

一种沉降监测自动化静力水准测试装置研究

金鹏^{1,2}, 刘枫^{1,2}, 马洪亮^{1,2}, 齐冀龙^{1,2}

¹中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春

²水利部寒区工程技术研究中心, 吉林 长春

收稿日期: 2024年3月8日; 录用日期: 2024年5月10日; 发布日期: 2024年5月17日

摘要

静力水准法是监测大坝垂直位移的有效方法, 但液体与管壁之间的摩擦阻力对静力水准装置系统响应时间和测量误差影响很大, 连通液体种类、连通管长度和管径都是可以改变的, 但是环境温度是无法改变的, 这也是静力水准装置极少在严寒地区野外环境下应用的主要原因。本文提出了一种连通管式监测设备管道系统响应时间和测量误差自动化测试装置, 针对现有的监测装置不便于对静力水准平衡响应时间和测量误差测试的问题, 得出适合实际工程的监测设计方案。

关键词

静力水准, 垂直位移, 安全监测, 数据采集装置

Study of an Automated Static Leveling Test Device for Settlement Monitoring

Peng Jin^{1,2}, Feng Liu^{1,2}, Hongliang Ma^{1,2}, Jilong Qi^{1,2}

¹China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun Jilin

²Engineering Technology Research Center of Ministry of Water Resource in the Cold Region, Changchun Jilin

Received: Mar. 8th, 2024; accepted: May 10th, 2024; published: May 17th, 2024

Abstract

Static leveling is an effective method for monitoring the vertical displacement of dams. The friction resistance between the liquid and the pipe wall has a great influence on the response time and measurement error of the static leveling device system, the type of connecting liquid, connecting pipe length and diameter can be changed, but the ambient temperature cannot be changed, which is the main reason that the static leveling device is seldom applied in the field environment in the cold region. This paper proposes an automated testing device for response time and mea-

surement error of piping system of connecting pipe-type monitoring equipment, which is not convenient for the existing monitoring device to test the response time and measurement error of static leveling equilibrium, and comes up with a monitoring design scheme suitable for actual projects.

Keywords

Static Level, Vertical Displacement, Security Monitoring, Data Acquisition Device

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前, 大坝运行中最危险的因素是其变形影响, 如横向变形、水平变形和沉降变形, 其中沉降变形对大坝安全的影响最大。目前建筑物沉降变形监测的主要方法有几何水准测量法、三角高程法、真空激光准直系统和双金属标方法。几何水准测量法、三角高程法需要采用水准仪、全站仪人工进行观测, 测量人员工作条件艰苦, 消耗人力和大量时间。真空激光准直法是外部沉降变形自动化监测的好方法, 但对设备安装空间要求高, 激光管道轴线必须通视, 轴线不能转弯, 发射端和接收端需要设置观测房, 对于已建工程, 实施难度较大, 且造价成本高。双金属标法需要在被测部位钻孔或预埋双标管, 造价较高, 一般仅布置在重点部位, 不能全面监控建筑物沉降变形情况。近年来静力水准沉降监测被广泛应用于桥梁、高铁、水工建筑物监测中, 应用前景较好[1] [2]。目前一部分学者们从实际工程角度对静力水准进行应用适用性评价[3] [4], 另一部分学者探索环境因素对静力水准的准确性及误差的影响[5]。学者们已经对静力水准的适用性和影响因素进行研究, 但是还有一些问题并未得到解决, 静力水准的平衡液位响应时间和平衡液位测量误差方面很少有学者进行研究, 由于连通管径大小、长度、环境温度、连通液的不同都会影响其响应时间。

静力水准系统作为一种沉降变形自动化监测方法, 主要应用于温暖环境下, 最低环境温度也不低于 -10°C , 即使应用在我国东北、西北等严寒地区, 也是安装在较温暖的洞室或廊道内部, 在严寒地区建筑物外部未曾应用过(少), 主要原因是市场主流的静力水准系统, 受环境温度过低影响, 测量误差较大, 不能满足监测规范要求。在实际工程中往往在静力水准测试时, 两监测点内的平衡液面很难保持一致, 这就需要现场人员不断去寻找导致这种情况的原因, 极大地浪费人力物力, 影响工程安装进度。目前沉降监测方法一般都是人工读取数据, 极大地影响大坝沉降监测的效率, 在管理水平和综合性方面都存在不同的局限性。

