

基于霍尔效应的土沉降监测方法及装置

闫子壮, 李青, 王燕杰, 贾生尧

(中国计量大学 机电工程学院, 杭州 310018)

摘要: 针对我国目前土沉降监测的自动化程度及仪器可靠性低、监测数据不及时、测量精度不高等问题, 提出了一种新型基于霍尔效应的科学监测方法; 这种方法采用多个霍尔器件组成阵列, 将沉降磁环分布在土中, 土的沉降会带动沉降磁环的跟随沉降, 于是便会引起霍尔器件周围磁场强度发生相应的变化; 利用霍尔效应监测霍尔器件周围磁场强弱并转化为相应的电信号, 采用 RS485 总线通讯方式将采集到的数据实时上传至实验主机, 主机对实验数据进行科学建模处理找到沉降磁环沉降位移与电信号的关系, 并设计监测管理平台以实现实时在线监测; 通过实验验证这种监测方法监测精度最高误差在 0.4 mm、稳定性好, 可以对多点实时在线监测, 从而实现土沉降的智能高精度监测; 在设计中可结合当前远程传输控制技术实现数据远程共享, 具有更加广泛的应用前景。

关键词: 霍尔效应; 土沉降; 在线检测; 485 总线通讯

Method and Device for Soil Settlement Monitoring Based on Hall Effect

Yan Zizhuang, Li Qing, Wang Yanjie, Jia Shengyao

(Institute of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A new scientific monitoring method based on Hall effect is proposed to solve the problem of low degree of automation and low reliability, low monitoring data and low measurement accuracy. This method uses a number of Hall devices to form an array, the settlement of the magnetic distribution in the soil, the settlement of the soil will lead to the settlement of the magnetic ring to follow the settlement, so it will cause the Hall device magnetic field around the corresponding changes. The Hall effect is used to monitor the strength of the magnetic field around the Hall device and converted into the corresponding electrical signal. The data collected by the RS485 bus is used to upload the data to the experimental host in real time. The host model is found in the scientific modeling of the experimental data. Displacement and electrical signal relationship, and design monitoring management platform to achieve real-time monitoring of soil settlement. The experimental results show that the maximum accuracy of the monitoring method is 0.4 mm, the stability is good, and the multi-point real-time monitoring can be realized in order to realize the intelligent high-precision monitoring of soil settlement. This design can be combined with the current remote transmission control technology to achieve remote sharing of data, with a wider range of applications

Keywords: Hall effect; soft soil settlement; on-line detection; 485 bus communication

0 引言

土路基地质条件、路堤载荷条件和施工条件都具有复杂性, 一般难以对每种处理方法进行严密的理论分析和计算, 因此不能在设计时作精确的计算和预测, 所以一般只能通过施工过程中监测以及施工完成后的质量检验来保证工程质量^[1]。现场大量使用的沉降检测仪主要还是对地面沉降的监测, 例如红外监测激光监测。但是大量的监测方法还是仅仅停留对整体沉降的总和进行监测, 对具体地下分层在线监测的方法还是比较少的。目前也有一些对地下土分层实现监测的仪器, 这些仪器主要由探测头、指示仪表和测尺等组成^[2]。但是这种测量方法主要由人工读取测尺并记录数值, 此方法存在的问题是测量精度不高, 信号线易疲劳受损, 数据量少且不及时, 数据处理难度比较大。

针对目前大量测量方法的缺点和不足, 该设计采用多个霍

尔器件组成阵列, 将沉降磁环埋于土中, 当土发生沉降时沉降磁环会跟随一起沉降。这样就会使得霍尔器件节点周围的磁场强度发生变化。由于沉降磁环周围磁场强度不同, 利用霍尔效应精确测量磁场强度并转化为相应的电信号^[3], 设计采用 RS485 串口通讯方式将电信号数据时时上传至实验主机, 实验主机对霍尔阵列数据进行处理并建立数学模型找出沉降磁环沉降位移与霍尔节点输出的电信号的对应关系, 从而可以精确测量沉降磁环的沉降位移。

