



# 第七章

## 工程的变形监测和数据处理



# 7.1 工程变形监测的基础知识

## 7.1.1 变形监测的定义、作用和内容

- 什么是变形监测？
- 什么是工程变形监测？
- 为什么要进行变形监测？
- 变形监测的内容和特点
- 变形模型的分类：
  - 非周期变形模型
  - 周期变形模型
  - 运动模型、动态模型



# 7. 1. 1. 1 变形监测的定义

变形监测：

对监视对象或物体(简称变形体)进行测量，以确定其空间位置随时间的变化特征。

包括全球性、区域性、和工程的变形监测。

变形：

变形体自身的形变  
变形体的刚体位移。

变形体自身的形变：

伸缩、错动、弯曲和扭转。

变形体的刚体位移：

整体平移、转动、升降和倾斜。



## 7.1.1.2 变形监测的意义

### 1、实用意义：

保障工程安全。

### 2、科学意义：

解释变形的机理，

验证变形的假说，

检验设计是否合理，

为修改设计、制定规范提供依据。



## 7.1.1.3 变形监测的内容

- 获取变形几何量：  
水平位移、垂直位移以及偏距、倾斜、扰度、弯曲、扭转、震动、裂缝等。
- 获取与变形有关的影响因子（物理量）：  
应力、应变、温度、气压、水位（库水位、地下水位）、渗流、渗压、扬压力等。



## 7.1.1.4 变形监测的特点

- 要进行周期观测，每一周期的观测方案如监测网的图形、使用仪器、作业方法乃至观测人员都要尽可能一致。
- 动态、持续监测。
- 要求精度高，对于重要工程，一般要求“以当时能达到的最高精度为标准进行变形观测设计”。



# 表 7-1 变形监测的精度举例

项 目			位移中误差限值	
水平位移	坝 体	重 力 坝	$\pm 1.0\text{mm}$	
		拱 坝	径 向	$\pm 2.0\text{mm}$
			切 向	$\pm 1.0\text{mm}$
	坝 基	重 力 坝	$\pm 0.3\text{mm}$	
		拱 坝	径 向	$\pm 0.3\text{mm}$
			切 向	$\pm 0.3\text{mm}$
坝体、坝基垂直位移		坝顶	$\pm 1.0\text{mm}$	
		坝基	$\pm 0.3\text{mm}$	
坝体、坝基挠度			$\pm 0.3\text{mm}$	
倾 斜	坝 体		$\pm 5.0''$	
	坝 基		$\pm 1.0''$	
坝体表面接缝与裂缝			$\pm 0.2\text{mm}$	
近坝区岩体	水 平 位 移		$\pm 2.0\text{mm}$	
	垂 直 位 移		$\pm 2.0\text{mm}$	
滑坡体和高边坡		水 平 位 移	$\pm 3.0$ (岩质边坡) $\pm 5.0$ (土质边坡)	
		垂 直 位 移	$\pm 3.0\text{mm}$	
		裂 缝	$\pm 1.0\text{mm}$	



## 7.1.2 变形模型

### 7.1.2.1 变形影响因子和动态变形模型

变形影响因子：

地壳运动、基础形变、地下开采、地下水位变化、工程建筑物的各种荷载、设备安装偏离设计值, 以及温度、气候变化等。

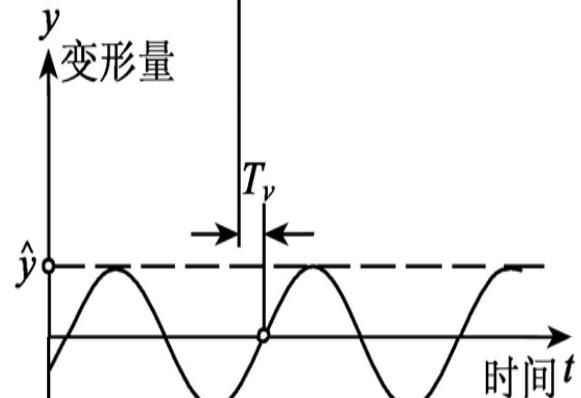
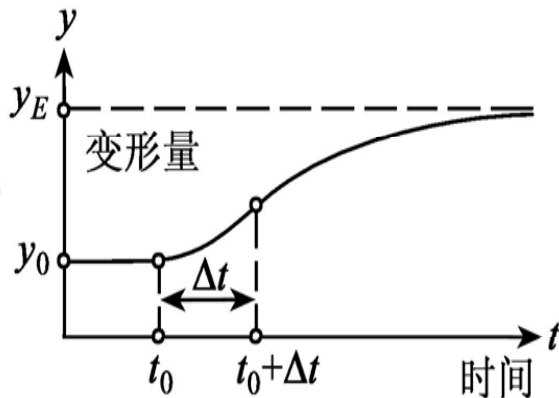
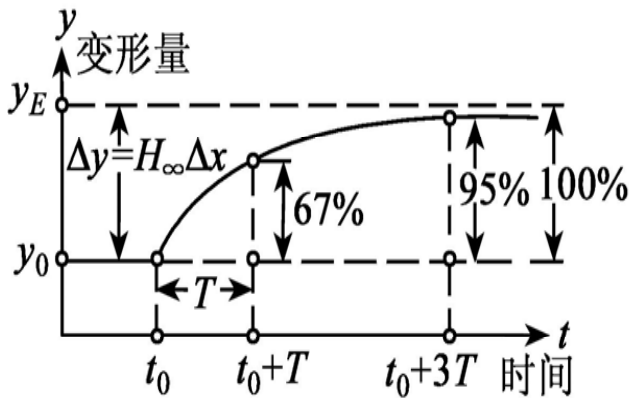
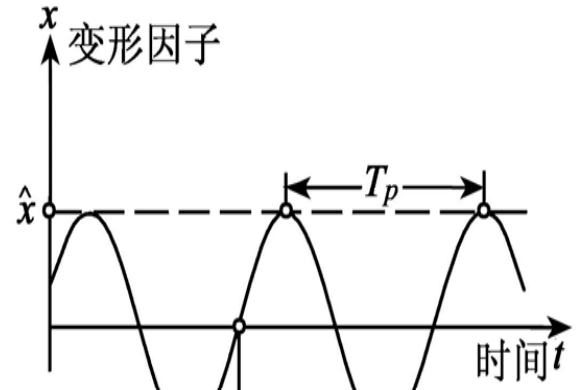
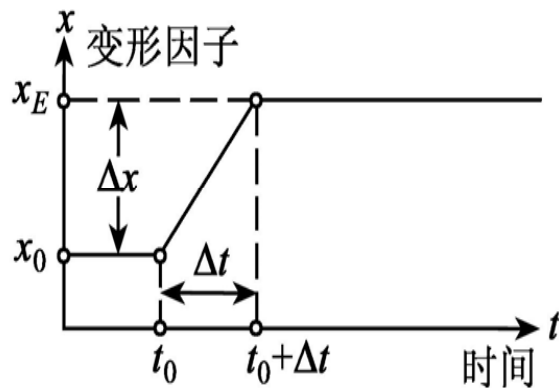
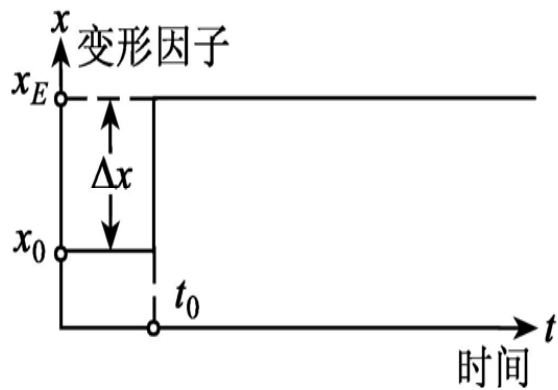
动态变形模型的一般数学表达式：

$$y(t) = \int_0^{\infty} g(\tau)x(t - \tau)d\tau$$





# 典型变形影响因子下的变形模型



(a)

(b)

(c)



## 7.1.2.2 典型动态变形模型

### 一、非周期变形

#### 1、突变模型 ( 图7-1(a) )

$$y(t) = H_{\infty} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{T}\right) \right]$$



## 2、渐变模型（图7-1(b)）：

$$y(t) = y_0 + H_\infty \frac{\Delta x}{\Delta t} \left\{ (t - t_0) - T \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{T}\right) \right] \right\}$$

$$t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t$$

$$y(t) = y_0 + H_\infty \frac{\Delta x}{\Delta t} \left\{ \left(1 - \exp\frac{\Delta t}{T}\right) \left[ \Delta t + T \cdot \exp\left(-\frac{t - t_0}{T}\right) \right] \right\}$$

$$t > t_0 + \Delta t$$



## 二、周期变形 (图7-1(c))

$$x(t) = \hat{x} \sin\left(2\pi \frac{t}{T_p} + \varphi_x\right)$$

$$y(t) = \hat{y} \sin\left(2\pi \frac{t}{T_p} + \varphi_y\right)$$



## 7.1.2.3 运动模型

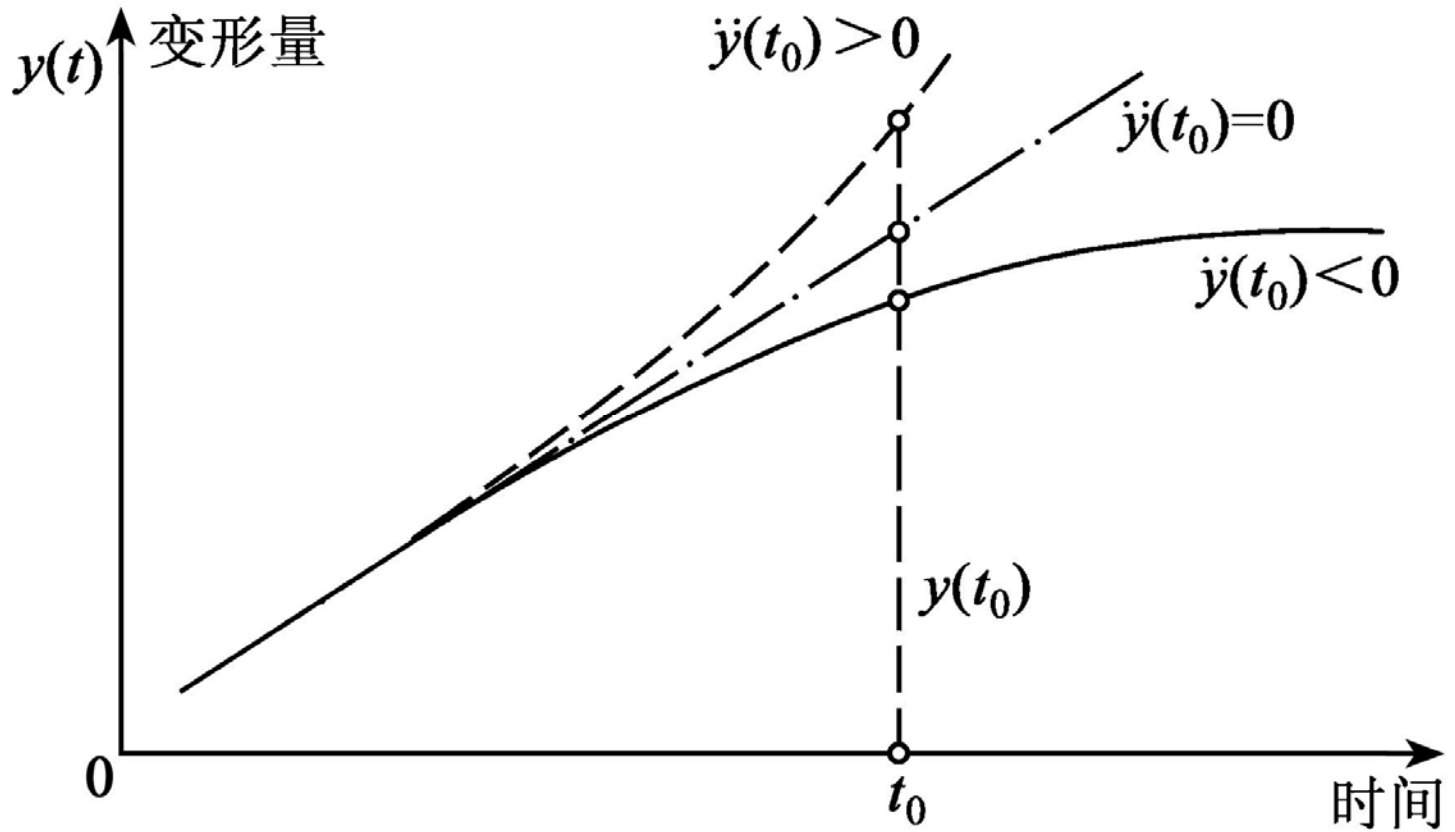
在许多情况下（如滑坡），变形影响因子的大小是随机性变化且不可量测的，或者虽可量测而难于建立影响因子与变形间的函数模型。

运动模型把变形视为时间的函数：

$$y(t) = y(t_0) + \dot{y}(t_0)(t - t_0) + \ddot{y}(t_0) \frac{(t - t_0)^2}{2}$$



# 运动模型





## 7.1.3 变形体的几何模型和监测点布设

### 7.1.3.1 变形体的几何模型

定义（参见图7-3）：

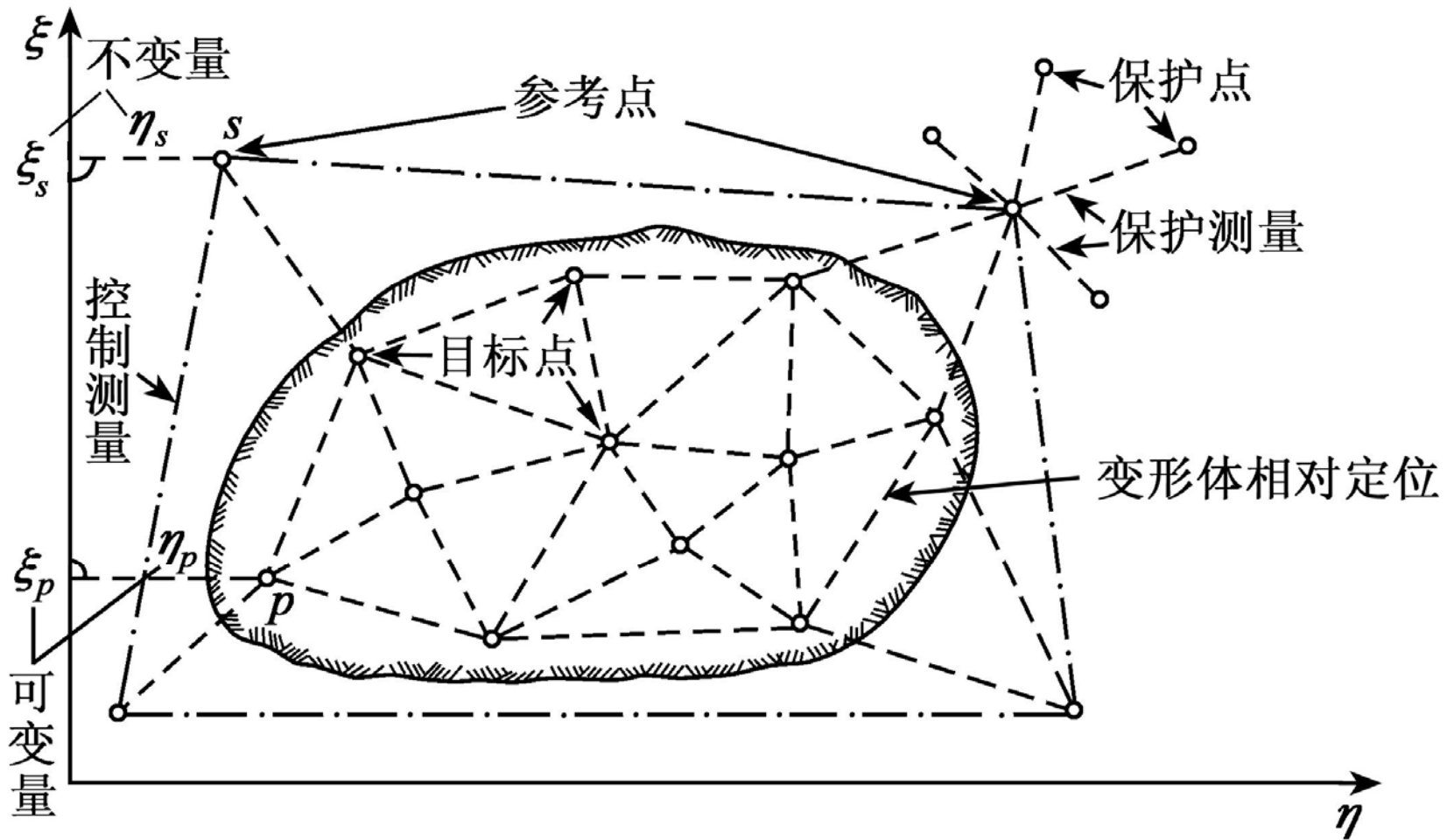
参考点、目标点及其它它们之间的连接称为变形体的几何模型。

概念：

- 变形体空间上的离散化：监测点（目标点）
- 时间上的离散化：周期性监测、持续性监测
- 相对定位、绝对定位
- 参考点、目标点
- 不变量、可变量



# 变形体的几何模型







参考点、目标点布设的要点：

位置、数量（密度）、  
埋石、布标。



## 7.2

# 变形监测方案设计

内容：

测量方法的选择、  
监测网布设、  
测量精度的确定  
观测周期的确定....



## 7.2.1 变形监测方案制定准则

(1) 所需的测量精度  $\sigma_y$  ，对于监测网，  
是确定目标点坐标  $\xi$ 、 $\eta$

$\sigma_\xi$ 、 $\sigma_\eta$  的允许精度

或  $\Delta_\xi$ 、 $\Delta_\eta$  坐标差

$\sigma_{\Delta\xi}$ 、 $\sigma_{\Delta\eta}$  的允许精度

- (2) 观测周期数（施测的次数）
- (3) 两周期之间的时间间隔  $\Delta t$
- (4) 一周期所允许的观测时间  $\delta_t$



# 重要概念:

- 测量精度  $\sigma_y$
- 预计最大变形量  $\Delta y$
- 变形监测分辨率  $\delta y$
- 变形速率  $\dot{y}$
- 周期时间  $T_p$
- 一周期所允许的观测时间

$\delta_t$



## 7.2.2 典型变形的准则

### 7.2.2.1 非周期变形

测量精度 $\sigma_y$  与预计的最大变形量  $\Delta y$  (准确性差) 有关:

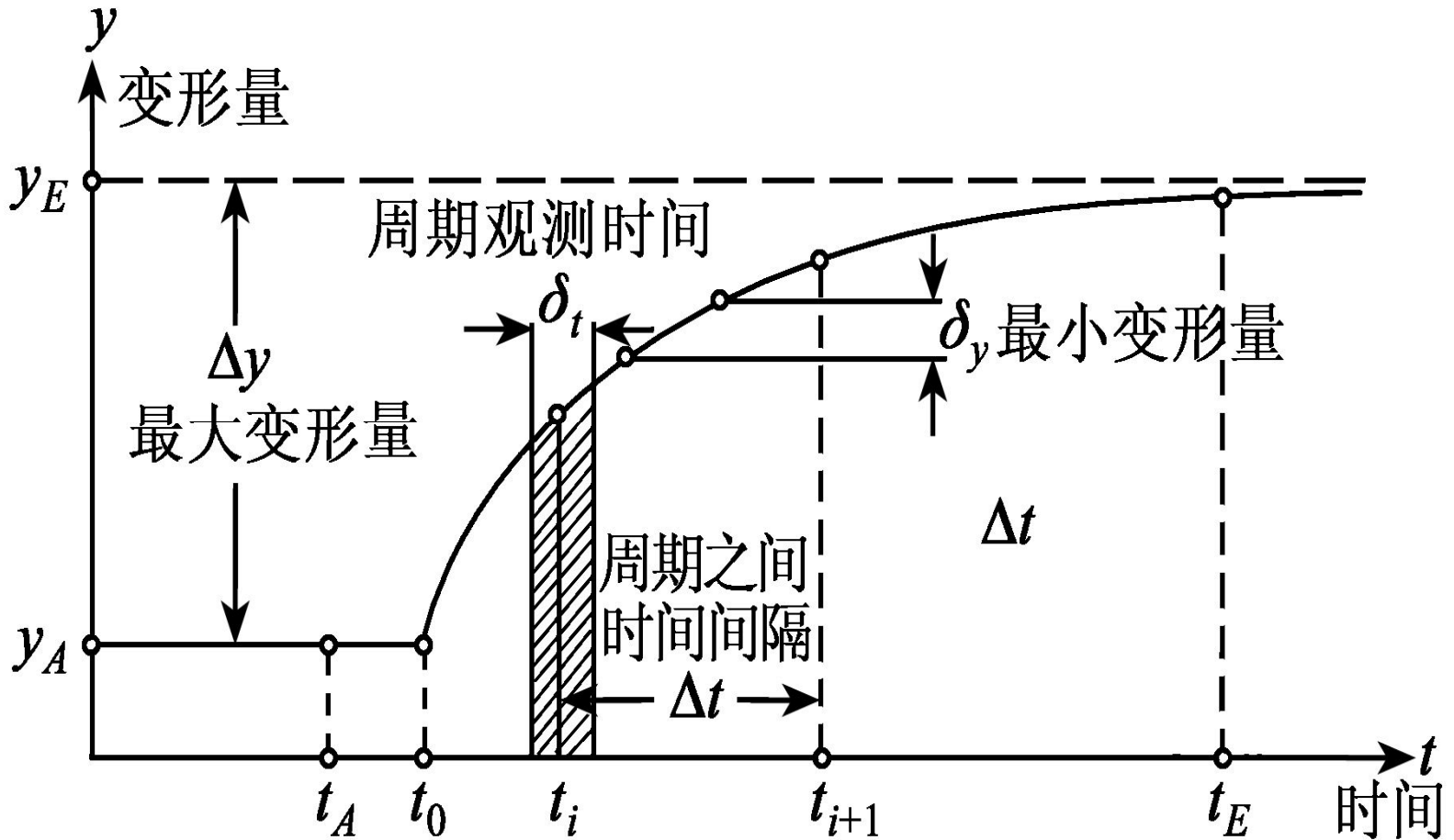
$$\sigma_y \leq \frac{1}{50} \Delta y = \frac{1}{50} (y_E - y_A)$$

