

测量现代技术译文

曹 垣 平 译

西北林学院 经理教研组
情报资料室

一九八一年十一月



目 录



惯性测量系统——经验与预测

发展中国家地籍整理的现代技术

轨电、管线工程测量

检验水准管的新仪四

惯性测量系统—经验与预测

DR. K. P. SCHWARZ, university of
New Brunswick, Fredericton, New Brunswick

首先,介绍了惯性定位原理,并用渥太华试验网取得的大量新资料来讨论这个技术的状态。目前,两个主要的问题限制了系统的精度,不能用于生产作业:航向灵敏度与对异常引力场的不完全了解。新资料的开始分析指出,最主要的是软件问题,而不是硬件问题。看来沿L形导线确定点位,可以取得与沿直伸导线定位相同的精度。第二个问题被认为是一个使用模拟软件的定量法问题。由于定位精度方面,迫切要求。对未来硬件的改进,正通过模拟误差传播过程进行研究。

导 言

根据惯性导航原理的测量系统,在大地测量实践中是比较新的方法。这些在七十年代早期发展起来的系统,是由美国陆军机构、特别是弗吉尼亚 Belvoir 要塞美国陆军工程师地形实验室创办起来的。

1975年第一个这种系统成为非军事用户可以得到的设备。在这一年里,对这些系统进行了广泛地试验。自1976年以来,在加拿大和美国,这些系统为政府部门和私营工业用于生产工作。迄今为止,大量的作业,一般是在建立具有二等精度的大地测量控制。但新近的成果指出,用这种系统来完成一等精度的控制是可能的。

本文拟简略地考察一个惯性测量装置所应用的原理，并指出现时使用的三个系统间的主要差别。惯性定位的精度，用新的渥太华试验网的大量试验数据进行检核。对于L形导线和由于不完全了解异常引力场所产生的影响，将予特别注意。在最近的将来，硬件研制的可能进展，用模拟研究作了评定。

关于地籍测量的应用，本文不作详细讨论。但下列几点可能是适合的。现时使用这种系统于控制测量和加密的情况指出，使用惯性测量系统有利的地方是大面积地区。这个系统的有利方面包括：测量速度，视线的独立性，均匀性、坐标形式的计算成果，最后，但是最重要的，是较低廉的测量费用。在地籍测量中，大的控制联系要由100公里到300公里间距的多普勒控制组成，用惯性法加密到2公里至10公里的间距，而详细的测量，则用传统方法或摄影测量方法。在目前，对这个有用的系统没有提供可以利用的资料，以便在详细的地籍测量中，可以使用大量只具短距离间隔的点位。这里所提出的方法，是用惯性法精密测定导线点位，而同时以视巨仪测量所有相邻点位。用惯性系统得出方位，由附带的电子测巨装置测量距离。目前供应的一种系统，电子测巨设备是作为任意选择的附件，还令人感兴趣的是这个系统的积分数据库，因为它能够确定水平位置和高程，同时还能测定垂直偏差和引力异常。

测 量 原 理

下面的讨论是以传统的经典力学为基础。在这样一个假定的基础上，惯性坐标系统就是包含牛顿运动方程式的一个系统。它可看成为对遥远银河系不旋转的一个系统。1977年Blais使用相对论性力学局部惯性系统的概念，而提出一个不同的方法。对于一个明确的

定义虽然相对论性的方法更加合适，但还是选择了传统的方法，因为它更直观，所以更适合于介绍性的说明。

我们从牛顿运动第二定律的特殊形式开始式中质量 m 视为常数。

$$f = ma \quad (1)$$

对于 f 是测量值，而 m 为已知，则加速度 a 可以计算。我们现在假定，加速度是车辆在三维欧几里得空间运动而产生的。利用笛卡尔坐标系，加速度 a 的矢量，可以表示为由坐标系原点半径矢量 r 的二次时间导数：

$$a = \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (2)$$

这样，测站 P_1 和 P_2 间的坐标差，可由 a 的二重积分来确定

$$r_2 - r_1 = \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} a \, dt \, ds \quad (3)$$