本装置是一个实时在线监测设计装置, 在设计中还可以利用以太网实现远程数据共享, 可以实现对地下土沉降的远程监测, 具有深远意义。

1 土沉降监测方法与方案设计

该设计具体方法是采用多个霍尔器件和沉降磁环, 将霍尔器件节点固定在已经固定好的标杆上, 标杆是固定在假设不随着土沉降发生沉降位移的基岩上, 假设标杆和固定桩都是不随土发生位移沉降的, 沉降磁环埋在土中。利用土沉降带动磁环沉降, 从而使霍尔器件与磁环发生相对位移, 因此霍尔节点周围的磁场分布将会发生变化, 于是由于霍尔效应的存在所以霍尔器件将会输出特定的电信号。利用 RS485 总线方式将所有霍尔节点的数据信号上传至实验主机。实验主机对数据进行处理和建模分析并显示, 对数据还可以远程共享进行实时监控, 总体方案设计如图 1 所示。

收稿日期: 2017-05-04; 修回日期: 2017-07-07。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0804604); 国家自然科学基金面上项目(41376111); 浙江省科技计划项目(2015C33045); 浙江省教育厅项目(Y201533855)。

作者简介: 闫子壮(1991-), 男, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 主要从事检测技术方向的研究。

通讯作者: 李青(1955-), 男, 浙江杭州人, 教授, 主要从事检测技术方向的研究。

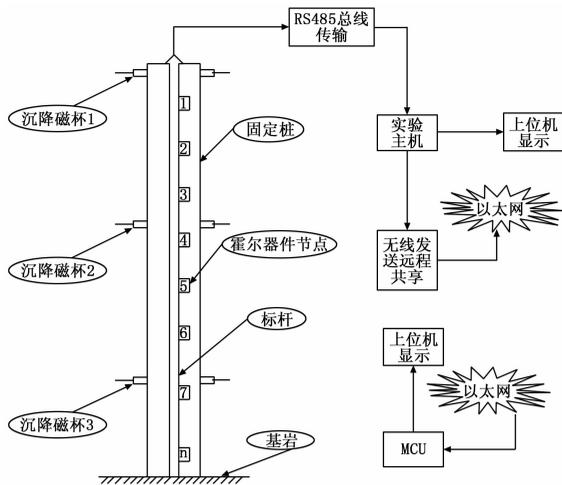


图 1 总体方案设计图

在实际的应用现场沉降磁环的数量可以按照需要来分配并不仅仅局限于图 1 的 3 个。沉降磁环分布的越多，对土层分布沉降的监测就会越精确。该设计可以实现网络化在线监测，可以大大的提高监测精度、效率和质量，改善监测环境，提高监测的档次和水平。

2 硬件电路设计

设计思路是采用多组霍尔器件和沉降磁环，将霍尔器件与磁环固定在特定的位置。利用软土沉降带动磁环沉降，从而使霍尔器件与磁环发生相对位移并输出特定的信号。系统利用控制器的 AD 采样端口对霍尔器件输出的电压信号进行采样。再运用总线方式将数据信号上传至主机。主机对实验数据进行分析 and 科学建模并显示。信息数据可以利用以太网进行数据共享。本系统硬件电路包括霍尔模块电路、系统从机电路、RS485 模块电路、系统主机电路、RS232 通讯电路、GPRS 模块电路和给系统多种电压电源供电电源电路。系统硬件电路如图 2 所示。

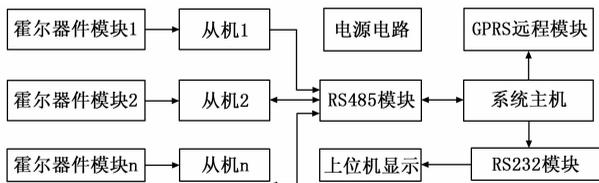


图 2 系统硬件电路框图

2.1 主控制器

主控制器是选用 STM32F103ZET6 作为系统主控制器，STM32F103ZET6 是基于 ARM Cortex-M3 的微处理器。这个处理器的特点是可应用 I/O 口多，自带 3 路共 16 通道的 12 位 AD 输入采样，而且是低电压 3.3 V 供电的低功耗产品。支持片外高速晶振 (8M)，和片外低速晶振 (32K)^[4]，其中片外低速晶振可用于 CPU 的实时时钟，带后备电源引脚，用于掉电后的时钟行走。

