

岩土工程计算机实时监测系统的应用研究

崔玉亮

于 凤

(天津大学 天津 300072)

(山东矿业学院 泰安 271019)

摘要 论述现代化岩土工程监测系统的技术特征及基本功能, 给出系统原理框图及层次结构。以谐振弦式传感器为基础, 研究其理论设计依据及现代测试技术。分析了两大类传输体制, 设计了相应的系统硬件及软件, 并给出系统在顶板来压监测预报、煤体支承压力分布研究、地音监测及冲击地压预报、综采支架工况监测等岩土工程领域中的应用实例。

关键词 监测系统, 谐振式传感器, 测试技术, 传输体制, 顶板预报, 地音监测

1 引言

当前在岩土工程领域, 无论是长期安全监测还是科学研究的需要, 对监测系统性能要求越来越高。归纳起来, 系统技术特征主要表现在“五化”: (1) 监测参数多样化; (2) 参数传感器数字化; (3) 测试技术智能化; (4) 信息传输处理实时化; (5) 系统结构网络化。本文论述的岩土工程用计算机实时监测系统, 代表了这一发展趋势。文中从传感器、系统结构、传输体制、分站、中心站、软件等方面进行论述, 并给出实际工程的应用实例。

2 监测系统基本功能及原理框图

现代化岩土工程监测系统的基本功能有:

- (1) 多通道多参数自动连续监测及记录功能;
- (2) 局部集中、总体分散式智能型信息传输网络功能;
- (3) 参数自适应测试及信息实时处理功能;
- (4) 信息融合、特征揭示及机理识别功能;
- (5) 对监测对象准确和及时预警功能;
- (6) 优化监测信息管理及分析决策功能;
- (7) 专家系统功能。

特定的监测系统功能是上述功能集的子集, 系统原理框图及层次结构分别如图 1a、图 1b 所示。

系统的基础层是传感器, 实现被测非电量(如压力、应力、载荷、位移等)到电量的变换。中间层是分站, 完成参数采集和传输功能。核心层是信息处理中心站, 由微机系统和传输控制系统组成, 对信息进行接收、处理、存储、输出, 并具有自诊断功能。

1995年2月23日收到初稿, 1995年7月3日收到修改稿。

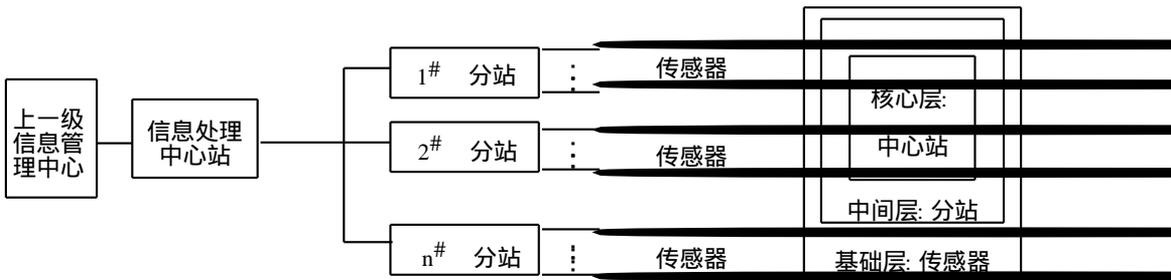


图1 (a) 监测系统原理图

(b) 系统层次结构

Fig 1 (a) Functional block diagram of the monitoring system

(b) Layer structure of the system

3 谐振弦式传感器及其现代测试技术

3.1 传感器信号制式选择原则

传感器是监测系统的基础, 其性能将直接影响到整个系统。传感器信号制式的选择原则是: 优先选择频率型, 其次是电流型、电压型等。在岩土工程领域中, 应加强设计和应用谐振弦式传感器。其突出优点是:

- (1) 输出信号为频率型信号, 可实现高精度测量, 并且不会因传输而降低精度, 适合于远距离传输;
- (2) 可不经 A/D 转换而方便地与计算机连接, 具有数字传感器特征;
- (3) 整体式牢固的机械结构, 可靠性好, 长期稳定性也好。

