## 基于因子分析方法解析降雨分量的渗流统计模型及应用

霍吉祥,宋汉周,顾小勇,吴志伟 (河海大学地球科学与工程学院,南京 210098)

摘要:基于原型监测资料的渗流统计模型可用于分析枢纽区的渗流动态,而其中因子的选择影响模型的有效性。针对 抽水蓄能电站环境变量监测频率的不一致性,对输水系统所在山体的地下水水位进行因子分析并对提取出的公共因子 进行识别,而后将其中的降雨因子应用于基于滞后效应的渗流统计模型中。计算结果表明,与不考虑降雨因子相比较, 所建模型可以有效地提高模型精度。因而,该模型适用于环境变量监测频率不一致或缺少相关资料的情形。

关键词:因子分析;改进渗流统计模型;降雨分量;抽水蓄能电站

中图分类号: P641.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3665(2011)06-0013-06

建立合理的渗流统计模型,对于及时正确地分析 和监控大坝的渗流状态、保证大坝的安全运行,具有重 要意义。一般认为,坝址渗流量主要受库水位分量、温 度分量、降雨分量以及时效分量四个因素的影响<sup>[1]</sup>, 各分量值选取的恰当与否,直接关系着模型的精确程 度。

对部分常规水电站而言,受历史或监测手段等自 然条件的制约,缺少某一时期的库水位或降雨量资料, 无法建立对应时段内的渗流统计模型或缺失模型中的 某一分量<sup>[2]</sup>,可能造成模型结果精度不理想,从而影 响进一步的分析判断;而在抽水蓄能电站枢纽区,库水 位、渗流量、渗透压力等观测资料大多每小时(或半小 时)记录一次,而降雨资料仍按传统的日降雨量记录, 监测数据频率的不一致直接影响了模型的建立和拟合 效果<sup>[3]</sup>。

本文以天荒坪抽水蓄能电站为例,首先对输水系统所在山体的地下水水位进行因子分析,并对提取出的主要因子进行识别;然后将得到的降雨因子应用于基于滞后效应的渗流统计模型,对一施工支洞内量水堰渗流量进行统计分析。实例计算表明,与不考虑降雨因子的模型相比较,该方法可以提高模型精度。

收稿日期: 2010-12-12; 修订日期: 2011-07-12

- 基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX10B\_ 218Z; CX09B\_167Z);国网新源控股有限公司科技 项目(THPKJ-2010-02)
- 作者简介:霍吉祥(1982-),男,博士研究生,从事大坝环境水文 地质研究。

E-mail: jixianghuo@ hotmail. com

#### 1 研究思路与数学模型

1.1 研究思路

抽水蓄能电站的运行特点决定了其渗流统计模型 较常规的应有较大不同,主要表现为模型以"天"为变 化周期、"小时"为计算单位。而在实际工作中,由于 受监测技术等条件的制约,降雨量资料仍按传统的日 降雨量来记录,从而无法在模型中得到直接地表达。 因此,如何将降雨量资料的监测频率与其它监测数据 保持一致,即将日降雨量转化为以"小时"为间隔的 "时降雨量",就成为模型是否有效的关键。

水电站枢纽区常布置有地下水位观测孔,通过水 位监测了解该区域的流场变化。岸坡地下水位主要受 上游库水位、前期降雨、温度和时效的影响<sup>[4]</sup>。在抽 水蓄能电站枢纽区,岸坡部位一般布置有地下水位观 测孔,可选取研究时段内一定范围下的观测孔监测资 料,通过因子分析的方法提取出以上各影响因子作用 的程度,并将其中的降雨分量应用于渗流统计模型,从 而解决了实际降雨监测资料频率与其它分量不一致的 问题,使得模型更加有效。研究思路流程,见图1。

1.2 因子分析

因子分析是一种揭示事物之间本质联系的统计分 析方法。其目的主要是解释观测变量之间的内在关联 性,用较少的维度去表示原来的数据结构,以便发现规 律或本质<sup>[5]</sup>。因子分析在研究地下水水质、水流系统 等方面得到广泛应用<sup>[6]</sup>。

假设 m 个可能存在相关关系的变量  $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$  含有 P 个独立的公共因子  $F_1, F_2, \dots, F_p$  ( $m \ge p$ ),每个变量  $Z_i$  含有特殊因子  $U_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ),诸特殊因子  $U_i$  间互不相关,且与  $F_i$  ( $j = 1, \dots, p$ )也互不相



