

文章编号:1007-2284(2021)05-0183-05

基于钻孔压水试验的渗透系数取值方法研究

刘明明¹,李博勇^{2,3},熊泽斌¹,向友国¹,花俊杰¹

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司,武汉 430010; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072;
3. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室,武汉 430072)

摘要:岩体的渗透系数是渗流场分析与工程渗控设计的重要参数,钻孔压水试验是获取该参数的主要方式之一。针对地下水面下有界渗流区域中倾斜钻孔压水试验数据解析问题,基于Darcy定律和镜像法建立了岩体渗透系数解析模型,并对该模型进行了数值验证。该解析模型形式简洁,物理意义明确,且在钻孔试段离地下水位较远时可退化为现行钻孔压水试验规程推荐的Hvorslev公式,是现行压水试验数据解析方式的理论拓展,可作为钻孔压水试验规程修订的重要依据。

关键词:钻孔压水试验;地下水位;渗透系数;解析模型

中图分类号:TV139.1 **文献标识码:**A

刘明明,李博勇,熊泽斌,等. 基于钻孔压水试验的渗透系数取值方法研究[J]. 中国农村水利水电,2021(5):183-187.

LIU M M, LI B Y, XIONG Z L, et al. An analytical model for the permeability of fractured rocks based on water pressure tests in boreholes [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(5):183-187.

An Analytical Model for the Permeability of Fractured Rocks Based on Water Pressure Tests in Boreholes

LIU Ming-ming¹, LI Bo-yong^{2,3}, XIONG Ze-bin¹, XIANG You-guo¹, HUA Jun-jie¹

(1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, Hubei Province, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China; 3. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering (Ministry of Education), Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

Abstract: The permeability of fractured rocks is an important hydraulic property for seepage analysis and design of seepage control system in the surrounding rocks. The water pressure test in borehole is an effective technique for characterizing the permeability in the fractured rocks. With the mirror-image method, a Darcy's law-based analytical model is established and numerically verified to estimate the hydraulic conductivity of the tested rocks. Given that the expression of hydraulic conductivity k is consistent with the Hvorslev equation recommended in the currently-applied codes of borehole water pressure test under certain conditions, the proposed model is hence an extension of the recommended formula. With its simple form and clear physical meaning, the proposed model can be treated as an important basis for revision of the codes of water pressure test in borehole.

Key words: water pressure test in borehole; groundwater level; hydraulic conductivity; analytical model

收稿日期:2020-07-13

基金项目:国家重点研发计划项目“深厚覆盖层上特高土石坝建设与安全保障技术”(2017YFC0404804);库区与枢纽区地质环境演化规律及预测方法课题项目(2018YFC0407001);中国长江三峡集团公司科研项目(XLD/2119)。

作者简介:刘明明(1991-),男,博士,主要从事岩土介质中的复杂流动特性研究及水利水电工程设计。E-mail:whulmm@whu.edu.cn。

0 引言

在水利水电开发、油气资源开采与储存、地下水资源评价与开采等领域,均普遍涉及复杂地质条件下岩体渗流和溶质迁移过程分析、模拟与控制的关键问题。例如,在大型水利水电工程建设中,厂坝区岩体渗漏和渗透稳定问题事关坝址选择、水电站运行安全和水能利用效率,通过在厂坝区合理布置防渗

排水系统,以控制厂坝区岩体渗漏量并保障岩体渗透稳定性,对于优化工程设计、确保工程安全和节省工程投资具有重要意义^[1,2]。在油气资源开采中,探明油气资源的赋存位置和地层渗透特性等地质条件事关开采钻井布置、钻井尺寸确定和开采步骤安排,对提高油气资源开采效率、节省工程投资至关重要。在地下水资源评价与开采中,获取区域水文地质条件、构造发育特征和地表水-地下水补给关系,是评估地下水资源、确定开采方案的基础环节。在上述工作中,岩体渗流参数的准确辨识则是其中的关键环节,而钻孔压水试验则是各类岩体工程实践中常用且十分重要的确定岩体渗透系数的工具,为工程渗控设计提供基本资料^[3-8]。