3.2 谐振弦式传感器设计依据

以竖式结构谐振弦式压力传感器为例, 其周边固定的承压圆平膜片的中心挠度:

(1) 不带硬中心膜片

$$W_o = \frac{3(1 - \mu^2)R^4}{16E_1h^3}P \tag{1}$$

(2) 带硬中心膜片

$$W_o = \frac{3(1 - \mu^2)R^4}{16E_1h^3} \left(1 - \frac{r^4}{R^4} - 4 \frac{r^2}{R^2} \ln \frac{R}{r}\right)P \tag{2}$$

式中: R —— 膜片半径; r —— 硬中心半径; E_1 —— 膜片材料的弹性模量; h —— 膜片厚度; μ —— 膜片材料的泊松比; P —— 膜片承受的压力。

统一起见, 记 $W_o = KP$, 其中 K 是常数。在 P 作用下, 振弦引起的附加纵向变形量等于 W_o , 令张紧的均匀柔性弹性弦作微幅横向振动, 经推导可得出:

$$f^2 = f_o^2 - \frac{E_2K}{4l^3\rho}P \tag{3}$$

式中: f_o —— 当 $p = 0$ 时的频率; l —— 振弦工作长度; ρ —— 弦体密度; E_2 —— 弦材料的弹性模量。

传感器的灵敏度:

$$\frac{df}{dp} = - \frac{E_2K}{8l^3\rho f} \tag{4}$$

可见, $f-p$ 特性及灵敏度特性均是非线性的。适当选取膜片及弦的材料和尺寸, 可获得所需要的灵敏度。

3.3 谐振弦式传感器现代测试技术

3.3.1 利用单片机实现频率信号的多倍周期测量方法

传感器输出的频率信号经放大、整形后, 接入MCS-51系列单片机的 T_0 引脚。令 T_0 为计数器, 工作于方式1, 作为周期数计数器, 对频率信号 f 的下降沿加“1”计数; 令 T_1 为定时器, 工作于方式1, 作为参考脉冲数计数器, 对 f_r 加“1”计数, 其中 $f_r = f_{osc}/12$, f_{osc} 是单片机晶振频率。在单片机控制下, 在准确的 mT (m 是正整数, $T = 1/f$) 时间间隔内, 参考脉冲计数器对 f_r 计数。设计数值为 N , 则:

$$\frac{m}{f} = \frac{N}{f_r} \tag{5}$$

从而
$$f = \frac{m}{N} f_r \tag{6}$$

误差分析:

绝对误差
$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial f_r} \Delta f_r + \frac{\partial f}{\partial N} \Delta N = \frac{m}{N} \Delta f_r - \frac{m f_r}{N^2} \Delta N \tag{7}$$

相对误差
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta f_r}{f_r} - \frac{\Delta N}{N} + \frac{f}{m f_r} \tag{8}$$

可见, 增大 m 、 f_r 可提高测量精度。

3.3.2 测量分辨率

测频分辨率
$$R_1 = \frac{1}{T m f_r} \tag{9}$$

测压分辨率
$$R_2 = \frac{1}{(T - T_0) m f_r} \tag{10}$$

式中: $T = 1/f$, $T_0 = 1/f_0$

基本的谐振弦式传感器的分辨率是无限的, 采用多倍周期测量技术后, 选择适当的 f 、 m , 可实现高分辨率测量。

3.3.3 静态综合误差合成方法

在静态标定试验中, 设对谐振弦式传感器输入量 X 共分 n 档 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 进行重复标定。对每标定档 x_i , 得到 m 个输出值 $y_{ij} (j = 1, 2, \dots, m)$, 从而有:

$$y_{ij} = f(x_i, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p) + \epsilon_{ij} \tag{11}$$

其中 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ 是未知参数, $\epsilon_{ij} (i, j)$ 相互独立, 且 $\epsilon_{ij} \sim N(0, \sigma)$ 。