或 
$$\sigma_y \leq \frac{1}{5} \delta_y$$

- $\delta_y$ : 变形监测分辨率, 相邻两周期间能以一定概率(如  $P=95\%$ ) 区分的最小变形量。  $\Delta y = 10 \delta_y$  (参见图7-4)。



# 图7-4 非周期变形的获取





突变模型（图7- 1中（a））：末期观测必须在变形趋于平缓的时刻进行：

$$t_E > t_0 + 3T$$

T为与变形体有关的时间常数，根据试验和经验确定。

在  $t_0$  和  $t_E$  之间要进行多期观测。

设第  $t_i$  与  $t_{i+1}$  期间时间间隔为  $\Delta t$ ， $\Delta t$  与  $\delta y$  和变形速率  $\dot{y}$  有关：



$$\Delta t \geq \frac{\delta y}{|\dot{y}|} \quad \Delta t = 5 \cdot \frac{\sigma_y}{|\dot{y}|}$$

初期，由于  $\dot{y}$  较大且不精确，故  $\Delta t$  较小且误差较大；后期， $\dot{y}$  值愈来愈小且愈来愈精确， $\Delta t$  会愈来愈大且愈来愈准确。一周期所允许的观测时间  $\delta_t$  应满足：

$$\delta_t \leq \frac{\sigma_y}{|\dot{y}_{\max}|}$$

显然有：

$$\delta_t \leq \frac{\Delta t}{5}$$

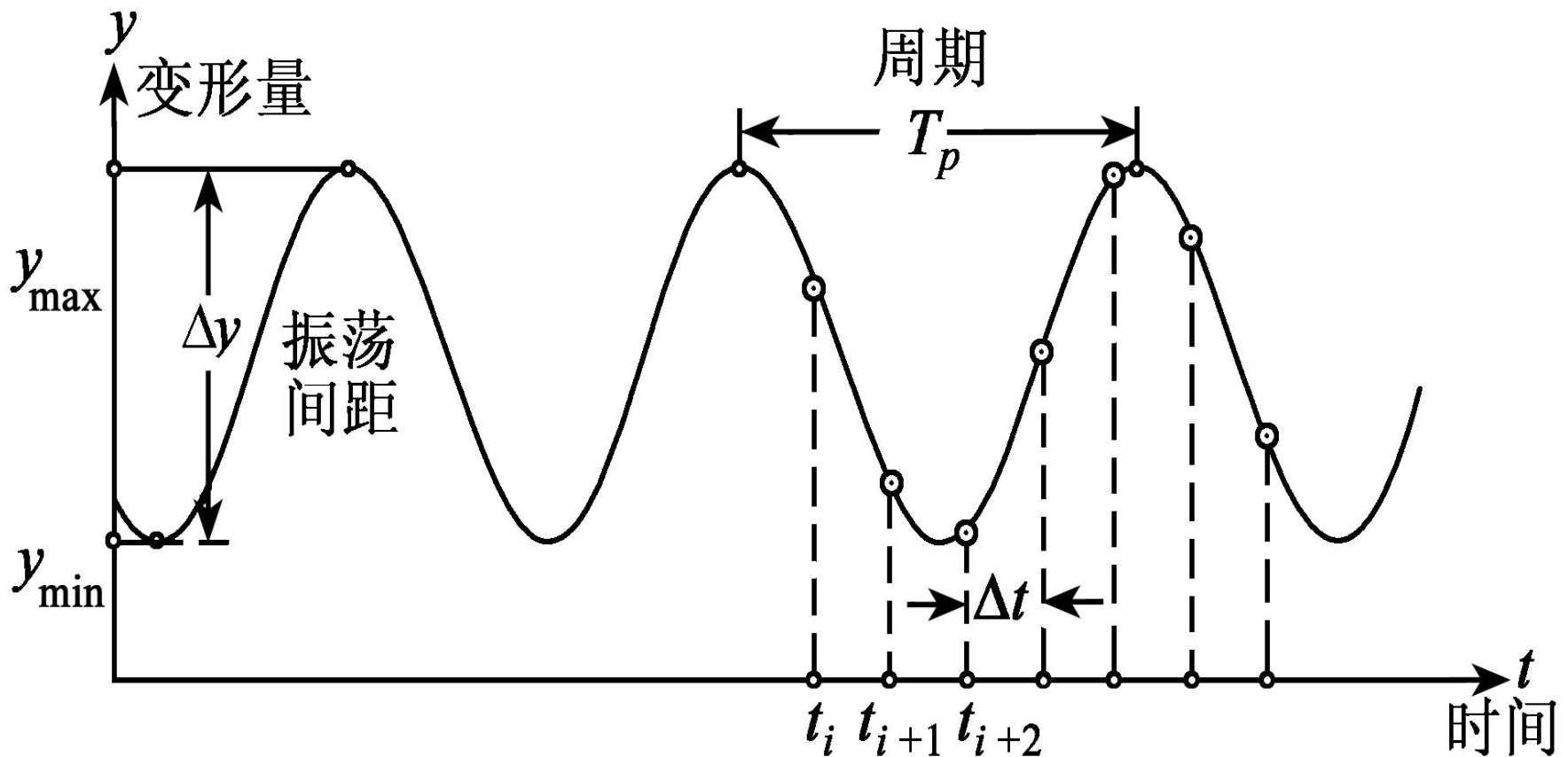
$\delta_t$  的大小对测量方法的选择是很有意义





## 7.2.2.2 周期变形

图7-5 周期变形的监测





$\Delta t$ 与周期时间  $T_p$  有关，有

$$\Delta t = \frac{T_p}{m} \quad 2 \leq m \leq 20$$

$m=2$ ，表示只对两个极值有兴趣且准确地知道所发生的时间，如在大坝的最高水位和最低水位时观测。

$m=20$ ，

$$\delta t \leq \frac{T_p}{100}$$



## 7.2.2.3 运动模型

测量精度根据要求监测的最小变形量来确定，即要求满足

$$\sigma_y \leq \frac{1}{5} \delta_y$$

$\Delta t$ 应满足

$$\Delta t \geq \frac{\delta_y}{|\dot{y}|}$$

每一次的观测时间  $\delta_t$  由下式估算。

$$\delta_t \leq \frac{\Delta t}{5}$$



## 7.2.3.1 测量精度的确定

对于监测网，要将坐标精度转化为观测值的精度。

网的模拟优化设计：确定观测方案，确定观测元素(如方向、距离、高差、GPS基线边长等)及其精度。

测量精度选取：仪器的标称精度、外界影响，应有一定富余。

按设计的测量方案和精度计算出各目标点坐标的精度，应完全满足要求。



- 1971年国际测量师联合会 (FIG) 第十三届会议上工程测量组提出：“如果观测的目的是为了使变形值不超过某一允许的数值而确保建筑物的安全，则其观测的中误差应小于允许变形值的 $1/10 \sim 1/20$ ；如果观测的目的是为了研究其变形的过程，则其中误差应比这个数小得多。”
- 不同类型的工程建筑物，其精度要求差别较大；
- 同一建筑物，不同部位、不同时间对观测精度的要求也不相同。



# 表7-2 建筑物变形测量等级及精度

变形 测量 等级	沉降观测	位移观测	适用范围
	观测点测站高差 中误差 (mm)	观测点坐标中误 差 (mm)	
特级	$\leq 0.05$	$\leq 0.3$	特种精密工程，重要科研项目变形观测
一级	$\leq 0.15$	$\leq 1.0$	高精度要求的大型建筑物，科研项目变形观测
二级	$\leq 0.50$	$\leq 3.0$	中等精度要求的建筑物和科研项目变形观测；重要建筑物主体倾斜观测、场地滑坡观测
三级	$\leq 1.50$	$\leq 10.0$	低精度要求的建筑物变形观测；一般建筑物主体倾斜观测、场地滑坡观测



## 7.2.3.2 观测周期数和一周期观测时间的确定

### 一、观测周期数的确定

原则：

观测周期数取决于变形的大小、速度及观测的目的，且与工程规模、监测点数量、位置以及观测一次所需时间有关。在工程建筑物建成初期，变形速度较快，观测周期应多一些，随着建筑物趋向稳定，可减少观测次数；但仍应坚持观测，以便发现异常变化。

及时进行第一周期观测具有重要意义，推延初始测量可能失去已经发生的变形，应特别重视第一周期观测的质量，以后各周期的成果要与第一期比较。



# 表7-3 大坝变形观测周期选择表

变形种类	水库蓄水前	水库蓄水	水库蓄水后2~3年	正常运营
混凝土坝：				
沉陷	1个月	1个月	3~6个月	半年
相对水平位移	半个月	1周	半个月	1个月
绝对水平位移	0.5~1个月	1季度	1季度	6~12个月
土石坝：				
沉陷和水平位移	1季度	1个月	1季度	半年





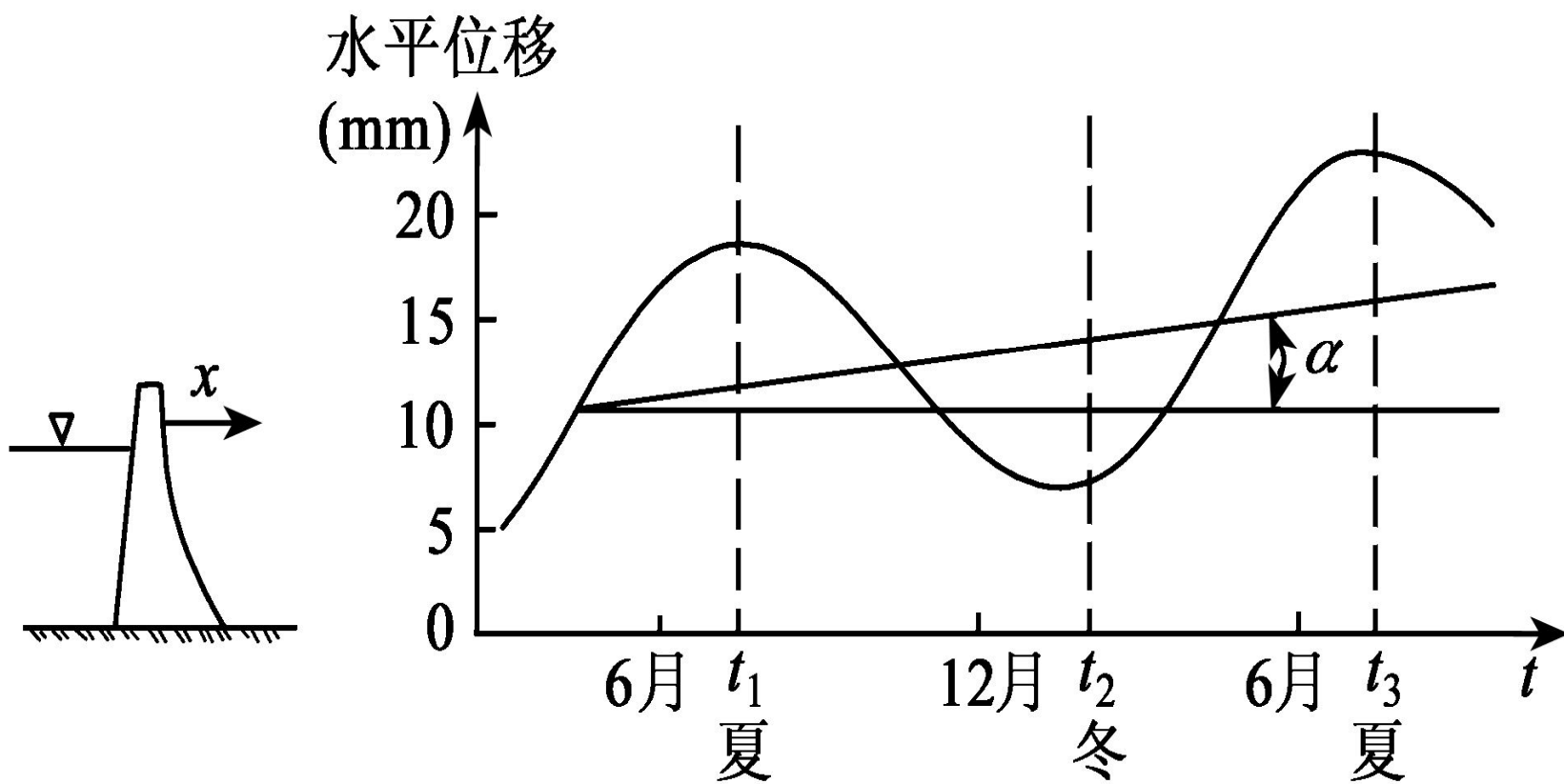
对于周期性变形，在一个变形周期内至少应观测两次。如果观测周期的时刻选择不当，将导致错误的结论。

图7-7：四种不同的一维变形过程，如果都用三个离散的时刻来获取，则会出现完全不同的结果：

正确，较正确，完全错。

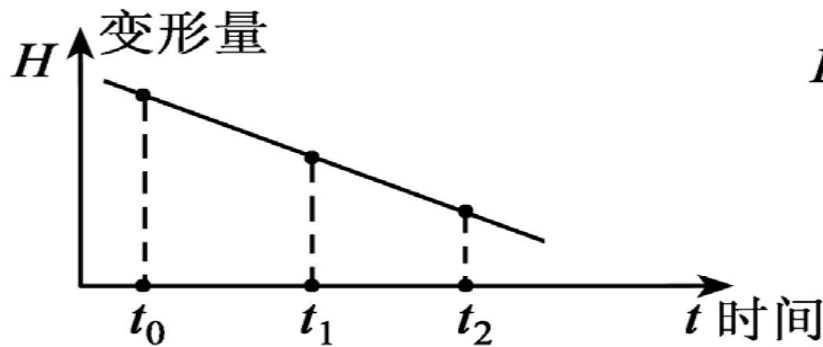


图7-6 大坝水平位移与观测时刻选择

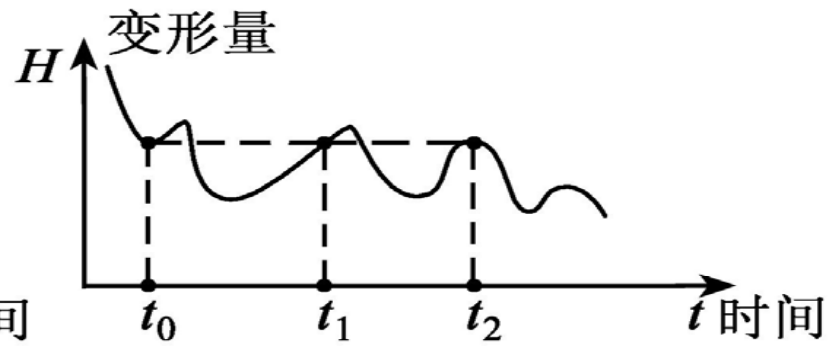




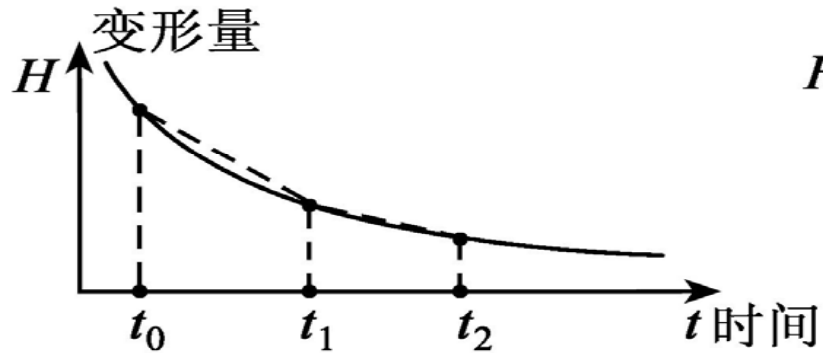
# 图7-7 对不同变形模型的观测时刻选择



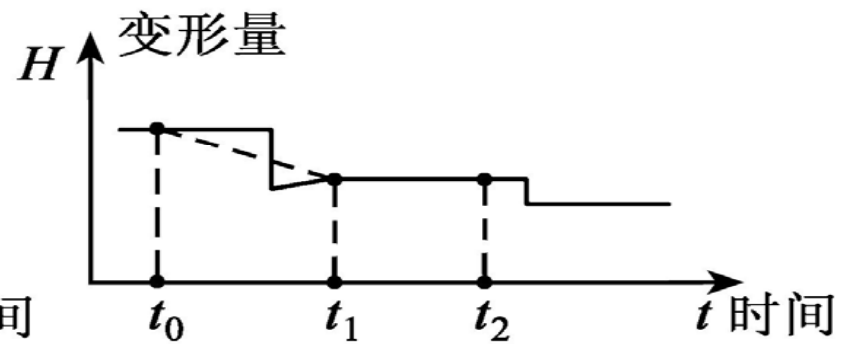
(a)



(b)



(c)



(d)



## 二、一周期内观测时间的确定

一周期内所有测量工作需在允许的时间间隔  $\delta t$  内完成。否则，周期内的变形将歪曲目标点的坐标值。

长周期变形， $\delta t$  可达几天甚至数周，可选用各种大地测量仪器和技术。

日周期变形， $\delta t$  为数十分钟，可选用快速测量仪器和技术，如GPS、Georobot。

短周期变形， $\delta t$  仅为数分甚至数秒，需要考虑采用摄影测量方法或自动化测量方法。



### 7.2.3.3 监测费用的确定

- (1) 建立监测系统的一次性花费。
- (2) 每一个观测周期的花费。
- (3) 维护和管理费。

当变形监测项目所要求的观测周期较少时，采用常规大地测量方法较好；

若观测周期多且周期中测量持续时间较短，应采用特殊的测量方法，研制专用仪器，建立全自动化监测系统。



## 7.2.2.4 其他考虑

- (1) 在监测时，变形体不能被触及，更不准许人在上面行走，否则将影响其变形形态。这时，许多测量方法都不能采用。
- (2) 只有在一定的时候才能到达变形体，在变形体上工作有特别的危险性，这种情况，许多测量方法也不能采用。
- (3) 当变形达到一定量时，对变形体本身或环境将造成巨大危害，但这种危害可通过事先报警而避免或减小时，宜采用自动化的持续监测系统。



(4) 进行荷载作用变形试验时，荷载与变形的关系以及临界值确定都需要快速实时处理，采用全自动化或半自动化数据采集与处理的监测系统比较合适。

(5) 变形监测项目实施时有极高的技术要求，可能造成其他工作停顿、停产，将造成经济损失，在选择测量方法时这一点可能起决定性的作用。

(6) 变形监测任务仅在于将变形体的原始状态保存下来，一旦监测对象发生变化，需通过测量来比较和证明其变化，这时宜采用摄影测量方法。

优点：初始测量的费用少，在需要时可对丰富的摄影信息进行详细处理和分析。



## 7.3 变形监测方法和自动化

### 7.3.1 常规的大地测量方法

指用常规的大地测量仪器测量方向、角度、边长和高差等量所采用方法的总称。

常规的大地测量仪器：

光学经纬仪、光学水准仪、电磁波测距仪、  
电子经纬仪、电子水准仪、电子全站仪、  
GPS接收机等

常规大地测量方法：

变形监测网（GPS网、边角网），几何水准、电磁波测距三角高程测量等。





## 7.3.2 摄影测量方法

### 特点:

- (1) 不接触监测。
- (2) 外业工作量小，观测时间短，快速，很多点
- (3) 信息量大，利用率高，利用种类多；
- (4) 仪器费用较高，数据处理对软硬件的要求较高。



### 7.3.3 特殊的大地测量方法

精确地获取被测对象的变化，

对被测对象本身的精度，要求不是很高



### 7.3.3.1 短距离和距离变化测量方法

距离小于50m，可采用机械法。

如 GERICK 研制的金属丝测长仪，将很细的金属丝（受温度影响小）在固定拉力下绕在钢瓦测鼓上，精度优于1mm。

两点间在*i*和*i+1*周期之间的距离变化  $\Delta l$ ：

$$\Delta l = L_{i+1} - L_i = l_{i+1} - l_i$$

**伸缩测微钢瓦线尺**：由伸缩测量和拉力测量两部分组成，其测微分辨率为0.01mm，如果传递元素（钢瓦线、石英棒等）的长度*a*、*b*保持不变，则只需测微小量  $l_i$  和  $l_{i+1}$ 。 $\Delta l$ 的精度可达0.02mm。