式中 dt 和 ds 两者都是关于时间的微分。这是建立惯性导航基础的基本方程式。为了用于定位目的，必须在车辆上用这样的方式安装一个加速仪三脚架，使车辆在空间的定向每一瞬间都是已知的。当车辆由 P_1 行驶到 P_2 时，即沿三个互相垂直轴系测量，并积分加速度。因为牛顿的运动定律，只在惯性坐标系中有较， r_2 和 r_1 精确的表示由惯性系统原点开始的三度笛卡尔矢量。但是为了在地球表面上测量原点，可以移至地球引力中心。由这种近似法产生的误差，最少要比测量误差小一个量级。

加速仪三脚架的定向，由测定测量装置对惯性空间（吊带系统）的所有定向变化来完成。或以这样的方式控制定向变化，使定向变化

能用一个确定的数学函数(方向转节系统)描绘出来。这第二个可能性,已用于目前使用的所有惯性测量系统中。它需要一个所谓稳定要素的机械器具——一个稳定台,即使测量装置与车辆运动分离的稳定台。在空间稳定系统中,工作台框架相对于惯性空间是固定的。在本机水平系统中,框架以这样的方式对惯性空间旋转,使测量系统的 z 轴垂直于起始确定的椭圆面。这可用一个简单的方法,使这第二系统与大地测量使用的椭圆面坐标系相联系。由椭圆坐标转换为真形的制图系统与高程部分的分析,则是众所周知的。

工作台稳定,由陀螺仪系统,即由高度精细的纺织陀螺来完成。除由动力矩给予作用外,陀螺仪将保持其在空间的定向。任务开始时由陀螺仪确定的三个相互垂直的轴系,在车辆运动中能够保持独立自由。这种可搬运的框架,理想地适于确定加速仪三轴的定向。

每次惯性测量之前进行校准,使测量框架的定向与已知控制点的坐标系定向联系起来。同时将测量仪器正置水平,并用陀螺罗盘定向。仪器正置水平后,即使惯性系统 z 轴与地方铅垂线相一致,若起始点的垂直偏差为已知,可用简单方法转换为坐标的椭圆系统。陀螺定向根据进动作用,即当使用一个垂直陀螺动力矩时,根据陀螺自转轴所受的特殊运动,在陀螺经纬仪中,就是用同样的原理建立子午正北。