利用逐步回归方法进行多项式回归分析, 得 y 估计值:

$$\hat{y} = \sum_{i=0}^p b_i x^i \tag{12}$$

其中 b_i 是 β_i 的最小二乘估计。

第 i 档的随机误差
$$S_i^2 = \frac{1}{m - 1} \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \tag{13}$$

式中 $\bar{y}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{ij}$

第 i 档的系统误差
$$\Delta C_i = \bar{y}_i - \hat{y}_i \tag{14}$$



由各档随机误差合成综合随机误差:

$$S_r^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i^2 \quad (15)$$

由各档系统误差合成综合系统误差:

$$S_s^2 = \frac{m}{n - p - 1} \sum_{i=1}^n \Delta C_i^2 \quad (16)$$

$$\text{综合误差 } S_t = \sqrt{\frac{nm - n}{nm - p - 1} S_r^2 + \frac{n - p - 1}{nm - p - 1} S_s^2} \quad (17)$$

4 监测系统传输体制及硬件设计

4.1 传输体制

现代化监测系统信息传输体制主要有两大类,一类是频分多路传输体制(简称 I 类),另一类是时分多路传输体制(简称 II 类)。

对 I 类传输体制,各路信号分别被调制到不同频段上同时传输,在接收端解调出各路信号,实现信道的频率划分。

对 II 类传输体制,现在基本上都采用数字传输方式。该方式又分基带传输方式和频带传输方式。基带传输中,宜用光电耦合电流传输方式或平衡隔离传输方式。频带传输中,多采用数字调频方式。

4.2 监测系统硬件设计

4.2.1 I 类系统

分站原理框图如图 2 所示。

谐振弦式传感器输出的频率信号,经适当分频后成为 5Hz~15Hz 统一调制信号进行调制发送。对其它类型传感器(输出为电压、电流或电阻),则需加输入模块、V/F 转换器等。

中心站原理框图如图 3 所示。

4.2.2 II 类系统

系统框图如图 4 所示。

对基带 NRZ 编码传输系统,通讯接口为光耦或平衡隔离传输接口;对数字调频式频带传输系统,通讯接口为 MODEM。

5 实时监测系统软件设计

既可以在多任务实时操作系统环境中开发系统软件,也可以在 MS-DOS 环境下,通过二次开发,建立多任务内核,使其具有前后台工作能力。带智能型分站实时监测系统软件菜单一般层次结构如图 5 所示。