图 7-8 伸缩测微仪原理

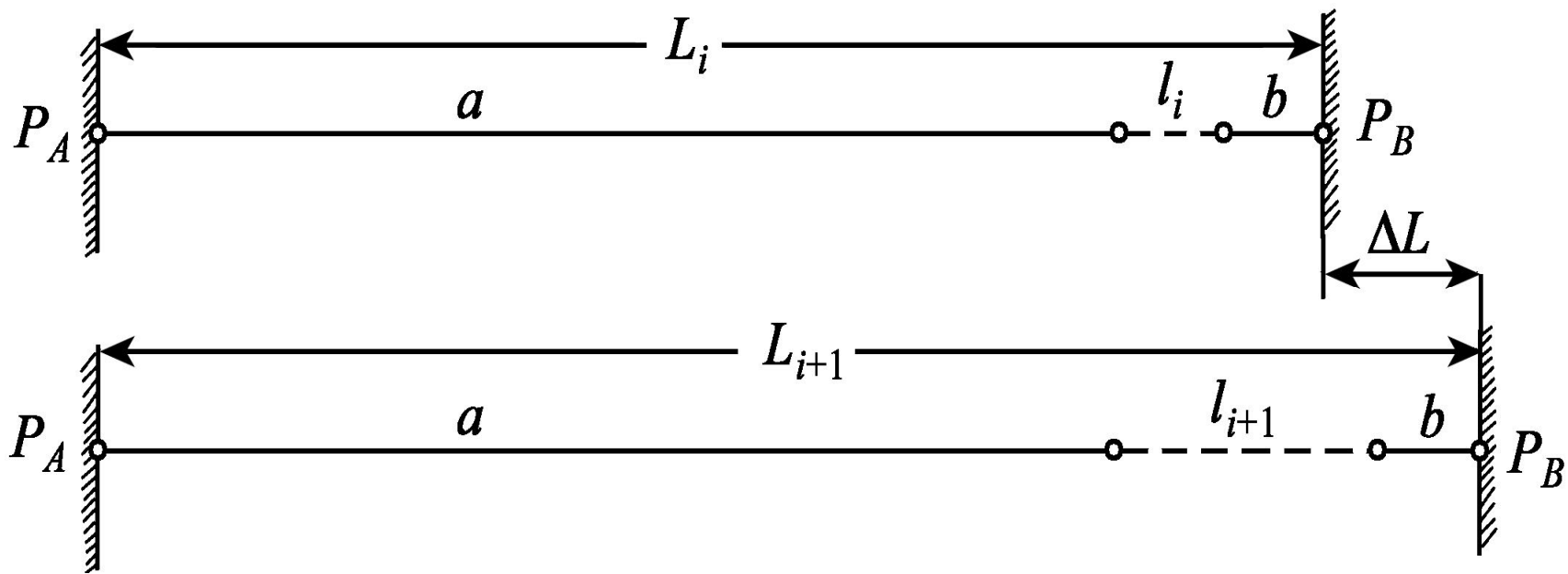
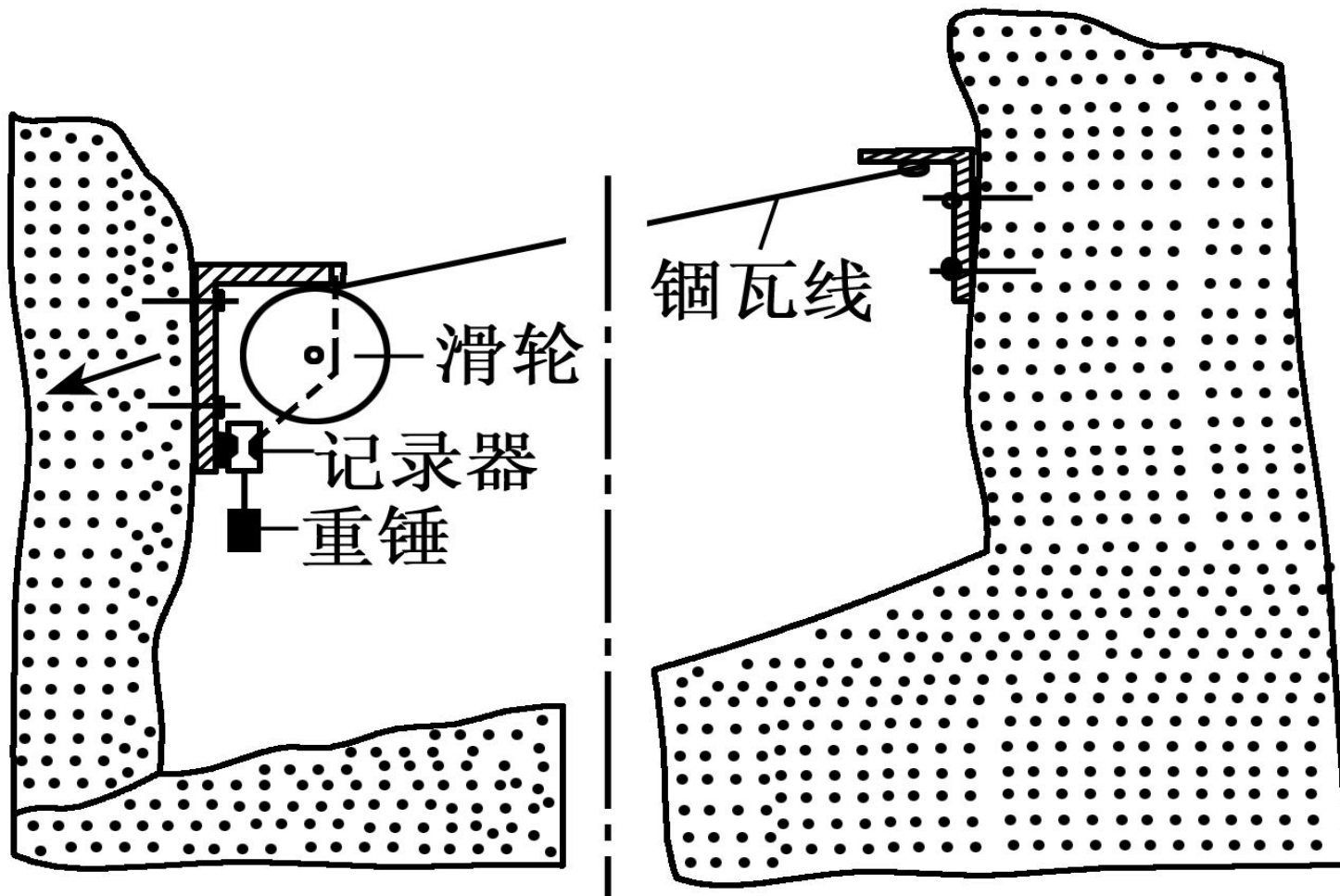




图 7-9 用伸缩测微仪监测岩体移动





## 7.3.3.2 偏离水平基准线的微距离测量——准直法

**水平基准线**通常平行于被监测物体（如大坝、机器设备）的轴线。

偏离基准线的垂直距离或到**基准线**所构成的垂直**基准面**的偏离值称**偏距(或垂距)**。

测量偏距的方法称**准直(测量)法**。

基准线（或基准面）可用**光学法、光电法和机械法**产生。



# 一、光学法

用光学经纬仪或电子经纬仪的视准线构成基准线，又称**视准线法**（包括**测小角法**、**活动觇牌法**）。若在望远镜目镜端加一个激光发生器，则基准线是一条可见的激光束。

测小角法按下式计算偏距及精度：

$$l_i = \frac{\alpha_i}{\rho} \cdot S_i$$

$$m_{l_i} = \frac{m_{\alpha_i}}{\rho} \cdot S_i$$



采用测回法观测时，一测回所测小角的误差等于照准误差  $m_v$ ，它与眼的视力临界角（60"）和经纬仪的望远镜的放大倍数  $\nu$  有关，即

$$m_v = \frac{60''}{\nu}$$

根据偏距的精度要求值和  $S_i$ ，可计算出小角的测量精度，再由望远镜的放大倍数计算小角观测的测回数。

活动觇牌法（略）





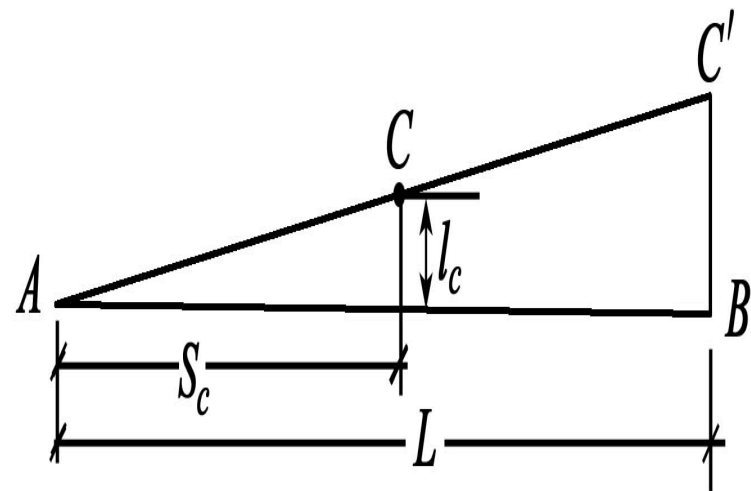
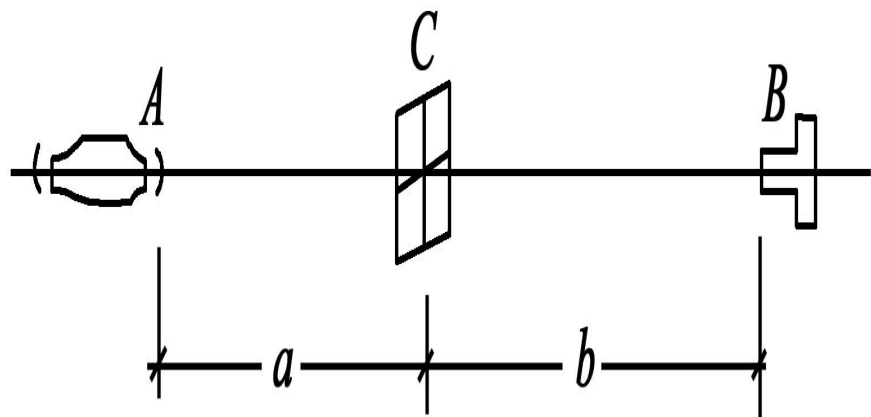
## 二、光电法

光电法是通过光电转换原理测量偏距，有激光经纬仪准直、波带板激光准直、尼龙丝准直系统和激光准直系统。

**三点法波带板激光准直系统：**基准线两 endpoint A、B，安置**激光器点光源**和**光电探测器**，在测点上安置波带板，点光源发射的激光照满波带板，通过**光的干涉原理**，在光源与波带板连线方向线的某点形成一亮点或十字线。对需要测偏距的测点设计专用波带板，使干涉成象恰好落在光电探测器上。测出在B点处相对于基准面的偏离值  $l_c = \frac{S_c}{L} \cdot BC'$ ，则可计算得到**测点C的偏距**



图 7-10 波带板激光准直和偏距测量





# 三、机械法

定义：

在基准点上吊挂钢丝或尼龙丝构成基准线，用测尺游标、投影仪或传感器测量中间目标点相对于基准线的偏距。

引张线法：是一种典型的进行偏距测量的机械法。

由端点、测点和测线装置三部分组成。端点装置含墩座、夹线、滑轮和重锤；测点装置包括水箱、浮船、标尺和保护箱等；测线装置为一根直径为0.6 ~ 1.2mm的不锈钢丝和直径大于10cm的塑料保护管。

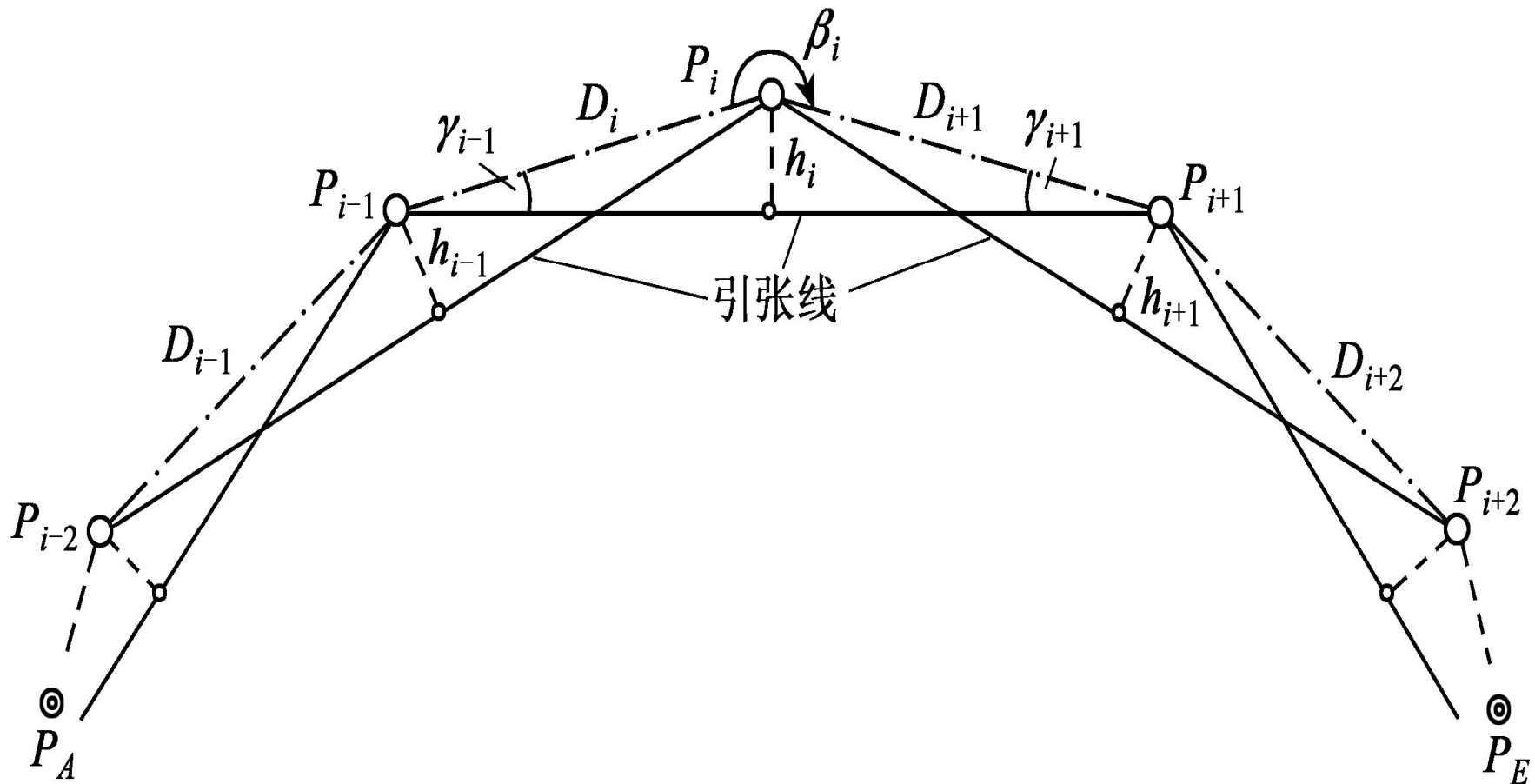
钢丝在两端重锤作用下引张成基准线，由于测点上的标尺是与建筑物如大坝固定在一起的，利用读数显微镜可读出标尺刻划中心偏离钢丝中心的偏距值，可测量大坝的水平位移。



机械法准直原理也可用于直伸三角形测高，对于拱坝或环形粒子加速器，常布设如图7-12所示的直伸重叠三角形网，每个直伸三角形长边上的高可视为偏距，精密地测量各偏距值，可大大提高导线点的精度。



图7 - 12 环形直伸三角形网





### 7.3.3.3 偏离垂直基准线的微距离测量—铅直法

定义：

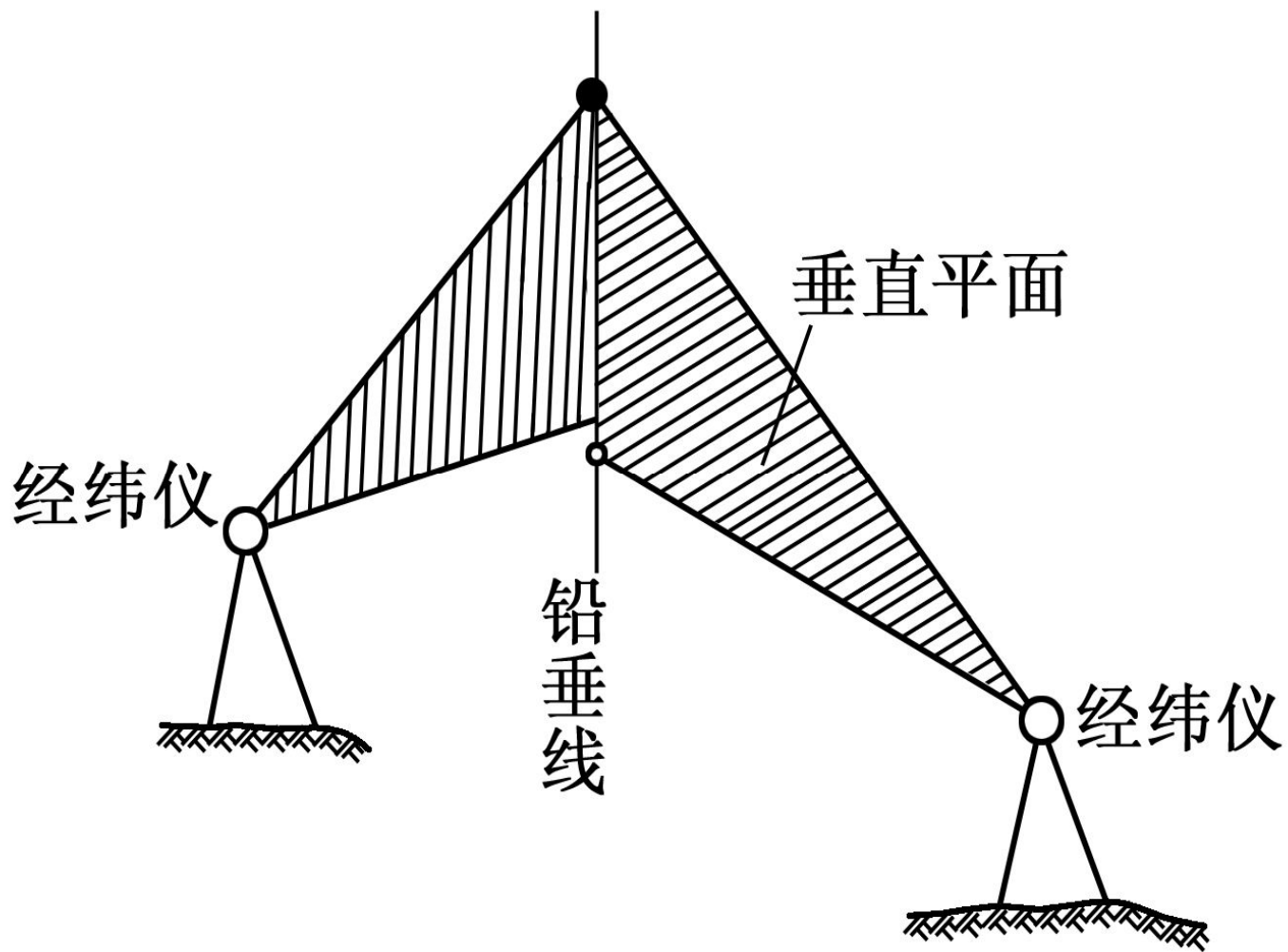
以过基准点的铅垂线为垂直基准线，测量沿铅垂基准线上的目标点相对于基准线的水平距离(亦称偏距)的方法。

铅垂线可以用光学法、光电法或机械法产生。偏距可用垂线坐标仪、测尺或传感器测得。

例如，两台经纬仪过同一基准点的两个垂直平面的交线即为铅垂线（参见图7-13）。用精密光学垂准仪可产生过底部基准点(底向垂准仪)或顶部基准点(顶向垂准仪)的铅垂线。光学法仪器中加上激光目镜，则可产生可见铅垂线，称激光铅直法。



图7 - 13 用经纬仪作铅直测量





# 机械法(正、倒垂线法):

1) 正垂线法: 用正垂线装置测量偏距的一种方法。正垂线装置由悬线、固定与活动夹线装置、观测墩、垂线、重锤、油箱等组成。重锤在下面, 固定夹线装置在上面, 是悬挂垂线的支点(可与工作基点相联系), 活动夹线装置由多点夹线法的观测支点构成, 支点设在不同的高程面上, 垂线是一种高强度且不生锈钢的金属丝(一般直径为 $1\sim 2.5\text{mm}$ ), 重锤是使垂线保持铅垂状态的重物, 重量为 $20\text{kg}\sim 200\text{kg}$ 。油箱的作用是不使重锤旋转或摆动, 保持重锤稳定。图7-14为正垂线装置图。





2) 倒垂线法：用倒垂线装置测量偏距的一种方法。倒垂线装置的重锤（称倒锤）在上面，利用钻孔将垂线（直径 $0.8 \sim 1.0\text{mm}$ 的不锈钢丝）一端锚埋到基岩中，提供在基岩下的基准点，垂线另一端与浮体箱相连，倒锤在浮力的作用下拉紧垂线，形成铅直基准线。图7-15为倒垂线装置图。

正、倒垂线常常成对布设，且与工作基点相对应，利用安置在工作基点观测墩上的垂线坐标仪（图 7-16）可测定工作基点相对于倒垂线的两个坐标值（ $x$ 、 $y$ ），求得工作基点的位移值。垂线观测多采用自动读数设备，如遥测垂线坐标仪，分辨率达 $0.01\text{mm}$ 。另外，还有自动视觉系统AVS（Automated Vision System），它通过CCD自动拍摄垂线的影像确定垂线位置的变化，分辨率可达 $3\mu\text{m}$ 。



