

〔苏〕Д. И. 米赫列夫

И. В. 鲁诺夫

А. И. 戈卢勃佐夫



大型工程建筑物的变形观测

测绘出版社

大型工程建筑物的变形观测

武汉测绘学院工测系译

测绘出版社

内 容 提 要

书中比较广泛地讨论了研究大型工程建筑物的变形观测工作,着重对现有的测量方法和设备进行了科学的综合,并分析它们在各种作业情况下的具体应用。

叙述了起始平面和高程控制的测量标志、施工构件和技术设备,介绍了这些结构的要求。

讨论了为测定建筑物平面位移和沉陷而建立的三角测量、导线测量和方向线观测。分析了每一项工作的主要误差来源,根据这些分析来选择适合的测量方法和设备。

阐述了摄影测量和立体摄影测量在变形观测中应用的理论和实践问题,概括地介绍了应用光学和电子仪器进行自动化观测的可能性。

书中还阐明了应用数理统计方法整理实际观测成果的问题。

Д.Ш.МИХЕЛЕВ, И.В.РУНОВ, А.И.ГОЛУБЦОВ
ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДЕФОРМАЦИИ
КРУПНЫХ
ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ
НЕДРА, 1977

大型工程建筑物的变形观测

武汉测绘学院工测系译

测绘出版社出版

山西新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张 5 $\frac{1}{2}$ ·字数124千字

1980年8月第一版 1980年9月第一次印刷

印数 1—5,500册 定价0.45元

统一书号: 15·039·新144

序

建筑物的变形观测在现代工程测量工作中占有很重要的地位。完全可以说，任何大型工程建筑物都须进行变形观测。建筑物的稳定性、特别是工艺过程的正常进行都取决于建筑物产生变形的数值。而建筑物的变形观测，不仅在建设的开始，而且一直延续到整个运营期间。同时变形观测的工作量和复杂性逐年增加，它的精度要求也逐年提高。

如果建筑结构变形观测的容许误差是毫米级的话，那么对技术设备的要求，应使其观测误差限制在十分之一甚至百分之一毫米。

为了保证上述要求，应根据最新的科学技术成就研究专门的测量方法和专门的工具。由于变形观测的特点，可采用自动化的测量方案和仪器。

为了说明和评定观测结果的情况，广泛地采用了数理统计的方法。

目前在建筑物变形观测的理论和实践方面，都积累了大量的经验，而对这些经验的整理已经提到日程上来了。鉴于此，在本书中，作者试图根据已发表的著作和作者研究的结果介绍变形观测现代的状况。由于书的篇幅的限制，不可能涉及建筑物变形观测的所有问题，但是主要的内容书中已有介绍。

本书第一、三、四和五章是由科技副博士 Д. Ш. 米赫列夫 (Михелев) 撰写；三、六和十章由科技副博士 И. В. 鲁诺夫 (Рунов) 所写，七、八、九章由科技副博士 А. И. 戈卢勃佐夫 (Голубцов) 所写；第十一章为作者共同写的。

译 者 说 明

本书由武汉测绘学院工测系组织翻译，具体翻译人员如下：吴栋材译前四章，陆国胜译第五、六、十一章，虞定麒译第七、八章，章书寿译第九、十章，并由章书寿进行统校。在译校过程中，李青岳、陈永奇、刘志德等对译稿部分章节曾给予指导，在此一并致谢。

目 录

序

第一章 概述	(1)
§ 1 大型工程建筑物及其变形的形式.....	(1)
§ 2 建筑物变形观测的任务和组织.....	(4)
§ 3 观测精度要求所依据的原则.....	(5)
第二章 工程建筑物产生变形的原因	(9)
§ 4 建筑物基础的工程地质条件.....	(9)
§ 5 研究负荷的种类和特性.....	(12)
第三章 测量标志的主要类型	(14)
§ 6 测量标志的分类及其结构要求.....	(14)
§ 7 基准点的标志.....	(15)
§ 8 建筑结构和工艺设备的标志.....	(20)
第四章 边角网的建立	(25)
§ 9 专用网的种类及其结构的特点.....	(25)
§ 10 控制网的精度估算.....	(28)
§ 11 角度和边长测量的方法和仪器.....	(30)
第五章 方向线测量	(34)
§ 12 概述.....	(34)
§ 13 方向线测量的方法.....	(35)
§ 14 方向线测量的方案.....	(37)
§ 15 方向线测量的一般理论.....	(39)
§ 16 方向线测量的仪器和设备.....	(43)
§ 17 方向线测量的主要误差来源.....	(46)
第六章 工程建筑物的沉陷观测	(53)