静力水准连通管管径和长度设计参数确定, 需要不同管径、不同长度连通管在不同温度环境下进行大量的精度测试试验, 人工观测难度相当大, 需要全面实现自动测量, 然后通过对试验数据统计回归分析, 建立流量与管径、管长、温度和液位高差的回归方程, 最后根据工程实际液位高差体积进行积分反算平衡液位时间。为了实现大坝监测的自动化水平, 本研究提出一种新的静力水准自动化监测系统, 以解决目前监测中所存在的不足。

2. 测试平台搭建与测试方案

2.1. 试验设备与材料

本次试验采用连通管式, 传感器选用数字输出磁致伸缩液位传感器, 主要用于监测量筒内水位和温

度变化,测得数据准确、灵敏度高、造价低,采集频率可根据本公司开发的自动化测试装置采集软件配套使用实现自动采集。量筒底部半径为 30 cm 高为 70 cm。连通管采用透明树脂管,其内径规格分别为 DN10 mm、DN12 mm、DN14 mm、DN16 mm 和 DN17 mm,管长分别为 40 m、80 m、120 m、160 m 和 200 m,主要用于模拟两测点之间的距离。连通管连接主要控制阀门为三线二控电动球阀。水泵为小功率水泵功率为 60 W,额定为 12VDC/3A,用于向 A 量筒内注水。连通液选用正常防冻液主要成分为乙二醇,适用温度为-35℃~160℃。由于在标准大气压下水的冰点为 0℃,不适用于低温条件下,同时油作为连通液,其粘性阻力系数太大,静力水准平衡液位平衡时间将增长,影响测量误差。工作站为 TinkStationP350,用于试验数据采集。

2.2. 测试装置模型

静力水准测试装置模型示意图如图 1 所示。本测试装置主要分三部分,第一部分为注水装置,第二部分为连通装置,第三部分为数据采集装置。根据图 1 所示工作原理是利用连通管的原理,将测点(量筒 A)与基准点(量筒 B)通过连通管相连,根据测点容器内的液体保持同一水平面的原理,当测点发生高程变化时,用液位传感器测量测点容器内液面的相对变化,从而实现变形监测。监测数据采集可通过 RS485 转 USB 连接线进行采集或进行无线传输采集。