2.2 霍尔器件

本模块选用的是 SS4951 霍尔传感器进行监测的。SS4951 是一个低功耗霍尔传感器，通常在 5 VDC 供电时供电电流仅为 7 mA，单个电流吸收或电流源线性输出。它的工作温度范围为 ±40~+150℃。SS4951 霍尔传感器还具有体积小、

操作简单、性价比高等特点^[5]。如图 3 给出 SS4951 输出信号与磁感应强度的关系图。

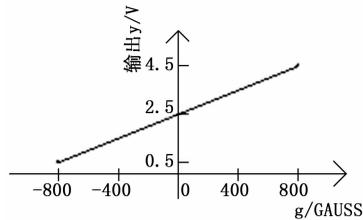


图 3 SS4951 输出特性图

由图 2 可得 SS4951 输出电压信号与磁感应强度的关系表达式为公式 (1)，其中 y 是输出电压，g 是磁感应强度。

$$y = 0.0025g + 2.5 \quad (1)$$

2.3 电压放大模块

系统由于外形尺寸的限制，所以沉降磁环需要定制特定的形状，所以输出电压信号在 42~500 mV 之间。单片机 AD 采样信号在 0~3 300 mV 之间，为了提高系统分辨率和沉降测量精度的大小，系统设计采用单阶信号放大电路。该放大电路选用放大芯片 OP07 放大器，OP07 芯片是一种低噪声运算放大器。由于 OP07 具有非常低的输入失调电压（对于 OP07A 最大为 25 μV)^[6]，所以输出信号稳定性较高。OP07 同时具有输入偏置电流低（OP07A 为 ±2nA）和开环增益高（对于 OP07A 为 300 V/mV）的特点，这种低失调、高开环增益的特性使得 OP07 特别适用于高增益的测量设备和放大传感器的微弱信号等方面，具体放大电路设计如图 4 所示。

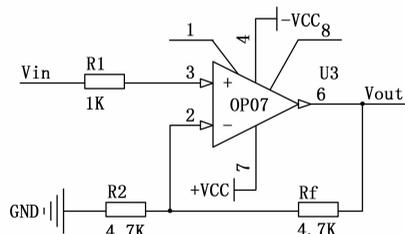


图 4 电压放大电路

由同向比例放大电路的输出与输入对应关系为式 (2) 所示。

$$V_{out} = V_{in} (1 + R_f/R_2) \quad (2)$$

所以可以得出该放大电路的放大倍数，可根据实际需要来设定运算放大电路的放大倍数。在该设计中由于霍尔节点输出信号较小，放大倍数设定为 2。

2.4 RS485 通讯

RS485 采用差分信号负逻辑，+2~+6 V 表示“0”，-6~-2 V 表示“1”。RS485 有两线制和四线制两种接线，四线制只能实现点对点的通信方式^[7]，现很少采用，现在大多采用的是两线制接线。在 RS485 通信网络中一般采用的是主从通信方式，即一个主机带多个从机。很多情况下，连接 RS-485 通信链路时只需要简单地用一对双绞线将各个接口的“A”、“B”端连接起来即可实现总线通信，图 5 为本系统使用的通信电路设计。

在设计中匹配电阻 R₁ 是设计在内的，但是在实际实用过程当中由于实验距离较近，所有的霍尔通信节点只需要在最后一个霍尔通信节点电路设计上加上这个匹配电阻即可，其他霍