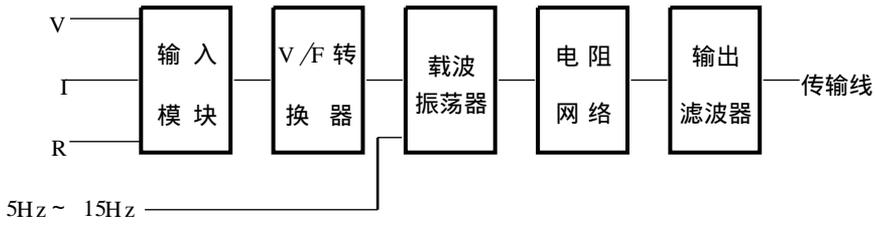


图 2 分站原理框图

Fig 2 Functional block diagram of the substation

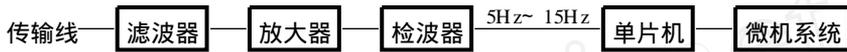


图 3 中心站原理框图

Fig 3 Functional block diagram of the central station

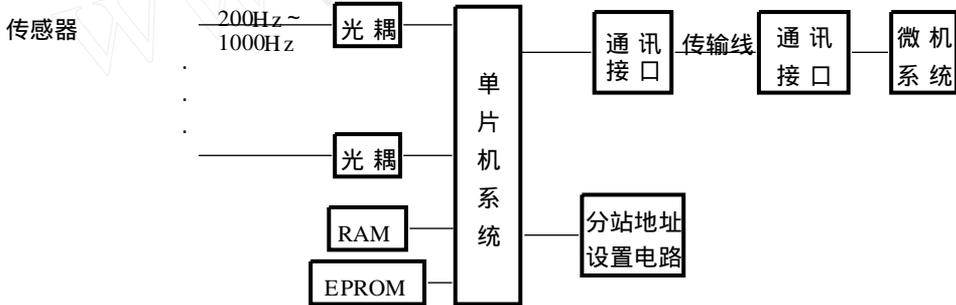


图 4 系统框图

Fig 4 Block diagram of system

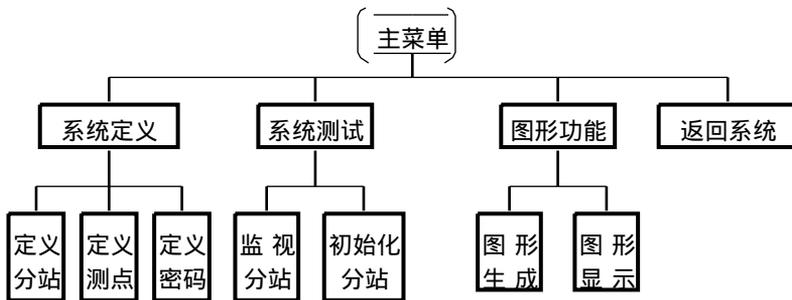


图 5 系统软件菜单层次结构

Fig 1 Layer structure of the system software menu

6 工程应用实例

6.1 顶板来压监测预报

6.1.1 意义

我国煤矿顶板死亡事故约占总死亡事故的 40%，而回采工作面顶板死亡事故又约占顶板死亡事故的 80%，对回采工作面中坚硬顶板实施监测预报，可实现安全高效生产，具有重大的社会效益。

6.1.2 监测方法

在工作面上下顺槽煤壁前方附近布置监测顶底板移近速度的测区。每个测区布置 4~6 台高分辨率大量程钢弦式位移传感器，间距 3m~5m，随工作面推进将靠近煤壁 2m 左右的位移传感器移设至前方。

传感器与分站相连，通过传输线将信号传至地面中心站，由计算机计算移近速度并储存。在计算机控制下，实现自动定时检测。

6.1.3 预报机理

以监测系统获得的数据为基础，利用模糊数学理论，建立煤矿超前巷道顶底板相对移近速度变化的戒下隶属函数模型，确定判别前兆异常的无量纲的阈值，根据异常次数作出来压预报。初压和周压分别出现 3 次和 2 次异常，据此进行预报，如表 1 所示。对坚硬顶板，预报可提前 4 天左右，对中硬顶板，提前 1 天~3 天。

表 1 顶板来压预报信息表

Table 1 Information table for the prediction of roof pressure

异常情况	初次来压预报信息	周期来压预报信息
第一次	预报老顶将第一次断裂	预报老顶将从煤壁前方断裂
第二次	预报老顶将第二次断裂	预报老顶周期来压
第三次	预报老顶初次来压	

6.1.4 预报实例

在木城涧矿千军台坑具有强烈初次和周期来压的 10 槽煤工作面及杨村矿有明显初次和周期来压的 16 上煤层工作面，成功地进行了 13 次顶板来压预报，其中初次来压 4 次，周期来压 9 次，为保证工作面安全生产提供了准确的信息，受到现场欢迎。

6.2 煤体支承压力分布研究

6.2.1 KGH-80 型钻孔测力计

KGH-80 型钻孔测力计安装在顺槽煤体中，监测支承压力受采动影响发生的变化，其结构示意图如图 6 所示。前端为带斜楔的油压枕，后边接液压钢弦测力计。使用时，利用 $\Phi 45\text{mm}$ 深孔钻钻孔，用 TS-1 型推送器推动承压板沿斜楔前进，可与孔的上下壁紧密接触，以反映煤体内受采动而引起的压力变化。