钻孔压水试验是在岩体中钻孔,采用一定手段将钻孔分割成若干个试段,将预定压力的水逐级压入试段围岩,记录不同试验压力下的稳定压入流量以获取试段围岩渗透系数的现场试验方法。目前,我国水利水电行业有两部关于钻孔压水试验的规程:《水利水电工程钻孔压水试验规程》(SL 31-2003)^[9];《水电工程钻孔压水试验规程》(NB/T 35113-2018)^[10]。这两部现行的规程均推荐采用 Hvorslev 公式^[11]对线性流(Darcy 流)的压水试验数据进行解析。通常情况下,试验钻孔布置在地下水面以下一定深度,且由于钻孔的多种用途或者地质因素,部分钻孔压水试验是在倾斜孔中开展,而 Hvorslev 公式^[11]不能考虑地下水面和钻孔倾斜对试验数据的影响。

综上所述,钻孔压水试验是研究岩体渗透系数的重要手段,但目前的压水试验数据分析方法还不完善。本文基于 Darcy 定律和镜像法,建立考虑地下水面和钻孔倾斜的钻孔压水试验数据解析模型,为岩体渗流参数的准确辨识提供有效途径。

1 钻孔压水试验问题描述与转化

如图1所示,钻孔中心位于地下水面以下,以地下水面为基准面,对于压水试验钻孔,地下水面为水头为零的有界定水头边界,其他方向边界为水头为零的无界定水头边界,直接求解该钻孔压水试验的解十分困难。为此,从镜像法原理^[12]出发,以地下水面为对称面,在地下水面上方映出与真实钻孔(简称为实孔)对称的虚孔,该虚孔具有下列特征:

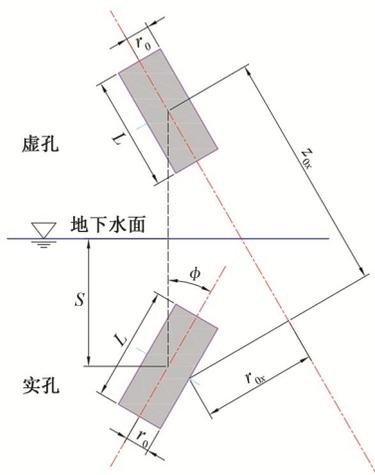


图1 镜像法概念图

Fig.1 Conceptual model for mirror-image method

- (1)位置对称:虚孔与实孔的位置对地下水面是对称的;
- (2)流量相等:虚孔的流量与实孔的流量相等;
- (3)性质相异:虚孔为抽水孔,实孔为压水孔。

通过上述镜像法处理,相当于将地下水面的边界作用采用虚孔替代,进而将实际的单侧有界渗流场(地下水部下部)转化为虚拟的无界渗流场,从而将单侧有界渗流场中的单孔压水试验问题,转化为无界渗流场中实孔压水和虚孔抽水的问题,最终利用叠加原理,求得钻孔压水试验的解。

2 无界流场中单孔压水试验解答

如图2所示,在钻孔压水试验条件下,岩体渗透系数解析模型的推导基于以下3点假定:①在钻孔轴向方向,单位长度流量 q 保持不变;②水流服从点源球形扩散;③压水试验段无穷远处孔隙水压力为零。

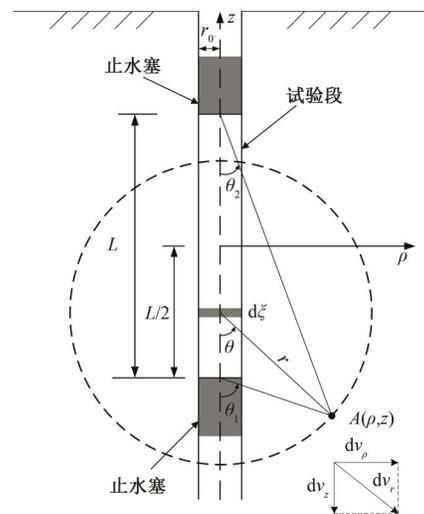


图2 单孔压水试验示意图

Fig.2 Conceptual model for single borehole test

需要指出的是,上述假定与压水试验规程^[9,10]推荐公式(Hvorslev 公式^[11])的基本假定一致。其中,假定①和②的实质是岩体可等效为均质、各向同性介质,因此通过压水试验测得的参数反映的是岩体的综合渗透系数。假定③是水文地质试验的常用假定,其实质是假定压水试验对岩体地下水位的影响随渗径增加而逐渐减小,并在无穷远处衰减为零。

