

# Review on the Research Progress of Mine Water Inflow and the Influence Law of Parameters

Manman Zhang, Haifeng Lu, Duoxi Yao, Guifang Zhang, Xiangshuai Meng, Chao Li

School of Earth and Environment, Anhui University of Technology, Huainan Anhui  
Email: 2375662837@qq.com

Received: Jun. 18<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jul. 3<sup>rd</sup>, 2020; published: Jul. 10<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Mine water inflow is an important index in the process of coal mine production safety, which is also the focus of scholars. Based on a large number of previous research results, this paper summarizes the prediction methods of mine water inflow and the influence of related parameters on it, introduces the research methods of water inflow prediction widely used at home and abroad, systematically combs the influence of parameters in various methods on water inflow prediction, the advantages and disadvantages of each method, the use conditions and the work of relevant scholars, etc. For the related research, it provides some reference and guidance.

## Keywords

Mine Water Inflow, Prediction Method, Applicability, Water Inflow Parameters

---

# 矿井涌水量的研究进展综述及参数影响规律

张曼曼, 鲁海峰, 姚多喜, 张桂芳, 孟祥帅, 李超

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南  
Email: 2375662837@qq.com

收稿日期: 2020年6月18日; 录用日期: 2020年7月3日; 发布日期: 2020年7月10日

---

## 摘要

矿井涌水量是煤矿生产安全过程中一个重要的指标,也是学者们关注的焦点。本文在参考大量前人研究成果的基础上对矿井涌水量预测方法及相关参数对其的影响进行综述,介绍了国内外普遍采用的对涌水量预测的研究方法,系统地梳理了各种方法中参数对涌水量预测的影响、每种方法优缺点及使用条件和相关学者所做的工作等,为相关研究提供了一定的参考和指导。

## 关键词

矿井涌水量, 预测方法, 适用性, 涌水量参数

Copyright © 2020 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

矿井涌水量是指矿山从开拓到回采过程中单位时间内流入井、巷和巷道系统中的水量。它是确定矿床的水文地质类型和水文地质条件复杂程度以及评价矿床开发经济技术条件的重要指标之一,也是制定矿山疏干设计方案、确定生产能力的主要依据;同时也会对矿井的生产安全造成严重影响,所以准确预测矿井涌水量对于设计防排水系统以及防止淹井等煤矿恶性事故的发生、保障煤矿安全生产等具有重要意义[1]。因此分析矿井涌水量的方法,并在此基础上提高其精度对煤矿生产安全有很大的帮助。

由于准确计算矿井涌水量的重要性,其计算方法受到学者们的普遍重视,也是采矿工程研究中的一个热点,一批新的研究成果开始涌现,国内外众多学者都从不同角度采用不同方法对其涌水量展开研究。其中查鲁宾斯基[2]对顿涅孜煤田涌水量运用多种方法进行预测,得出常规公式预测的误差较大的结论;傅耀军[3]等利用矿井新的涌水量预测(计算)方法,预测了工作面不同推进距离(或不同推进时间段)、不同水文地质条件(水文地质参数分区)的矿井涌水量。本文综合前人的研究成果,详细介绍了矿井涌水量的主要计算方法及研究现状,并对这些方法的适用范围和优缺点进行简要介绍,以期对相关研究人员从事该课题的研究提供参考。

## 2. 涌水量预测方法的分类

目前预测矿井涌水量的方法可以分为确定性预计方法和非确定性预计方法。其中确定性预计方法主要有解析法、水均衡法、数值法和模拟法;而非确定性预计方法主要分为时间序列分析法、模糊数学法、灰色关联法、回归分析法、神经网络法、地质比拟法和混沌模型法等[4]。除此之外,经过近几年的研究可知,还可以将涌水量预测方法分为分布参数法和集中参数法两大类。