图 7-15 倒锤装置



图7-14 正锤装置



图 7-16 垂线坐标仪



### 7.3.3.4 液体静力水准测量法

液体静力水准测量法原理：

连通管中处于静止状态的液体压力满足贝努利方程：

$$P + \rho gh = \text{常数}$$

按此原理制成的仪器可测两点或多点之间的高差。若其中的一个观测头安置在基准点上，其他观测头安置在目标点上，进行多期观测，则可得目标点的垂直位移。该法特别适合建筑物内部（如大坝）的沉降观测，尤其是用常规的光学水准法观测较困难且高差又不太大的情况。

液体静力水准测量系统采用自动读数装置，可实现持续监测，监测点可达上百个。



### 7.3.3.5 挠度曲线和倾斜测量

定义：

相对于水平或铅垂基准线的弯曲线称挠度曲线。  
曲线上某点到基准线的距离称为挠度。

挠度曲线及其随时间的变化可通过倾斜测量或正、倒垂线法获得。例如，确定建筑物在垂直平面内不同高程面上的点相对于底点的水平位移称挠度曲线测量。对于高层建筑物，基础不均匀沉陷将导致建筑物倾斜，建筑物的挠度也可通过观测不同高度处的倾斜值换算得到。两点之间的倾斜也可采用测量高差（或水平位移）和两点间距离，通过计算间接获得。



用测倾仪测倾角，根据两点上所测的倾角和两点间的距离，可按下式计算挠度曲线的倾角  $\alpha$  和坐标差（参见图7-17）：

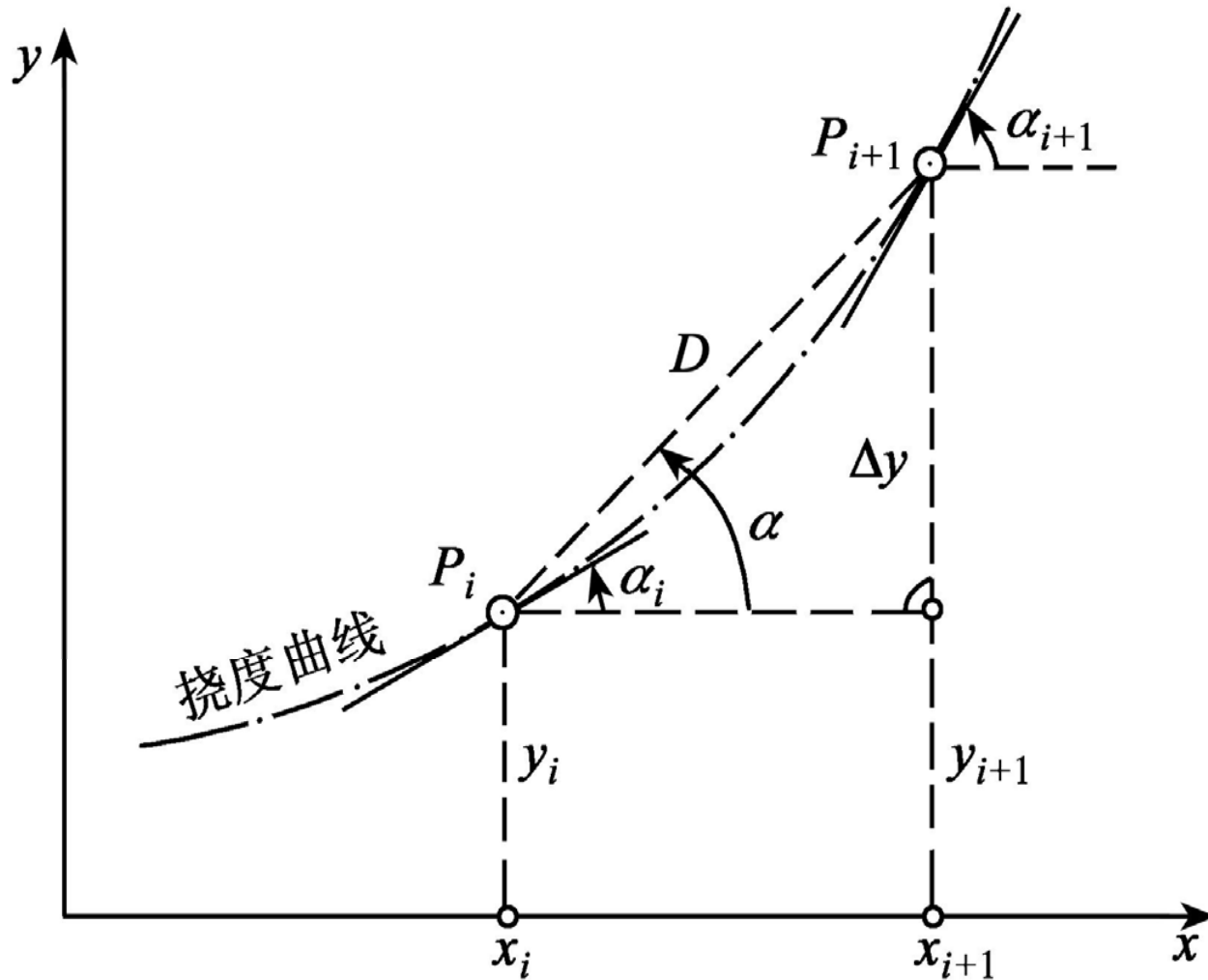
$$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_i + \alpha_{i+1})$$

$$\Delta y = y_{i+1} - y_i = D \cdot \sin \alpha$$

挠度曲线的各测点构成“导线”，通过周期连测端点与基准点，可获取挠度线的变化。



图7-17 用测斜仪测量挠度曲线





### 7.3.3.6 裂缝观测

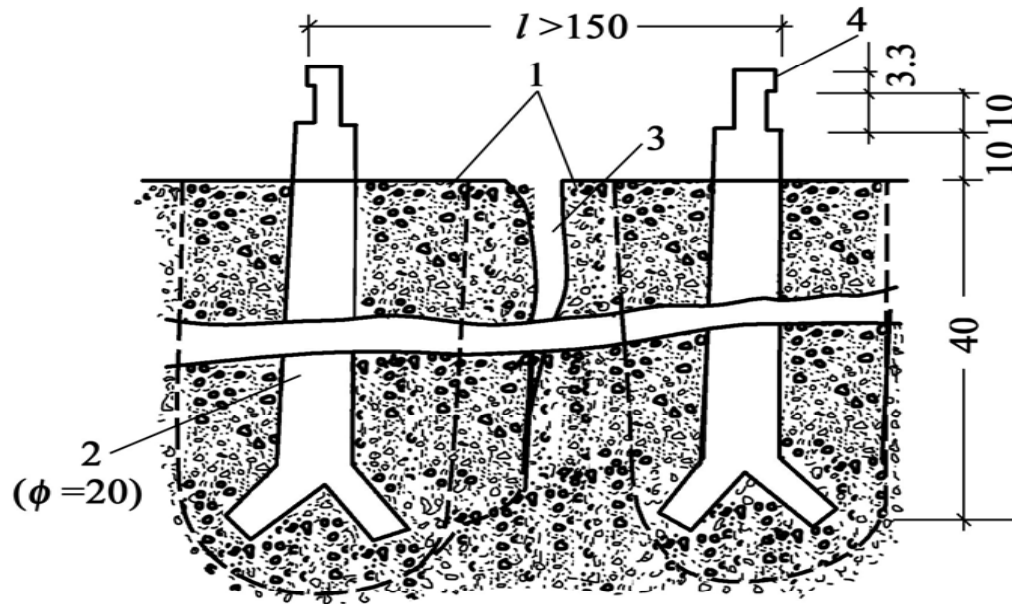
混凝土大坝和土坝的裂缝观测十分重要。对于重要的裂缝，要埋设如图7-18所示的观测标志，进行裂缝编号、确定裂缝位置、走向、长度、宽度等。

一般用游标卡尺定期地测定两个标志头之间距离的变化，确定裂缝的发展情况。观测次数与裂缝的部位、长度、宽度、形状和变化情况有关，应与温度、水位和其他监测结合进行。

对于建筑预留缝和岩石裂缝，一般预埋内部测微计和外部测微计。测微计由金属丝或钨瓦丝与测表构成，其精度可优于0.01mm。



# 图7-18 裂缝观测标志



单位：毫米

1-钻孔后回填的混凝土，2-观测标志，3-裂缝，4-游标卡尺的标志头





### 7.3.3. 7振动观测

高层（或塔式）建筑物，在温度和风力荷载作用下，会产生振动或来回摆动，从而需要进行振动（摆动）观测。桥梁也需进行振动观测，特高的房屋建筑如美国的帝国大厦（102层），在风荷载下，最大摆动达7.6cm。

一般采用光电测量系统和全球定位系统作持续动态观测。



### 7.3.3.8 三维激光扫描测量

三维激光扫描仪本质上也是一种测距测角仪器，通过极坐标和交会原理快速获取物体的三维坐标。

激光扫描仪LR200（也称调频相干激光雷达）可提供水平角、垂直角和距离三个观测值。经坐标转换和建模，可输出被测对象的各种数字模型，并转换到CAD成图。

在工程建筑变形监测方面将成为一种重要的方法得到应用。



图7-19 三维激光扫描仪HDS4500





## 7.3.4 变形监测的自动化

### 变形监测为什么要求自动化？

- 变形速度太快；
- 监测点太多。需要同一时刻获得许多个测点上的变形；
- 监测间隔太短。变形过程需要大量短时间间隔的观测数据描述；
- 监测环境太恶劣。噪声、高压、高热、高磁场或人无法到达；
- 监测不能影响生产和运行管理。



# 如何实现变形监测自动化？

采用基于信号转换传感技术。把变形监测中的距离、角度、高差、倾角等几何量及其微小变化转化为电信号。

信号转换方式有：电感式、电容式、光电式、电阻式、压电式和压抗式等。

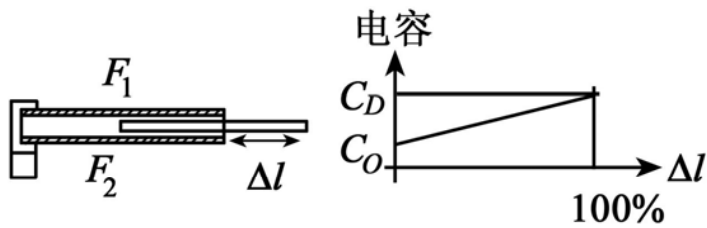
传感器有：差动变压器（电感式传感器）、直线式感应同步器、电容式传感器、光栅式传感器、硅光电池、电荷耦

合器（CCD，又称固态图像传感器）、数模转换器等。

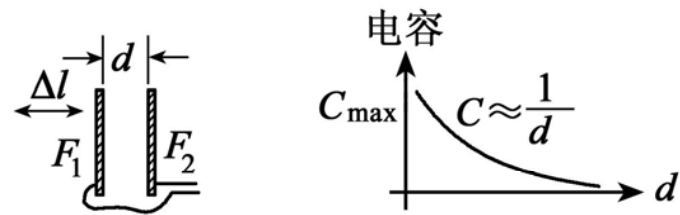
将这些传感器安装在伸缩仪、应变仪、准直仪、铅直仪、测斜仪及静力水准测量系统等仪器中，通过数据获取、信号处理、数据转换与通讯，可将成百上千个测点上的数据传送到数据处理中心，实现持续监测和数据的自动记录、传输与处理，即变形监测自动化。



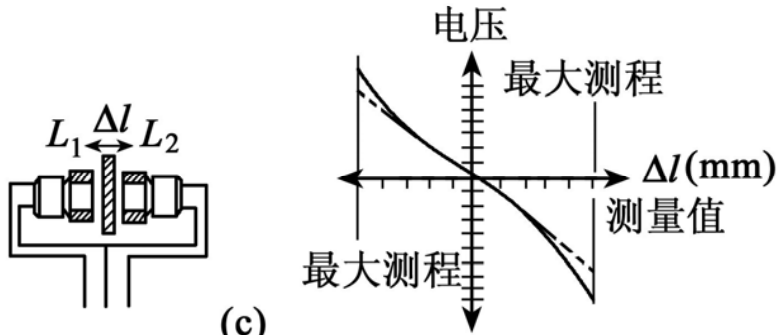
# 图7-20 将位移量转换为电压或电容和特征曲线



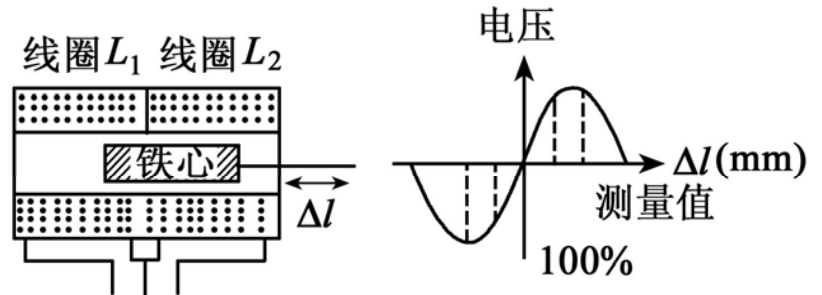
(a)



(b)



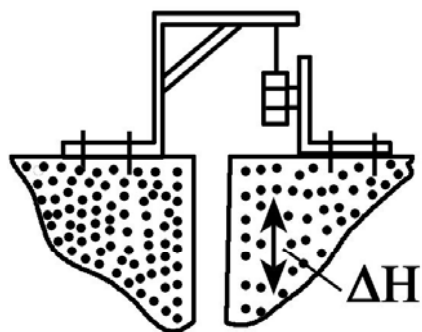
(c)



(d)

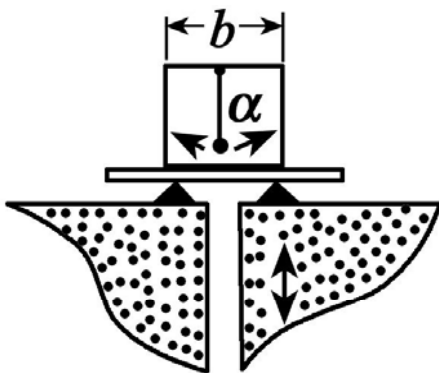


# 图7-21 用不同传感方法进行获取同一种垂直位移



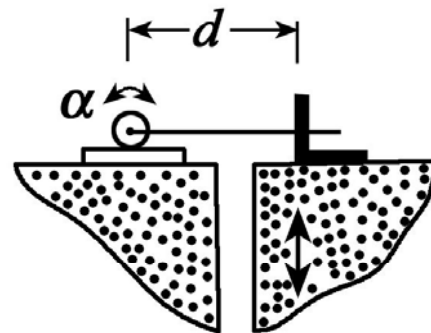
位移传感器直接得到 $\Delta H$

(a)



倾斜传感器  
 $\Delta H = b \cdot \tan \alpha$

(b)



转动传感器  
 $\Delta H = d \cdot \tan \alpha$

(c)



## 7.4 变形观测数据处理

### 变形观测数据处理：

1. 监测网的周期观测数据处理
2. 各监测点上的监测数据处理
3. 变形分析
4. 变形预报

### 变形分析：

几何分析。确定变形量的大小、方向 及其变化，即变形体形态的动态变化。

物理解释。确定引起变形的原因、确定变形的模式，从本质上认识变形。





## 变形分析与预报的方法：

统计分析法

确定函数法

综合法

变形模型：

运动模型：计算速度、加速度。

动力学模型：根据受力与变形的关系确定变形。

观点：

监测是基础，分析是手段，预报是目的。



## 7.4.1 变形监测网的数据处理

---

参考点稳定性分析:

平均间隙法加最大间隙法

卡尔曼滤波法



## 7.4.1.1 平均间隙法和最大间隙法

高斯-马尔可夫模型：

$$\left. \begin{aligned} E\{l\} &= A_i \mathbf{x}_i \\ \Sigma_{LL,i} &= \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{LL,i} = \sigma_0^2 \mathbf{P}_i^{-1} \end{aligned} \right\}$$

参考点坐标向量的估值及协因数矩

$$\hat{\mathbf{x}}_i = (\mathbf{A}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_i) \mathbf{A}_i^T \mathbf{P}_i l_i$$

位移向量及  $d$  的协因数阵

$$\mathbf{Q}_{xx,i} = (\mathbf{A}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_i)^+$$



$$d = \hat{\mathbf{x}}_{i+1} - \hat{\mathbf{x}}_i$$

二次型  $\mathbf{Q}_{dd} = \mathbf{Q}_{xx,i+1} + \mathbf{Q}_{xx,i} = 2\mathbf{Q}_{xx,i}$

称为平均间隙。整体检验（参考网的叠合分析）：

$$\theta^2 = \frac{d^T \mathbf{Q}_{dd}^+ d}{h}$$

零假设

$$H_0 : \left. \begin{array}{l} E(\mathbf{X}_{i+1}) = E(\mathbf{X}_i) \\ E(d) = 0 \end{array} \right\}$$

备择假设

$$H_A : E(\mathbf{X}_{i+1}) \neq E(\mathbf{X}_i), \text{ 或 } E(d) \neq 0$$



## 构成统计量

$$T = \frac{\theta^2}{S_0^2} \sim F_{h,f}$$

当零假设成立时，说明参考点不存在显著性变形。

当备择假设成立时，说明参考点存在显著性变形。

做分解：

$$\mathbf{d} = \begin{pmatrix} \mathbf{d}_M \\ \mathbf{d}_F \end{pmatrix}, \mathbf{Q}_{dd}^+ = \begin{pmatrix} \mathbf{p}_{MM} & \mathbf{p}_{MF} \\ \mathbf{p}_{FM} & \mathbf{p}_{FF} \end{pmatrix}$$



做以下变换

$$\left. \begin{aligned} \bar{\mathbf{d}}_M &= \mathbf{d}_M + \mathbf{p}_{MM}^{-1} \mathbf{p}_{MF} \mathbf{d}_F \\ \bar{\mathbf{p}}_{FF} &= \mathbf{p}_{FF} - \mathbf{p}_{FM} \mathbf{p}_{MM}^{-1} \mathbf{p}_{MF} \end{aligned} \right\}$$

构造二次型:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{(j)}^2 &= \frac{\mathbf{d}_F^T \bar{\mathbf{P}}_{FF} \mathbf{d}_F}{h - 2} \\ \omega_j &= \frac{\bar{\mathbf{d}}_M^T \mathbf{p}_{MM} \bar{\mathbf{d}}_M}{2} \end{aligned} \right\}$$



称  $\omega_j$  为动点间隙，  
 $\theta_{(j)}^2$  为其余点的平均间隙。

对所有的参考点，均轮换做上述分解并计算  $\omega_j$ ，  
其中最大的一个称为最大间隙，  
最大间隙所对应的点为显著性变形点。

对剩下的平均间隙  $\theta_{(j)}^2$  再重复上述的整体检验，直至整体  
检验通过。

经过上述检验，参考网若存在至少两个稳定点，可作  
约束平差。如果少于两个稳定点，则应进行拟稳平差，拟稳点的  
权



# 拟稳平差:

把参考网点当做拟稳点，拟稳点的权根据其上的位移向量大小按一定的规则确定，如

$$P_d = \text{diag}\{(|d_j| + c)^{-1}\}$$

$c$  表示第  $j$  点的位移向量， $d_j$  是一个小的正数。在确定出固定基准或拟稳基准后，所计算出动点以及目标点的位移向量则是相对于基准的真实位移，利用所求的位移及其精度就可以进行变形体变形模型鉴别和变形参数的估计。





## 7.4.1.2 卡尔曼滤波法

卡尔曼滤波是最优估计的一种方法，德国测量学者佩尔策（H. Pelzer）将其应用于变形监测网参考点和目标点的显著性变形检验。

由第 $K-1$ 期参考网的坐标未知数向量及其协方差阵，并考虑第 $K$ 期参考网的观测值，求解第 $K$ 期的坐标未知数向量及其协方差阵采用卡尔曼滤波的递推算法，通过统计检验确定显著性变形的参考点，称为**参考网静态点场更新**。

若将参考网扩大到包括相对网，将参考点视为稳定点，而将目标点视为动点，按卡尔曼滤波法的递推算法进行参考点是否有显著性变形的统计检验和动点的位移向量计算，称为**监测网似静态点场更新**。



# 一、参考网检验和静态点场更新

卡尔曼滤波的递推公式为：

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_K &= \mathbf{T}\hat{\mathbf{X}}_{K-1} + \boldsymbol{\xi}_K = \mathbf{I}\hat{\mathbf{X}}_{K-1} + \mathbf{0} \\ \Sigma_{XX,K} &= \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{XX,K} = \Sigma_{\hat{\mathbf{X}}\hat{\mathbf{X}},K-1} + \Sigma_{\boldsymbol{\xi}\boldsymbol{\xi},K} \\ \mathbf{I}_K &= \mathbf{L}_K - \bar{\mathbf{L}}_K = \mathbf{L}_K - \mathbf{A}_K \mathbf{X}_K \\ \Sigma_{LL,K} &= \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{LL,K} \\ \hat{\mathbf{X}}_K &= \mathbf{X}_K + \mathbf{x}_K = \mathbf{X}_K + \mathbf{K}l_K \\ \Sigma_{\hat{\mathbf{X}}\hat{\mathbf{X}},K} &= \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}\hat{\mathbf{X}},K} = \sigma_0^2 (\mathbf{Q}_{XX,K} - \mathbf{K}\mathbf{D}\mathbf{K}^T) \\ \mathbf{K} &= \mathbf{Q}_{XX,K} \mathbf{A}_K^T \mathbf{D}^{-1} \\ \mathbf{D} &= \mathbf{Q}_{LL,K} + \mathbf{A}_K \mathbf{Q}_{XX,K} \mathbf{A}_K^T \end{aligned} \right\}$$