运动在地球表面或其附近的惯性系统,应用公式(1)和(3)时,产生两个问题。第一,测量仪器是在地球引力场中运动,这里公式(1)必须用

$$f = a - g \quad (4)$$

代替,为方便起见式中假定 $m = 1$ 。公式(4)说明,为了积分车辆的加速度,必须首先由测量值中减去地心引力的影响。这对于包含总

重力约百分之 99 的法向分量是困难的，但对于重力摄动矢量，则是更加复杂了。这个问题将在以后的章节中讨论。

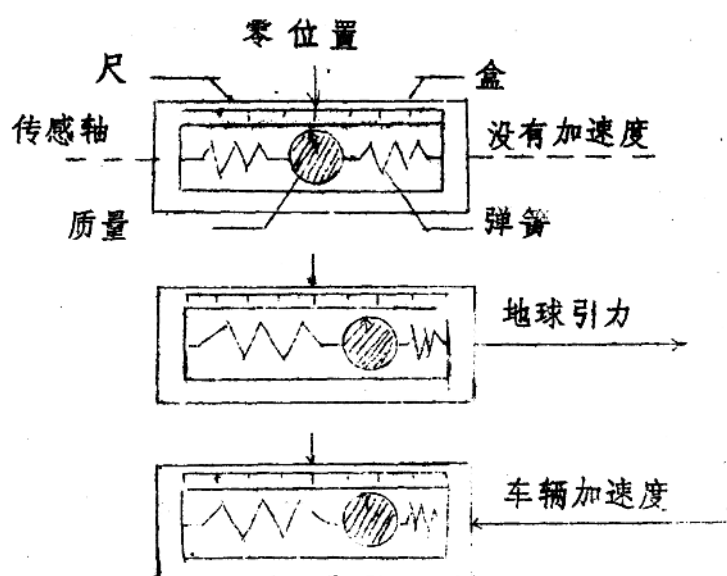


图 1 加速仪对车辆加速度与地球引力的等量响应。

图 1 给出 (4) 式的图解表示。要克服的第二个困难，是测量仪器在一个对惯性空间作自身转动的物体上 (车辆) 运动。这样，惯性系统中的加速矢量之间的转换关系，应引入方程式 (3) 中。方程式的最后式子为

$$\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \mathbf{f}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, \ddot{\mathbf{r}}, \Omega) + \mathbf{g} \right\} dt ds \quad (5)$$

式中 $\mathbf{f}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, \ddot{\mathbf{r}}, \Omega)$ 表示，现在加速度取决于 $\mathbf{r}$ ， $\mathbf{r}$ 的第一次和第二次时间导致 $\dot{\mathbf{r}}$ 和 $\ddot{\mathbf{r}}$ ，以及取决于一个包括角速度的斜称矩阵 Ω 。矢量 $\mathbf{r}$ 现在指的是一个局部中心系统。再者已假定 $m = 1$ 。

这样，惯性定位可以概括为由测量值及其沿三个互相垂直轴系的积分测定车辆的加速度，三个垂直轴系对惯性装置的定向在任一时刻都是已知的。

误差传播

在本文中假定测量装置产生无误差的数据。称为数学模型的这种理论观念，对仍可能接近理想情况下的物理过程是需要的。实际上，经常把测量误差带入计算中，而应寻求最佳方法消去这些误差。在惯性测量系统中，一切重要的误差是时间的函数，并表现一个关于某个时间周期非常典型的特性。这样，取决于约 84 分钟的 SCHULER 周期的定位误差，基本上表现为一个正弦曲线的误差增长，而不受抑制的高程误差，则按指数规律发展，这就是图 2 表示由加速仪倾斜 $10^{-5} \text{ m sec}^{-2}$ (1 微伽) 与由陀螺仪每小时偏差 1.5 弧度秒产生的坐标误差。由于这种大

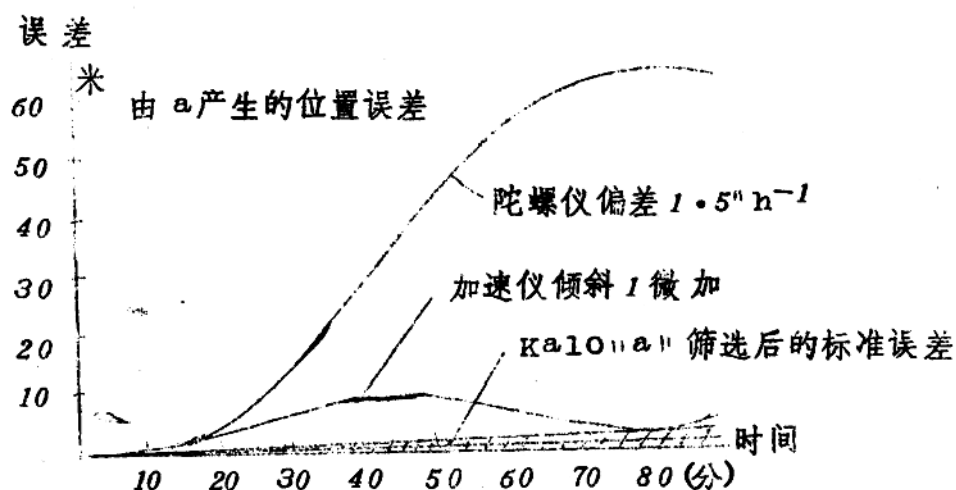


图 2：定位误差是时间的函数

小的系统误差，可以视为测量开始时的随机数量，定位误差常表现为一个标准系统特性 (quasi systematic behavior)。这种已知的误差特性曲线，可用来控制以一种最佳方法输出参数的精度。所用的方法称为筛选法，应用最广的是实时控制的卡尔曼 (Kalman) 筛选法。