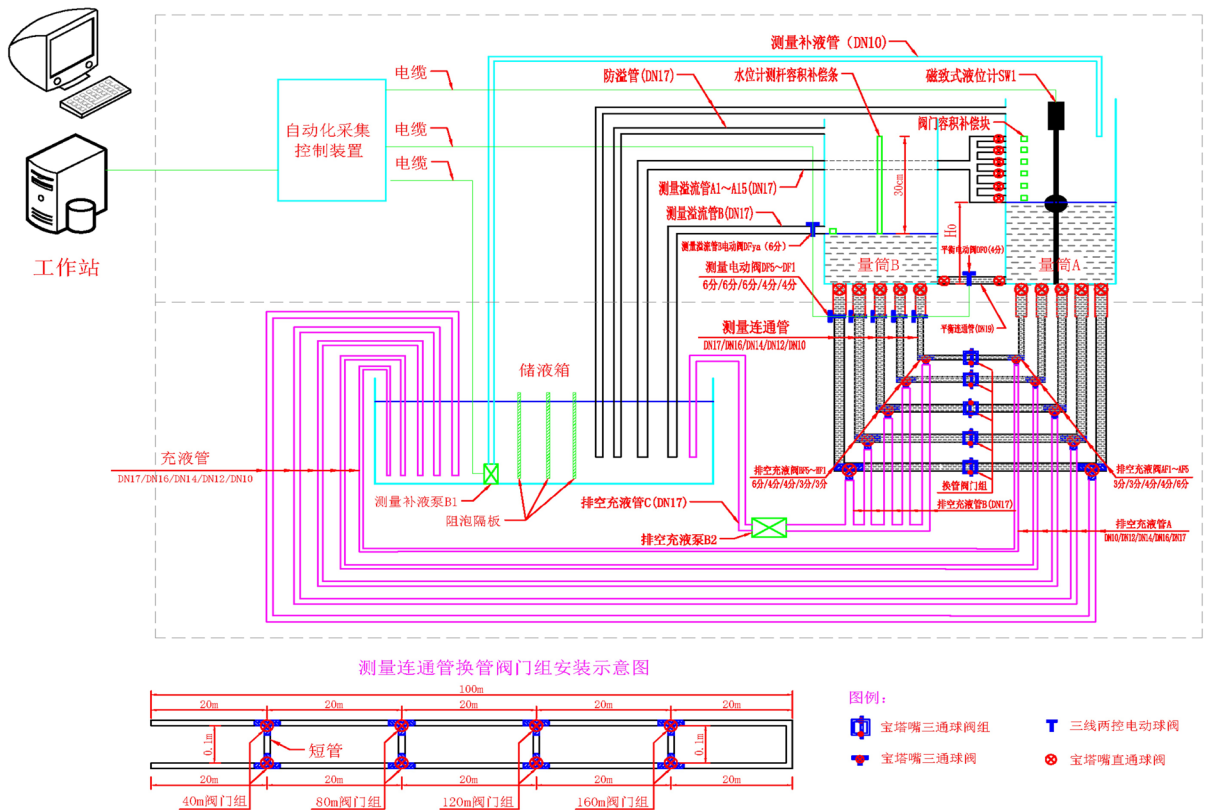


Figure 1. Schematic diagram of the static leveling test set model
图 1. 静力水准测试装置模型示意图

2.3. 测试方案

2.3.1. 连通管充液操作流程

如图 1 所示,关闭量筒 A 底部测量连通管所有手动阀、侧壁测量溢流管 A1~A15 所有手动阀,关闭

量筒 B 底部测量连通管所有手动阀、侧壁测量溢流管 B 电动阀, 打开平衡连通管手动阀和电动阀, 开启测量补液泵 B1, 向量筒 A 充液, 待量筒 B 防溢管有液体流出时关闭测量补液泵 B1, 静置一段时间等待量筒液体气泡全部消散。打开所有换管阀门组(测量连通管两方向通、短管方向关)和排空充液阀 AF1~AF5、BF1~BF5 (后方测量连通管和排空充液管方向通、量筒侧测量连通管方向关), 开启排空充液泵 B2, 待长度 200 m DN17 测量连通管充满液体后, 按 160 m、120 m、80 m、40 m 顺序打开换管阀门组(量筒侧测量连通管和短管方向通、后方测量连通管方向关), 一般在各长度换管阀门组短管气泡排出后, 再切换下一组长度换管阀门, 待 DN17 测量连通管所有短管气泡排出后, 依次打开量筒 A 底部 DN17 测量连通管手动阀和排空充液阀 AF5 (测量连通管两方向通、排空充液管 A 方向关), 待量筒 A 底部 DN17 测量连通管气泡全部排出后, 依次打开量筒 B 底部 DN17 测量连通管手动阀、电动阀和排空充液阀 BF5 (测量连通管两方向、排空充液管 B 方向全通), 待量筒 B 底部 DN17 测量连通管气泡全部排出后, 打开排空充液阀 BF5 (测量连通管两方向通、排空充液管 B 方向关), 最后开启测量补液泵 B1, 向量筒 A 充液, 待量筒 B 防溢管有液体流出时关闭测量补液泵 B1, 静置一段时间等待量筒液体气泡全部消散。以此类推进行下一管径测量连通管的充液, 完毕后关闭排空充液泵 B2, 等待测量。