§ 18	沉陷观测的方法	(53)
§ 19	测量方法的研究	(63)
§ 20	起始水准基点高程稳定性的研究	(66)
第七章	建筑物单个构件的变形观测	(76)
§ 21	局部观测的作业特点	(76)
§ 22	建筑物结构的局部倾斜观测	(77)
§ 23	建筑物单个构件的变形观测	(78)
第八章	用摄影测量方法进行建筑物的变形观测	(80)
§ 24	用摄影测量方法进行变形观测的特点	(80)
§ 25	摄影仪器	(82)
§ 26	摄影与成果处理的方法	(84)
§ 27	主要误差来源	(87)
第九章	工程建筑物变形观测的自动化	(95)
§ 28	用于测定长度、角度和高程变形的传感器的主要类型	(95)
§ 29	自动指示数值的测量仪器	(103)
第十章	数理统计方法在观测成果中的应用	(109)
§ 30	分布类型的检验	(109)
§ 31	等精度观测的检验	(116)
§ 32	系统误差的检验	(119)
§ 33	相关分析	(126)
第十一章	特种工程建筑物变形观测的特点	(142)
§ 34	水工建筑物	(142)
§ 35	对变形特别敏感的建筑物	(148)
§ 36	高房屋和高建筑物	(157)
	参考文献	(162)

第一章 概 述

§ 1 大型工程建筑物及其变形的形式

现代大型工程建筑物包括水利枢纽工程、火力发电站、质子加速器、高层房屋和建筑物、桥梁、精密输送带、大型无线电发射系统以及其它类似建筑物。这些建筑物的运营情况与它们的稳定性有关。

这些建筑物的特点是：建筑结构之间以及工艺设备的构件之间都是联系得非常紧密的整体，而最主要的特点是它们对最小变形值的敏感性。此外，它们通常在小范围的地面上有较大的荷载，而且是建设在工程地质、水文地质和气候条件不相同的地区。

由于建筑物的结构特点及自然因素的影响，整个建筑物或其局部构件所产生的变形也是不相同的。

在建筑物和工艺设备固定重量的作用下，由于基础的土壤被压实，因而引起建筑物沉陷。除固定重量之外，建筑物的沉陷还可能由其它原因引起：如地质情况（喀斯特溶洞和滑坡现象），动负荷的作用（运动机械的振动、重型运输设备、压榨机和大锤的作业）等等。

有时候，当基础土壤的压缩程度不一样，或者位于土壤上面的荷载不相同，就会产生不均匀的沉陷。从而引起建筑物其它形式的变形：如位移、倾斜、扭转，建筑物的表面可能出现裂缝，甚至被毁坏。

建筑物的位移，即建筑物在水平面上的运动。这种位移是由侧向压力（水压力、土壤压力、风等）所引起的。

塔式建筑物的扭转是由受热不均匀及风力作用所引起

的。

根据及时发现建筑物特征点上的变形值，可以了解到建筑物的状态。因此，变形的形式和过程，可以根据所选择的时间段内，特征点的空间位置相对于开始时刻的起始位置的变化来描述。