由假定①可得单位长度流量 q 为:

$$q = Q/L \quad (1)$$

式中: L 为钻孔压水试验段长度; Q 为钻孔压水试验段总流量。

根据假定②,在钻孔压水试验段上取微元 $d\xi$,该微元引起岩体中A点的流速增量 dv_r 为:

$$dv_r = \frac{qd\xi}{4\pi r^2} = \frac{Qd\xi}{4\pi Lr^2} \quad (2)$$

式中: r 为A点与流量微元 $d\xi$ 之间的距离, $r = \sqrt{\rho^2 + (z - \xi)^2}$; ρ 和 z 为A点在柱坐标系下的坐标; ξ 为微元 $d\xi$ 的 z 向坐标。

将A点的流速增量 dv_r 沿着径向 ρ 和轴向 z 分解可得:

$$\begin{cases} dv_\rho = dv_r \cdot \frac{\rho}{r} \\ dv_z = dv_r \cdot \frac{z - \xi}{r} \end{cases} \quad (3)$$

$J = v/k$ (6)

对式(3)两边进行积分,可得A点的渗流速度:

$$v_\rho = \int_{-L/2}^{L/2} dv_\rho = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{q}{4\pi r^2} \cdot \frac{\rho}{r} d\xi = \frac{q}{4\pi\rho} (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) \quad (4)$$

$$v_z = \int_{-L/2}^{L/2} dv_z = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{q}{4\pi r^2} \cdot \frac{z - \xi}{r} d\xi = \frac{q}{4\pi\rho} (\sin\theta_2 - \sin\theta_1) \quad (5)$$

式中: $\xi=z+\rho\cot\theta$,其中 θ 为 ξ 点和A点连线与 z 轴负向的夹角。

根据Darcy定律:

$$P_A = \int_{\rho}^0 \frac{qt}{4\pi k} \left(\frac{L/2 - z}{\sqrt{(1/t)^2 + (L/2 - z)^2}} + \frac{L/2 + z}{\sqrt{(1/t)^2 + (L/2 + z)^2}} \right) d(1/t) = \int_0^{1/\rho} \frac{q}{4\pi kt} \left(\frac{L/2 - z}{\sqrt{(1/t)^2 + (L/2 - z)^2}} + \frac{L/2 + z}{\sqrt{(1/t)^2 + (L/2 + z)^2}} \right) dt = \frac{Q}{4\pi Lk} \left\{ \operatorname{arcsinh}[(L/2 - z)/\rho] + \operatorname{arcsinh}[(L/2 + z)/\rho] \right\} \quad (9)$$

3 地下水面上有界渗流区域中单孔压水试验解答

对于地下水面上开展钻孔压水试验,根据镜像法,真实钻孔孔壁中心压力水头 P 等于无界渗流场中实孔作用产生的压力水头 $P_{实}$ 叠加虚孔作用产生的压力水头 $P_{虚}$:

$$P = P_{实} + P_{虚} \quad (10)$$

$$P_{实} = \frac{Q}{2\pi Lk} \operatorname{arcsinh}\left(\frac{L}{2r_0}\right) \quad (11)$$

$$P_{虚} = \frac{-Q}{4\pi Lk} \left\{ \operatorname{arcsinh}\left[\frac{(L/2 - z_{0x})}{r_{0x}}\right] + \operatorname{arcsinh}\left[\frac{(L/2 + z_{0x})}{r_{0x}}\right] \right\} \quad (12)$$