2.3.2. 连通管、量筒和储液箱排空操作流程

打开所有换管阀门组(测量连通管两方向通、短管方向关)、排空充液阀 AF1~AF5 (测量连通管两方向通、排空充液管 A 方向关)、BF1~BF5 (测量连通管两方向、排空充液管 B 方向全通)、量筒 A、B 底部所有手动阀和电动阀, 开启排空充液泵, 量筒 A、B 内液体排空后, 按顺序依次打开排空充液阀 BF5~BF1 (后方测量连通管和排空充液管 B 方向通、量筒侧测量连通管方向关), 将各测量连通管内所有液体逐个排出; 储液箱内液体采用将排空充液管 C 放入原液体储存桶, 打开排空充液阀 AF5、BF5 (后方测量连通管和排空充液管方向通、量筒侧测量连通管方向关), 最后开启排空充液泵排出。

3. 数据采集软件

本程序框架为 Visual Basic .NET, 它是在 .NET Framework 上实现的面向对象的计算机编程语言。数据库为 SQLite, 它是一个进程内的库, 实现了无服务器的、零配置的、事务性的 SQL 数据库引擎。通讯协议为 Modbus RS485, 用户可以免费使用, 不需要交纳许可证费, 也不会侵犯知识产权。编程工具采用 Microsoft Visual Studio 2015 社区版本。

采集控制对象: 包括 7 个电动阀、1 个水泵、1 个 RS485 输出磁致式液位计。

采集控制模块功能: 能在指定时间和时长下, 开启或关闭水泵和指定的电动阀, 并采集液位计水位、温度和响应时间数据, 采集的数据自动存储到现场存储器和电脑上。

自动化测试装置采集软件: 在电脑软件平台上, 能远程实现参数测试功能键、电动阀控制开关、水泵控制开关、液位计采集开关的操作, 并设置工作状态标识, 操作界面上能修改参数测试功能键的电动阀、水泵、液位计采集控制时间、操作顺序等程序命令, 能自动存储每个规格连通管不同测试程序下的液位计水位、温度和响应时间数据, 并能按 Excel 格式输出。

4. 试验结果与分析

4.1. 平衡液位时间及误差分析

不同管径管长液位平衡响应时间如图 2(a)所示, 由图可知 10 mm 管径的平衡响应时间最长。不同管径管长测量误差如图 2(b)所示, 由图可知最大误差为 0.16 mm 未超过 0.20 mm 满足设计规范要求, 同时可以看出 10 mm 管径的测量误差最大, 与图 2(a)变化趋势大致相同。在管长一定的情况下, 管径越细平衡响应时间越长, 测量误差越大。

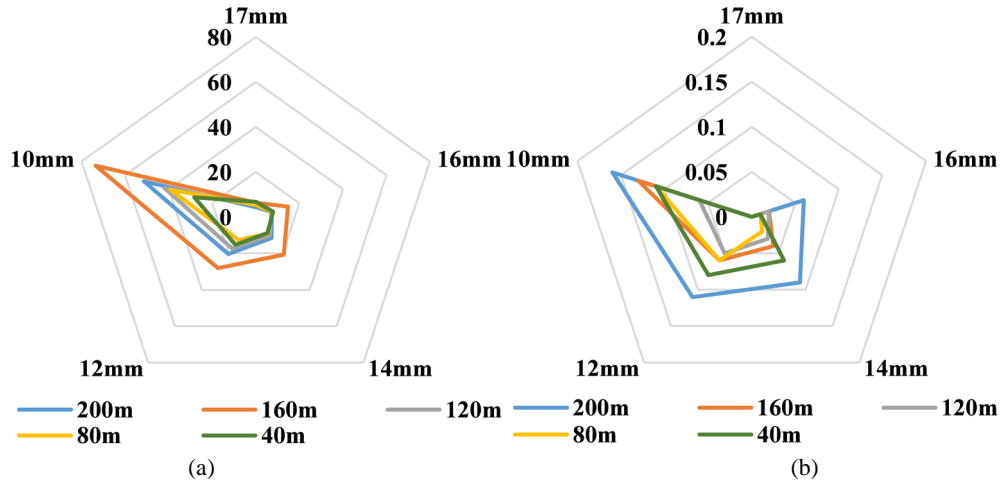


Figure 2. Level equilibrium response time (h) and measurement error (mm) for different pipe diameters and pipe lengths

