参考站设置的准确性;然后测设各整桩和加桩的位置,在每次作业的最后应再次回到已知点上检查是否与已知数据相符,以保证实测数据的质量。在 K108+600 和 K120+700 上有比较准确的水泥中线桩,实测的点位与已有点位之差均在 2 cm 内,精度较好。

利用 RTK 技术进行中线定测时,线路上的里程可按一定的算法算出。即首先计算至前一整桩的直线距离 S ,然后根据程序计算该整桩加 S 处点的坐标 X_1 、 Y_1 ,进而计算距离 S_1 , S_1 与 S 的差即为曲线长 S 处的弦曲差,该差作为第一次改正加到 S 中即可得到加桩的里程,若精度不够可再次趋近。对于横断面首先绘制其方向线,任一点的横断面与该点切线方向相垂直,因此是不难给出的,沿该方向线便可测绘横断面,避免了常规测量中曲线段横断面方向较难确定的困难,根据记录在手持计算机中的纵、横断面的数据导入道路 CAD 系统绘制纵横断面图,为施工数据提供资料。但 RTK 产品有待于开发用于道路的专用的软件系统。

5 结 语

RTK 技术是 GPS 定位技术的一个新的里程碑,它不仅具有 GPS 技术的所有优点,而且可以实时获得观测结果及精度,大大地提高了作业效率并开拓了 GPS 新的应用领域。RTK 技术将在道路初测、定测、施工测量、竣工测量等领域发挥巨大作用,将给现行道路勘测手段及规范带来变革。当然 RTK 技术的应用还有待于进一步完善和新的的发展。

注:本文发表在《电力工程测量论文》,2004 年 11 月