图 1 分析流程图 Fig. 1 Flowchart of analysis

关,则其数学模型一般表达为:

$$\begin{cases} Z_1 = a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \dots + a_{1p}F_p + c_1U_1 \\ Z_2 = a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + \dots + a_{2p}F_p + c_2U_2 \\ \vdots \\ Z_m = a_{m1}F_1 + a_{m2}F_2 + \dots + a_{mp}F_p + c_mU_m \end{cases}$$
(1)

简记为:

$$Z_{(m\times 1)} = A_{(m\times p)} F_{(p\times 1)} + C_{(m\times m)} U_{(m\times 1)}$$
(2)

式中: A——因子载荷矩阵,其元素 a<sub>ij</sub>表示第 i 个变量 (z<sub>i</sub>) 在第 j 个公共因子 F<sub>j</sub> 上的载荷,简称 因子载荷;

*C*——对角阵。

可根据占总方差的累计百分比、特征根大小、或碎 石图等获得所需公共因子数。为明晰所获公共因子的 意义,可进行因子旋转,从而对实际问题做出具体分析。

在抽水蓄能电站地区,可将岸坡部位各地下水位 观测孔获得的监测数据作为变量 Z<sub>i</sub>,通过因子分析可 获得若干公共因子 F<sub>j</sub>,为明确各因子对应的物理量, 可将求得的各公共因子与各影响因素作相关性分析或 作过程线分析,以达到提取相关环境因子的目的。

1.3 渗流统计模型

针对上述抽水蓄能电站不同于常规水电站的运行 工况,对传统的基于滞后效应的渗流模型<sup>[7]</sup>作出改 进:以"天"为变化周期、"小时"为计算单位,更加符合 抽水蓄能电站的实际情况,并将因子分析中提取出的 降雨因子应用于模型中:

$$Q = Q_{h} + Q_{T} + Q_{p} + Q_{\theta}$$
  
=  $a_{0} + a_{1} \int_{-\infty}^{0} \frac{1}{\alpha_{1}} \frac{1}{\sqrt{2\pi x_{2}}} e^{\frac{-(t-x_{1})^{2}}{2x_{2}^{2}}} H(t) dt +$   
$$\sum_{i=1}^{2} \left[ b_{1i} \sin \frac{2\pi i t'}{24} + b_{2i} \cos \frac{2\pi i t'}{24} \right] +$$
(3)  
 $c_{1} \int_{-\infty}^{0} \frac{1}{\alpha_{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi x_{4}}} e^{\frac{-(t-x_{3})^{2}}{2x_{4}^{2}}} p(t) dt +$ 

式中: 
$$Q$$
——参流量;  
 $Q_h$ ——库水位分量;  
 $Q_r$ ——温度分量;  
 $Q_p$ ——降雨分量;  
 $Q_{\theta}$ ——时效分量;  
 $a_0, a_1, b_{1i}, b_{2i}, c_1, d_1, d_2$ ——各分量的回归系数( $i = 1, 2$ );  
 $\alpha_1$ ——库水位权分布函数有关的调整参数,在固  
定观测时刻  $t = t_0$ ,为常数;  
 $\alpha_2$ ——降雨量权分布函数有关的调整参数,在固  
定观测时刻  $t = t_0$ ,为常数;

- $x_1$ ——库水位的滞后小时数;
- $x_2$ ——库水位的影响小时数;
- H(t) ——t 时刻的水位;
- t<sup>2</sup>——监测时刻至初始时刻的累计小时数;
- x<sub>3</sub>——降雨因子的滞后小时数;
- *x*<sub>4</sub>——降雨因子的影响小时数;
- *p*(*t*) 通过因子分析提取出的 *t* 时刻的降雨 因子值;
- $\theta = t^{2}/2400$  监测时刻至初始观测时刻的累 计小时数除以 2400。

需要指出的是,以往渗流统计模型中降雨分量大多 通过实测降雨量来求取,而由于降雨与大坝渗流的关系 较为复杂,与入渗条件、雨量大小等因素有关,降雨可能 会以地表径流的方式被排泄,因而其与渗流量之间是非 线性关系,一般采用指数关系法,文献[7]将降雨量作 2/5的指数变换;式(3)中的p(t)是通过对岸坡地下水 位进行因子分析后,提取出的降雨因子,即岸坡地下水 位受到降雨因素的影响,而非实际的降雨量,因此无需 再作指数变换;同理 $x_3 x_4$ 为降雨因子的滞后小时数和 影响小时数,由于降雨因子滞后于实际降雨,因此,两者 对应的滞后因子在数值上也并不相等。