图 2. 不同管径管长液位平衡响应时间(h)及测量误差(mm)

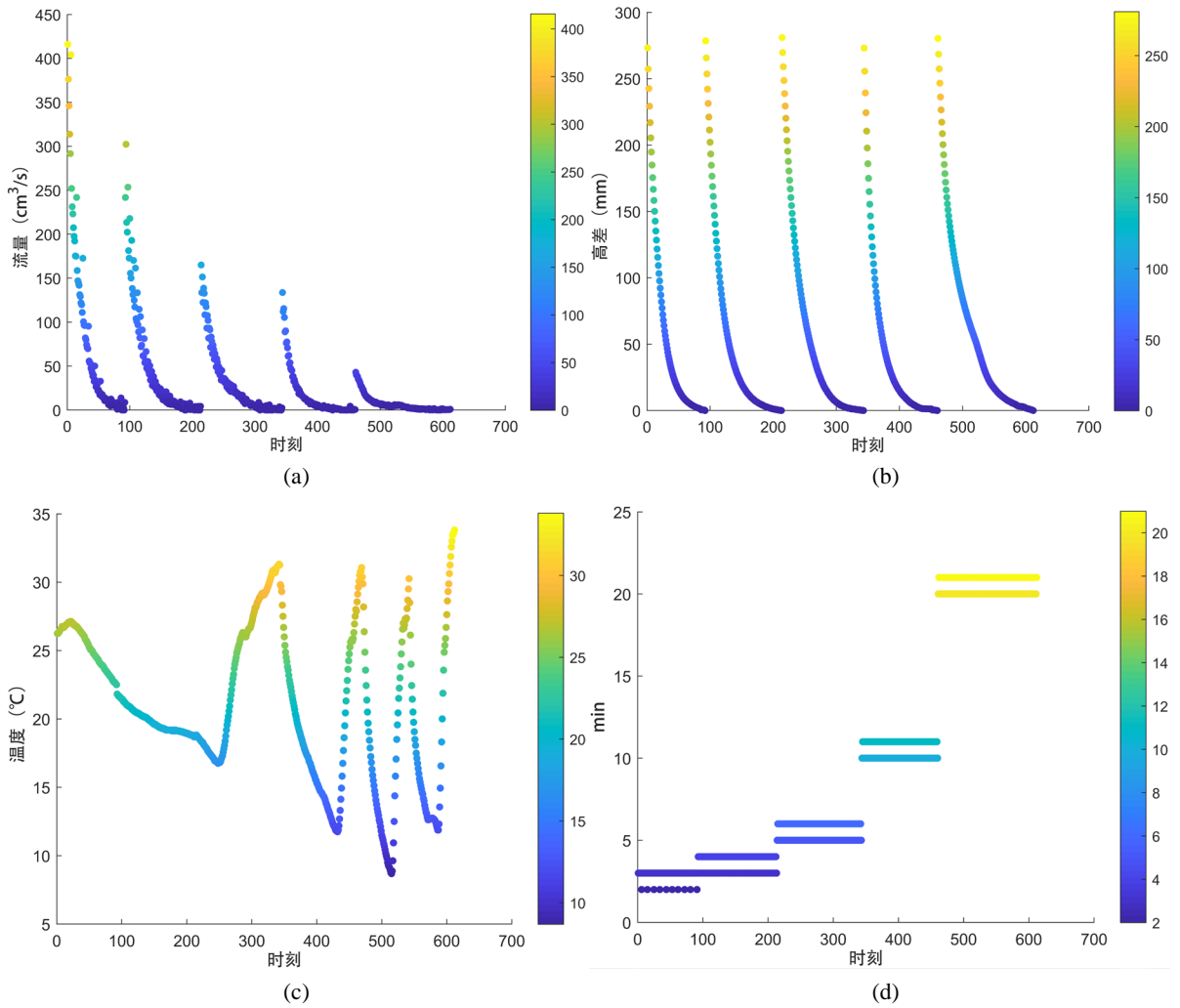


Figure 3. Scatterplot of flow rate, elevation difference, temperature and time variation at different pipe diameters for 200 m