## 系统噪声向量 $\xi_K$ 及其协方差阵 $\Sigma_{\xi\xi,K}$

系统噪声向量  $\xi_K$  是未知的随机向量，由于地下水位变动、环境温度变化、阳光照射、标石不稳定以及对中不好等原因所引起。

协方差阵  $\Sigma_{\xi\xi,K}$  为对角矩阵，其对角元素值为  $p$  个参考点  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  坐标的方差，即

$$\text{diag}(\Sigma_{\xi\xi,K}) = (\sigma_{X_1}^2 \sigma_{Y_1}^2 \sigma_{Z_1}^2 \cdots \sigma_{X_p}^2 \sigma_{Y_p}^2 \sigma_{Z_p}^2)$$



在缺少系统噪声信息时，通常假设

$$\xi_K = 0$$

两周期间一致性整体检验步骤（略）

二、监测网检验和似静态点场更新（略）



## 7.4.3 变形监测点的数据处理

### 7.4.3.1 回归分析法

回归分析是处理变量之间相关关系的一种数理统计方法。

变形值(亦称效应量, 如位移、沉陷、挠度、倾斜等)为系统的输出, 影响因子(亦称环境量, 如库水位、气温、气压、坝体混凝土温度、渗流、渗压以及时间等)为系统的输入, 将输入称自变量, 输出称因变量。

用回归分析方法近似地估计变形与影响因子间的函数关系。根据这种函数关系可以解释变形产生的原因, 同时也可以进行预报, 自变量取预计值时变形的预报值。



## 重要概念:

- 1) 回归分析既是一种统计计算方法, 又是一种变形的物理解释方法。
- 2) 若只是两个变量之间的问题, 即一个自变量的情况, 称**一元回归**。变形值和时间之间也可作回归分析。
- 3) 若两个变量之间存在线性函数关系, 则为直线回归。若两个变量是非线性关系, 有两种处理方法:
  - (1) 根据散点图和常见的函数曲线(如双曲线、幂函数曲线、指数曲线、对数曲线)进行匹配, 通过变量变换把曲线问题化为直线问题;
  - (2) 用多项式拟合任一种非线性函数, 通过变量变换把**一元非线性回归**问题化为**多元线性回归**问题。



直线回归方为:

$$y = a + bx$$

双曲线方程:

$$\frac{1}{y} = a + \frac{b}{x}$$

代换:

$$y' = \frac{1}{y}, x' = \frac{1}{x}$$

化为一元直线回归问题:

$$y' = a + bx'$$



指数函数:

$$y = de^{\frac{b}{x}}$$

做变换

$$y' = \ln y, x' = \frac{1}{x}, a = \ln d$$

变为标准式回归方程

$$y' = a + bx'$$





二次多项式(抛物线):

$$y = a + bx + cx^2$$

做变换:

$$x_1 = x, x_2 = x^2$$

变为二元线性回归方程:

$$y = a + bx_1 + cx_2$$



## 二、多元线性回归模型及解

函数模型的矩阵:

$$y = x\beta + \varepsilon \quad y + v = x\hat{\beta}$$

$y$ 为因变量, 即变形观测值向量

$$\mathbf{y}^T = (y_1, y_2, \dots, y_n)$$

$\varepsilon$ 为观测值误差向量

$\beta$ 是回归系数向量

$$\boldsymbol{\beta}^T = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m)$$



共有 $n$ 个变形观测值，有 $m$ 个变形影响因子，它们构成

矩阵的元素

$$x = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}$$



$n > m + 1$  时，按最小二乘原理求解

$$\left. \begin{aligned} (\mathbf{X}^T \mathbf{X}) \hat{\boldsymbol{\beta}} &= \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \\ \hat{\boldsymbol{\beta}} &= (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \\ \Sigma_{\hat{\boldsymbol{\beta}} \hat{\boldsymbol{\beta}}} &= \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{\hat{\boldsymbol{\beta}} \hat{\boldsymbol{\beta}}} = \sigma_0^2 (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \\ \hat{\mathbf{Y}} &= \mathbf{Y} + \mathbf{V} = \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} \end{aligned} \right\}$$

$$S_0^2 = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{V}}{n - (m + 1)}$$



## 多元线性回归模型中的几个概念

残差平方和  $Q$

回归平方和  $U$

总离差平方和  $S$

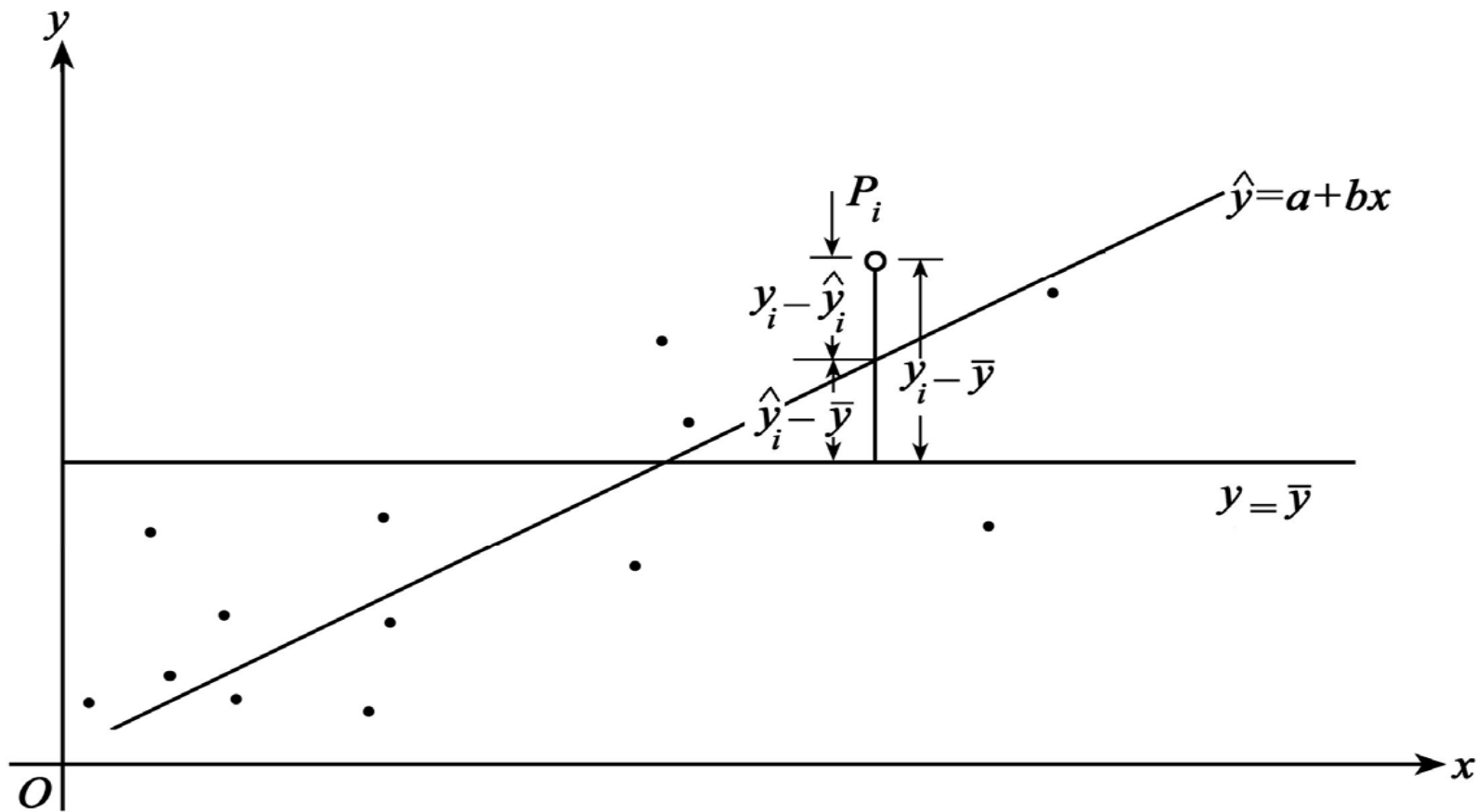
$$Q = (\mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}})^T (\mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}}) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \mathbf{V}^T \mathbf{V}$$

$$U = (\hat{\mathbf{Y}} - \bar{\mathbf{Y}})^T (\hat{\mathbf{Y}} - \bar{\mathbf{Y}}) = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

$$S = (\mathbf{Y} - \bar{\mathbf{Y}})^T (\mathbf{Y} - \bar{\mathbf{Y}}) = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$



图 7-22 总离差平方和、残差平方和与回归平方和





关系： 总离差平方和  $S$  等于残差平方和  $Q$  加上回归平方和  $U$ 。

$$S = Q + U$$

几何意义：总离差平方和为变形观测值与变形观测值的平均值之差的平方和，残差平方和为变形观测值与变形观测值的回归值之差的平方和，回归平方和为变形观测值的回归值与变形观测值的平均值之差的平方和。



回归平方和 $U$ 为经过回归之后使总离差平方和 $S$ 减少的那一部分， $U$ 愈大，表示回归效果愈好；

残差平方和 $Q$ 表示经过回归之后自变量对因变量的非线性影响及它们的测量误差影响部分；

回归计算公式是以 $Q$ 等于最小的原理推导的。显然，在 $S$ 一定的情况下， $Q$ 愈小，则 $U$ 愈大。 $Q$ 愈小， $U$ 愈小，另外，变形影响因子的个数 $m$ 愈少， $Q$ 也愈小。在用回归模型进行预报或控制时，应选用尽可能少的影响因子，达到尽可能高的拟合度，即 $Q$ 、 $m$ 都尽可能地小。





## 一元线性回归直线性的相关系数检验法

自变量与因变量间的相关系数估值

公式

$$\hat{\rho} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$$

相关系数估值与回归系数  $\hat{\beta}$  的符号一致，大小与自由度和置信水平  $\alpha$  有关。若相关系数的估值大于其分位值，表示自变量与因变量间的线性关系密切，回归直线有效。



## 复相关系数和偏相关系数

多元线性回归中，定义复相关系数（因变量与自变量的线性关系程度）：

$$R = \sqrt{\frac{U}{S}} = \sqrt{1 - \frac{Q}{S}}$$

在多元线性回归中，任意两个变量之间的相关系数称为偏相关系数。偏相关系数反映了两个变量之间的相关程度。影响因子和因变量之间的偏相关系数的符号与该因子对应的回归系数的符号一致。回归系数表示在除去其他影响因子后对因变量的影响。



## 偏相关系数的计算方法：

设有三个变量  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ ，在除去  $x_1$ 、 $x_2$  影响后之间的

相关系数  $r_{12,3}$  称  $x_1$ 、 $x_2$  对  $x_3$  的偏相关系数，有

$$r_{12,3} = \frac{\rho_{12} - \rho_{13} \cdot \rho_{23}}{\sqrt{1 - \rho_{13}^2} \cdot \sqrt{1 - \rho_{23}^2}}$$

式中，

$\rho_{12}$ 、 $\rho_{13}$ 、 $\rho_{23}$  按相关系数估值公式计算。



# 1、逐步回归算法的原理

根据专业知识和监测资料，在一元线性回归基础上，通过对回归系数进行显著性检验，逐步接纳和舍去影响因子后得到最佳回归方程。

逐步回归算法建立在F检验的基础上： $\hat{\beta}_i$ 影响因子对因变量是否有显著作用的检验。

零假设

备选假设  $H_0 : E(\hat{\beta}_i) = 0$

$H_A : E(\hat{\beta}_i) = \hat{\beta}_i \neq 0$



构成以下服从F分布的统计量:

$$T = \frac{\hat{\beta}_i^2 / q_{\hat{\beta}\hat{\beta},i}}{Q / n - (m + 1)} \sim F_{1, n - (m + 1)}$$

式中:  $q_{\hat{\beta}\hat{\beta},i}$  为  $Q_{\hat{\beta}\hat{\beta}}$  矩阵中第  $i$  个对角元素,

$Q$  为残差平方和

当  $T > F_{1, n - (m + 1), 1 - \alpha}$

表示  $x_i$  是显著的, 相应的影响因子  $\hat{\beta}_i$  应接纳到回归方程, 应舍去。



## 进行增添影响因子的显著性检验

设多元线性回归方程为

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \cdots + \hat{\beta}_m x_m$$

其残差平方和为  $Q_m$

回归平方和为  $U_m$

增添一个影响因子  $x_{m+1}$  后，其回归方程为

$$\hat{y}'_x = \hat{\beta}'_0 + \hat{\beta}'_1 x_1 + \cdots + \hat{\beta}'_m x_m + \hat{\beta}'_{m+1} x_{m+1}$$

相应的残差平方和及回归平方和为  $Q_{m+1}, U_{m+1}$

$$\Delta Q = Q_m - Q_{m+1}$$

有：
$$\Delta U = U_{m+1} - U_m$$

$$\Delta Q = \Delta U$$



称  $\Delta Q$  为  $y$  对  $x_{m+1}$  的偏回归平方和，等于增添影响因子后残差平方和的减小量，反映  $x_{m+1}$  对回归效果的贡献。

显著性检验：

零假设 
$$H_0 : E(\hat{\beta}'_{m+1}) = 0$$

备选假设 
$$H_A : E(\hat{\beta}'_{m+1}) = \hat{\beta}'_{m+1} \neq 0$$

统计量：

$$T = \frac{\Delta Q}{Q_{m+1} / (n - m + 2)} = \frac{\Delta Q (n - m + 2)}{Q_{m+1}} \sim F_{1, n - m + 2}$$

当  $T > F_{1, n - m - 2, 1 - \alpha}$  时

拒绝零假设，影响因子应归入回归方程，

否则不应增添该影响因子。



## 2、逐步回归算法的步骤

- (1) 初选变形影响因子；
- (2) 确定首选的一元线性回归方程；
- (3) 确定最佳二元线性回归方程；
- (4) 确定最佳三元线性回归方程；
- (5) 确定最佳回归方程。





### 3、算例

一混凝土大坝某坝段挠度监测值，库水位、气温及坝内相关部位的混凝土温度。

由专业知识确定影响因子：

库水位、其二、三次幂、观测前10天平均库水位  
前30天、60天、90天的平均气温  
该坝段33个监测点的混凝土温度

通过逐步回归计算，得到一个15元最佳线性回归方程：

观测前10天平均库水位

前90天的平均气温

13个监测点的混凝土温度

由最佳线性回归方程可作挠度值与回归因子间的定量分析，可作挠度的预报和挠度的控制。



## 四、说明

- 1) 逐步线性回归模型需要有较长且一致性较好的观测值序列。
- 2) 当环境量之间相关性较大，可采用岭回归分析；
- 3) 如果考虑测点上有多个效应量，如三向垂线坐标仪、双向引张线仪，二向、三向测缝计的观测值序列，则可采用偏回归模型
- 4) 偏回归模型具有多元线性回归分析、相关分析和主成份分析的功能，在某些情况下优于一般的逐步线性回归模型。



## 7.4.2.2 其他方法(略)

- 一、时间序列分析法
- 二、 频谱分析法
- 三、模糊人工神经网络法
- 四、小波分析法



## 7.4.3 变形体的变形模型分析



## 7.4.3.1 目标点的位移向量场

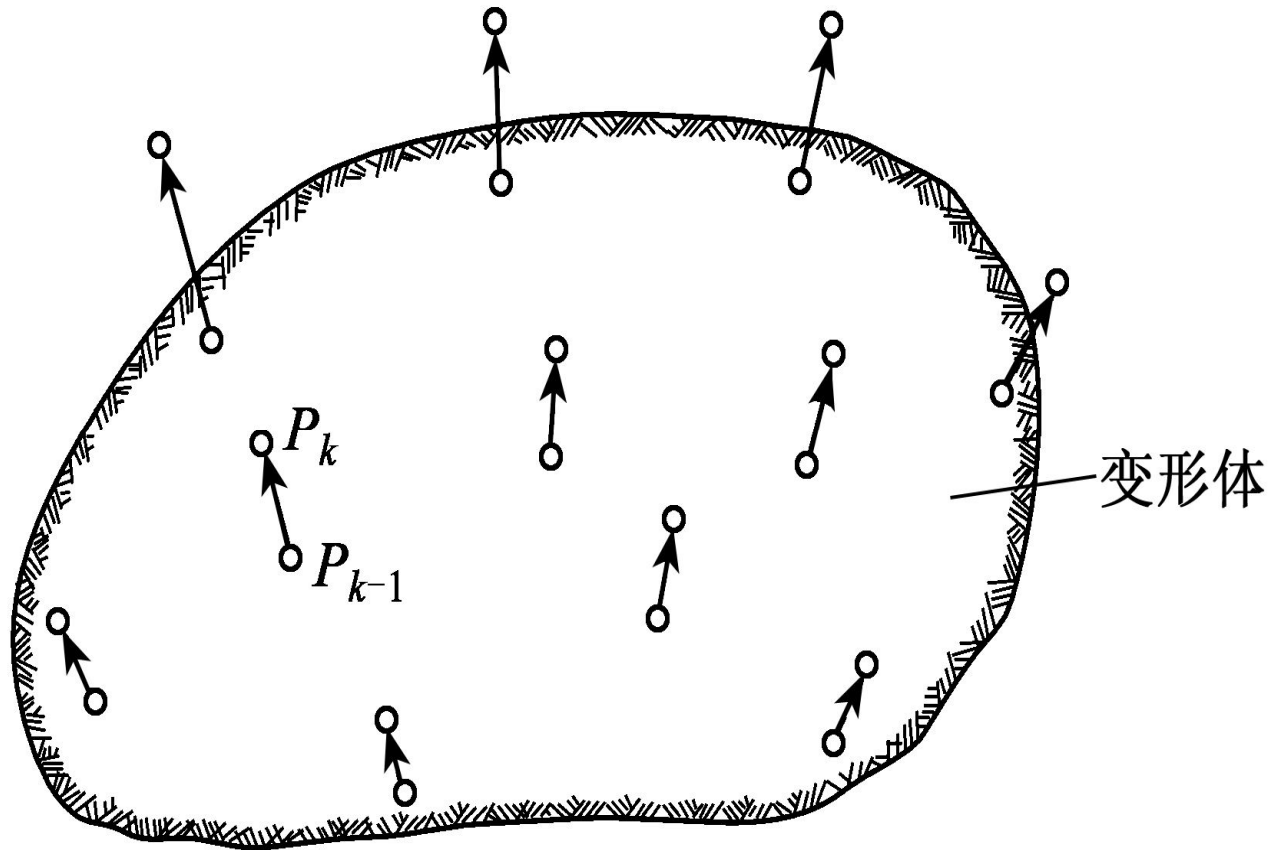
变形监测网的位移向量图：

直观地反映目标点位移的大小和方向。



图 7-23

# 变形体的位移向量图





## 面向问题的结构化回归分析法：

要点：对全部或部分目标点建模，  
描述变形体的刚体运动和相对形变  
称综合变形模型

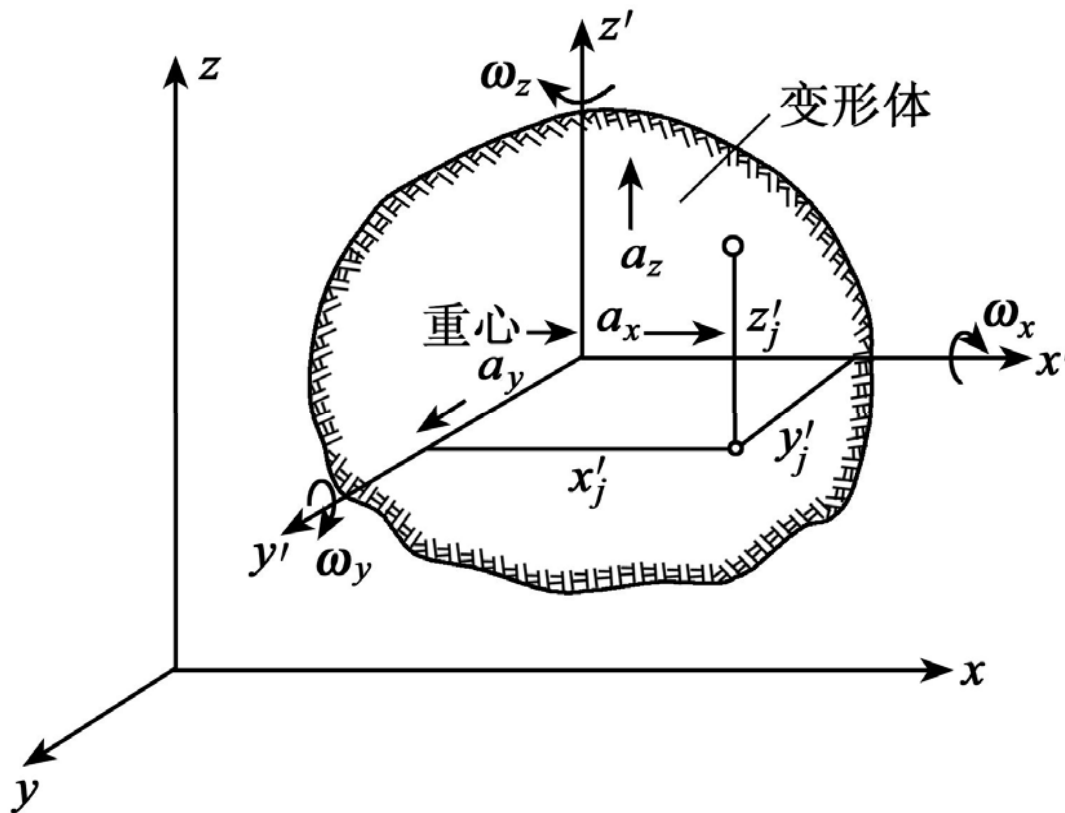
原理：



## 7.4.3.2

# 变形体的综合变形模型

## 一、刚体运动模型







运动方程（左手坐标系）：

$$\begin{bmatrix} \Delta x_j \\ \Delta y_j \\ \Delta z_j \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_j' & -y_j' \\ 0 & 1 & 0 & -z_j' & 0 & x_j' \\ 0 & 0 & 1 & y_j' & -x_j' & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$