#### 2 实例计算

#### 2.1 工程概况

天荒坪抽水蓄能电站位于浙江省安吉县天荒坪镇 境内,为日调节型抽水蓄能电站。电站枢纽主要由上 水库、下水库、输水系统、地下厂房洞室群和开关站等 组成。其中,上水库处于山河港左岸山顶的沟源洼地, 设计最高蓄水位905.2m,设计最低蓄水位863.0m;下 水库位于大溪村至潘村间的山河港峡谷中,设计最高 蓄水位344.5m,设计最低蓄水位295.0m。输水系统 及地下厂房区地层主要为流纹质熔凝灰岩,坚硬完整, 耐风化。电站于2000年12月全部投入生产。

为监测运行工况下输水系统围岩渗漏水的动态特征,在7#施工支洞内布置了4个量水堰(WE7-1~ WE7-4)。本文主要对2009年1月21日00:00~ 2009年4月12日23:00期间的渗流动态进行分析。

#### 2.2 因子提取

电站输水系统边坡布置有 12 个地下水位观测孔, 沿上下游方向自上库进/出水口至厂房之前,在 2 条输 水系统之间及两侧约 30m 范围内布置,其监测频率为 每小时记录1次。由于 7 #施工支洞位于输水系统斜 井段,因此对山体部位的 up1~up3、up7~up10 共 7 个 观测孔研究时段内的资料进行因子分析,可得到特征 值结果(图 2、表 1)。

图 2 为因子分析中的碎石图 ,即按特征值大小排

列的因子序号图。由图 2 可以看出,提取出的前 3 个 因子特征值较大,其折线也较为陡峭,而后 4 个因子数 值较小,形成的折线也较缓,因此可选取前 3 个因子作 为公共因子进行分析。



图 2 因子分析碎石图 Fig. 2 Scree plot of factor analysis

为明晰上述公共因子的物理意义,本文采取了方差最大正交旋转方法进行因子旋转,旋转后特征值和 方差贡献、提取公因子方差和因子载荷矩阵分别见表 1 和表 2。由表 1 可知,因子 1、2、3 提供的方差贡献率 之和达到了 94.315%,因而可认为此三项公共因子是 影响地下水位变化的主要因子。同时,由表 2 中可以 看出,公共因子方差在各地下水位总方差中的比例皆 大于 0.85,可见公共因子能很好的解释区内 7 个观测 孔中的地下水位变化。此外,各观测孔中地下水位受 此三项公共因子影响比重有所不同:其中,up3、up7、 up9 主要受因子 1 影响;up1、up10 受因子 2 影响;up2、 up8 受因子 3 影响。

旋转前 旋转后 因子序号 特征值 方差贡献(%) 累计贡献(%) 特征值 方差贡献(%) 累计贡献(%) 3.979 56.842 1 56.842 3.628 51.834 51.834 2 1.364 19.480 76.322 1.617 23, 106 74.940 3 1.260 17.993 94.315 1.356 19.375 94.315

表1 旋转前、后公共因子特征值及方差贡献 Table 1 Eigen values of factors before and after rotation and explained variance

#### 表 2 公共因子方差及因子载荷矩阵

Table 2 Communalities and component matrix of factors

地下水水位观测孔	初始公园之主美	坦亚公园之大关	旋转后因子载荷矩阵				
	彻如公凶丁刀左	旋蚁公凶丁刀左	因子1	因子 2	因子 3		
up1	1.000	0.969	0.002	0.984	0.013		
up2	1.000	0.912	-0.224	- 0. 021	0. 928		
up3	1.000	0.976	0.983	0.095	0.016		
up7	1.000	0.982	0.941	0.307	- 0. 037		
up8	1.000	0.852	0. 599	0.057	0.700		
սթ9	1.000	0.979	0.989	0.017	- 0. 045		
սթ10	1.000	0.932	0.625	0.736	- 0. 010		

#### 2.3 因子识别

在求得公共因子后,需进行因子识别这一步骤,即 对提取出的公共因子所代表的实际物理意义进行识 别。由于岸坡地下水位主要受上游库水位、降雨、温度 和时效的影响,各分量的变化规律具有不同的特征,因 而可作出公共因子随时间变化的过程线图(图3)。



图 3 公共因子过程线图 Fig. 3 Hydrograph of factors

由图 3 可以看出,三类公共因子具有不同的变化 规律:第一因子变化较为平缓;第二因子则呈不规则的 脉冲式波动;第三因子则为较规律的周期变化,且变幅 较为一致。结合影响地下水位变化的几个分量考虑, 可认为第一因子与时效分量有关,第二因子与降雨有 关,第三因子与上游库水位有关。由于在研究时段内, 温度变化较小,因而温度分量对地下水位变化影响不 大,故在提取公共因子时未被选入。以 θ 和 lnθ 为自 变量(θ意义同前所示)对第一因子作回归分析,可得 复相关系数 R 为 0.9007,因而可认为第一因子为时效 因子;对第三因子和实际上游库水位作相关分析,可得 两者之间相关系数 R = 0.899,相关性十分显著,第三 因子即为库水位因子。

