Vol.45 No.7 July, 2019

doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018060058



岩土中热式渗流测量初探

张 超, 李 青, 程一峰, 刘章杰 (中国计量大学机电工程学院,浙江杭州 310018)

摘 要: 岩土内部的渗透(孔隙)水压力采用渗压计测量,进而进行渗流监测,其测量的是标量,存在动态响应差、量程小、非直接测量等缺陷,难以满足岩土中渗流监测发展的需求。鉴于此,该文设计一种基于热扩散原理的远程在线渗流计,主要由电源模块、温度检测模块、恒功率加热模块、显示模块组成;由三线制铂电阻恒流源测温电路检测进出水两端温度差,检测结果返回显示到STM32并经过 RS-485 总线传至主机进行数据分析。实验结果表明,该渗流计可实现在线监测岩土中的渗流情况,能有效检测岩土中渗流的速度,分辨率达到 0.05 mL/s,具有良好的灵敏度、准确性和重复性,适用于大部分岩土中的渗流测量。

关键词: 岩土; 渗流; 微小测量; 热传递

中图分类号: TP23 文献标志码: A

文章编号:1674-5124(2019)07-0092-05

Study on thermal seepage measurement in rock and soil

ZHANG Chao, LI Qing, CHENG Yifeng, LIU Zhangjie

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

Abstract: The osmotic pressure meter is (mainly) used to measure the infiltration (pore) water pressure inside rock and soil, and then the seepage monitoring is performed. The measurement is scalar, and there is a poor dynamic response, small range, non- Direct measurement and other defects are difficult to meet the needs of monitoring and development of seepage in rock and soil; in view of this, a remote online flow meter based on the principle of thermal diffusion is designed; it consists of power module, temperature detection module, constant power heating module, and display module (Partial composition); three-wire platinum resistance constant current source temperature measurement circuit detects the temperature difference between the two ends of the influent water, the test results are returned to the display to the STM32 and passed through the RS-485 to the host for data analysis; experimental results show that the flow meter can be implemented on-line monitoring the seepage in rock and soil and it can effectively detect the velocity of seepage in rock and soil, with a resolution of 0.05 mL/s. It has good sensitivity, accuracy and repeatability, and is suitable for the seepage measurement of most types of rock and soil.

Keywords: rock and soil; seepage; micro measurement; heat transfer

收稿日期: 2018-06-13; 收到修改稿日期: 2018-07-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0804604);浙江省重点研发计划项目(2018C03040)

作者简介:张 超(1994-),男,内蒙古包头市人,硕士研究生,专业方向为检测技术。

通信作者:李 青(1955-),男,浙江杭州市人,教授,主要从事检测技术方向研究。

0 引 言

渗流形成的基坑塌陷四、滑坡、垮坝四等危害每 年都会造成巨大的人员伤亡和经济损失。由于岩土 自身特殊的物理性质,岩土空隙中运动的地下水也 就是渗流的测量¹³,很难通过传统的声、光、电等手 段进行检测,岩土中的渗流具有流速低,流量小,组 成复杂等特性^[4]。目前大量使用的岩土渗流测量设 备是孔隙水压力计和测压管^[5],其测量原理为测量 岩土中高度不同的两个点之间的水力坡降,通过达 西定律 $Q = K \cdot A \cdot \frac{H_1 - H_2}{I}$ 来得出渗流量 Q的大小进而 得到渗流速度的大小¹⁰。其中 K 是渗透系数, 对于 同一种土壤而言,渗透系数是不变的,其通过土壤 渗透仪来测得,A为孔隙水压力计的截面积。其最 终测得的是标量,不能反映出渗流的方向,测压管 只能测量渗流压力变幅小的部位, 且其滞后时间 长,可靠性低四。渗压计具有量程小,分辨率低,施 工难度大等缺点图。目前尚无直接测量渗流速度的 传感器。

针对目前测量方法的缺点和不足,本文设计一种基于热扩散的原理[®] 在岩土中测量微小流量的液体流量计,采用微型陶瓷加热棒,微型铂电阻放置在细管中组成传感器。利用热扩散原理对岩土中的渗流实现较高精度的测量。设计采用 RS-485 总线通信的方式将采集到的电信号实时上传到实验主机,实验主机对铂电阻采集到的电信号和时间建立数学模型找出电信号变化和渗流速度之间的对应关系。