从数学方面来说，误差特性可用一系列下列型式的线性微分方程式来解释

$$\frac{dX}{dt} = FX + Gu \quad (6a)$$

对于起始值

$$X(0) = C \quad (6b)$$

时间函数矢量 X ，说明惯性系统在时间 t 的状态。它大多数视矢量初始值 C 而定。矢量 u 包括时间 t 产生的误差。 F 和 G 是时间函数矩阵。现在我们假定，矢量包含惯性测量系统所有的时间函数误差来玩，并假定在某个时间 t_1 ，完成了依 X 而定的测量值 Y

$$Y(t_1) = H(t_1)X(t_1) + n_1 \quad (7)$$

再假定 u 的统计性能为已知，则可以估算 C 。一旦 C 为已知，方程式 (6a) 就确定任意时间的误差特性。卡尔曼 (Kalman) 筛选以测量值代入 (7) 式，用顺序逼近法，采取某种统计假定值，取得任意时间 t 的一个最优 X 估值，这就获得了方程式 (6) 的解。方程式 (7) 还说明车辆正常停车的需要，以便测量车辆在零速度时，系统误差的累积作用。这些问题的较详细研究可参考 1979 年本文作者的资料。

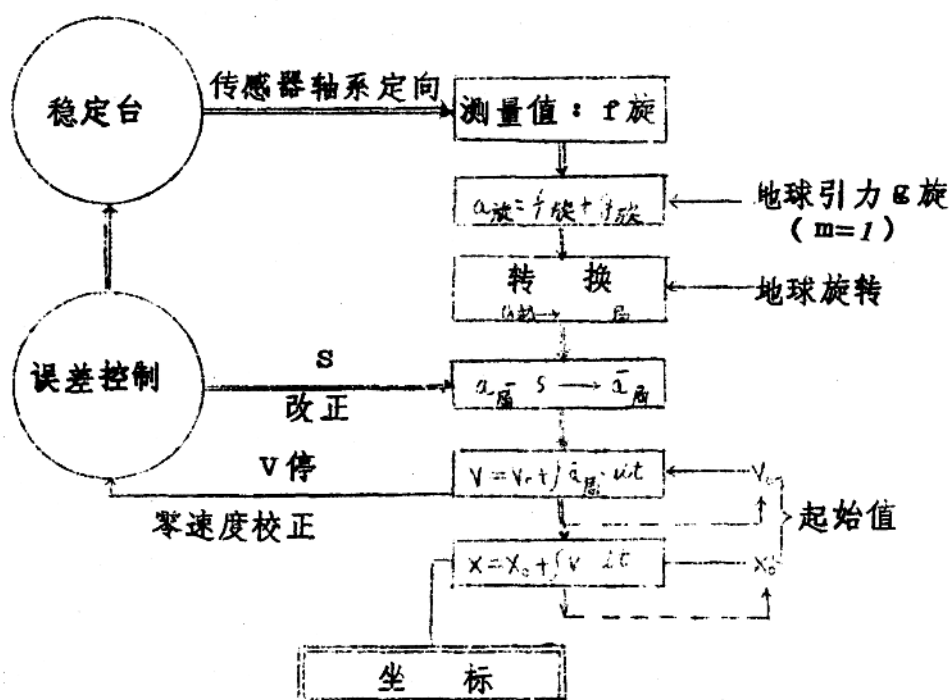


图 3：简化惯性测量系统方框图

现有惯性测量系统

目前，有三家公司供应用于测量目的的惯性系统。李顿自动测量员 (LITTON'S Auto-Surveyor)，在市场上出售的年代最久，而在有关测量系统文献中引用的实际成果，绝大多数是涉及这个系统的。系统名称有时随使用者而变异。这样，惯性定位系统 (LPS)，可见之于美国，而惯性测量系统 (LSS)，则见之于加拿大。李顿系统 (LITTONSYSTEM) 和费鸾替惯性陆地测量员 (FERRANTI

Inertial Land Surveyor) (F115), 开始是为军用目的设计的。关于费鸾替系统向测量应用方面需要的精度发展, 是由公司与加拿大壳牌资源公司, 在最近两年合作完成的。贺勒威尔陀螺自转仪 (Honeywell GEO-SPIN), 是专为测量目的设计的一个系统。1979年夏季广泛试验了试制样品, 预期1980年将生产这个系统。

