

结构健康监测 GPS监测技术

伊廷华 李宏男◎编著

*Structural Health Monitoring
Based on GPS Technology*

中国建筑工业出版社

结构健康监测

GPS 监测技术

伊廷华 李宏男 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

结构健康监测 GPS 监测技术/伊廷华, 李宏男编著.
北京: 中国建筑工业出版社, 2009
ISBN 978-7-112-10764-3

I. 结… II. ①伊…②李… III. 全球定位系统(GPS)-
应用-建筑结构-监测 IV. TU311.3-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 024183 号

本书系统地介绍了结构健康监测领域中的一门新兴技术——GPS 监测技术。书中总结了作者近年来的研究成果及散现在国内外文献中的资料。全书共分九章, 内容包括: GPS 定位技术的发展概况及特点, GPS 的组成与卫星信号的结构, GPS 变形监测的基本原理, GPS 信号接收机的工作原理和分类, GPS 监测的误差来源与消除方法, GPS 监测数据的基本处理方法, GPS 结构监测系统的设计与软件开发, GPS 结构监测的工程实施及应用。

本书可作为土木工程、水利工程和工程测量等专业高年级本科生和研究生的学习用书, 也可供相关专业的科技人员参考。

* * *

责任编辑: 赵梦梅
责任设计: 赵明霞
责任校对: 刘 钰 孟 楠

结构健康监测 GPS 监测技术

伊廷华 李宏男 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京永峥排版公司制版
北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17½ 字数: 436 千字
2009 年 5 月第一版 2009 年 5 月第一次印刷
印数: 1—2500 册 定价: 49.00 元

ISBN 978-7-112-10764-3

(18021)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码: 100037)

前 言

全球定位系统 (Global Positioning System, 简称 GPS) 是 20 世纪 70 年代由美国国防部研制的新一代卫星导航定位系统, 该系统可提供高精度的导航、定位与授时服务。自从 1978 年 2 月 22 日第一颗 GPS 试验卫星发射成功, GPS 定位技术就以其高度的自动化及其所达到的高精度和具有的极大潜力, 而引起了广大科技工作者和工程技术人员的兴趣。随着硬件和软件技术的不断完善, GPS 已从最初的取代常规大地测量, 发展渗入到精密工程测量、地籍测量、地形测量、航空摄影测量、地质调查、交通管理、地理信息系统、海洋测绘、气象预报和地球科学等各个领域。

将 GPS 技术用于工程结构健康监测是近年来一个新的研究热点。早期的 GPS 监测主要是静态或准静态的监测, 直到近几年随着整周模糊度在航解算问题的解决和 RTK 技术的诞生, 长期的实时动态监测才得以迅速发展, 目前已从大坝监测扩展到地震监测、山体滑坡、地面沉降、海洋平台、高层建筑及高耸结构、大桥等复杂系统的监测。但到目前为止, 在国内外土木工程领域还没有一本专门论述 GPS 技术在结构健康监测应用中的著作, 已有著作大多限于 GPS 原理的普及和介绍, 工程应用方面的著作相对较少。鉴于此, 作者结合近年来取得的一些研究成果以及散现在国内文献中的一些相关资料, 撰写了本书, 旨在为研究者和工程技术人员提供一本内容深入浅出、覆盖面广的参考用书, 以利于这一新技术的应用和推广。