本装置是一个实时在线监测设计装置,安装在 野外采用太阳能电池板进行供电,在日后还可以利 用以太网实现远程数据共享,可以实现岩土中渗流 的远程监测,具有深远意义。

1 岩土中渗流的监测方法与方案设计

该设计具体方法是采用两个直径为 3 mm 的 PT100 铂电阻和一个直径为 3.3 mm 的陶瓷加热 棒,将铂电阻和加热棒通过胶水固定在直径为 6 mm 长度为 200 mm 的聚碳酸酯细管内,加热棒固 定在细管中央长度的位置,铂电阻固定在细管两端 的位置。将细管和直径为 55 mm 的漏斗用胶水粘 紧,将直径 50 mm 厚度 5 mm 的透水石放置于漏斗 内用胶水粘紧,将此装置放置于直径和漏斗一致的 60 mm 粗管内,用胶水固定。渗流传感器的设计方 案如图 1 所示。当细管中有水流过时,水先经过一



图 1 渗流传感器设计图和实物图

端的铂电阻,此时铂电阻将温度值转化为电信号, 然后水流过加热棒进行加热,最后水流过另一端的 铂电阻并测量其温度并转化为电信号。加热棒采用 恒功率加热^[10],两端铂电阻采集到的温度差会随着 流速的变化而变化。

2 细管内流体传热模型及仿真

2.1 层流原理及数学推导

水是一种粘性流体,当水通过固定长度和内径的细管时,流体存在一定的阻力,细管越细,阻力越大。聚碳酸酯材质的细管光滑的内壁将导致稳定的 层流状态。在这种条件下,最大的流速是在中心 区,细管内壁附近的流体保持几乎静止不动,根据 层流原理对细管内水的流动情况进行数学分析^[11]。

假设粘度为μ的流体在半径为 R 的水平细管内 作层流运动,现取管轴中心处一半径为 r,长度为 l 的流体柱作为分析对象,作用于流体柱两端面的 压差为Δp,则作用在流体柱上的推动力为 $f = \Delta p \pi r^2$ 。

设距离细管中心处 *r* 的流体速度为 *V*,, (*r*+d*r*) 处的相邻流体层的速度为 (*V*,+d*V*,),则流体速度沿 半径方向的变化率 (即速度梯度) 为 $\frac{dV_r}{dr}$,两个相邻 流体层所产生的粘滞力为 τ_r 。层流时粘滞力遵循牛 顿粘性定律, 即 $\tau_r = -\mu \frac{dV_r}{dr}$ 。

作用在流体柱上的阻力为 $\tau_r = -\mu \frac{dV_r}{dr}$ 。流体作 等速运动时,推动力与阻力大小相等,方向相反,所 以 $\Delta p\pi R^2 = -2\pi R l \mu \frac{dV_r}{dr}$ 。

当 *r*=r 时, $\mu_r = \mu_r$; 当 *r*=R 时, $\mu_r = 0$ 。故,将 $\Delta p \pi R^2 = -2\pi R l \mu \frac{dV_r}{dr}$ 积分后可得到

$$\mu_{\rm r} = \frac{\Delta p}{4\mu l} \left(R^2 - r^2 \right) \tag{1}$$

式(1)是流体在细管内作层流运动时的速度分

布表达式,表示在某一压力降下,速度与半径的关系是抛物线型,即在管路中心处的速度最大,面到 管壁处的速度为零。流经厚度为 dr 的流体柱的体积流量为dF = V_rdA,其中dA = 2πrdr。那么细管内 流体的流量就是这些流体柱的流量的积分 F =

$$\int_{0}^{F} dF = \int_{0}^{R} v dA = \int_{0}^{R} \frac{\Delta p \left(R^{2} - r^{2}\right)}{4\mu l} \times 2\pi r dr$$
$$F = \frac{\pi R^{4} \Delta p}{8\mu l}$$
(2)

式(2)即为液体在细管内层流状态下的数学公 式。可以看出,当细管的长度一定,液体一定(粘度 确定)时,流量与半径的四次方和压差成正比¹¹²。

2.2 细管中水的速度场和温度场仿真

采用 Ansys Fluent 软件来进行建模并对细管中 流体的流动状态及温度进行仿真来验证 2.1 中的数 学推导。如图 2 所示为细管中流体的温度场,图 3 为细管中流体的速度场,其中加热棒为恒功率 4 W, 水由右向左以 0.05 mL/s 的速度流动。

从温度场仿真图中可得出, 在加热棒 4 W 恒功 率, 水流速度 0.05 mL/s(一滴水)的情况下, 上下游 两端温度差大约为 6.8 ℃。由速度场仿真图可看 出, 速度与半径的关系是呈抛物线型, 即在细管中 心处的速度最大, 越靠近管壁流动的速度越慢, 在 紧贴管壁处速度几乎为零。因此在渗流计制作过程 中, 要将加热棒和 PT100 尽可能固定在细管中轴线 上方可得到最好的测量效果。