因为三个系统的典型测量任务, 全都是类似的, 所以, 首先说明它们一些共同的特点。装在有棚汽车里或直升飞机里的这种系统, 要在一个已知坐标 (100米以内) 站校准。这个步骤一般需用1到1.5小时, 并只要求作业员稍加注意即可。然后汽车驶到第一个已知坐标点位, 进行第一次坐标值校正。沿着导线继续前进, 在四分钟间隔停车一次, 进行控制误差的零速度校正。这种校正需时一到二分钟, 要求在每个站进行测量。若到达已知坐标的测量标志, 就进行另一个坐标校正。然后汽车开始次一条边的驶行。进展相当迅速, 对于直升飞机法, 每小时正常数值为80公里到100公里, 对于汽车法, 每小时为30公里到40公里。关于惯性测量的数理逻辑, 1977年威克汉 (Wickham) 作了更详细的阐述, 而关于它的经济状况, 则由巴贝格 (Babbage) 于1977年做了详细说明。

由于概念、硬件和软件而存在着系统之间的差别。李顿 (Litton) 和费鸾替 (Ferranti) 系统是机身水平系统, 而贺勒威尔 (Honeywell) 陀螺自转仪是空间稳定系统。基本的差别是一个机械与计算的复杂性。在第一种情况, 由于Z轴保持与椭圆法线的垂直, 可能是一个简单的计算模型, 但由于转矩误差, 误差的累积是增长的。在第二种情形, 计算负担有些过重, 而陀螺仪在执行任务中基本上未被触动。这就排除一个重要的误差来源, 给予系统以更大的稳定性,

但需要一个较大的车载计算机。然而对现时微型计算机技术的发展来看，这似乎不是一个缺点。

贺勒威尔 (Honeywell) 和费雷替 (Ferranti) 系统硬件比李顿 (Litton) 系统硬件更现代化。但硬件元件—陀螺仪、加速仪和万向转节系统—精度方面的差别，不是所有运转性能差别的直接指示。由于这些系统的复杂性，一个实际的误差模型，必须包括软件的不协调。最近对李顿 (Litton) 系统的调查表明，在已知坐标测站取得复测的内部一致性比不一致性情况更佳。这就指出硬件的精密密度不能完全为标准软件所使用。这样，软件的改善似乎比硬件的改善更加急迫。

三个系统的误差控制技术是完全不同的。李顿 (Litton) 系统在每次校正时使用一个 (Kalman) 筛选法，并在到达已知坐标测站时，使用一个简单的修正程序。这样，在野外即可直接取得成果。目前，使用者只能利用二者之一，或者筛选数据，或者平差数据。这就意味着，实际测量值没有采用价值，它使得软件的改善特别困难。