式中: r_0 为实孔半径; r_{0x} 为实孔孔壁中心点与虚孔轴线的距离; z_{0x} 为实孔孔壁中心点与虚孔中心平面的距离。由图1可知: $r_{0x} = |2S \sin(\phi) - r_0 \cos(2\phi)|$, $z_{0x} = 2S \cos(\phi) + r_0 \sin(2\phi)$ 。其中, S 为实孔中心距地下水面距离, ϕ 为钻孔偏移铅直方向的角度。此外, $P_{虚}$ 即地下水面和钻孔倾角因素对钻孔压水试验数据影响的结果, $P_{虚}$ 与 S 、 ϕ 的关系如图3所示。

由式(10)~式(12)和图3可知,钻孔压水试验 P - Q 数据有如下特征:

- (1) 钻孔孔壁中心压力水头 P 与压入流量 Q 成线性正比关系;
- (2) P - Q 曲线斜率 $m=P/Q$ 与岩体渗透系数的倒数 $1/k$ 成线性正比关系;
- (3) P - Q 曲线斜率 $m=P/Q$ 与钻孔半径 r_0 成负相关关系,与钻孔长度 L 成正相关关系;
- (4) 在孔中心距地下水面距离 S 很小(例如 $S \leq 6$ m)时,虚孔

式中: J 为水力梯度; k 为渗透系数。

沿径向 ρ 对式(6)两边积分,可得A点的孔隙水压力水头 P_A (m):

$$P_A = P_A - P_{+\infty} = \int_{\rho}^{+\infty} J d\rho = \int_{\rho}^{+\infty} \left(v_\rho/k \right) d\rho \quad (7)$$

将式(5)代入式(7)可得压力水头 P_A 与单位长度流量 q 的关系式:

$$P_A = \int_{\rho}^{+\infty} \frac{q}{4\pi k\rho} (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) d\rho = \int_{\rho}^{+\infty} \frac{q}{4\pi k\rho} \left(\frac{L/2 - z}{\sqrt{\rho^2 + (L/2 - z)^2}} + \frac{L/2 + z}{\sqrt{\rho^2 + (L/2 + z)^2}} \right) d\rho \quad (8)$$

令 $t=1/\rho$,得到:

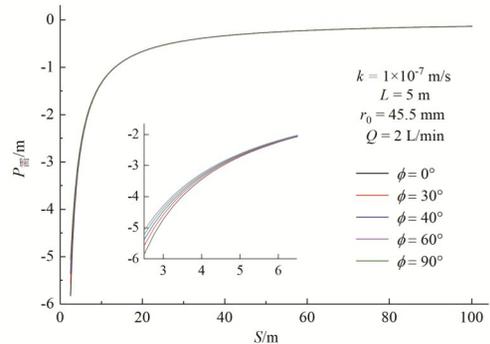


图3 $P_{虚}$ 随 S 、 ϕ 的变化曲线

Fig.3 Relationship between $P_{虚}$ and S 、 ϕ

作用项 $P_{虚}$ 随钻孔倾角 ϕ 的增大而增大,但倾角 ϕ 对 $P_{虚}$ 的影响随着 S 的增大逐渐减小为0。

(5) 地下水位对 $P_{虚}$ 的影响比钻孔倾角大,随着钻孔中心距地下水面距离 S 增加, $P_{虚}$ 逐渐趋于0。

根据特性(4),当 S 较大(例如 $S \geq 10$ m)时,倾角 ϕ 对 $P_{虚}$ 的影响可以忽略,此时式(12)可简化为:

$$P_{虚} = \frac{-Q}{4\pi Lk} \left\{ \operatorname{arcsinh}\left[\frac{(L/2 - 2S)}{r_0}\right] + \operatorname{arcsinh}\left[\frac{(L/2 + 2S)}{r_0}\right] \right\} \quad (13)$$