建筑物单个点的绝对沉陷 S ，可以用起始观测周期的高程 H_0 和本次观测周期的高程 H_i 之差来计算，而各观测周期的高程都是由固定的起始点确定，即

$$S = H_0 - H_i \quad (1)$$

整个建筑物或其中的一部分，其平均沉陷 $S_{均}$ 可以用建筑物上 n 个点绝对沉陷之和的算术平均值来确定，也即

$$S_{均} = \frac{\sum_{i=1}^n S}{n} \quad (2)$$

为了充分说明建筑物总的特征，在指出平均沉陷的同时，还应指出建筑物最大沉陷 $S_{最大}$ 和最小沉陷 $S_{最小}$ 的点。

两个点 (i 和 j) 或者两个观测周期 (m 和 n) 的沉陷差 ΔS 分别按下列公式计算：

$$\Delta S_{i,j} = S_j - S_i \quad (3)$$

$$\Delta S_{m,n} = S_n - S_m \quad (4)$$

建筑物的基础土壤或者建筑体本身的厚度为 z 时，其固结变形 ΔS_z 可根据埋在建筑物基础土壤上下两层点上的沉陷差来确定，即：

$$\Delta S_z = S_{上层} - S_{下层} \quad (5)$$

建筑物各部分局部的相对均匀弯曲 f 根据下面公式计算：

$$f = \frac{2S_K - (S_i + S_j)}{2L} \quad (6)$$

式中 S_i 和 S_j 分别为 i 、 j 点的沉陷量， i 、 j 点分别固定在建筑物的两端，其距离为 L ；

S_K 为 K 点的沉陷量， K 点位于 i 、 j 点之间。

弯曲的符号是：向上凸起为正，反之为负。

建筑物的倾斜由固定在建筑物某一轴线两端的 i 、 j 点的沉陷差来确定。建筑物纵轴方向的倾斜称为纵向倾斜，而在横轴方向的倾斜称为横向倾斜。为了了解建筑物的稳定性，最常见的是用相距为 L 的 i 、 j 点的倾斜来说明。相对倾斜 K （包括纵向倾斜或横向倾斜）可由下式计算：

$$K = \frac{S_j - S_i}{L} \quad (7)$$

建筑物某个点的水平位移 Q 可由该点在第 n 次和 m 次观测周期所得相应坐标 X_n 、 Y_n 与 X_m 、 Y_m 的差数来确定。坐标轴通常与建筑物的主轴线重合。一般情况下，按下式计算位移值：

$$\left. \begin{aligned} Q_x &= X_n - X_m \\ Q_y &= Y_n - Y_m \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

当建筑物的两平行边的变形方向相反时，则建筑物的构件将产生扭转。塔式建筑物相对其竖直轴的扭转是根据固定点的矢径位置的角变化来表明的，该固定点设置在所检验的水平截面的中部。

某一时间段内变形值的变化用平均变形速度 $V_{\text{均}}$ 来表示。例如，在第 m 和 n 周期相隔时间内，观测点的平均沉陷速度等于：

$$V_{\text{均}} = \frac{S_n - S_m}{t} \quad (9)$$

当以 t 时间段表示月份数或表示年份数时，则月平均变形速度和年平均变形速度是不相同的。

§ 2 建筑物变形观测的任务和组织

建筑物的变形观测是指用各种测量方法来查明建筑物或建筑物某一部分的变形程度，以及找出它们变形的原因等。用大地测量方法测出变形值是变形观测的主要手段。

建筑物变形观测的目的如下：

- 1) 确定变形的程度，用以了解建筑物的稳定性，以便及时采取预防措施；
- 2) 研究影响工艺生产过程正常进行的变形规律；
- 3) 验证计算数据；
- 4) 研究预报变形的方法和各种条件下的变形规律。

如果说前两项主要与该建筑物的实用目的有关，那么后两项则是为了科学研究的目的，其研究结果可以解决以后设计中的问题。

为了达到上述各项目的，通常在设计工程建筑物的同时，便应开始组织观测。在即将建设的工地上，在调查建筑物基础土壤负载性能的同时，还要研究各种自然因素对建筑物变形的影响。在此期间内，应建立控制网，以便在建筑物开始施工时就可以发现它们的稳定程度。

当建筑物开始施工的时候，就对它进行直接观测，并一直连续到整个建设期间。而对于许多大型工程建筑物在运营期间也要进行变形观测。这要根据工艺任务的要求、建筑物的特点，以及自然条件而定。观测工作可以在变形停止后结

束，而有些建筑物则要持续到整个运营期间。从影响工艺过程的观点出发，对变形特别敏感的建筑物，尤其需要在整个运营期间进行变形观测。

建筑物的每一个施工或运营阶段，都要按规定的时间段周期性地定期进行变形观测。这种根据日历计划所进行的变形观测称为系统观测。

除了按照规定日期进行的系统观测外，还要进行紧急情况下的观测。这类观测通常是在出现特殊情况前后进行，这种特殊情况使得一般的变形过程产生了急剧的变化。例如基础土层上负荷的急剧增加或减少，外界温度的急剧变化，建筑物本身的状态、土壤及地下水、地壳构造作用等急剧变化，以及在研究对象附近的新建筑物的施工等，都属于这种特殊的因素。