图 3 速度场仿真图

3 硬件电路设计

3.1 铂电阻测温电路

测温电路主要是对 PT100 铂电阻上的电压信 号进行采集和放大。通过 STM32 内部 A/D 采样端 口对测温电路输出的电压信号进行采样并显示在屏 幕上,运用 RS-485 总线将数据上传到主机进行处 理。图 4 为测温电路的设计框图。



测温电路主要包括 PT100 铂电阻、信号放大电路、滤波电路、STM32 控制器以及电源电路等^[13],最终实现对铂电阻电压信号的实时采集和上传。

1 mA 恒流源产生电路使用 Howland 运放电流 源^[14],如图 5 所示电路,有两个电阻反馈网络。在保 持输入电压 V_{in} 不变的情况下,假设因负载电阻 R_L减小而引起输出电流 i_L增大,则节点 c 和 d 间的 电压升高,则流过 R₂ 和 R₄ 的电流 i_n 和 i_E增大,因 R₂ 不变,则节点 a 的电压升高,根据运算放大器"虚 短"的概念,节点 b 的电压也要升高,在相同输入电 压的情况下,此时流过电阻 R₁ 的电流减小,再根据 运算放大器"虚断"的概念,则流过 R₃ 的电流也减 小,而输出电流为流过 R₃ 和 R₅ 的电流之和,所以此 时输出电流减小,通过闭环反馈从而抑制了输出电 流的增加,以达到恒流的作用。其恒流性能良好, 最终可得到输出电流与输入电压成正比,可以得出:



图 5 Howland 恒流电路

铂电阻选用德国 Heraeus 高精度 A 级 PT100 薄膜型铂电阻, 0 ℃ 时阻值误差为±0.06%, 测温范 围为-50~300 ℃, 响应时间 $t_{0.5}$ =0.05 s, $t_{0.9}$ =0.15 s。 采用不锈钢套管进行防水, 总尺寸为 ϕ 3 mm×15 mm, 多股镀银屏蔽线为引出线。

采用三线制 PT100 铂电阻来减小导线电阻所 带来的附加误差,使用 op07c 电压运算放大器采集 铂电阻上的电压信号并进行 100 倍放大。如图 6 所 示为三线制铂电阻测量原理,当电桥平衡时 $R_1(R_{T}+r_6)=R_2(R_3+r_4)$,因为 $R_1=R_2$,所以 $R_{T}+r_6=R_3+r_4$, $r_4=r_5=r_6$ 为三线制铂电阻导线上的电阻,所以 $R_{T}=R_3^{(15)}$ 。



3.2 测温电路标定

分别采用 4 个 109.73,120,125,140 Ω 的 RX70 型万分之一精度的高精密线绕电阻来代替电 路中的铂电阻对测温电路进行标定,标定结果放大 倍数约为 99.93,平均误差为 0.1655 mV,对应到 PT100 铂电阻分度表中可得到测温精度约为 0.1 ℃, 满足对岩土中渗流监测的需求。

4 实验装置的设计

4.1 流速与温度的变化关系实验

为验证流速与温度变化的关系,设计如图 7 所 示的实验装置,分为限流装置、温度信号检测和放 大电路、加热棒电路,将水袋用支架挂起,水袋、渗流 计细管、限流阀之间用软管连接,渗流计细管用铁 甲台固定并保持水平,调整限流阀旋钮获得不同的 流速,加热棒恒功率加热。通过 PT100 采集到的渗 流计细管两端的温度差来计算出流速和流量的大小。

4.2 渗流计标定实验装置

为了得到岩土中渗流的真实情况,更好地模拟



图 7 流速变化和温度之间的关系实验

岩土中渗流的条件和环境,设计了如图 8 所示的标 定实验装置,长度 110 cm 直径 6 cm 的透明管和 DN50 口径的弯头以及水平的长度为 40 cm 直径为 6 cm 的透明管进行连接,并采用弧形支架固定在底 板上保持稳定。水平放置的透明管内是渗流计细管 和漏斗以及透水石的结合体,使用防水胶进行连接 和填充缝隙。在垂直透明管中加入一定量的土,然 后加入水,水由于重力渗过土然后流经弯头接着流 过透水石集聚在漏斗内,当漏斗中的水充满一半时 水位和渗流计细管平齐,此时水开始充满细管,分 别流过细管中的 PT100、加热棒、PT100,整套装置 连接处均采用防水胶进行密封处理。目前采用控制 限流阀来控制水的流速来模拟长管内装土的状态。



图 8 渗流计标定实验装置及实物图

5 实验数据处理

为了模拟出土壤中的渗流速度,采用限流阀来 对流速进行限定,查阅各类土的渗透系数如表1 所示。

由于岩土中的渗流是为了监测垮坝、滑坡、基

表1 岩土渗透系数经验值	
地层岩性	渗透系数/(m·d ⁻¹)
粘土	0.005
粉土质砂	0.5~1.0
细砂	1.0~5.0
中砂	5.0~20.0
粗砂	20~50
稍有裂隙的岩石	20~60