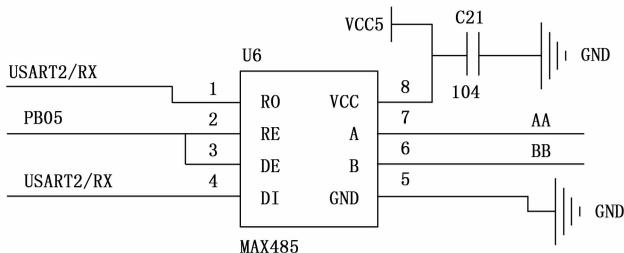


图 5 MAX485 通讯电路

尔通信节点是不需要加的。

3 系统软件设计

土沉降监测装置系统软件设计主要包括智能管理中心上位机界面设计和控制器的软件设计。

3.1 上位机界面软件设计

上位机界面软件设计采用 Java 语言。Java 语言是甲骨文公司推出的一种电脑编程语言, 拥有跨平台、面向对象等特点^[8]。为实现实时显示沉降环精确位移, 研究设计了一套精美上位机显示平台。本设计的上位机显示平台主要显示初始沉降磁环的位置、实时霍尔阵列输出信号、实时沉降磁环的沉降位移和北京时间等技术参数。

3.2 控制器软件设计

控制器的核心是 STM32F103ZET6, 软件是采用可移植性很高的 C 语言来实现的。系统使用 RS485 总线级联的, 所以就分为实验主机和从机。软件首先是进行初始化, 然后是主机设定为发送模式分别给从机发送特定的信号命令然后设定自己为接收模式; 每一个从机初始化后设定为接收模式接收到属于自己的命令之后, 根据命令进行传输霍尔器件传输来的信号; 主机接收到从机发送来的信号后进行建模、滤波等处理, 最后控制显示模块进行显示和远程数据共享, 图 6 是系统程序流程图。

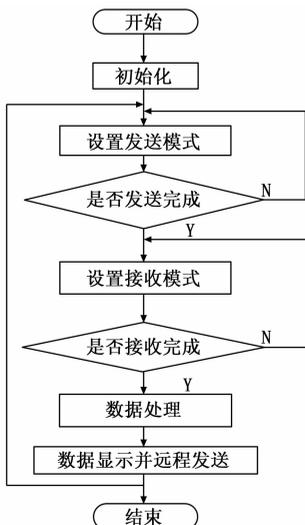


图 6 系统主机程序流程图

4 实验数据处理与结果

4.1 数据处理

系统测试首先是搭建测试平台, 测试平台是固定沉降管和固定桩, 分别将霍尔器件节点安装在固定桩上面。用电机带动沉降磁环的上下沉降来模拟土沉降。系统实验数据较多, 必须

进行大量的数据处理筛选, 最终选取最优数据进行利用。图 7 是实验测试平台示意图。

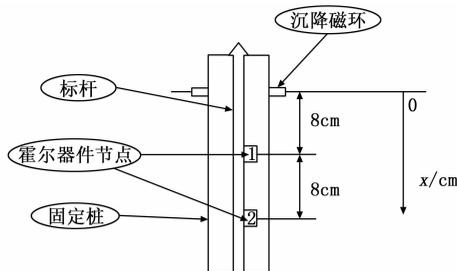


图 7 实验测试平台示意图

实验测试是首先固定霍尔器件节点, 将每个节点之间的距离固定在 8 cm, 手动使沉降磁环从 0 开始沿 x 方向往下发生沉降, 分别记录沉降 16 cm 处的实验数据, 并多次取样取平均数值为实验数据, 测试数据如图 8。