图 3. 200 m 不同管径下流量、高差、温度及时间变化散点图

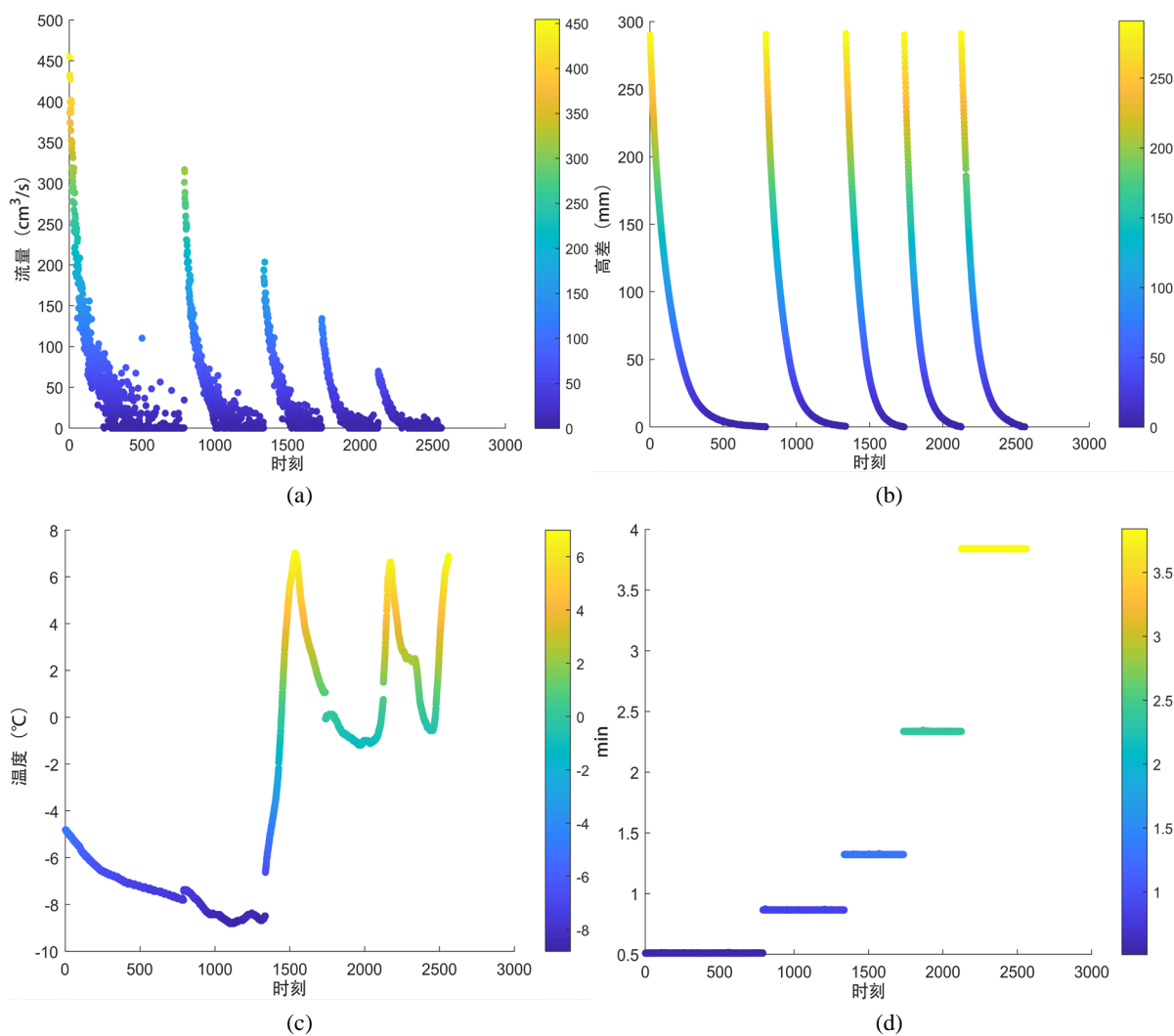


Figure 4. Scatterplot of flow rate, elevation difference, temperature and time variation at different pipe diameters for 40 m
图 4. 40 m 不同管径下流量、高差、温度及时间变化散点图

4.2. 时间变化分析

200 m、40 m 不同管径下流量、高差、温度及时间变化散点图如图 3、图 4 所示，由图 3、图 4(a)可知静力水准装置即将达到平衡液位时流量处于波动状态。由图 3、图 4(c)可知在自然条件下温度变化对静力水准有一定影响，由于本次试验为自然状态下，温度量不受约束。

4.3. 回归模型建立及平衡响应时间推算

一元线性回归模型研究的是一个因变量与一个自变量之间呈直线趋势的数量关系。本项目中，含一个因变量与多个自变量数量关系的问题，我们需要建立多元线性回归模型解决问题。多元线性回归方程式如下：

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \alpha_1 \times x_1 + \alpha_2 \times x_2 + \dots + \alpha_n \times x_n + \beta$$

其中， x_1, x_2, \dots, x_n 分别表示自变量 1、自变量 2、……、自变量 n ；

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示受自变量共同影响而线性合成的因变量；

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 分别表示待拟合的系数;

β 表示待拟合的常数。

检验指标: R^2 是指拟合优度, 是回归直线对观测值的拟合程度, P 越接近 0 说明多元线性方程越显著。

静力水准问题中, 含多个变量间的线性关系的问题, 本项目用 Python 和 Matlab (验证) 进行多元线性回归来解决实际问题。得到拟合方程如下:

$$Q = 0.4611T - 0.0023L + 73.7385D + 6.9398H + 1.1073t - 87.6854$$

$$P < 0.05$$

其中: Q 为流量(cm^3/s), T 为气温($^{\circ}\text{C}$), L 为管长(cm), D 为管径(cm), H 为液位高差(cm), t 为响应时间。

响应时间 t 计算公式为:

$$\int_0^t Q dt = V$$

$$0.55365t^2 + (0.4611T - 0.0023L + 73.7385D + 6.9398H - 87.6854)t - V = 0$$

其中: V 为体积(cm^3)。

5. 结论

- 1) 静力水准连通管在管长一定的情况下, 管径越细平衡响应时间越长, 测量误差越大。
- 2) 静力水准平衡响应时间方程式为 $0.55365t^2 + (0.4611T - 0.0023L + 73.7385D + 6.9398H - 87.6854)t - V = 0$, 根据此方程式可以得到不同管径管长等条件下的设计方案。
- 3) 自动化测试装置采集软件可以对自动化设备进行实时采集, 可靠性强。
- 4) 本研究提出的一种沉降监测自动化静力水准测试装置, 可为监测设计、施工和仪器厂家提供参考, 也可以在严寒地区野外环境下推广应用。

参考文献

- [1] 刘向明. 静力水准仪系统在高铁桥梁变形监测中的应用[J]. 交通科技与经济, 2020, 22(6): 6.
- [2] 田志刚, 宋厚源, 郭鹏. 激光静力水准技术在土石坝沉降测量中应用[J]. 山东水利, 2020(5): 3.
- [3] 胡云龙, 汪大超. 静力水准系统在沉降监测中的应用[J]. 城市勘测, 2017(3): 4.
- [4] 侯煜, 廖月. 静力水准系统在水工建筑物沉降监测中的应用[J]. 江苏水利, 2019(12): 4.
- [5] 陈果, 李波, 吴琪. 环境温度对压差式静力水准仪测试精度影响试验研究[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2022, 44(1): 92-99.