全书共分九章。第一章为绪论, 简要介绍了 GPS 定位技术的发展概况以及其在各个领域中的应用情况, 使读者对 GPS 有一个大体的了解。第二章主要介绍了 GPS 的组成与卫星信号的结构, 主要包括 GPS 的各个组成部分、坐标系统、时间系统和卫星信号的结构。第三章介绍了 GPS 变形监测的基本原理, 重点介绍了精密相对定位的观测方程及其线性化形式, 简要讨论 GPS 监测的精度评定方法和伪卫星定位技术等。第四章主要介绍了 GPS 信号接收机的基本概念和工作原理、检校和维护方法, 以及当前一些著名测量型 GPS 接收机的概况, 以供研究人员选择和使用接收机时作为参考。第五章介绍了 GPS 监测的误差来源与消除策略, 重点讨论了影响监测精度的多路径效应以及整周跳变现象。第六章介绍了 GPS 监测数据的处理方法, 内容包括基线向量的解算、坐标系统的转换以及各种常用的数据分析方法等。第七章介绍了 GPS 结构监测系统的总体设计框架, 内容包括软件平台的选择和监测仪器的选型等。第八章介绍了课题组开发的 GPS 结构健康系统, 内容包括数据采集子系统、数据处理及分析子系统、损伤识别及预警子系统以及数据管理子系统的设计与实现。第九章介绍了 GPS 结构监测技术的工程实施方法及应用, 以使读者对 GPS 监测系统的设计技术依据、数据通信方法、土建工作、防雷措施及过压保护、电力供应方案有所了解, 最后给出了一个基于有线通信和无线通信的 GPS 监测系统实例, 可供读者作为系统设计时的参考范例。



本书是作者近年来研究工作的阶段性总结。袁永博教授、王苏岩教授、伊晓东副教授和于清华工程师在试验过程中给予了热心的帮助和支持；硕士生高东伟、张永恒、薛明玉等做了大量研究工作，是他们的辛勤劳动才使得这项研究工作逐步深入，也使得本书内容丰富、翔实，在此表示衷心的感谢！

书中的研究成果得到了国家“十一五”科技支撑计划项目（2006BAJ03B05，2006BAJ06B08）、高等学校学科创新引智计划项目（B08014）、教育部长江学者和创新团队发展计划项目（IRT0518）、国家自然科学基金青年基金（50708013）、教育部高等学校博士学科点专项科研基金新教师基金（20070141036）以及中国博士后科学基金面上项目（20070420113）的资助，本书的出版得到了中国建筑工业出版社的大力支持，在此一并表示感谢！

利用GPS进行结构健康监测是一门新兴的技术，其理论和方法还在不断的发展和完善中，其应用范围也在不断地拓广和深化中，需要进一步研究和解决的问题也还有很多。由于作者水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，衷心希望读者批评指正。

作 者

2008年12月

尊敬的读者：

感谢您选购我社图书！建工版图书按图书销售分类在卖场上架，共设22个一级分类及43个二级分类，根据图书销售分类选购建筑类图书会节省您的大量时间。现将建工版图书销售分类及与我社联系方式介绍给您，欢迎随时与我们联系。