根据特性(5),当 S 进一步增大时(例如 $S \geq 50$ m),可近似取 $P_{虚}=0$ 。另外,在实际压水试验中,通常有 $r_0 \ll L$,此时式(10)~式(12)的钻孔压水试验 P - Q 关系可简化为:

$$P = \frac{Q}{2\pi Lk} \ln\left(\frac{L}{r_0}\right) \quad (14)$$

式(14)即为Hvorslev公式^[11],也是我国钻孔压水试验行业规程的推荐公式^[9,10]。

4 数值验证

为了验证本文解答[式(10)~式(12)]的正确性,建立如图4所示的圆柱数值模型。圆柱半径200 m,其中包含孔径为91 mm,长度为5 m,倾角为 ϕ 的钻孔试段,试段中心位于圆柱轴线上。试段中心离圆柱底面100 m,离圆柱顶面(即地下水面)距离为 S ,即模型的高度为 $(100+S)$ m。采用通用有限元软件COMSOL Multiphysics对该模型进行网格划分和数值计算^[13],对试段附近的网格进行了加密。计算的边界条件如下:模型侧面,顶面和底面均取0水头边界,钻孔试段壁面为流量入口边界(流量为 Q),试段两端为隔水边界(模拟止水塞)。采用COMSOL中达西定律模块可算得孔壁中心点的压力水头 P 。

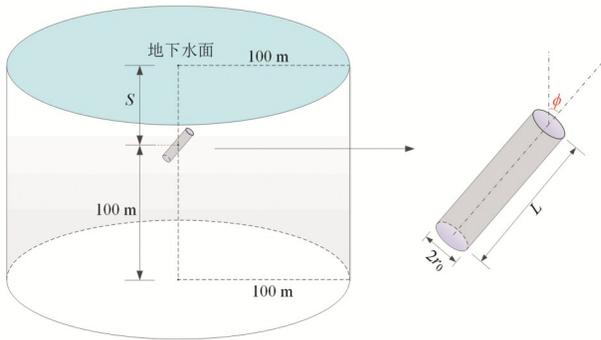


图4 数值模型示意图
Fig.4 The numerical model

不同 S 、 ϕ 条件下 P - Q 曲线的数值解和本文解析解的对比如图5所示,可见本文提出的模型与数值结果几乎完全一致,证明了解析模型的准确性。从图5中还可看出 P - Q 曲线的斜率以Hvorslev公式(规程模型)为上边界,随着 S 的增大而增大。

5 适用条件

从图5以及第4节中性质(2)可以看出,对给定压水试验 P - Q 数据,如果忽略地下水位和钻孔倾角的影响,直接采用现有规程公式[式(14)],将导致渗透系数被高估。为了量化被高估的程度以及厘清在何种条件下需要使用本文模型,引入如下相对误差:

$$\varepsilon = \frac{k' - k}{k} \times 100\% \quad (15)$$

式中: k' 是采用现有规程公式计算得到的渗透系数; k 是采用本文模型计算得到的渗透系数; ε 为两者的相对误差,将式(10)~式(12)以及式(14)代入式(15)可知相对误差 ε 主要与钻孔试段参数 L 、 r_0 、 ϕ 、 S 有关,本文重点关注 ϕ 、 S 的影响,图6显示了相对误差 ε 随 ϕ 、 S 的变化,图中钻孔半径和长度取常用值($L=5$ m, $r_0=45.5$ mm)。

由图6可以看出,随着钻孔中心距地下水面的距离 S 的增大,两种模型估算的渗透系数相对误差逐渐减小,当 $S>13.3$ m时,误差小于2%(一般生产允许误差),此时忽略钻孔倾角和地下水位,直接采用现有规程公式是合理的。而当 $S\leq 13.3$ m时,