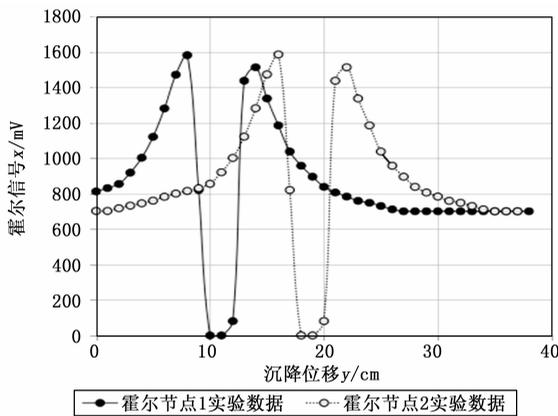


图 8 实验测试数据

从实验数据来看, 沉降位移在 0~8 cm 内霍尔节点 1 输出是不断增加的, 之后霍尔节点 1 输出会有一个到 0 mV 的突变过程。在然后输出信号的上升到峰值, 随后是随着沉降位移增加而不断减小的过程。这个过程当中的突变是因为沉降磁环是一个具有一定尺寸的圆柱体而不是一个永磁体点, 所以会有一段霍尔信号输出为 0 mV 的过程。这个实验结果曲线和理论上是一致的。

实验过程当中为了减小实验误差, 现采用选取第一个霍尔节点的前 8 个有效数据进行拟合利用, 当实验沉降磁环沉降到 8 cm 以后立即选取第二个霍尔节点的实验数据进行利用, 对于第二个霍尔节点的实验数据前 8 个直接舍弃不用, 因为霍尔信号数据变化量较小, 如果利用进行拟合会引起较大误差, 所以只利用第二个霍尔节点的后 8 个有效数据进行拟合, 这样可以有效地减小实验误差。图 9 给出了选取的有效数据汇总。

在图 9 的有效数据中可以发现, 利用两个霍尔节点的有效数据进行曲线拟合可以实现对沉降磁环沉降位移在 0~16 cm 内精确监测。以此类推第三个第四个等多个霍尔节点便可以实现对更大沉降位移进行精确监测。对于有效实验测试数据走势可以看出霍尔输出信号是随着沉降磁环的沉降位移不断变化的, 可以根据这种图变化来预测出沉降磁环的实时位置。图 8 中实验数据是具有一定数学关系的, 所以进行数学模型的建立。为了进一步减小实验模型误差, 现在采用分段分别进行数学模型的建立。曲线拟合常用的方法有解析表达式逼近离散数

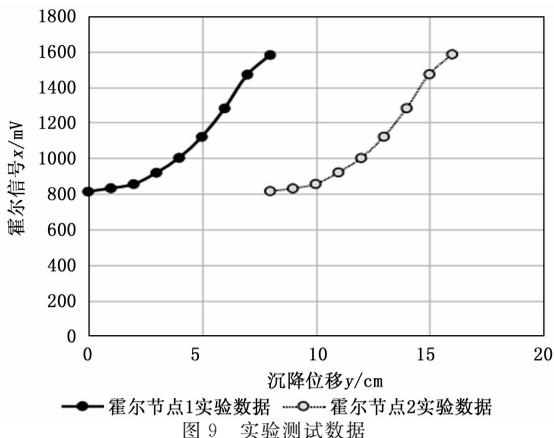


图 9 实验测试数据

据的方法和最小二乘法，在这里采用最小二乘法进行曲线拟合^[9]。从而实现对沉降位移的精确监测。

在设计中根据图 8 实验有效数据可以采用两种方式进行曲线拟合。方式一根据曲线走势直接采用二次曲线拟合如式(3)。

$$x = ay^2 + by + c \tag{3}$$

公式(3)是进行二次曲线拟合，其中 a 、 b 、 c 是拟合系数。方案二是采用分段一次曲线进行拟合，如公式(4)。

$$x = ay + b \tag{4}$$

公式(4)是采用分段一次曲线进行拟合，其中 a 、 b 是拟合系数。为了更好的进行数据就监测，现在将两者结合起来，采用分段拟合，综合一次、二次曲线拟合。

4.2 实验结果

在实验中分别做出了单个沉降磁环沉降位移在为 0、200、400、600、800、1 000、1 200、1 400、1 600、1 800 mm 处的测量值和实际值的对比结果，并且分别给出了每组实验数据误差结果，如表 1 给出了实验测试结果。