★建工版图书销售分类表（详见下表）。

★欢迎登陆中国建筑工业出版社网站www.cabp.com.cn，本网站为您提供建工版图书信息查询，网上留言、购书服务，并邀请您加入网上读者俱乐部。

★中国建筑工业出版社总编室 电 话：010—58934845
传 真：010—68321361

★中国建筑工业出版社发行部 电 话：010—58933865
传 真：010—68325420
E-mail: hbw@cabp.com.cn

建工版图书销售分类表

一级分类名称 (代码)	二级分类名称 (代码)	一级分类名称 (代码)	二级分类名称 (代码)
建筑学 (A)	建筑历史与理论 (A10)	园林景观 (G)	园林史与园林景观理论 (G10)
	建筑设计 (A20)		园林景观规划与设计 (G20)
	建筑技术 (A30)		环境艺术设计 (G30)
	建筑表现·建筑制图 (A40)		园林景观施工 (G40)
	建筑艺术 (A50)		园林植物与应用 (G50)
建筑设备·建筑材料 (F)	暖通空调 (F10)	城乡建设·市政工程· 环境工程 (B)	城镇与乡(村)建设 (B10)
	建筑给水排水 (F20)		道路桥梁工程 (B20)
	建筑电气与建筑智能化技术 (F30)		市政给水排水工程 (B30)
	建筑节能·建筑防火 (F40)		市政供热、供燃气工程 (B40)
	建筑材料 (F50)		环境工程 (B50)
城市规划·城市设计 (P)	城市史与城市规划理论 (P10)	建筑结构与岩土工程 (S)	建筑结构 (S10)
	城市规划与城市设计 (P20)		岩土工程 (S20)
室内设计·装饰装修 (D)	室内设计与表现 (D10)	建筑施工·设备安装技 术 (C)	施工技术 (C10)
	家具与装饰 (D20)		设备安装技术 (C20)
	装修材料与施工 (D30)		工程质量与安全 (C30)
建筑工程经济与管理 (M)	施工管理 (M10)	房地产开发管理 (E)	房地产开发与经营 (E10)
	工程管理 (M20)		物业管理 (E20)
	工程监理 (M30)	辞典·连续出版物 (Z)	辞典 (Z10)
	工程经济与造价 (M40)		连续出版物 (Z20)
艺术·设计 (K)	艺术 (K10)	旅游·其他 (Q)	旅游 (Q10)
	工业设计 (K20)		其他 (Q20)
	平面设计 (K30)	土木建筑计算机应用系列 (J)	
执业资格考试用书 (R)		法律法规与标准规范单行本 (T)	
高校教材 (V)		法律法规与标准规范汇编/大全 (U)	
高职高专教材 (X)		培训教材 (Y)	
中职中专教材 (W)		电子出版物 (H)	

注：建工版图书销售分类已标注于图书封底。

目 录

前 言

第一章 绪论	1
1.1 工程变形监测总论	1
1.1.1 变形监测的内容及分类	1
1.1.2 变形监测的精度和频率要求	2
1.1.3 变形监测的方法与技术	3
1.1.4 变形监测的特点	10
1.1.5 变形监测的意义	12
1.2 GPS 定位技术的发展概况及特点	12
1.2.1 早期的卫星定位技术	12
1.2.2 GPS 定位技术的由来与发展阶段	13
1.2.3 GPS 定位技术的特点	14
1.3 GPS 定位技术主要应用领域	15
1.3.1 GPS 在军事上的应用	15
1.3.2 GPS 在海陆空导航中的应用	16
1.3.3 GPS 在海洋测绘方面的应用	20
1.3.4 GPS 在大地测量方面的应用	21
1.3.5 GPS 在工程测量方面的应用	22
1.3.6 GPS 在航空摄影测量中的应用	24
1.3.7 GPS 在土木工程健康监测中的应用	24
1.3.8 GPS 在其他领域中的应用	25
参考文献	28
第二章 GPS 组成与卫星的广播信号	29
2.1 GPS 的基本组成	29
2.1.1 空间星座部分	29
2.1.2 地面监控部分	31
2.1.3 用户设备部分	32
2.2 GPS 定位的坐标系统	32
2.2.1 协议天球坐标系	32



2.2.2	协议地球坐标系	36
2.2.3	国家坐标系与地方坐标系	40
2.2.4	WGS-84 坐标系统	45
2.3	GPS 定位的时间系统	45
2.3.1	世界时系统	46
2.3.2	原子时系统	47
2.3.3	力学时系统	48
2.3.4	协调世界时	48
2.3.5	GPS 时间系统	49
2.3.6	其他计时系统	49
2.4	GPS 卫星的广播信号	50
2.4.1	GPS 卫星的伪随机测距码	51
2.4.2	GPS 导航电文	55
2.4.3	GPS 卫星载波信号	58
	参考文献	61

第三章	GPS 变形监测基本原理	63
3.1	引言	63
3.2	卫星的无摄运动	63
3.2.1	开普勒三定律	64
3.2.2	卫星运行的轨道参数	66
3.2.3	卫星的瞬时位置和瞬时速度	66
3.3	卫星的受摄运动	70
3.3.1	卫星的摄动力分类	71
3.3.2	几种主要的摄动力影响	71
3.4	GPS 定位的观测方程	73
3.4.1	GPS 的定位方式和观测量	73
3.4.2	GPS 观测方程及其线性化	75
3.5	GPS 动态绝对定位原理	80
3.5.1	测码伪距动态绝对定位	80
3.5.2	测相伪距动态绝对定位	81
3.6	GPS 静态绝对定位原理	82
3.6.1	测码伪距静态绝对定位	82
3.6.2	测相伪距静态绝对定位	82
3.7	GPS 静态相对定位原理	84
3.7.1	单差观测方程	84
3.7.2	双差观测方程	85