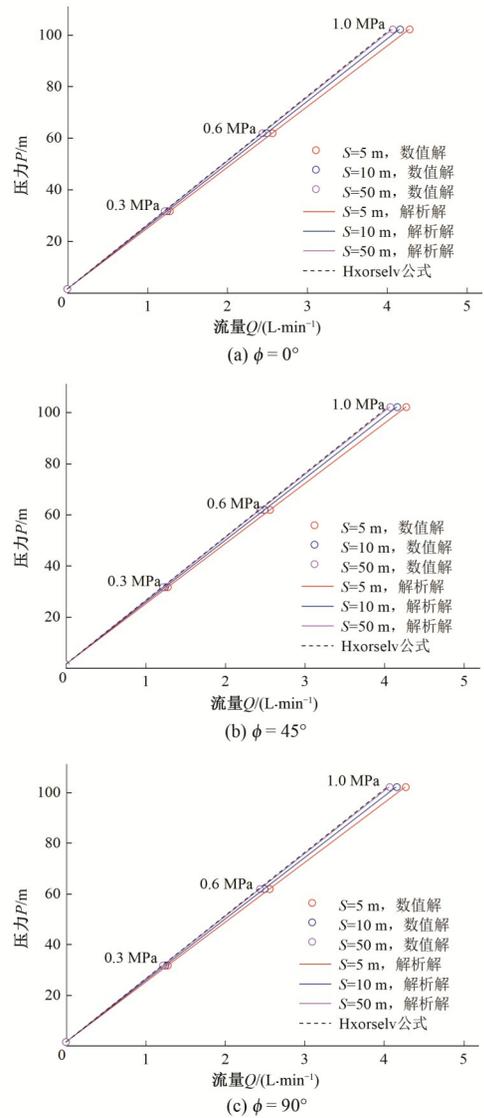


图5 本文解答与数值结果对比图, $k=1\times 10^{-7}$ m/s
Fig.5 Comparisons between the proposed model and the numerical results with $k=1\times 10^{-7}$ m/s

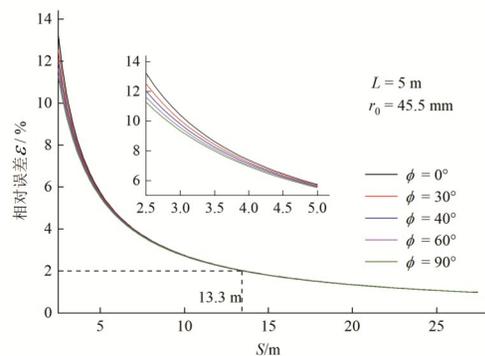


图6 渗透系数的相对误差随 S 、 ϕ 的变化曲线
Fig.6 Relationship between the relative error of the estimated hydraulic conductivity and S 、 ϕ

需采用本文提出的模型才能求得较为准确的渗透系数。

另外,在 $S\leq 5$ m时,采用规程公式产生的误差随着钻孔倾角 ϕ 的增大而减小;在 $S>5$ m时,钻孔倾角的影响几乎可以忽略。整体而言,在各向同性假定下钻孔倾角对渗透性估计的影响很

小,这说明大多数情况下,式(12)可以简化为式(13)。

6 结 论

本文提出了考虑钻孔倾角及地下水位的钻孔试验数据分析方法,并采用数值模拟方法进行了验证,主要结论如下。

(1) 本文提出的钻孔压水试验解析模型从机理上反映了钻孔倾角及地下水位对试验数据分析的影响。

(2) 在钻孔距地下水面距离较远时,本文模型可退化为我国钻孔压水试验行业规程推荐的 Hvorslev 公式。

(3) 本文模型参数较少,物理意义明确,便于工程应用。在钻孔($L=5\text{ m}$, $r_0=45.5\text{ mm}$)中心距地下水面距离小于 13.3 m 时,需采用本文提出的模型才能求得较为准确的渗透系数。 □

参 考 文 献:

- [1] 周志芳,滕建仁. 三峡工程大坝坝基渗控分析[J]. 岩石力学与工程学报,2001(5):700-704.
- [2] 陈益峰,周创兵,胡 冉,等. 大型水电工程渗流分析的若干关键问题研究[J]. 岩土工程学报,2010(9):136-142.
- [3] HOULSBY A C. Routine interpretation of the Lugeon water-test [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1976, 9(4):303-313.
- [4] WANG M, KULATILAKE P H S W, UM J, et al. Estimation of REV size and three-dimensional hydraulic conductivity tensor for a fractured rock mass through a single well packer test and discrete fracture fluid flow modeling [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(7):887-904.
- [5] 张世殊. 溪洛渡水电站坝基岩体钻孔常规压水与高压压水试验成果比较[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(3):385-387.
- [6] 王锦国,周志芳,黄 勇. 基于压水试验资料的岩体透水性分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003(4):562-565.
- [7] 蒋中明,陈胜宏,冯树荣,等. 高压条件下岩体渗透系数取值方法研究[J]. 水利学报,2010,41(10):1228-1233.
- [8] 平 扬,蒋志坚. 基于压水试验的裂隙岩体渗透特性分析[J]. 中国农村水利水电,2014(9):166-168.
- [9] 中华人民共和国行业标准编写组. 水利水电工程钻孔压水试验规程: SL 31-2003 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [10] 中华人民共和国行业标准编写组. 水电工程钻孔压水试验规程: NB/T 35113-2018 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2017.
- [11] HVORSLEV M J. Time lag and soil permeability in ground-water observations [C]//MI Bulletin, US Crops of Engineerings Waterways Experimental Station Vicksburg. [S.l.]: [s. n.], 1951, 36: 43-44.
- [12] 薛禹群,吴吉春. 地下水动力学[M]. 3版. 北京:地质出版社,2010.
- [13] 王 瑞,沈振中,陈孝兵. 基于COMSOL Multiphysics的高拱坝渗流-应力全耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增刊2): 3197-3204.
- [14] 曹凯花. 北京市属医院建设项目治理影响因素研究[D]. 北京:北京建筑大学,2018.
- [15] 佟 瑶. 基于项目治理的EPC总承包项目绩效评价[D]. 郑州:华北水利水电大学,2019.
- [16] 庄城城,易 辉,张 杰. EEMD多尺度熵和LSSVM在模拟电路故障诊断中的应用[J]. 微电子学与计算机,2019,36(10):78-82.
- [17] HUANG G B, ZHU Q Y, SIEW C K. Extreme learning machine: Theory and applications [J]. Neurocomputing, 2006, 70(1-3): 489-501.
- [18] 邹剑晖,敖银辉. 基于CEEMD和小波核极限学习机的轴承故障诊断[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019,61(11):74-77,82.
- [19] 张 宁,魏秀业,徐晋宏. 基于LMD样本熵与ELM的行星齿轮箱故障诊断[J]. 机械传动,2020,44(4):152-157.
- [20] 万书亭,彭 勃. 基于非局部均值去噪和快速谱相关的滚动轴承早期故障诊断方法[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(1):76-85.
- [21] 孙泽金. 转子故障信号的敏感特征提取方法研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2019.
- [22] 卢 俊,吴建星. 基于EEMD近似熵的矿山微震信号特征提取研究[J]. 化工矿物与加工,2019,48(9):1-5.

(上接第175页)

- [17] ROBERT J, RALF M. The relationship between project governance and project success [J]. International Journal of Project Management, 2016, 34(4):613-626.

(上接第182页)

- [13] 唐贵基,姜 乐,王晓龙. 基于SSD和MPE的滚动轴承故障诊断方法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020,62(3):70-73.
- [14] 苟先太,李昌喜,金炜东. VMD多尺度熵用于高速列车横向减振器故障诊断[J]. 振动、测试与诊断,2019,39(2):292-297,442.
- [15] 程晓宜,陈启卷,王卫玉,等. 基于多维特征和多分类器的水电机组故障诊断[J]. 水力发电学报,2019,38(4):179-186.
- [16] 张伟博. 基于时频分析与非线性熵的水电机组智能故障诊断与状态趋势预测研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
- [17] 齐 天,裘 焱,吴亚锋. 利用聚合经验模态分解抑制振动信号中的模态混叠[J]. 噪声与振动控制,2010,30(2):103-106.
- [18] COSTA M, GOLDBERGER A L, PENG C K. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series. Physical Review Letters, 2002, 89(6):068102-1-4.
- [19] 秦喜文,高中华,董小刚,等. 利用经验模态分解和多尺度熵的滚动轴承故障诊断研究[J]. 制造业自动化,2015,37(21):67-70.