Honeywell 系统使用一个简单零校正法，并在很小时间间隔内存储实际测量值。当到达一已知测站时，启动 Kalman 筛选器，就取得所有中间各点位的平差值，这样，在旅行中，就知道了近似的位置。在野外，就取得了校正的成果，如果以后需要分析，还可以把测量值存储起来。对于系统的使用者来说，这种布置似乎是理想的。目前，Ferranti/Shell 系统就不使用筛选法，把所有的数据在野外存储起来，在室内计算评定。这样，基本上就没有计算机的限制了。位置的确定，则使用三动点曲线拟合平均以积分法完成。这个方法的困难，在于野外没有检查的可能和数据中细小的非线性误差，仍然不能发现。其优点，则是可取得实际测量值与可建立一个更加紧凑的系统。

这个简短的叙述，说明在获得和处理惯性测量数据方面，已经使用了不同的方法。而要达到最佳的方法，也许还需要更多几年的经验。

惯性定位的精度

下面成果是根据作者建议，由加拿大大地测量机构于1979年3月和4月间完成的大量外业试验。这些试验资料只限于LittOn系统，这不是偏爱，而是只有这个系统可供利用。

图4表示渥太华地区为惯性设备而建立的试验控制网。总精度按照一等标准，惯性测量最重要的相对精度以下列比式给出

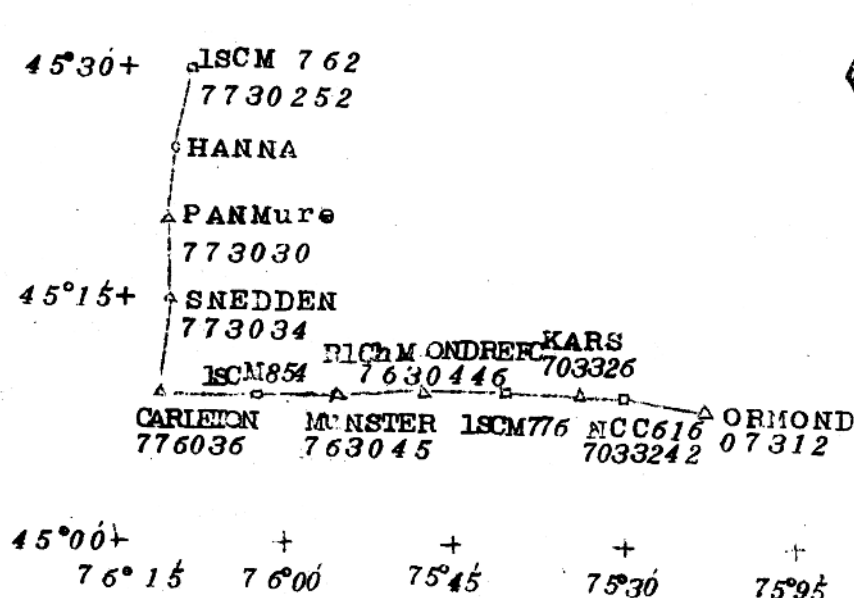


图4:用于惯性测量的渥太华试验网(1979年3月建立)。

- △ 一等三角点 比例尺 1 : 250.000
- 二等控制点 南北导线长度 38.1 公里
- 设标志的惯性测量系统点 东西导线长度 63.5 公里

$$P = \frac{C \times x}{d}$$

式中 x 为标准误差椭圆的半长轴， C 为视置信区域试样大小和或然程度而定的变量， d 为相对误差椭圆两点间的距离。这样，在原理方面半长轴的置信区域是与距离相关的。对于应用这种相对数量的主要理由是控制网比较使用频繁和加拿大大地测量机构用作控制网规程标准。使用百分之 95 的置信，控制网中大多数相对误差椭圆给出一个大约 $P = 7 \times 10^{-6}$ PPM 的值。

由外业成果和实验室试验都指出，用这样一个图形（控制网）会导致最坏的工作结果，因此选择了导线的形式。一切测量作业，都用直升飞机完成。进行了九个双程（往返），只用导线终点作为输入（L形导线），十程包括用于坐标校正的 Carleton 站（直线导线）。