3.7.3	三差观测方程	86
3.8	GPS 动态相对定位原理	87
3.8.1	测码伪距动态相对定位	87
3.8.2	测相伪距动态相对定位	88
3.9	卫星几何分布对定位结果的影响	92
3.9.1	卫星几何分布的影响	92
3.9.2	伪卫星定位技术	93
	参考文献	95
第四章	GPS 信号接收机	97
4.1	引言	97
4.2	GPS 信号接收机的分类与选用	97
4.2.1	按接收机工作原理分类	97
4.2.2	按接收机的用途分类	98
4.2.3	按接收机捕获的载波频率分类	98
4.2.4	按接收机的通道数分类	99
4.3	GPS 信号接收机的组成与工作原理	100
4.4	GPS 信号接收机的检校与维护	102
4.4.1	GPS 信号接收机的检校方法	102
4.4.2	GPS 信号接收机的维护方法	104
4.5	几种常用的 GPS 信号接收机	104
4.5.1	中国中海达 GPS 信号接收机	105
4.5.2	美国 Ashtech GPS 信号接收机	107
4.5.3	加拿大 NovAtel GPS 信号接收机	110
4.5.4	美国 Trimble GPS 信号接收机	112
4.5.5	瑞士 Leica GPS 信号接收机	113
	参考文献	123
第五章	GPS 监测的误差来源与消除方法	124
5.1	引言	124
5.2	与卫星有关的误差与消除方法	124
5.2.1	卫星星历误差	124
5.2.2	卫星钟差	125
5.3	与信号传播路径有关的误差与消除方法	125
5.3.1	电离层折射	125
5.3.2	对流层折射	127
5.3.3	多路径效应与消除方法	127



5.3.4 周跳的探测与修复	140
5.4 与接收机有关的误差与消除方法	150
5.4.1 观测误差	150
5.4.2 接收机钟差	150
5.4.3 天线相位中心偏差	150
参考文献	151
第六章 GPS 监测数据的处理方法	153
6.1 引言	153
6.2 GPS 基线向量的解算	154
6.2.1 GPS 数据传输	154
6.2.2 GPS 基线解算的预处理	154
6.2.3 GPS 基线解算的模式	156
6.3 GPS 定位结果的坐标转换	157
6.4 GPS 监测数据处理常用方法	159
6.4.1 GPS 监测中的数据挖掘方法	159
6.4.2 GPS 监测中的数据融合方法	161
6.4.3 GPS 监测中的系统识别方法	162
参考文献	164
第七章 GPS 结构监测系统的总体设计	165
7.1 引言	165
7.2 结构健康监测系统的组成与研究概况	165
7.2.1 结构健康监测系统的设计原则	166
7.2.2 结构健康监测系统的设计标准	167
7.2.3 结构健康监测各个子系统的研究概况	169
7.2.4 结构健康监测集成系统典型工程应用	177
7.3 虚拟仪器技术	181
7.3.1 虚拟仪器技术的概念	181
7.3.2 虚拟仪器的组成	182
7.3.3 虚拟仪器的特点及优越性	183
7.4 软件开发环境及 LabVIEW 平台	184
7.4.1 软件开发环境的选择	184
7.4.2 LabVIEW 开发平台	185
7.5 GPS 结构监测系统的设计方案	188
7.5.1 GPS 结构监测系统的总体设计方案	188
7.5.2 传感器的选型与配置	189