为进行原型观测，要拟定专门的方案，在一般情况下设计方案包括如下内容：

1. 技术任务书；
2. 有关建筑物、自然条件和工艺生产过程的概述；
3. 观测的原则方案；
4. 控制点和变形点的布置方案；
5. 计算和说明各观测阶段测量的必要精度；
6. 测量的方法和仪器；
7. 对观测成果的整理方法和工程说明的建议；
8. 观测进度计划表；
9. 观测人员的编制和预算。

§ 3 观测精度要求所依据的原则

用大地测量方法研究工程建筑物的变形时，存在着必须

确定（或必须知道）测量精度的问题。这一问题的重要性在于：解决了这样的问题，才能选择适当的测量方法和工具，最后计算出测量过程中所花费的时间和经费。但是在很多情况下，提出和采用的测量精度是没有充分根据的。此外，对于不同周期的观测，或者对同一建筑物的不同部位的观测，往往也采用同样的测量精度和相同的测量方法。

虽然目前对这些情况还不可能用严格的数学方法来解，但是，确定测量精度所依据的原则却是可能的。为此，必须考虑到上述变形观测的目的以确定观测的精度要求。

因为变形的程度是根据变形值和变形速度来确定的，也即根据选定的时间段内变形的变化过程来决定的，显然，有必要使观测精度无论在规定时间段的变形值本身方面，还是在变形的变化速度方面，都能符合“实际上可靠”的原则。这里，选择连续观测的时间段（周期）是有重要意义的。合理的要求是：一方面使系统观测的次数可以判断出变形过程的一般特点，另一方面又不能错过它的变化时刻。在这种情况下，从分析变形过程的观点出发，变形速度值比变形的绝对值有更重要的作用。从而可以得出结论：在规定测量精度时，首先应根据变形的速度值。这一条件可以写成：

$$\Delta\phi = \phi(t_i) - \phi(t_{i-1}) \geq \sigma\epsilon \quad (10)$$

式中， $\phi(t)$ —— t 时刻的变形值；

σ ——确定变形的标准，在测量工作中，一般用中误差进行统计估算；

ϵ ——由误差分布类型和置信水平所决定的系数。

变形速度可以根据计算资料，或者根据动负荷的预计来确定。这时，为了确定任一期间变形的大小，必须知道前一段时间变形的数值。从而可以得出：根据初步计算的资料或

类似方法所求得的最初测量精度，应该在观测过程中根据所观测的结果进行修正。根据观测阶段或根据建筑物整体中有代表性（重要性）的部位，分别给予不同的测量精度。例如，施工期间比运营期间的变形大，又如拱坝拱冠处的变形比岸边连接坝段变形的危险性小些。

正如公式（10）所指出的，变形观测要求的精度取决于系数 ε ，这种精度是由变形标准来表示的。为了确定系数 ε ，必须根据观测误差的分布类型和置信概率用经验的方法决定，而置信概率说明了所求值的可靠程度。通常，测量工作的误差分布规律是近于正态分布，变形观测也一样，在这种情况下，所取置信概率为 $\beta = 0.955 \sim 0.997$ ，此时， ε 将相应地为 $4.0 \sim 6.0$ 。●。 $\sigma\varepsilon$ 的乘积表明置信区间，根据所取之概率，该列误差就可能落入这一置信区间内。因此，应根据测量结果的可靠性和重要性方面的要求来选择置信概率，即这些要求愈高，置信概率愈大。

所给定误差和变形观测预期结果之间的最合适的比例，同样应根据观测结果的重要性来确定。实际上，这一比例可取 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{10}$ 。但是，如上所述，当 $\beta = 0.955 \sim 0.977$ ，相应

的比例为 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{6}$ 时，变形值将在测量误差的置信区间内。

这就是说，所得的变形值实际上可以认为就是测量误差。

为了避免这一点，提出如下条件是合适的：

$$\frac{\sigma}{\Delta\phi} < \frac{1}{\varepsilon} \quad (11)$$

● 置信区间以 $-t_{\beta}\sigma$ ， $+t_{\beta}\sigma$ 表示，所以在上述情况中，我们所关心的是置信区间的范围，即 $\varepsilon = 2t_{\beta}$ 。

当置信概率为 $0.955\sim 0.997$ 时，取测量误差和变形观测预期结果之间的比例应小于 $\frac{1}{4}\sim\frac{1}{6}$ 。

现举一例：如果在规定的时段 Δt 内，建筑物下沉 ΔS 的速度平均值为5毫米，那么对于置信概率 $\beta = 0.955$ 时，其变化的标准不应大于1.2毫米。