数据资料的初步分析，导出下列结果：

a. 沿直伸导线（双程、筛选与平差）惯性法点位定位的相对精度约为一个 2.5×10^{-5} 的 P 值，再使用一个百分之 95 的置信区域。这个数目完全不能满足加拿大对于一等精度的要求（1973年规程），要求的一等精度在 $P = 2.0 \times 10^{-5}$ 量级。这里，由相对于已知值的复测实际残差计算了标准椭圆。这意味着在 P 中包含系统误差，消除这些误差可导出一个约为 $P = 1.5 \times 10^{-5}$ 的值。

b. 未平差的筛选数据误差，对直伸导线和 L 形导线具有相同的数量级。平差数据的误差对于 L 形导线是较大的。这指出平差程序对 L 形导线工作不良。

c. 对 L 形导线在一般情况下，复测、筛选和平差的平均值，与

已知坐标值偏差甚大。这意味着，在数据中出现影响全部测程的系统误差。

d. 对于往返测程的系统误差是不相同的。取两者的平均值，就不会产生系统误差的影响。

e. 由数据减去测程的平均值时，沿导线点间的相关系数仍是很高的 ($r > 0.9$)。这表示每个单独导线中的误差，都是属于准系统误差的性质。

(c) 中提到的系统误差影响，有三个可能的来源：硬件，卡尔曼筛选和平差法。由于 (b) 中所提到的那些结果首先研究了平差。发现这种结果，在很大程度上，依赖于这个程序中的予配权值。检查由公司所提供软件中的那些权，会导出一些变化 (见图 5)。这个图给出 λ 分量的标准偏差，图中 λ 分量为巨离的函数。由九个已知坐标的 L