## 3. 确定性预计方法

### 3.1. 解析法(大井法)

迄今为止,矿坑涌水量的计算方法中应用最常见的是解析法,又可称为地下水动力学法。它是通过研究分析煤矿所处的地理概况,地质以及水文地质等条件,再运用相应的水动力学公式来计算矿区涌水量。当采用解析法预测矿井涌水量时,一般把坑道系统所占面积简化成一个圆形的大井,然后应用地下水向井流的公式计算涌水量的值;同时,还可以提供疏干时间、疏干范围及其疏干水位等疏干设计所需要的各项重要指标,这种方法相对而言比较简单,效果较好[5]。

解析法又可以分为两类,分别为稳定流解析法和非稳定流解析法。

#### 1) 稳定流解析法

稳定流解析法一般应用于承压转无压的情况,如图1所示。

根据 Dupuit 假设和达西定律,设距井  $r = a$  时由承压水转无压水区。

承压 - 无压水的计算公式[6]为:

$$Q = \frac{1.366K(2HM - M^2 - h^2)}{\lg R_0 - \lg r_0} \quad (1)$$

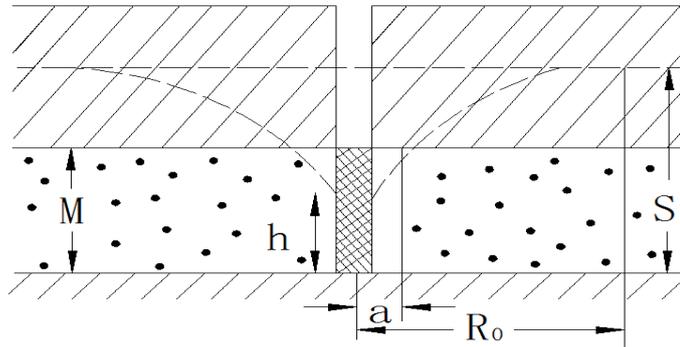


Figure 1. Schematic diagram of pressure bearing well without killing  
图 1. 承压-无压井示意图