## 二、相对形变模型

运动方程：

$$\begin{pmatrix} \delta_{x_j} \\ \delta_{y_j} \\ \delta_{z_j} \end{pmatrix} = \mathbf{S} \mathbf{X}'_j = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_j \\ y'_j \\ z'_j \end{pmatrix}$$

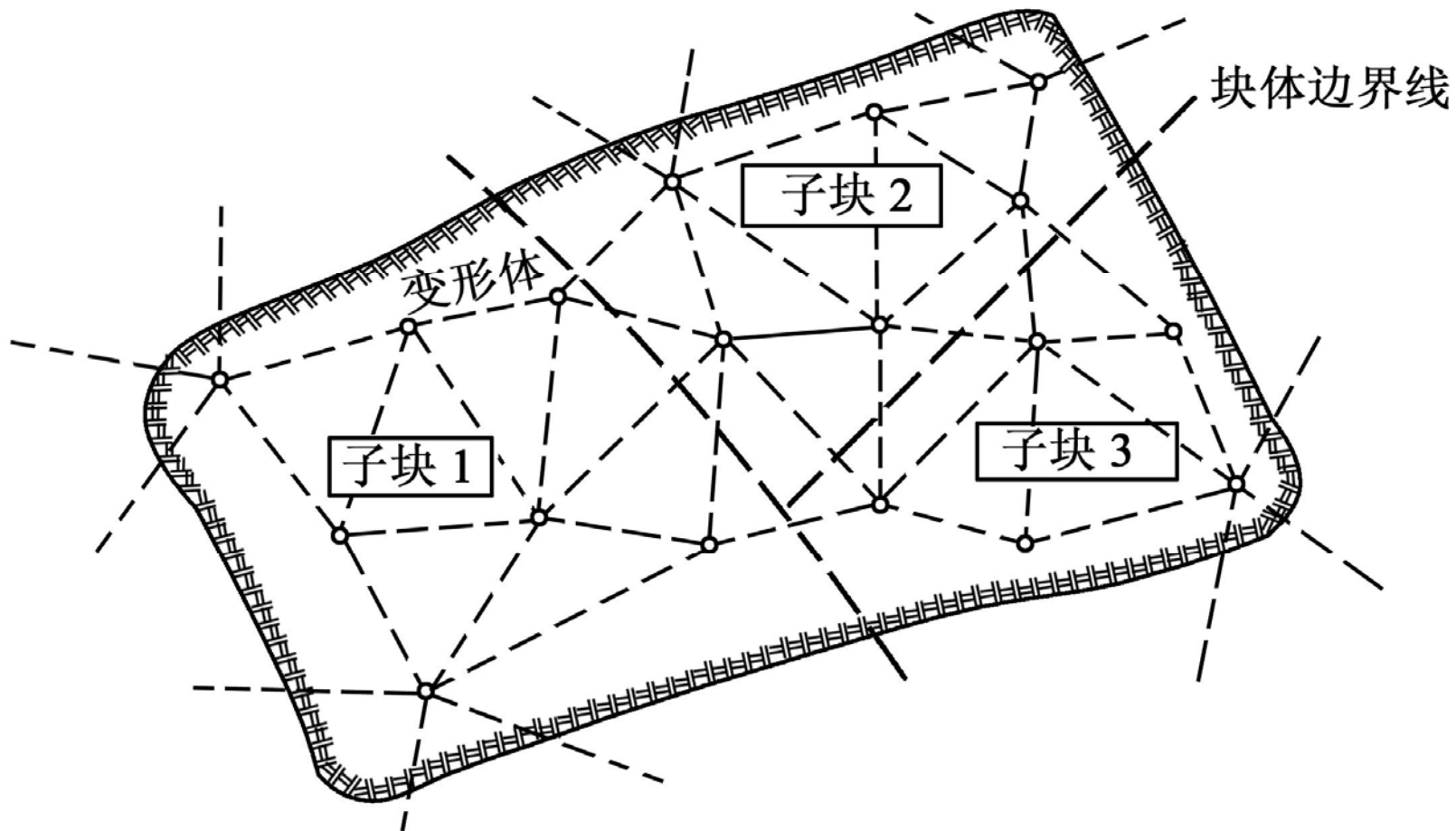


### 三、 综合变形模型

刚体运动和相对形变的叠加



图 7-25 变形体的分块示意图





$$\mathbf{x}_{j,k} = \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} \Delta x_j \\ \Delta y_j \\ \Delta z_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta x_j \\ \delta y_j \\ \delta z_j \end{pmatrix} = \mathbf{H}_j \mathbf{t}$$

$$\mathbf{H}_j = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dot{z}_j & -\dot{y}_j & \dot{x}_j & 0 & 0 & \dot{y}_j & \dot{z}_j & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\dot{z}_j & 0 & \dot{x}_j & 0 & \dot{y}_j & 0 & \dot{x}_j & 0 & \dot{z}_j \\ 0 & 0 & 1 & \dot{y}_j & -\dot{x}_j & 0 & 0 & 0 & \dot{z}_j & 0 & \dot{x}_j & \dot{y}_j \end{pmatrix}$$

$\mathbf{t}$  向量包括 12个参数，当一个子块(或整块)上多于4个目标点时，构成平差模型求最小二乘解。



## 综合变形模型:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}_{1,k} \\ \mathbf{x}_{2,k} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{q,k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{V}_{1,k} \\ \mathbf{V}_{2,k} \\ \vdots \\ \mathbf{V}_{q,k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_q \end{pmatrix} \mathbf{t}$$



## 7.4.3.3

## 运动模型

分回归模型和卡尔曼滤波模型



# 一、回归模型

适用于对高程变化的建模





## 二、卡尔曼滤波模型

状态方程中含监测点的位置、速率和加速度等状态向量参数。

特别适合滑坡监测数据的动态处理。优点：是有严密的递推算法，不需要保留使用过的观测值序列，而且可把模型的参数估计和预报结合在一起。



## 7.4.3.4 动态模型

特点：

不仅研究点的运动，同时研究引起点运动的作用力，更为丰富多彩。

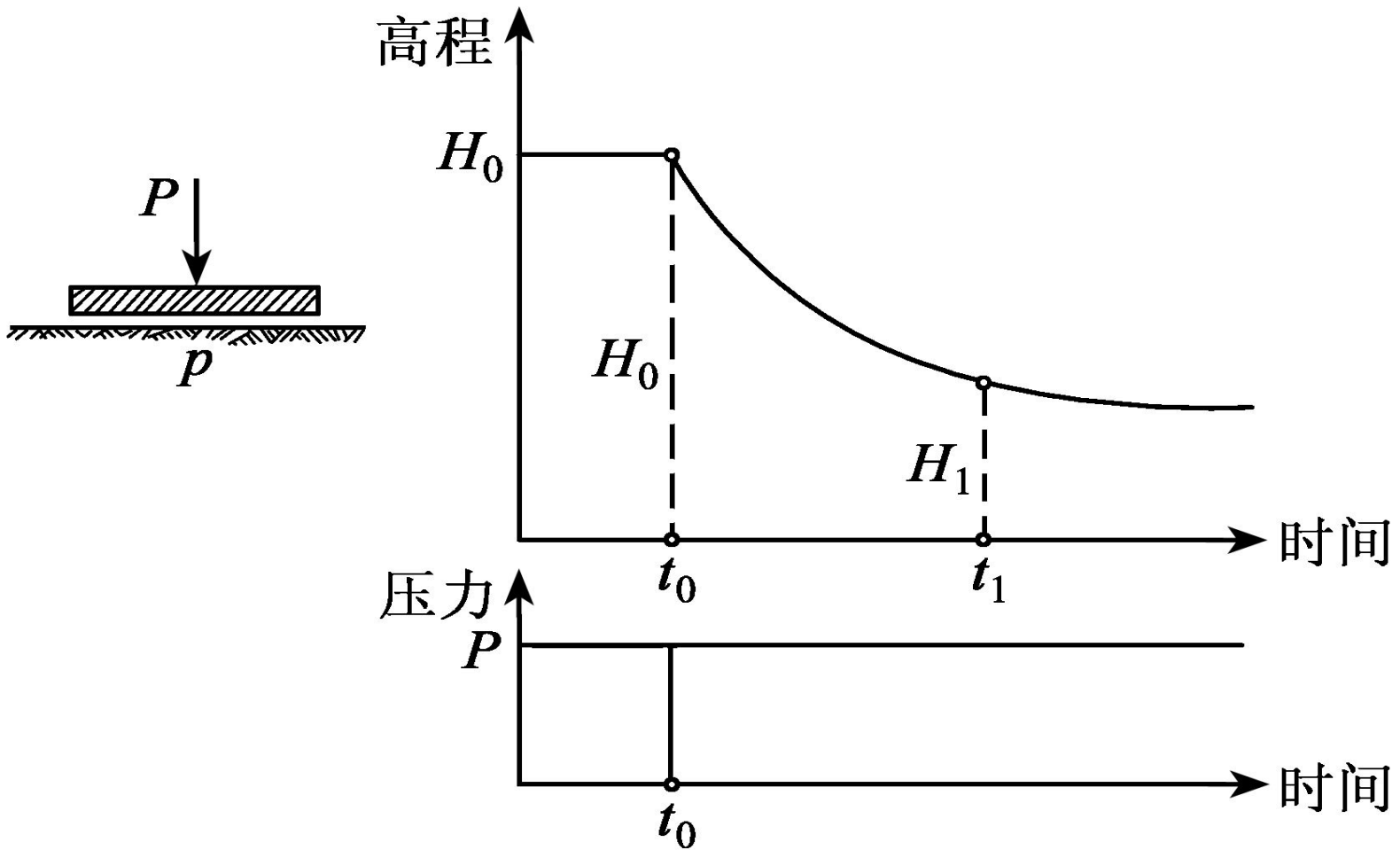
当变形体上目标点的运动和作用力的函数关系能构造出来时，则可采用动态模型。

一个简单的例子：

目标点 $p$ 压力 $P$ 作用，引起地面下沉。



图 7-26 地面受压下沉的动态模型





## 7.5 监测资料整理、成果表达和解释



## 7.5.1

# 资料整理

变形观测资料:

自动采集或人工采集的各种  
原始观测数据

观测资料整理自动化



## 资料整理的主要内容:

- 1) 收集资料
- 2) 审核资料
- 3) 填表和绘图
- 4) 编写整理成果说明



## 观测资料分析阶段：

- 1) 施工期的资料分析
- 2) 初期蓄水期的资料分析
- 3) 运行期的资料分析



## 资料分析常用方法：

- 1) 作图分析
- 2) 统计分析
- 3) 对比分析
- 4) 建模分析





## 提交成果资料:

1. 技术设计书和测量方案;
2. 监测网和监测点布置平面图;
3. 标石、标志规格及埋设图;
4. 仪器的检校资料;
5. 原始观测记录(手簿和(或)电子文件);
6. 平差计算、成果质量评定资料;
7. 变形观测数据处理分析和预报成果资料;
8. 变形过程和变形分布图表;
9. 变形监测、分析和预报的技术报告。



## 7.5.2

# 成果表达

形式:

文字、表格、图形，多媒体、  
仿真、虚拟现实 技术

要点:

逻辑性、艺术性、直观、丰富  
多彩、满足业主要求



# 例子说明



# 图 7-27 某桥墩的荷载变化及沉降过程曲线 (99%的置信域)

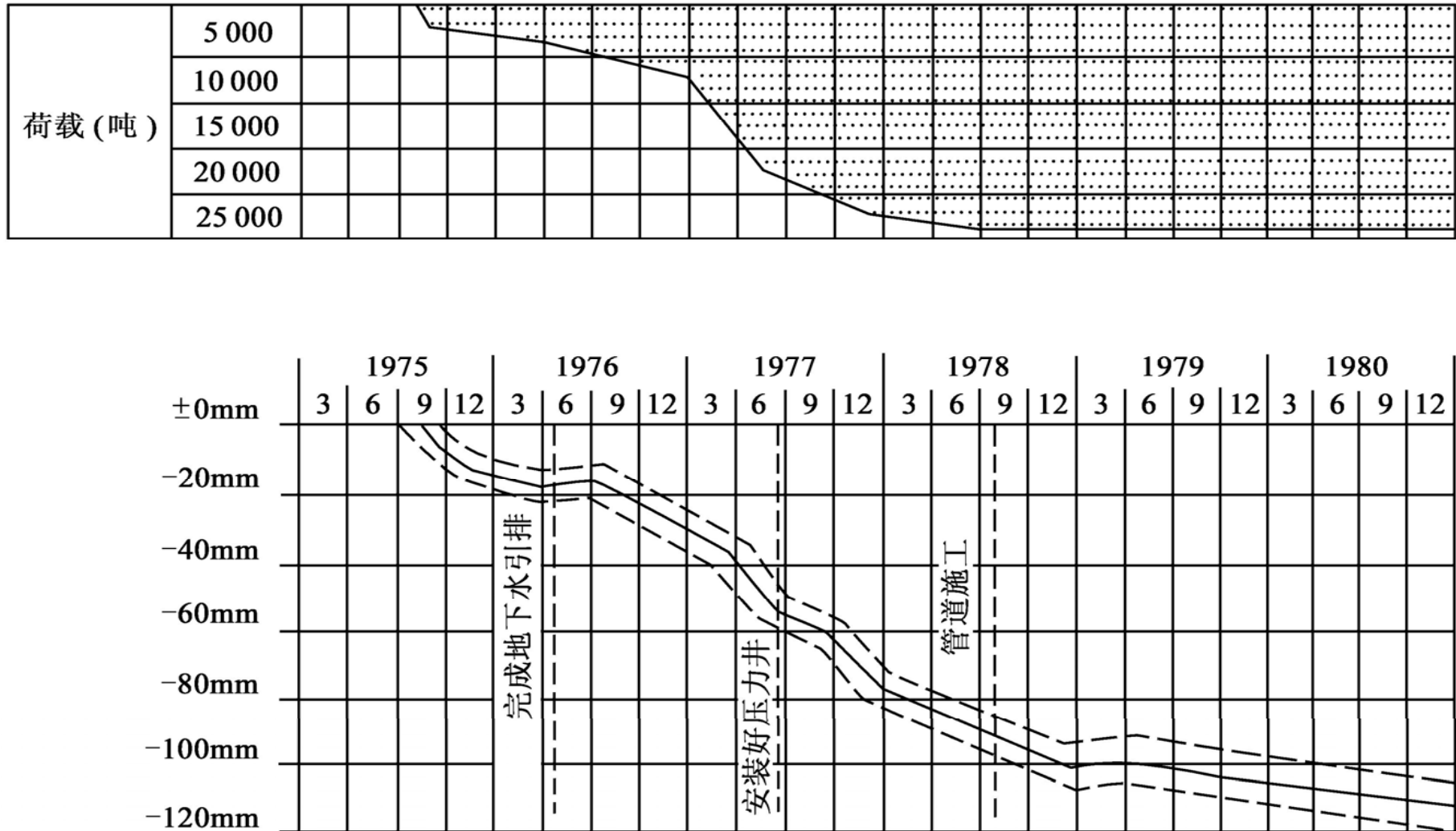




图 7-28 某大楼沉降变形监测示意图

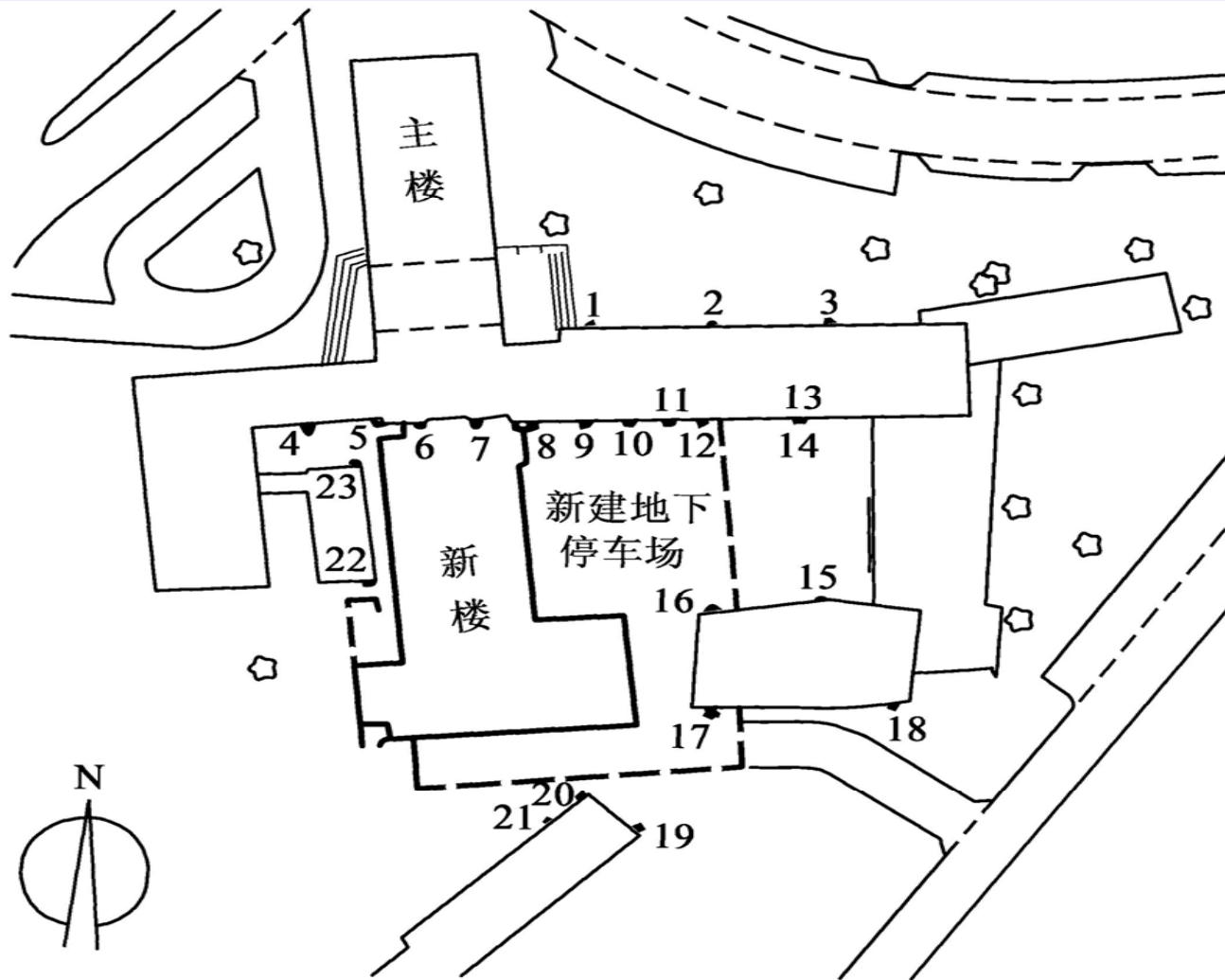




表 7-3 某大楼高程监测点的绝对沉降值

周期	本周期			复测周期																				
	1			2			3			4			5			6			7			8		
时间	1982.2.2			1982.2.12			1982.2.25			1982.3.1~4			1982.3.23			1982.4.7			1982.6.7			1983.9.30		
建筑阶段	基础开挖处理						基础完成			曲下水位下降			最低曲下水位			框架完成			全部建成					
监测点	高程	沉降值		高程	沉降值		高程	沉降值		高程	沉降值		高程	沉降值		高程	沉降值		高程	沉降值		高程	沉降值	
		上周	本周		上周	本周		上周	本周		上周	本周		上周	本周		上周	本周		上周	本周		上周	本周
点号	m	mm		m	mm		m	mm		m	mm		m	mm		m	mm		m	mm		m	mm	
1	9.568						9.568						9.568			9.568			9.568			9.567	-1	-1
2	9.098						9.099		+1				9.099		+1	9.099		+1	9.099		+1	9.098	-1	
3	8.611						8.612		+1				8.611			8.612	+1	+1	8.611	+1	+1	8.611	-1	
4	7.769			7.769			7.770		+1	7.770		+1	7.770		+1	7.770		+1	7.770		+1	7.768	-2	-1
5	7.632			7.629		-3	7.629		-3	7.630	+1	-2	7.629	-1	-3	7.628	-1	-3	7.628	-1	-4	7.626	-2	-6
6	7.632			7.628		-4	7.628		-4	7.628		-4	7.628		-4	7.628		-4	7.627	-1	-5	熄档		
7	7.525			7.520		-5	7.520		-5	7.521	+1	-4	7.520	-1	-5	7.520		-5	7.520		-5	*		
8	7.368			7.365		-3	7.364		-4	7.365	+1	-3	7.364	-1	-4	7.364		-4	7.364		-4	7.360	-4	-8
9	7.360			7.358		-2	7.357	-1	-3	7.357		-3	7.358	+1	-2	7.357	-1	-3	7.357		-3	熄档		
10	7.384			7.382		-2	7.382		-2	7.382		-2	7.382		-2	7.382		-2	7.382		-2	*		
11	7.388			7.387		-1	7.387		-1	7.387		-1	7.387		-1	7.387		-1	7.387		-1	*		
12	7.391			7.390		-1	7.390		-1	7.390		-1	7.390		-1	7.390		-1	7.391	-1		*		
14	7.713			7.712		-1	7.713	+1		7.712	-1	-1	7.712		-1	7.713	+1		7.714	+1	+1	7.711	-3	-2
15	7.768			7.767		-1	7.767		-1	7.767		-1	7.768	+1		7.768			7.768			7.766	-2	-2
16	7.444			7.442		-2	7.432	-10	-12	7.431	-1	-13	7.432	+1	-12	3.432		-12	7.432		-12	7.429	-3	-15
17	7.909						7.901		-8	7.900	-1	-9	7.900		-9	7.900		-9	7.900		-9	7.896	-4	-13
18	7.794						7.794			7.794			7.795	+1	+1	7.794	-1		7.796	+2	+2	7.795	-1	+1
19	7.953			7.954		+1	7.950	-4	-3	7.950		-3	7.951	+1	-2	7.951		-2	7.951		-2	7.948	-3	-5
20	7.803						7.793		-10	7.793		-10	7.793		-10	7.793		-10	7.794	+1	-9	7.791	-3	-12
21	7.956						7.954		-2	7.953	-1	-3	7.953		-3	7.953		-3	7.953		-3	7.951	-2	-5
22	7.716			7.716			7.716			7.716			7.716			7.716			7.716			7.712	-4	-4
23	7.700			7.699		-1	7.699		-1	7.700	+1		7.700			7.699		-1	7.699	-1	-1	7.695	-4	-3