坑塌陷等一系列灾害事故,其岩土大多为颗粒直径 较大的粗砂或松散堆积物。故选用粉土质砂(颗粒 直径约为 0.05 mm)渗透系数为 0.6 m/d,换算到长 管截面为 0.18 mL/s,以每滴水 0.05 mL 来计算,流 速大约为 3 滴/s~4 滴/s。使用限流阀将流速限制为 1 滴/s, 2 滴/s, 3 滴/s, 4 滴/s,在非同一天的同一时 间、长管中水位一致、加热棒功率恒定 4 W 的情况 下分别进行多次实验,实验结果如图 9 所示。其中 横坐标代表时间,纵坐标为下游 PT100 测温的电压 值大小,电压越大代表温度越高。



图 9 不同流速下电压变化对比

可看出不同流速下,达到稳定的时间,斜率都 有明显不同,其中 0.05 mL/s(1 滴/s)大约需 4 500 s 达到稳定,0.10 mL/s(2 滴/s)大约需 3 300 s 达到稳 定,0.15 mL/s(3 滴/s)大约需 2 100s 达到稳定,0.20 mL/s (4 滴/s)大约需 390 s 达到稳定。

根据图 9 中的数据,将 PT100 上的电压值转化 成温度值。保持加热棒恒功率 4 W 加热时,在流量 为 0.05 mL/s(1 滴/s)时,下游 PT100上的最高温度 为 51.1 ℃,此时上游 PT100 上的温度值,也就是入 水口的初始温度为 22.1 ℃,经过4 600 s 以后温度差 约为 29 ℃,并保持不变。在流量为 0.1 mL/s(2 滴/s) 时,下游 PT100 的最高温度为 38.6 ℃,入水口温度 为 22.1 ℃, 经过 3 000 s 以后温度差约为 16.5 ℃ 并 保持不变。在流量为 0.15 mL/s(3 滴/s), 上下游温 度差约为 2 ℃ 并保持不变。0.2 mL/s 及以上测出 的温差太小, 难以检测。故采用 4 W 加热棒恒功率 加热, 细管内 PT100 相距加热棒都为 10 cm 的情况 下, 适用于 0.05~0.15 mL/s 的渗流速度, 此时测量精 度最高。

6 结束语

本文设计了一种基于热扩散原理的液体微流量 计用来测量岩土中的渗流。实验结果表明这种检测 方式和传统渗压计相比,具有直接测量、测量范围 广、重复性好等优点,可以测量到最低 0.05 mL/s 的 渗流速度,将来可以实现多点测量,从而实现对岩 土中渗流的在线监测,是一种新的测量岩土中渗流 的解决方案。

参考文献

- [1] 朱海波. 渗流对地下室基坑沉降的影响及预防 [J]. 工程建 设与设计, 2017(16): 28-29.
- [2] 杨淑艳,赵玉坤.浅谈水库渗流安全问题 [J].内蒙古水利, 2014(1):152-152.
- [3] 杨裕云,杨红刚,吴有才.与地下水作用有关的地质灾害 [J].水文地质工程地质,2003(S1):1-7.
- [4] 刘泉声, 崔先泽, 张程远, 等. 多孔介质中沉积颗粒脱离特性 试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 747-754.
- [5] 孙嘉彬. 张峰水库大坝渗流监测和仪器选型 [J]. 山西水利, 2008, 24(5): 77-79.
- [6] 程冠初, 岩土介质渗流以及输运从孔隙尺度到达西尺度的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [7] 刘玉峰, 王消川. 对土石坝渗流安全监测仪器的几点认识[J]. 大坝观测与土工测试, 2000(5): 11-13.
- [8] 李刚, 宋先海. 渗压计在渗流监测中的误差分析及对策 [J]. 人民长江, 2010, 41(15): 59-62.
- [9] 杨世铭. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社. 2006: 20-32.
- [10] 刘伟帅. 基于热扩散式恒功率流量测量研究 [D]. 大庆: 东北 石油大学, 2015.
- [11] 李雯, 热式质量流量计的设计热式质量流量计的设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [12] 魏列江, 液体微小流量的非定常流测量原理与方法的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2009.
- [13] MAHNAM A, YAZDANIAN H, SAMANI M M. Comprehensive study of Howland circuit with non-ideal components to design high performance current pumps[J]. Measurement, 2016(82): 94-104.
- [14] NIE Y Z. Design of high precision temperature sensor based on platinum resistance[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 539: 177-180.
- [15] MORRIS A S, LANGARI R. Measurement and Instrumentation (Second Edition)[M]. Pittsburgh:Academic Press,2016.

(编辑:徐柳)