7.5.3 数据采集仪器的选型	191
参考文献	192
第八章 基于虚拟仪器技术的 GPS 结构监测系统开发	197
8.1 引言	197
8.2 数据采集子系统	198
8.2.1 硬件采集仪器	199
8.2.2 数据采集软件程序流程	199
8.3 数据处理及分析子系统	203
8.3.1 数据处理及分析系统程序流程	203
8.3.2 数字滤波器的设计	204
8.3.3 虚拟小波消噪仪的设计	207
8.3.4 数据分析模块的设计	209
8.4 损伤识别及预警子系统	214
8.4.1 损伤识别系统程序流程	214
8.4.2 声、光预警方法及程序流程	215
8.5 数据管理子系统	217
8.5.1 LabVIEW 与数据库的连接	218
8.5.2 DCT 的配置	219
8.5.3 数据管理系统程序设计	219
8.5.4 网络安全技术	222
8.6 监测系统的测试与应用	225
8.6.1 模型设计与制作	225
8.6.2 试验过程及结果分析	225
参考文献	228
第九章 GPS 结构监测的工程实施及应用	230
9.1 引言	230
9.2 GPS 结构监测的工程实施方法	230
9.2.1 GPS 结构监测的技术依据	230
9.2.2 GPS 结构监测的数据通信方法	231
9.2.3 GPS 结构监测的土建工作	239
9.2.4 GPS 设备的防雷措施及过压保护	240
9.2.5 GPS 设备的电力供应方案	244
9.3 GPS 多路径误差信号监测试验	248
9.3.1 GPS 多路径信号监测系统的设计	248
9.3.2 GPS 多路径信号监测系统的建立	248



目 录

9.3.3 GPS 多路径误差信号监测试验	250
9.4 大连世贸大厦 GPS 动态变形监测	253
9.4.1 大连世贸大厦动力分析	254
9.4.2 大连世贸大厦 GPS 监测系统设计	256
9.4.3 大连世贸大厦 GPS 现场监测	263
参考文献	268

1.1 工程变形监测总论

变形是自然界普遍存在的现象，它是指变形体在各种荷载作用下，其形状、大小及位置在时间域和空间域的变化。变形监测是指周期性地对设置在建筑物上的监测点进行重复监测，求得监测点各周期相对于首期的点位或高程变化量。其目的是监视建筑物在施工中和竣工后使用过程中的安全情况；验证地质勘察资料和设计数据的可靠程度；研究变形的原因和规律，以改进设计理论和施工方法等。变形监测是多种技术的综合，目前正向着边缘学科的方向发展，同时随着理论和设备的进步，变形监测已从单一的、范围受限、工作量大的作业手段发展成为使用方法多样、范围广大、自动化程度高的新技术^[1]。

1.1.1 变形监测的内容及分类

变形监测的研究内容应具有明确的针对性，既要有重点，又要做到全面考虑，才能正确地反映出变形体的变化情况，达到监视变形体的安全、了解其变形规律的目的。根据变形体的研究范围，变形监测的研究对象可划分为三类：

- (1) 全球性变形研究，如监测全球板块运动、地极移动、地球自转速率变化、地潮等；
- (2) 区域性变形研究，如地壳变形监测、城市地面沉降等；
- (3) 工程和局部性变形研究，如工程建筑物的三维变形、坡体的滑动、地下开采时引起的地表移动和下沉等。

通常土木工程中所说的变形监测主要是指针对建筑物及场地的变形监测，它可分为以竖向位移为主的变形监测和以水平位移为主的变形监测^[2]。

对于以竖向位移为主的变形观测，其方法是首先根据建筑场地的地形、地质条件和对变形观测的精度要求，合理布设变形控制网点。在建筑物附近比较稳固的位置埋设工作基点，直接用以测定建筑物上观测点的位移，且应尽可能在变形影响以外的稳固位置埋设基准点，用以检核工作基点本身的稳固性。工作基点与基准点一般都组成网形，用精密水准测量的方法来施测和检验。高程变化值的测定通常采用精密水准方法，也可用液体静力水准仪、气泡倾斜仪、电子水准器等进行测量。常见的竖向变形观测包括：

- (1) 基坑回弹测量：在基坑开挖前、中、后期，测出事先埋设在基底面上的观测点，由于基坑开挖而引起的高程变化。开挖前和开挖后两次的高程差为基坑的总回弹量。
- (2) 地基分层沉降测量：测出埋设在不同土层上的观测点因荷载增加而引起的高程变化，以求得各土层的沉降量和受压层的最大深度。
- (3) 建筑物的沉降测量：测出建筑物或基础上的观测点，因时间推移或因地基发生变