对于第二因子,由于其以"小时"为时间间隔,无 法直接建立与日降雨量之间的数学关系,因此可通过 两者之间的柱线图进行比较(图4)。从图4中可知,



#### 2.4 模型计算结果与讨论

为比较降雨因素考虑与否对模型精度的影响,分

表 3

别对式(3)中无降雨分量和有降雨分量的情况进行求 解。将监测得到的库水位、渗流量资料,以及前面利用 因子分析提取出的降雨因子等数据代入,通过遗传算 法求解相关滞后因子 $x1 \sim x4$ (物理意义如式(3)所 示),并计算复相关系数R值、剩余标准差S值及F检 验统计值等,计算结果如表 3 所示。

		Table 3	Results whether rainfall factor is taken into account or not						
	量水堰	<i>x</i> <sub>1</sub> (h)	<i>x</i> <sub>2</sub> (h)	<i>x</i> <sub>3</sub> (h)	<i>x</i> <sub>4</sub> (h)	R	F	S	
	WE7 - 1	1	1	_	_	0.8329	471.1382	0.052629	
不考虑降雨	WE7 $-2$	0	9	—	—	0.8896	788. 7685	0.012685	
影响	WE7 - 3	243	162	—	—	0.9093	993.6681	0.009151	
	WE7 $-4$	240	162	—		0.9158	1082.0770	0.007144	
	WE7 $-1$	1	1	499	201	0.8374	426. 7841	0.052002	
考虑降雨	WE7 $-2$	0	9	500	378	0.9044	816.6170	0.011856	
影响	WE7 - 3	503	503	402	229	0.9718	3089. 4270	0.005188	
	WE7 - 4	503	108	405	233	0.9742	3383.0740	0.004020	

考虑降雨因子与否模型计算结果的比较





Fig. 5 Fitting between measured values and calculated ones

根据计算结果(表3、图5),可进行如下讨论: (1)在考虑降雨分量的情况下,各测点的计算结 果精度均有不同程度的改善。其中,WE7-3和WE7 -4 拟合精度的提升尤为明显。这主要是由于WE7-1和WE7-2量水堰流量较大,分别达到6.5L/s和 1.4L/s以上,而WE7-3和WE7-4则只有0.05L/s 和 0.15L/s 左右,降雨分量在后两者中所占的比重要 远大于前两者,因而拟合精度提升较大。因此可知,测 点流量中随着降雨分量所占比重的增大,模型精度提 高显著。

(2) 在考虑降雨分量的情况下,各测点降雨分量的滞后因子也有所不同。其中,WE7-1和WE7-2

的滞后小时数在 500h 左右,WE7 -3 和 WE7 -4 则在 400h 左右。这主要是因为降雨入渗主要受量水堰所 在山体周边岩体渗透性能的影响,而 WE7 -1 和 WE7 -2 同位于 7#支洞下岔的西侧,之间距离较近;WE7 -3 位于支洞上岔东侧,WE7 -4 位于其下方下岔位置, 距离之间也较为接近。

(3)模型中是否考虑降雨分量,对各测点库水位 分量的滞后因子具有不同的影响。其中,WE7-3和 WE7-4 库水位分量的滞后因子值产生较大影响。其 原因是由于这2个测点的流量较小,降雨分量对其影 响较大。

(4)表3中关于降雨分量的滞后因子是相对于降雨因子而言,而由前面分析可知,降雨因子本身相对于实际降雨量存在一定的滞后性,因而实际降雨的滞后小时数与表3中的x3之间是不等同的。

#### 3 结论

本文针对渗流统计模型中环境分量存在的监测资 料缺失或监测频率不一致等问题,提出运用因子分析 方法获取各影响分量,并通过相关分析、回归分析以及 柱线图等方法进行因子识别。以一抽水蓄能电站为 例,计算结果表明,通过对输水系统所在山体地下水位 进行因子分析,可获取库水位、降雨以及时效等环境分 量,而将提取出的降雨分量应用于基于滞后效应的渗 流统计模型,与不含降雨分量的同类模型相比较,不仅 可以有效地提高模型精度,而且对模型中库水位分量 和降雨分量的滞后因子也有相应改善。