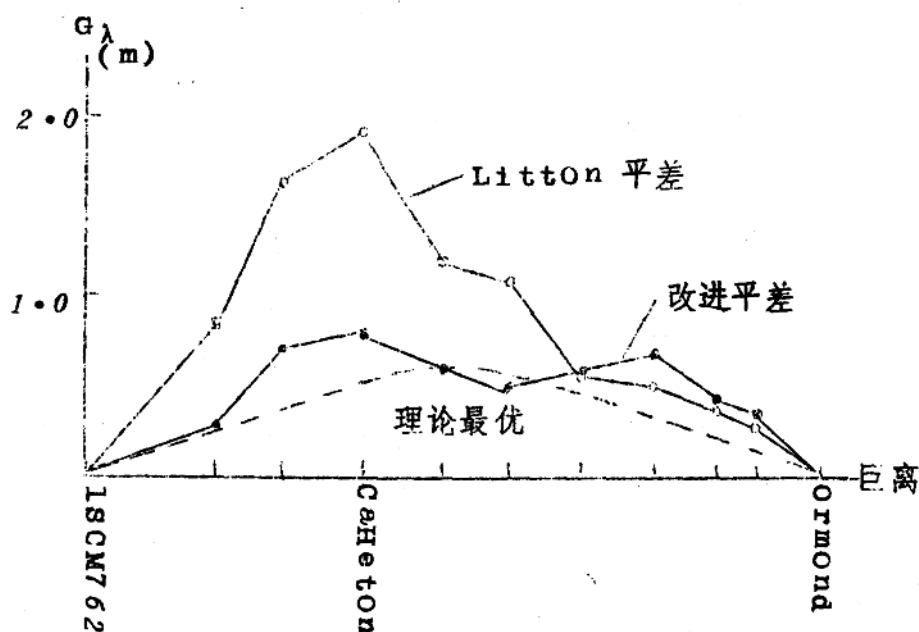


图 5：手差后的标准误差

形导线残差计算标准偏差。在 CailetOn 点改变导线方向，Litt-on 平差程度给出最大标准误差也是在这一点。在使用改进的平差方法时，标准误差一般较小，数量大小更加均匀一致。导线上以后各点间的相关系数也大为减少。如前所述，按照一个百分之 95 置信级计算比值 P ，得出一个约为 2.5×10^{-5} 的平均值。比所要求的一等精度稍大些。但仍有系统误差的影响存在，将另行研究。如果从数据中消除系统误差，标准误差就接近等巨离伸展导线。消去所有误差后的误差，在原理方面指明，沿着 L 形导线的定位，应不次于沿直伸导线的定位。图 5 中虚线表示这些无偏向的标准误差 (bias-free standard errors)，可以把它们当作关于系统的极限值。

总之，可以说惯性定位接近一等精度，前面讨论的许多问题，给人的印象似乎是一个软件的问题，而不是硬件的问题。

异常引力场的影响

上节给出的成果，是具有小变化异常引力场的代表地区。一般地，垂直变化几个弧度秒的偏差，就产生 10 微伽到 20 微伽的引力异常。若垂直变化更大，即在山嶽地区，则异常引力场的影响增加到由 (4) 式产生的位置误差。

为了用数量方式研究这些影响，扩大了用于机身水平系统的模拟软件，使之包括引力场异常的模拟。图 6 给出一个典型的例子，它表示由 12 弧秒的偏差变化，产生对 ϕ 和 h 的坐标误差与对一段 60 公里巨离上产生 20 微伽引力异常的变化。误差总值达到几米，而并没有从往返测程取平均数中得到平衡。程序使用了四分钟的标准零校正周期和卡尔曼 (Kalman) 筛选技术。若干作者推荐的两分钟校正周期的缩减，并未改善这种情况。事实上，Kalman 筛选的过度调节，在

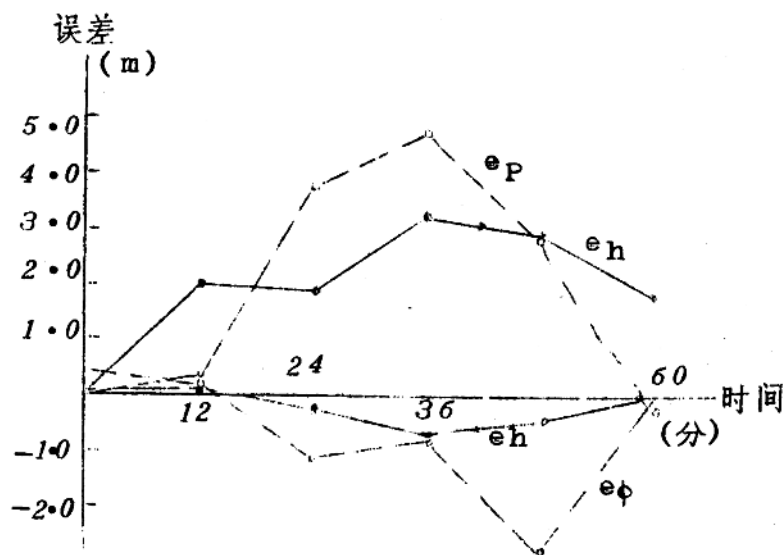


图 6：由于忽视异常引力场而产生的坐标误差：
 这种情况已是更加明显。这种在实际测量中已经观测到的影响（SC-
 WALZ, 1978），现在正进行更详细的研究。

图 6 指出，若在具有迅速变化的引力场异常地区，使用惯性定位系统，可能发生一些问题。更精密的估算方法与尽量包括邻近地区的重力资料，会适当的减小这个问题的影响程度。

惯性定位系统的未来潜力

在误差传播一节中，论述到系统的总精度，取决于计算软件与取决于硬件精度同样重要。虽然对硬件的改进，可用这些系统的已知误差传播鉴定，但对计算方法的可能改进是难于判断的。如果《现有惯性测量系统》一节中的试验结果是有代表性的，大约百分之 50 的改