化所引起的高程差异,比较不同时期的观测值即得沉降量。

对于以水平位移为主的变形观测,其方法除在稳定地区建立变形控制网,检验工作基点或基准点的稳固性外,通常使用测角前方交会法、经纬仪投影法、观测水平角法、激光准直法和垂线观测法等,来定期测定观测点的位置变化。对于特定方向的水平位移,还可用视准线法和引张线法进行观测。常见的水平变形观测包括:

(1) 倾斜观测:测定建筑物顶部由于地基的差异沉降或受外力作用而产生的竖向偏差。通常在顶部和墙基设置观测点,定期观测其相对位移值,也可直接观测顶部中心点相对于底部中心点的偏移值,然后推算建筑物的倾斜度。

(2) 位移观测:测定建筑物因受侧向荷载的影响而产生的水平位移量。观测点的建立应视工程情况和位移的方向而定。

(3) 裂缝观测:测出建筑物因基础有局部不均匀沉降而使墙体出现的裂缝。一般需在裂缝两侧设置观测标志,定期观测其位置变化,以获取裂缝的大小和走向等资料。

(4) 挠度观测:测定建筑物受力后产生的挠曲程度。一般测定设置在建筑物垂直面内不同高度观测点相对于底点的水平位移值。

(5) 摆动和转动观测:测定高层建筑和高耸构筑物在风振、地震、日照等外力作用下的摆动量和扭曲程度。

1.1.2 变形监测的精度和频率要求

与其他测量工作相比,变形监测的精度要求较高。合理确定变形监测的精度十分重要,过高的精度要求使得监测工作变得复杂,增加监测费用和时间;而精度定的太低又会增加变形分析的困难,使所估计的变形参数误差较大,甚至会得出不正确的结论。不同类型的工程建筑物,变形监测的精度要求差别较大。对于同类工程建筑物,根据其结构、形状不同,要求的精度也有差异。此外,即使同一建筑物,不同部位的精度要求也不同。

制订变形监测的精度主要取决于变形的大小、速率、仪器和方法所能达到的实际精度,以及观测的目的等。一般来说,如果变形监测是为了使变形值不超过某一允许值,以确保建筑物的安全,则其监测的误差应小于允许变形值的 $1/10 \sim 1/20$;如果是为了研究变形的过程,则其误差应比上面这个数值小得多,甚至应采用目前测量手段和仪器所能达到的最高精度。我国《建筑变形测量规程》(JGJ/T 8—97)^[3]对建筑变形测量的等级划分及其精度要求如表1.1所示。

建筑变形测量的等级划分及其精度要求

表 1.1

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	≤ 0.05	≤ 0.3	特高精度要求的特种精密工程和重要科研项目变形观测
一 级	≤ 0.15	≤ 1.0	高精度要求的大型建筑物和科研项目变形观测



续表

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)	
二 级	≤ 0.50	≤ 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	≤ 1.50	≤ 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

注：1. 观测点测站高差中误差，系指几何水准测量测站高差中误差或静力水准测量相邻观测点相对高差中误差；
2. 观测点坐标中误差，系指观测点相对测站点（如工作基点等）的坐标中误差、坐标差中误差以及等价的观测点相对基准线的偏差值中误差、建筑物（或构件）相对底部定点的水平位移分量中误差。

变形监测的频率大小应能反映出变形体的变形规律，并可随单位时间内变形量的大小而定。变形量较大时，应增大监测频率；变形量减小或建筑物趋于稳定时，则可减小监测频率。一般而言，变形测量的观测周期应符合下列要求：

(1) 对于单一层次布网，观测点与控制点应按变形观测周期进行观测；对于两个层次布网，观测点及联测的控制点应按变形观测周期进行观测，控制网部分可按复测周期进行观测。