表 1 实验测试结果

实验序号	磁环测量沉降位移/mm	磁环实际沉降位移/mm	误差/mm
1	0	0	0
2	199.9	200	0.1
3	399.8	400	0.2
4	600.1	600	0.1
5	800.2	800	0.2
6	1 000.2	1 000	0.2
7	1 200.1	1 200	0.1
8	1 399.6	1 400	0.4
9	1 599.8	1 600	0.2
10	1 800.4	1 800	0.4
11	2 000.4	2 000	0.4

实验测试结果显示测量沉降位移量和实际沉降位移值很相近，能够较好的对沉降位移进行监测。但是还是存在一定的误差，最大误差达到 6.2 mm，可以看出测量精度不是很高。针对实验结果分析和总结，分析系统发现误差存在的原因有：

1) 选取的运算放大器精度不够高，而且经过测量发现运放存在一定的失调电压。

解决措施：重新选取高精度精密运算放大器，重新设计信号放大电路对失调电压进行补偿。

2) 霍尔器件供电电源电压稳定性不够高，节点与节点供电电压之间有时差值在 200 mV，这样会引起霍尔器件的输出

不稳定，而且进过实验测试发现霍尔器件输出信号跟自身供电电源电压大小是有一定关系的。

解决措施：重新设计霍尔器件节点供电电源电路，采用同一个开关电源进行并联供电，解决了不同霍尔器件节点供电不同引起输出误差的问题。

重新修改电路设计之后进行测试、数据处理建模，得出新的测试结果如表 2。

表 2 实验测试结果

实验序号	磁环测量沉降位移/mm	磁环实际沉降位移/mm	误差/mm
1	0.5	0	0.5
2	202.1	200	2.1
3	402.2	400	2.2
4	604.3	600	4.3
5	803.1	800	3.1
6	1 006.2	1 000	6.2
7	1 205.4	1 200	5.4
8	1 404.5	1 400	4.5
9	1 604.2	1 600	4.2
10	1 806.1	1 800	6.1
11	2 005.7	2 000	5.7

通过新的实验数据可以得出实验结果较为稳定，实验误差很小，最大实验误差为 0.4 mm。实验结果表明该研究设计可以很好的对土沉降进行高精度的监测。

5 结论

本文针对土沉降设计实现了一种新型基于霍尔效应的科学监测方法。这种方法采用多个霍尔阵列，利用霍尔效应监测周围磁场强弱，并采用 485 通讯方式将数据实时上传至实验主机，实验主机对霍尔节点信号进行建模处理，即可实现对沉降位移进行实时在线监测。实验结果显示这种监测方法监测精度高、数据量大、稳定性好，可以实现多点实时在线监测，从而实现对土沉降的智能化高精度在线监测。这个设计方法对于土沉降的监测的研究具有一定突破。

参考文献：

- [1] 王海波. 软土路基沉降机理及沉降预测研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- [2] 吴雪婷. 温州浅滩软土工程特性及固结沉降规律研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2010
- [3] 江铭波, 阎旭东, 徐国旺. 霍尔效应及霍尔元件在物理量测量中的应用 [J]. 湖北工业大学学报, 2011 (2): 142-144.
- [4] 孙书鹰, 陈志佳, 寇超. 新一代嵌入式微处理器 STM32F103 开发与应用 [J]. 微计算机应用, 2010 (12): 59-63.
- [5] 王美丽. 霍尔传感器的应用探讨 [J]. 山西电子技术, 2010 (4): 84-86.
- [6] Antonio F D, Pagani G, Familiari A, et al. OP07. 07: Outcome in fetuses with isolated agenesis of the corpus callosum: a systematic review and meta - analysis [J]. Ultrasound Obstet Gynecol, 2016, 48.
- [7] Sim Y K. 5 V RS232/RS485 multiprotocol transceiver [M]. Elsevier Inc. 2015.
- [8] 刘明清. Java 语言的特点与 C++ 语言的比较 [J]. 信息技术与信息化, 2015 (11): 151-153.
- [9] 田垅, 刘宗田. 最小二乘法分段直线拟合 [J]. 计算机科学, 2012 (S1): 482-484.