表7-4 某大楼相邻高程监测点相对沉降值

周别	本周别		复测周别																	
	1		2		3		4		5		6		7		8					
时间	1982.2.2		1982.2.12		1982.2.25		1982.3.1~4		1982.3.23		1982.4.7		1982.6.7		1982.9.30					
建筑阶段	基础开挖处理						基础完成		地下水位下降		最低地下水位		框架完成		全部建成					
监测点	高程 $\Delta h$		沉降值		高程 $\Delta h$		沉降值		高程 $\Delta h$		沉降值		高程 $\Delta h$		沉降值		高程 $\Delta h$		沉降值	
	上周	本周	上周	本周	上周	本周	上周	本周	上周	本周	上周	本周	上周	本周	上周	本周	上周	本周	上周	本周
点号	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1																				
2	-510							-509	+1				-509	+1	-509	+1	-509	+1		
3	-447							-477					-447		-447		-447			
4																				
5	-138		-140	-2			-140	-2	-140	-2	-141	-1	-3	-141	-3	142	-1	-4		
6	+1		-1	-2			-1	-2	-2	-1	-3	-2	-3	-1	+1	-2				
7	-107		-108	-1			-108	-1	-107	+1		-108	-1	-1	-108	-1				
8	-157		-155	+2			-156	-1	+1	-156	+1	-156	+1	-156	+1					
9	-8		-7	+1			-7	+1	-7	+1	-8	-1		-7	+1	+1				
10	+23		+24	+1			+24	+1	+25	+1	+2	+25	+2	+25	+2					
11	+4		+5	+1			+5	+1	+5	+1	+5	+1	+5	+1	+6	+1	+2			
12	+3		+3				+3		+3		+4	+1	+1	+4	+1					
14	+322		+322				+323	+1	+1	+322	-1	+323	+1	+1	+323	+1				
15																				
16	-325		-325		-334	-9	-9	-336	-2	-11	-336	-11	-366	-11	-366	-11	-338	-2	-13	
17																				
18	-115				-106	+9	-106	+9	-105	+1	+10	-106	-1	+9	-104	+2	+11	-101	+3	+14
19																				
20	-150				-157	-7	-157	-7	-158	-1	-8	-157	+1	-7	-157	-7	-158	-1	-8	
21	+152				+160	+8	+160	+8	+160	+8	+160	+8	+160	+8	+159	-1	+7	+160	+1	+6
22																				
23	-17		-18	-1			-17	+1	-16	+1	+1	-17	-1	-17	-1			-17		



图 7-29 基坑回弹的纵横断面图

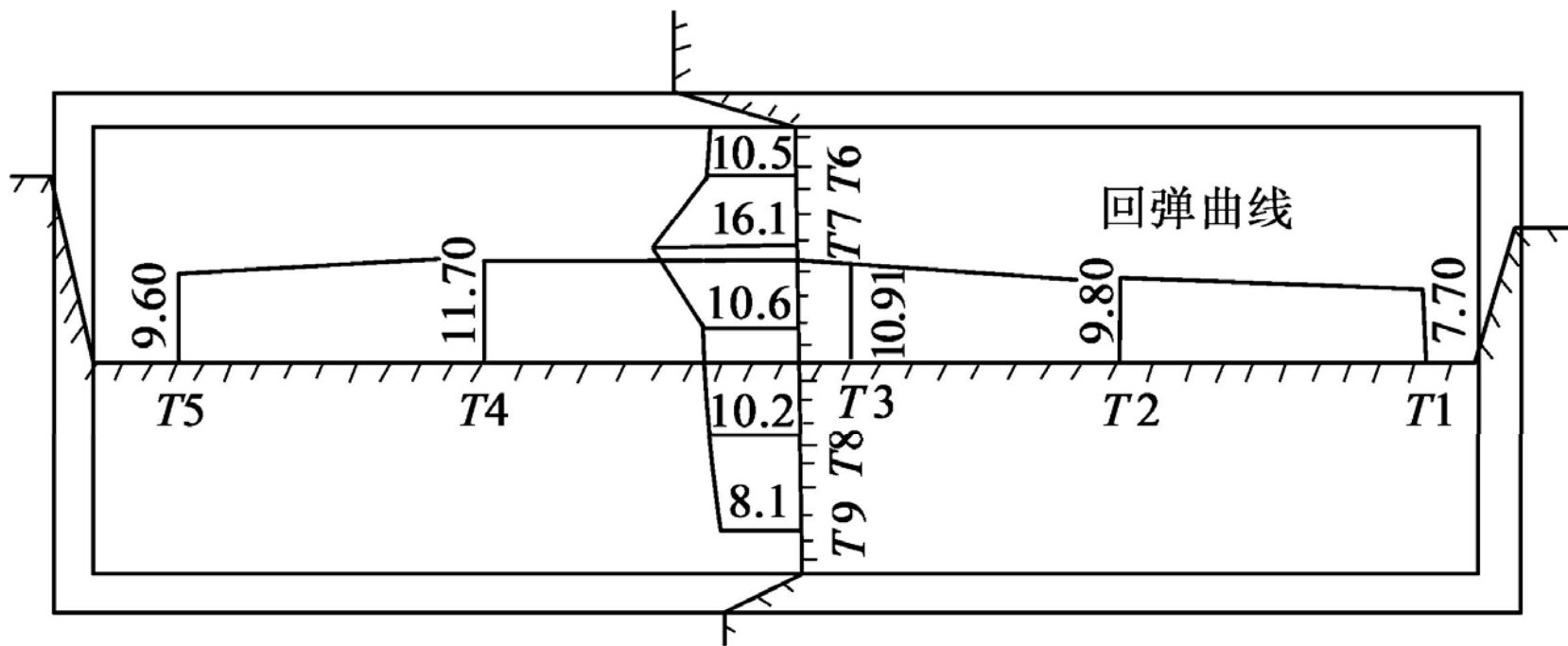
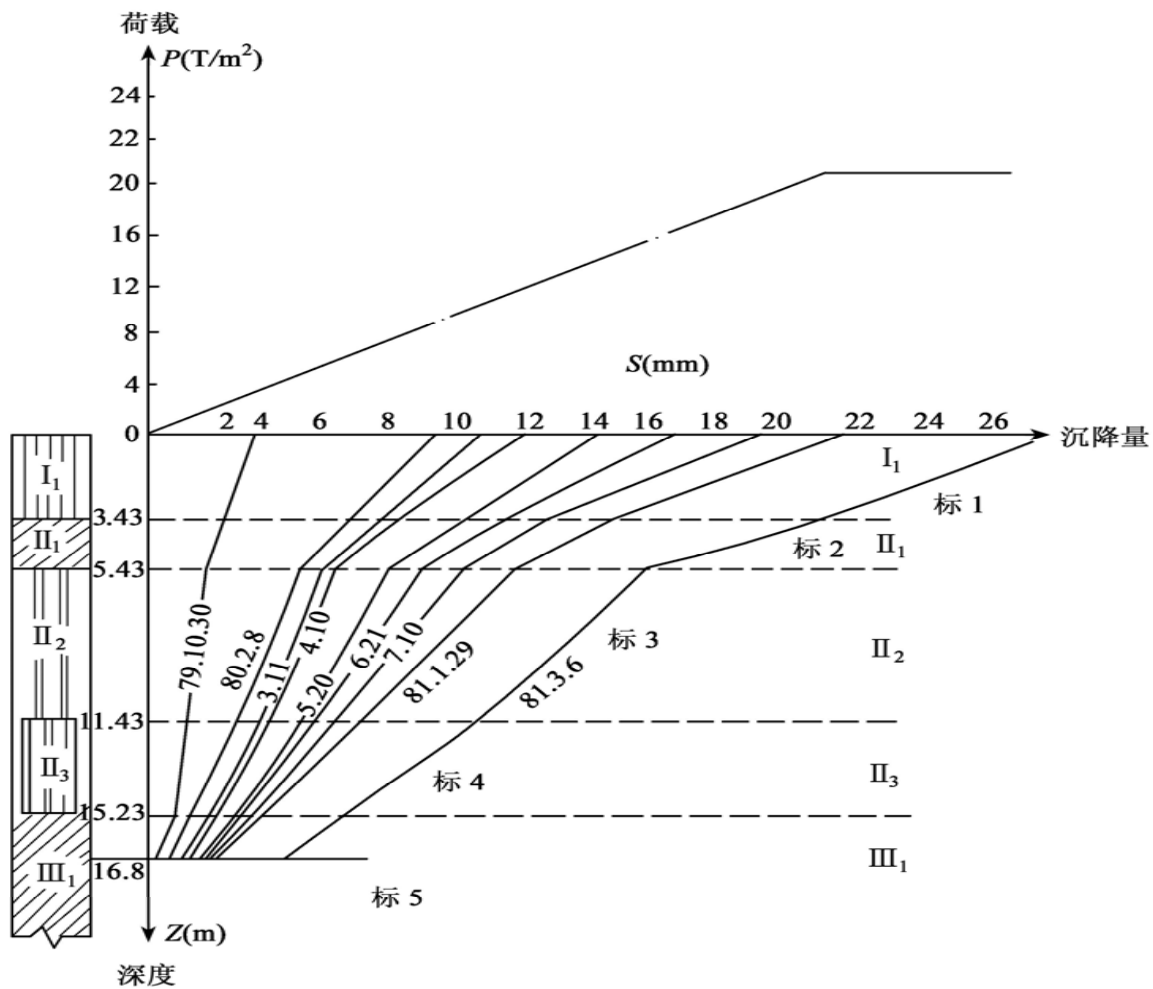






图 7-30 土层的荷载沉降量深度 (P-S-Z) 曲线图





# 图 7-31 某大楼沉降等值线图

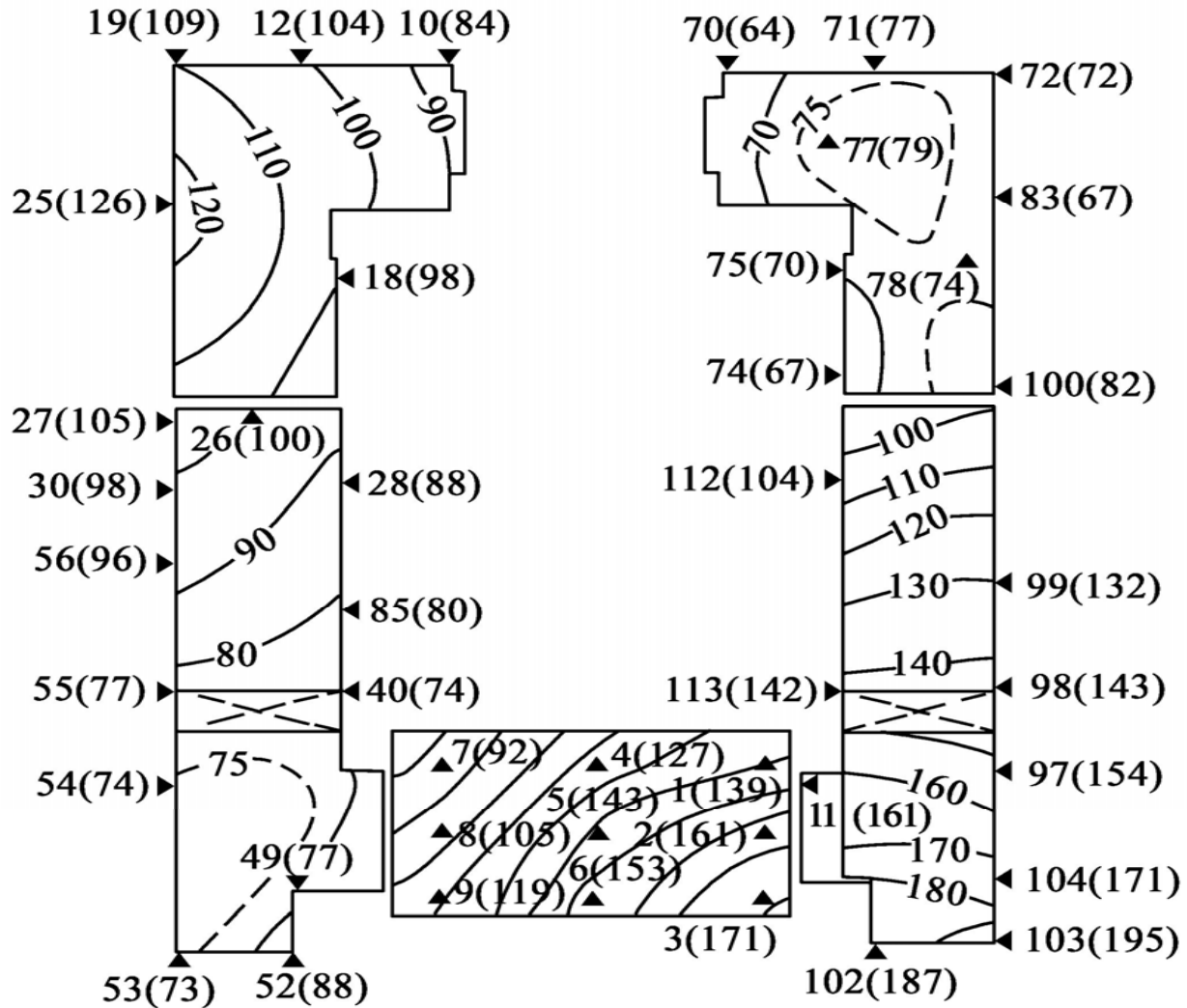




图 7-32 某地表沉降等值线和平面位移向量图

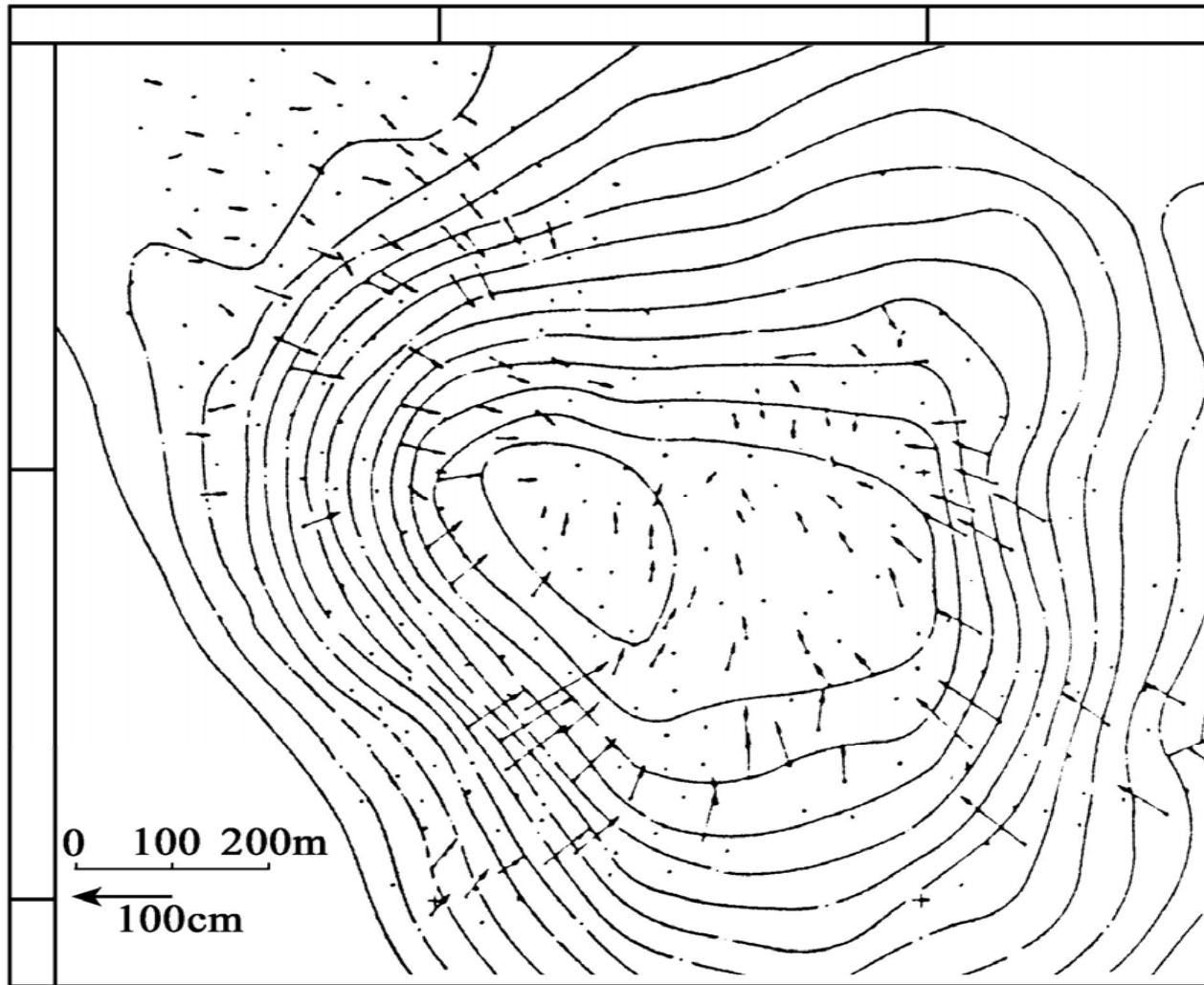
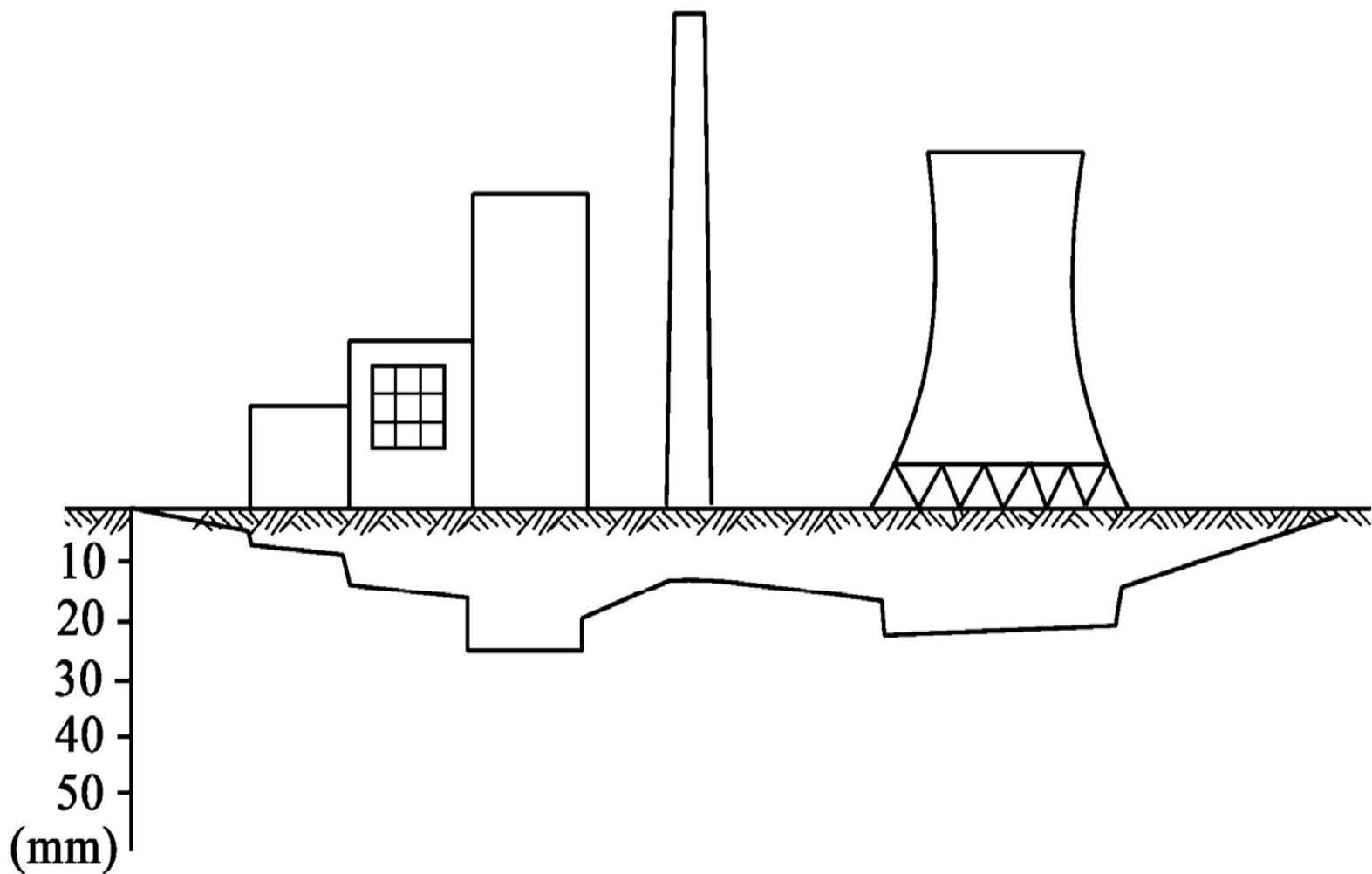