(2) 变形观测周期应以能系统反映所测变形的变化过程且不遗漏其变化时刻为原则，根据单位时间内变形量的大小及外界因素影响确定。当观测中发现变形异常时，应及时增加观测次数。

(3) 控制网复测周期应根据测量目的和点位的稳定情况确定，一般宜每半年复测一次。在建筑施工过程中应适当缩短观测时间间隔，点位稳定后可适当延长观测时间间隔。当复测成果或检测成果出现异常，或测区受到如地震、洪水、爆破等外界因素影响时，应及时进行复测。

(4) 变形测量的首次（即零周期）观测应适当增加观测量，以提高初始值的可靠性。

(5) 不同周期观测时，宜采用相同的观测网形和观测方法，并使用相同类型的测量仪器。对于特级和一级变形观测，还宜固定观测人员、选择最佳观测时段、在基本相同的环境和条件下观测。

1.1.3 变形监测的方法与技术

变形监测的方法应由建筑物的性质、使用情况、监测精度、周围环境及对监测的要求来定，不同的监测要求需要选择不同的方法和仪器。例如，对于局部性的外观变形监测和精密水准测量而言，高精度的三角、三边、边角测量方法以及测量机器人是监测的良好手段和方法；而钻孔倾斜仪、多点位移仪则非常适合工程建筑物内部的变形观测。总体而言，仪器选择应遵循以下原则^[2]：

(1) 观测仪器的选择必须从监测的实际情况出发，选用的仪器应能满足监测精度的要求；



(2) 在选用仪器时,既要注意环境条件,又要避免盲目追求精度;

(3) 仪器应该有足够的量程,一般要满足监测的要求;

(4) 一般说来,电测仪器的适应性不如机械仪器仪表,而机械仪器仪表的适应性又不如光学仪器。因此,应根据实际情况,采用既简便易行又符合要求的仪器仪表。

目前常用的建筑物变形监测方法包括:常规大地测量方法、特殊测量手段、摄影测量方法、测量机器人以及3D扫描技术、GPS测量技术等。表1.2列举了这些常用监测方法所使用的仪器以及它们的精度对比情况。

常用变形监测方法

表 1.2

方 法	仪 器	精 度	适用性评价
常规大地测量方法	全站仪、水准仪、经纬仪、测距仪	可满足不同精度要求	灵活性大,能适用于不同结构形式的建筑物,缺点是受地形通视和气候条件影响,难以实现自动化监测
特殊测量手段	机械位移计	百分表精度 0.01mm 千分表精度 0.001mm	精度较高,测量过程简单,易实现连续监测和自动化观测,能够提供局部观测信息,缺点是不如常规测量仪器灵活
	位移传感器	可以达到 0.01mm	
	测角仪	与距离有关,最高可达 1mm	可以测量建筑物的挠度、高层建筑物的倾斜、基础的沉降
	准直测量	一般精度 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ mm	可以测量建筑物的横向位移,精度较高,且易实现自动化,缺点是不如常规测量仪器灵活
摄影测量方法	摄影经纬仪	可达毫米级	观测精度低,有时不能满足要求,各监测点不同步,精度与建筑物的形状、大小有关,受自然地理条件限制
	数码相机		
	测量机器人	$1\text{mm} + 1 \times 10^{-6}$	能够观测建筑物的沉降、位移、倾斜量等,易于实现自动化。但测点不同步,且受气候条件影响,不能全天候监测
	3D扫描	1 ~ 5mm	精度较高,测量过程迅速、全面,不需要大量监测点布置,易于实现动态和自动化监测,缺点是内部结构隐蔽点的信息难以获得
	GPS RTK方式	平面 $10\text{mm} + 1 \times 10^{-6}$ 垂直 $20\text{mm} + 1 \times 10^{-6}$	全天候监测、操作简单、自动化程度高、定位速度快,缺点是平面精度高、高程精度低

下面就分别简单介绍一下上述的六种方法:

(1) 常规大地测量方法

常规测量仪器(水准仪、经纬仪、测距仪、全站仪)主要是通过测量角度、边长和高