在当前的实践中，大家都知道变形的性质对工艺过程的正常进行是有影响的。质子加速器便是这种情况的一个例子，对于加速器来讲，重要的不是建筑物结构的单个变形值，而是加速器扰动时所产生的影响。其容许偏差完全可以用一定的数学公式表示，根据数学公式就能够确定测量的必要精度，这一精度可以按容许偏差函数的误差来计算。

有时可根据具体任务，如为了预报变形需确定变形的规律，则可用下述两种方法来解决测量精度问题。第一种方法与上述一般的观测情况类似。这里只是依靠增加置信概率和相应地减小观测误差与结果之间的比例来提高测量的可靠性。在第二种情况中，则要求“尽可能精确”。为此要专门研究相应于目前最新科技水平的测量方法和工具。为了进行这种观测，有必要花费大量的开支。特种工程和特重要的观测目标，可以用类似的方法来解决变形观测的精度问题〔12〕。

第二章 工程建筑物产生变形的原因

§ 4 建筑物基础的工程地质条件

在进行工程建筑物变形观测的过程中，了解可能产生变形的原因是非常重要的。一般说来，这些原因可以分为两大类：第一类是自然条件，以及同所研究的工程建筑物（或直接位于附近的其它建筑物）的施工和运营有关的自然条件的变化。工程地质和水文地质条件均属于这种自然条件。第二类是直接工程建筑物的施工和运营有联系。这些原因包括施工和运营期间土壤负荷的变化，特别是负荷的不均匀性、机器工作引起的振动或由运输机械强烈运动所引起的振动、工程建筑物的基础和其他部位结构强度不够等。这里还包括有邻近工程建筑物的施工和运营所引起的类似的原因。

为了查明和分析变形可能产生的原因，要最大限度地利用勘测人员、施工人员和管理人员所提供的资料。通常，这些资料包括有关预计的变形值和变形特性的情况。这些在确定观测的期限、观测的周期性和某些观测细节时应予考虑。分析所收集的各种资料能够确定以后研究人员的组成和必要的规模。

工程建筑物的变形在很大程度上决定于基础土壤的负荷特性。在编制工程建筑物设计时，所采用的地质勘探资料中已经给出有关土壤的特性。这些工程地质资料可用来计算基础预期沉陷。资料中包括各种土层的厚度，地下水的水位，在整个受压区域内基础土壤的物理机械性能、孔隙系数、可

缩性及抗剪强度，粘性土壤的过滤系数、结构强度、压力坡降，此外还有密实和泥污粘土的蠕动参数。所有这些资料都是研究工程建筑物的依据。同时，应充分利用工程地质剖面图，剖面是沿着最重要的建筑物进行布置，并在图上简略地标有土壤的物理机械性能和地下水位。也可以充分利用工程地质图，在图上标有不同的土壤变形地段。利用这些资料应能为以后对估算预期沉陷所用的土壤变形模量，和根据观测的变形值而用回归法计算的模量进行比较。根据这种比较能够评定估算预期沉陷的有效率，和更准确地规定变形系数，这对于预报基础沉陷来说，无论是理论方面还是实践方面都非常重要。

首先应特别标出土壤强度较低的地段，那里的基础是属于不同类型的，因为它们的沉陷值和沉陷的延续时间是不相同的。这种不均匀的沉陷，也是由于建筑物不同地段的基础上荷载不同而产生的，因此，对其中最具有代表性的地段，同样要适当地组织观测。总而言之，不均匀沉陷无论对工程结构的整体性，或者对工艺过程可能产生的障碍都有很大的危险性。因而，重要的是能够对该地区的基础获得最全面的了解。

还应特别注意到土壤强度减低的现象，即浸渍的下陷土壤，多年不冻土壤的分化，膨胀土壤湿度的增加，冰冻的冻胀现象，已存在或可能发生滑坡的地区，喀斯特溶洞，泥石流等。因此，为了及时地发现上述现象所引起的各种变形，应建立完整的周期性的变形观测。

在许多情况下，不能仅限于已有资料的研究，还要求在变形观测的同时，对土壤温度状况和地下水位进行专门的观测。工程建筑物的施工和运营也可能引起土壤温度状态和地