图 7-33 建筑物某一断面上的沉降线图





# 图 7-34 某大坝铅直线上水平位移曲线

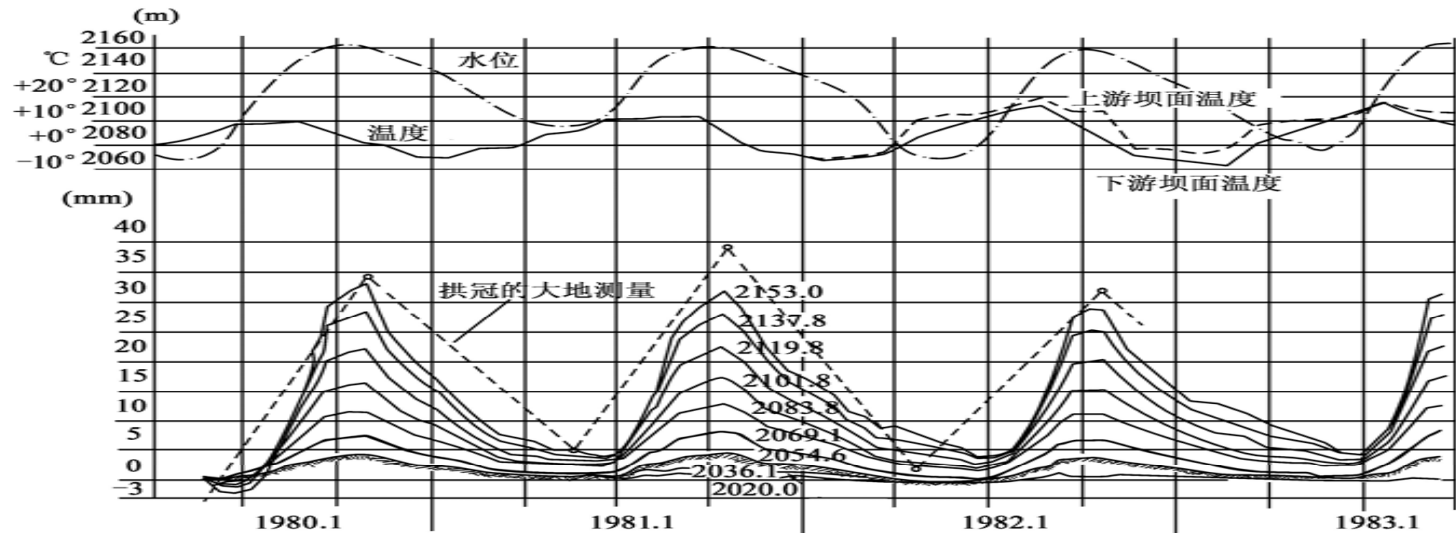
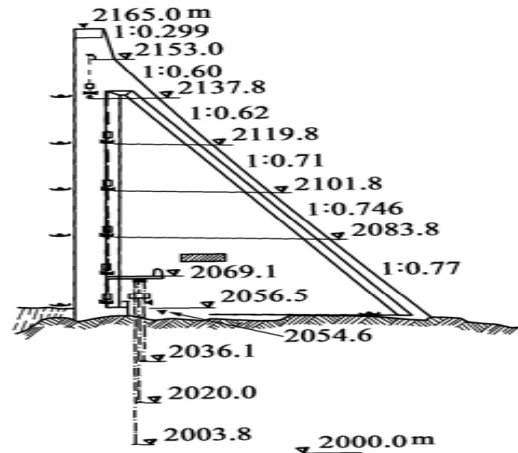
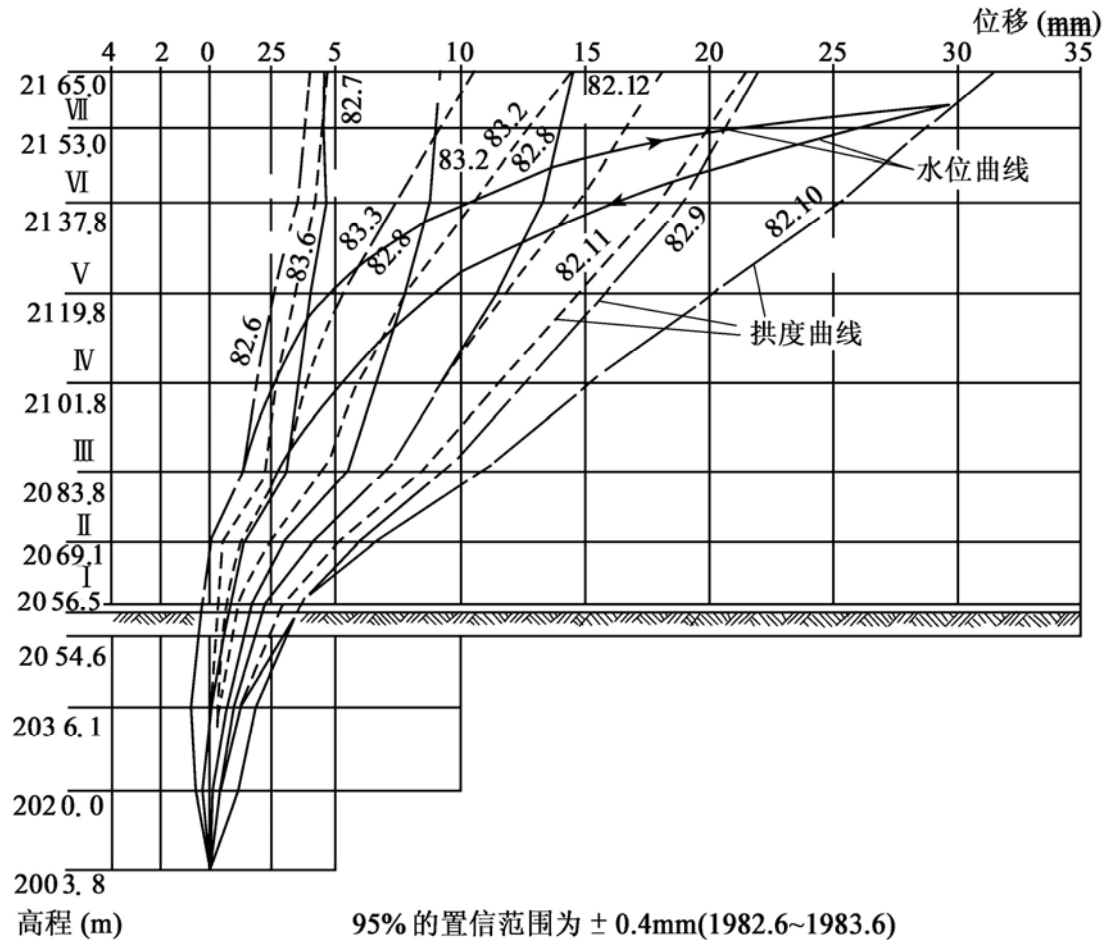


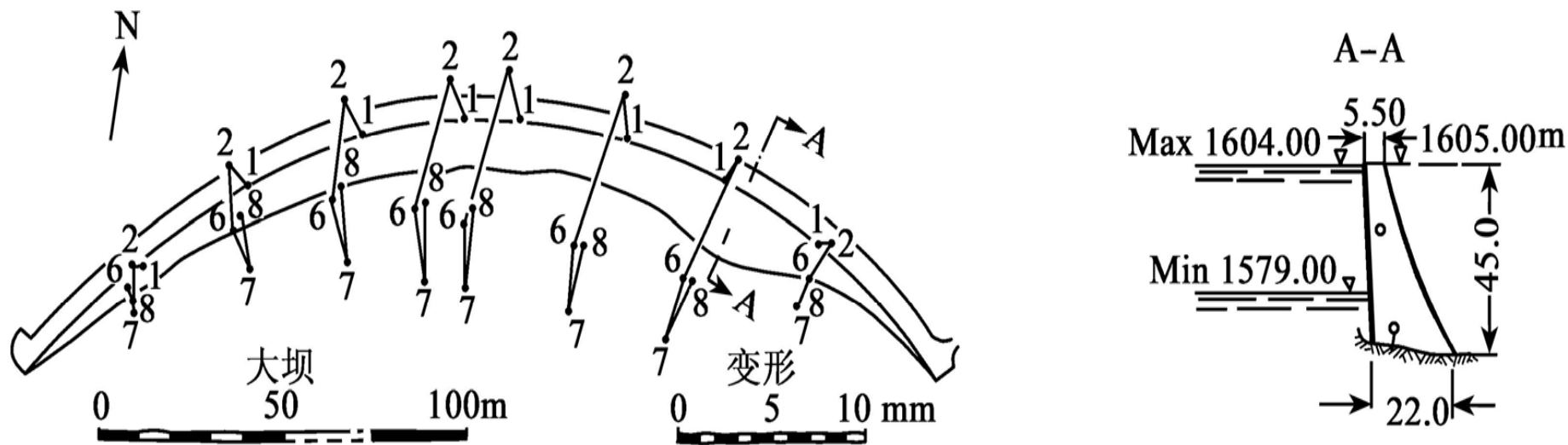


图 7-35 某大坝由测倾仪得到的挠度曲线图





# 图 7-36 多期位移矢量图



周期	日期	水位m
1	1980.06.08	空
2	1980.07.28	空
6	1981.08.16	1604
7	1982.06.18	1604
8	1983.05.20	1591



图 7-37 某滑坡体上的位移和沉降矢量图

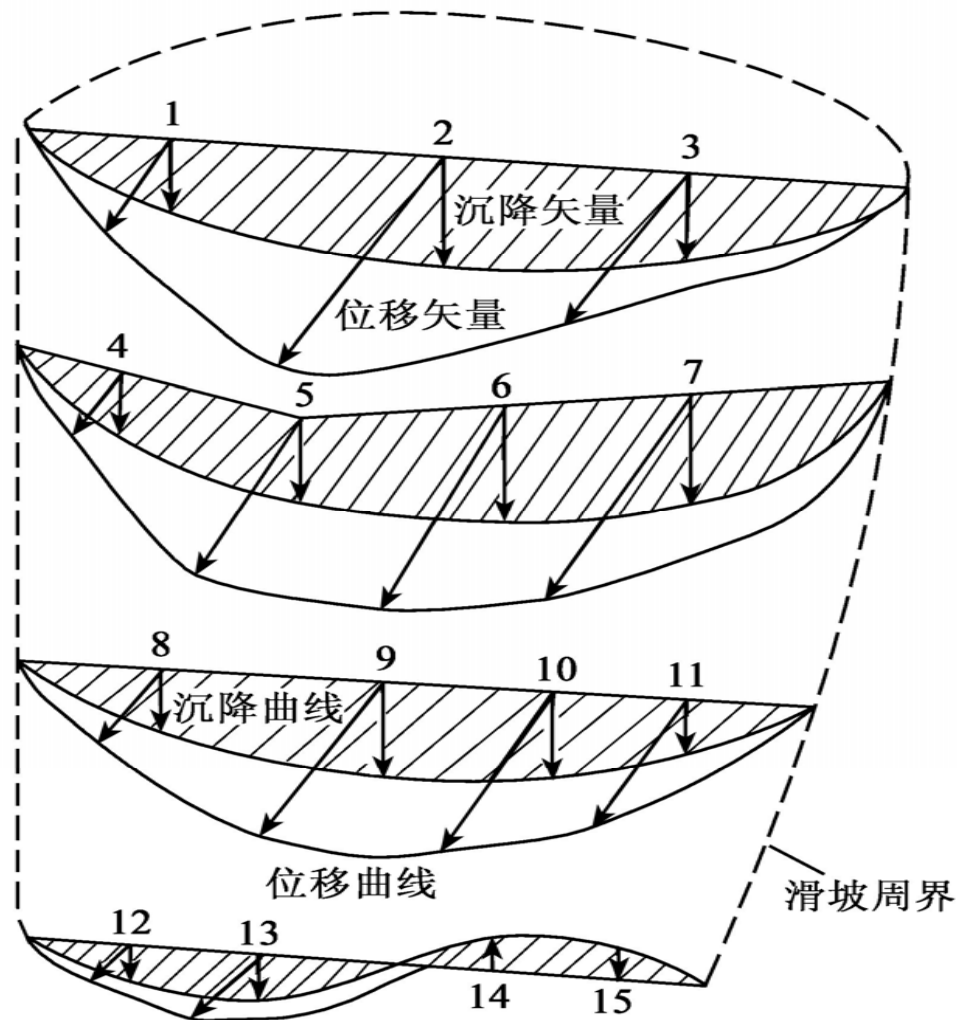






图 7-38 地表沉降的三维表达

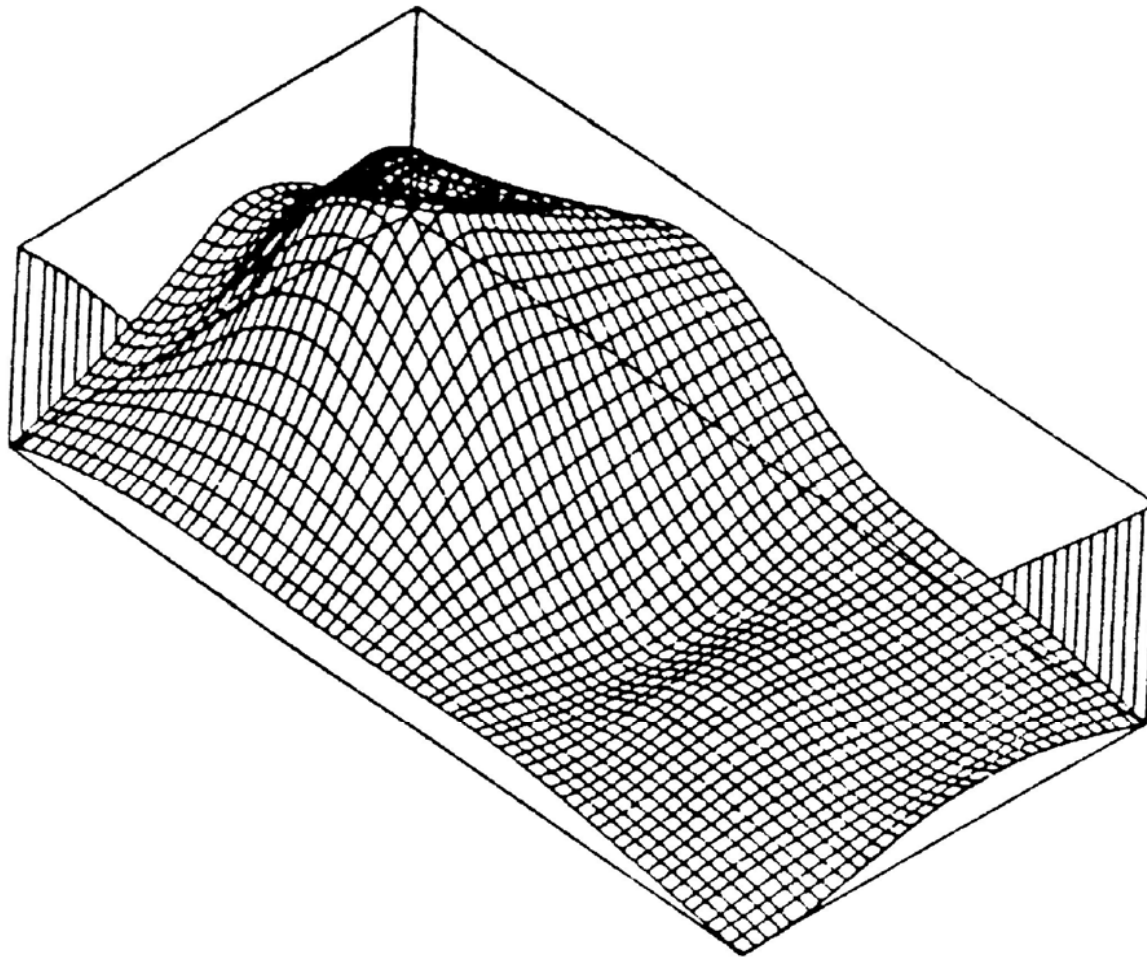
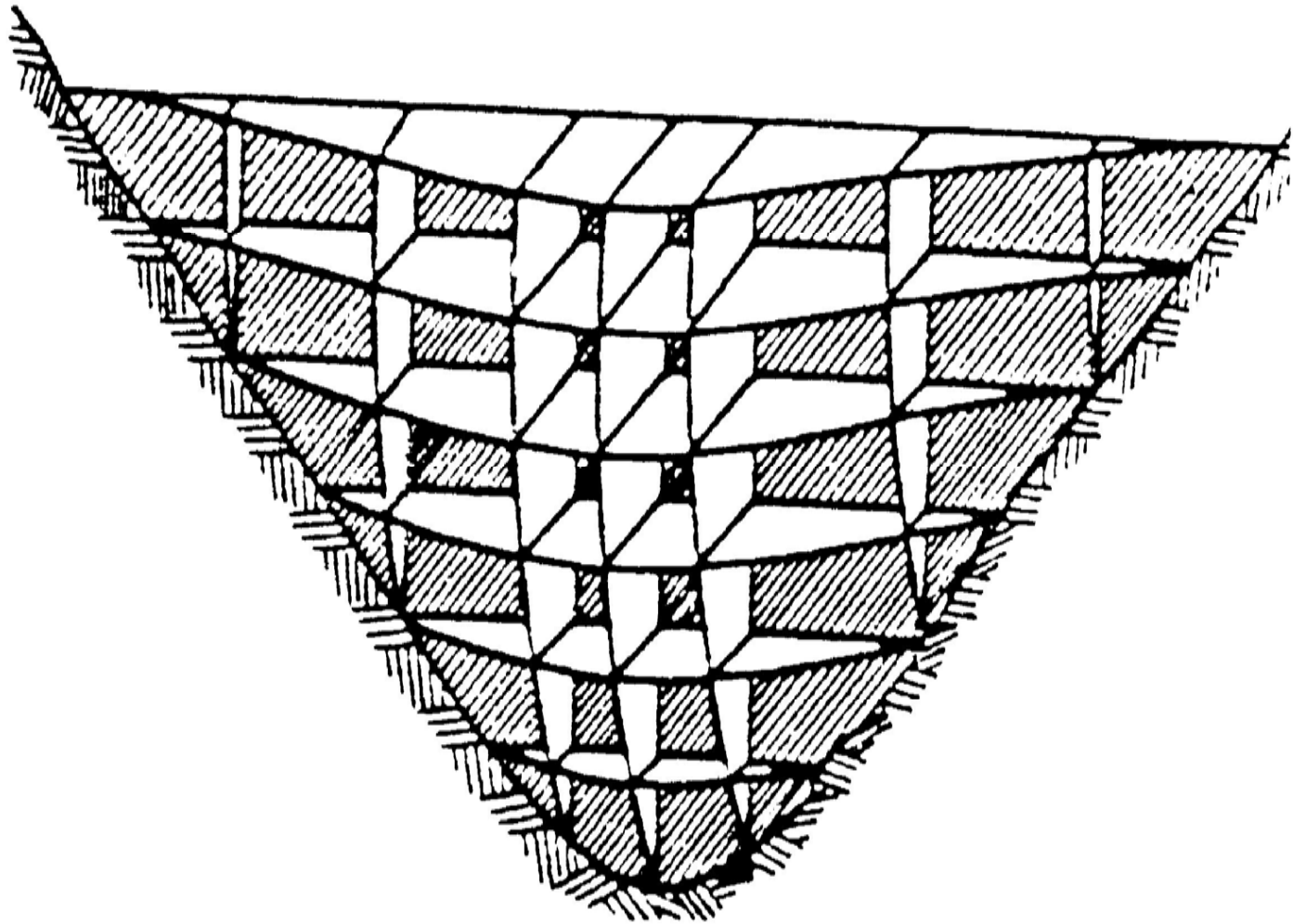




图 7 -39 大坝水平位移的立体表





## 7.5.3

# 成果解释

需要回答以下问题：

1. 性质：是为什么性质的监测？状态安全监测还是交通安全监测或运行安全监测；
2. 是否需在不同荷载情况下，对变形体的变形模型做检验验证？
3. 是否需根据岩土力学性质建立物理力学模型？
4. 工程整治的效果怎样？
5. 是否需对地球物理假设进行验证？
6. 是否需对工程建筑物进行监测和检验？
7. 采取措施后是否需做建筑物的安全证明？



谢谢大家!