同时,该方法不仅适用于抽水蓄能电站枢纽区,对 于部分常规水电站而言,可能缺失某一时段的降雨资 料或者库水位资料,也可采用本文方法通过对某一效 应量(如岸坡地下水位等)进行因子分析,提取出相关 的分量后,再应用于渗流统计模型之中。

#### 参考文献:

 [1] 吴中如.水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2003.[WU Z R. Safety monitoring theory and its application of hydraulic structures [M]. Beijing: Higher education press, 2003.(in Chinese)]

- [2] 张强勇,林春金,向文. 石板水电站重力坝坝基渗 流渗压观测资料的统计回归分析[J]. 岩土力学, 2006 27(10):1831-1834. [ZHANG Q Y, LIN C J, XIANG W. Statistical regression of seepage and seepage-pressure of gravity dam foundation of Shiban Hydropower Station [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10):1831-1834. (in Chinese)]
- [3] 吴志伟,宋汉周,周祖权. 抽水蓄能电站枢纽区地下水动态统计模型及其应用[J]. 水电自动化与大坝监测 2010 34(3):60 64. [WU Z W, SONG HZ, ZHOU Z Q. Statistical model for seepage around pumped storage power station and its application [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2010, 34(3):60 64. (in Chinese)]
- [4] 郑东健,王建. 绕坝渗流地下水位的时空分布模型研究[J]. 水科学进展,2005,16(5):730-734.
  [ZHENG D J, WANG J. Spatial-temporal distribution model for the groundwater elevation of dam abutment [J]. Advances in water science, 2005, 16(5):730-734.(in Chinese)]
- [5] 章文波,陈红艳. 实用数据统计分析及 SPSS12.0 应用[M]. 北京:人民邮电出版社 ,2006. [ZHANG W B, CHEN H Y. Statistical analysis and application of SPSS12.0 [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2006. (in Chinese) ]
- [6] 蒋勇军,吴月霞,Chris Groves,等.利用因子分析确 定岩溶地下河系统水系的影响因素[J].水文地质 工程地质,2009,36(4):1-7. [JIANG YJ,WU YX,Chris Groves, et al. Identification of influencing factors of groundwater quality variation using factor analysis [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009,36(4):1-7. (in Chinese)]
- [7] 张乾飞,顾冲时,吴中如. 基于滞后效应的土石坝
  渗流监控模型[J]. 水利学报,2001(2):85-89.
  [ZHANG Q F, GU C S, WU Z R. Seepage flow monitoring model for rockfill-earth dams based on lag effect [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001 (2):85-89. (in Chinese)]

(下转第23页)

# The general tracing model of measuring flow velocity based on mass conservation

LIN Tong<sup>1</sup>, CHEN Jian-sheng<sup>2</sup>, CHEN Liang<sup>2</sup>

(1. Wenzhou Institute of Hydraulics & Estuary, Wenzhou 325000, China;
2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract**: Tracer logging technique can accurately detect the velocity of groundwater seepage and the traditional point dilution is suitable for computing seepage velocity without vertical flow influence. This paper firstly introduces the research which is aimed to compute horizontal seepage velocity under the influence of vertical flow , and then pointes out that there are some unreasonable problems of the existing models. The authors rebuild the computing model of seepage velocity under the influence of vertical flow based on the mass conservation. In the new model the vertical flow velocity and horizontal flow velocity are considered as a function of  $v_v(z)$  and  $v_h(z)$ . Finally the seepage velocity of the 6# drilling well , which is affected by vertical flow of The Xiaolangdi reserve regulation reservoir , is computed with the new model. The computed seepage velocity is consistent with the result of leakage investigation.

Key words: mass conservation; isotope tracer; seepage velocity; vertical flow; dilution formula

责任编辑:张若琳

#### (上接第18页)

### Statistical model for seepage based on factor analysis for calculating rainfall factor and its application

HUO Ji-xiang , SONG Han-zhou ,GU Xiao-yong , WU Zhi-wei

(College of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract**: Statistical model for seepage is an effective tool to analyze the flow dynamics. The accuracy of the model depends on the factors involving in the model. As the pumped storage power station has a special running condition, a factor analysis of the groundwater level is carried out and the extracted rainfall factor is applied in the statistical model for seepage based on lag effect. The results show that the model has a better accuracy compared to the non-rainfall one. Conclusions can be drawn that this method can be widely used in the absence of rainfall data or different monitoring frequency.

Key words: factor analysis; developed statistical model of seepage; rainfall factor; pumped storage power station

责任编辑:张若琳