6.2.2 监测实例

在千军台坑 741003 工作面下巷内, 从煤壁前方 20 5m 处, 依次安装 4 台钻孔测力计, 平均间距为 3 3m, 工作时间为 29 天。

1. 钢弦测力计 2 楔块 3 油压枕

图 6 钻孔测力计结构示意图

Fig 6 Schematic diagram of borehole stress meter

分析所测数据发现, 工作面前方煤体支承压力峰值在 5m~ 8m 范围内, 支承压力的剧烈作用范围达到工作面前方 15m 左右, 明显作用范围达到工作面前方 20m 左右。

6 3 地音监测预报

6 3 1 基本原理

地音探头拾取的岩石声发射信号, 通过分站内的单片机进行就地处理, 形成反映声发射频度的每分钟事件数、大事件数和反映其声发射频度的每分钟能率数。数据经传输系统连续地传至地面中心站进行处理。由于可实现地音自动连续监测, 为顶板来压预报及冲击地压预报提供了有力的依据。

6 3 2 顶板来压预报

在千军台坑进行 8 个月的地音遥测, 共获得 4 次来压的完整资料, 其中直接顶初次垮落 1 次, 老顶周期来压 3 次。每次来压之前都有明显的前兆, 表现为事件数、大事件数及能率数的 3 次平滑曲线上出现同步上升的双峰, 而在第 2 个波峰出现之后约 1 天~ 2 天(时间与采掘推进有关)来压发生。

6 3 3 冲击地压预报

在华丰矿进行 3 个月的冲击地压监测, 发现岩体声发射信息表现出了特别明显的冲击地压前兆, 前兆过去之后约 24 小时冲击地压发生。大的冲击地压之后应力并未完全消除, 还不断有余震及顶板下塌发生, 仪器监测仍能清楚地看到余震前兆。

6 4 综采支架工况监测

6 4 1 意义

实时监测综采支架工况, 有利于及时采取措施, 将事故消灭在萌芽状态, 并且可以对支护质量进行准确评价, 有利于保证支护质量, 提高生产效率。

6 4 2 监测内容及实例

综采支架工况实时监测系统, 采用 ZGH- 60 型钢弦式压力传感器, 对支架前探梁、前柱、后柱的阻力进行监测。在鲍店矿 2305- 1 工作面, 共监测 92 点, 其中支架 90 点(30

架), 泵站 2 点。系统进行 6 个月的工业试验, 达到了预期目的, 并通过了部级鉴定。

参 考 文 献

- 1 崔玉亮: 高分辨率钢弦式位移遥测系统研究 电子测量与仪器学报, 1994; 8(2): 31- 36
- 2 Giovanni: Flat and Corrugated Diaphragm Design Handbook. Wadsworth Pub. Comp., California: 1982; 7- 15
- 3 Richard C. Meyer: A New digital pressure transducer. ISA Transactions, 1973; 12: 61- 67
- 4 Draper and Smith: Applied Regression Analysis. John Wiley, London: 1981

APPLICATION STUDY OF COMPUTER-CONTROLLED REAL-TIME MONITORING SYSTEM IN GEO TECHNICAL ENGINEERING

Cui Yuliang

Yu Feng

(Tianjin University, Tianjin 300072) (Shandong Mining Institute, Tai'an 271019)

Abstract The technical features and fundamental functions of a modern monitoring system for geotechnical engineering are described. The theoretical design and modern measuring technique of the vibrating wire transducers are investigated. Two types of transmission system are analyzed and the hardware as well as softwares of corresponding monitoring systems are designed. The monitoring system can be used to solve many problems in geotechnical engineering, such as roof pressure monitoring and prediction, study of abutment pressure distribution of coal mass, powered supports monitoring in the fully mechanized coal face, and some practical application examples are also given.

Key words monitoring system, resonant transducers, measuring technique, transmission system, prediction of roof pressure

下期内容简介

下期将集中发表应用于岩石力学与工程的 3 维有限元、3 维离散元、DDA、FLAC、耦合计算等数值分析方面的文章以及岩石力学在水利与矿山工程中的应用方面的论文多篇。随着我国基本建设的持续发展, 道路、桥梁、厂房和高层建筑物的地基加固与处理中的岩土力学问题越来越引起人们的关注。自下期起, 《岩石力学与工程学报》也将注意发表方面的文章。