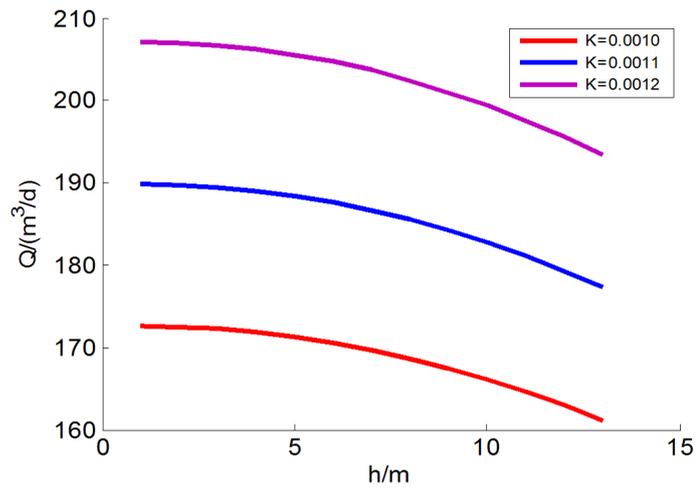


Figure 2.  $Q-h$  curve  
图 2.  $Q-h$  曲线图

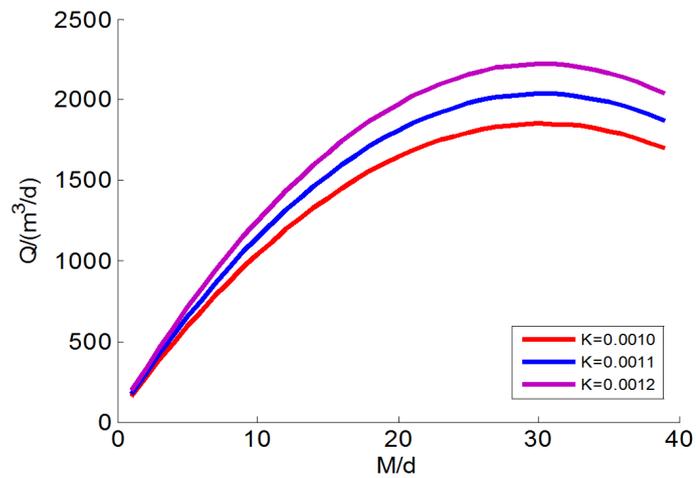


Figure 3.  $Q-M$  curve  
图 3.  $Q-M$  曲线图

依据上述承压 - 无压计算公式, 首先固定水头值  $H$  为 459.76 m,  $M$  为 21.80 m,  $R_0$  为 1000 m,  $r_0 = 700$  m, 变量为水柱高度  $h$  和渗透系数  $K$ ,  $h$  取值为 0~37m;  $K$  取值为 0.0010 m/d、0.0011 m/d 和 0.0012 m/d, 可得到图 2 所示的  $Q-h$  关系曲线图; 由图 2 可知, 涌水量  $Q$  随着水柱高度  $h$  的增大而减小; 在同一水柱高度下,  $Q$  随渗透系数  $K$  的增大而增大。其次固定  $H$  为 459.76 m,  $h$  为 37m,  $R_0$  为 1000 m, “大井”半径  $r_0 = 700$  m, 变量为  $M$  和  $K$ ,  $M$  取值为 21.80~600 m,  $K$  为 0.0010 m/d、0.0011 m/d 和 0.0012 m/d, 可得到图 3 所示的  $Q-M$  关系曲线图; 由图 3 可知,  $Q$  与  $M$  呈抛物线关系, 含水层厚度在低于  $H$  时,  $Q$  随  $M$  的增大而增大; 在含水层厚度等于  $H$  时, 矿井涌水量值最大; 在含水层厚度高于  $H$  时,  $Q$  随  $M$  的增大而逐渐减小。

当开采动水位降到底板以下时,  $h$  的值一般可忽略不计, 此时的计算公式便可以简化为[6]:

$$Q = \frac{1.366K(2HM - M^2)}{\lg R_0 - \lg r_0} \quad (2)$$

若矿井所在含水层是均质无限分布且天然水位近似水平, 则引用影响半径  $R_0$  可采用下列公式计算[6]:

$$\begin{aligned} R_0 &= r + r_0 \\ r &= 10S\sqrt{K} \\ r_0 &= \sqrt{F/\pi} \end{aligned} \quad (3)$$

依据承压 - 无压计算公式以及上式所述, 固定水头值  $H$  为 459.76 m,  $M$  为 21.80 m,  $r_0 = 798$  m,  $h$  为 37 m, 变量为  $S$  和  $K$ ,  $S$  取值为 0~423 m,  $K$  取值为 0.001 m/d、0.005 m/d 和 0.010 m/d, 可得到图 4 所示的  $Q-S$  关系曲线图。由图 4 可知,  $Q$  随着  $S$  的增大而减小; 在同一水位降深下,  $Q$  随渗透系数  $K$  的增大而增大。

承压的计算公式[6]:

$$Q = \frac{2.73KMS}{\lg R_0 - \lg r_0} \quad (4)$$

无压的计算公式[6]:

$$Q = \frac{1.366K(2H - S)S}{\lg R_0 - \lg r_0} \quad (5)$$

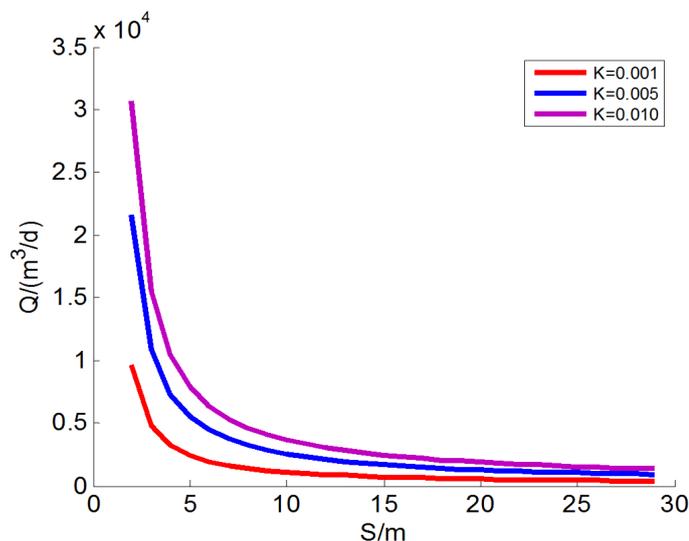


Figure 4.  $Q-S$  curve  
图 4.  $Q-S$  曲线图

式中,  $Q$  为矿井涌水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $K$  为渗透系数,  $\text{m}/\text{d}$ ;  $M$  为含水层厚度,  $\text{m}$ ;  $S$  为水位降深,  $\text{m}$ ;  $F$  为采区面积,  $\text{km}^2$ ;  $R_0$  为含水层的引用影响半径,  $\text{m}$ ;  $r_0$  为“大井”半径,  $\text{m}$ ;  $r$  为影响半径,  $\text{m}$ ;  $H$  为潜水含水层厚度或承压水含水层由底板算起的水头值,  $\text{m}$ ;  $h$  为井筒水柱高度,  $\text{m}$ 。

## 2) 非稳定流解析法

一般矿井突水瞬时量、突水口径和降深较大, 稳定流解析理论无法解决这些问题, 而非稳定流理论中的雅克布公式可以很好的模拟任意时刻的水量变化, 并加深对区域水文地质条件的认识。

非稳定流计算公式如下[6]:

$$S = \frac{0.08Q}{T} W(u) \quad (\text{Theis 公式}) \quad (6)$$

当  $u \leq 0.01$  或  $u \leq 0.05$  时, 井函数一般只考虑级数前面两项, 后面的可忽略不计, 即[6]:

$$S = \lg \frac{2.25Tt}{r^2u} \quad (\text{Jacob 公式}) \quad (7)$$

将上式变换形式可得[6]:

$$Q = \frac{ST}{0.08} \cdot \frac{1}{W(u)} u = \frac{r^2u}{4Tt} \quad (8)$$

当  $u \leq 0.01 \sim 0.1$  时, 即可得到涌水量的 Jacob 计算公式[6]:

$$Q = \frac{ST}{0.183} / \lg \frac{2.25Tt}{r^2u} \quad (9)$$

式中,  $Q$  为流量(涌水量),  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $S$  为井壁水位降深,  $\text{m}$ ;  $T$  为导水系数,  $\text{m}^2/\text{d}$ ;  $r$  为井孔(突水)半径,  $\text{m}$ ;  $u$  为释水系数;  $t$  为抽(放)水延续时间,  $\text{d}$ 。

当  $u \leq 0.01 \sim 0.1$  时, 依据上述 Jacob 公式, 首先固定  $T$  为  $45 \text{ m}^2/\text{d}$ ,  $S$  为  $323 \text{ m}$ ,  $r$  为  $1 \text{ m}$ , 变量为  $t$  和  $u$ ,  $t$  取值为  $0.00069 \sim 0.009 \text{ d}$ ,  $u$  取值为  $0.0001$ 、 $0.0002$  和  $0.0003$ , 可得到图 5 所示的  $Q-t$  关系曲线图; 其次可固定  $T$  为  $45 \text{ m}^2/\text{d}$ ,  $S$  为  $323 \text{ m}$ ,  $t$  为  $0.008 \text{ d}$ , 变量为  $r$  和  $u$ ,  $r$  取值为  $1 \sim 10 \text{ m}$ ,  $u$  取值为  $0.0001$ 、 $0.0002$  和  $0.0003$ , 可得到图 6 所示  $Q-r$  关系曲线图。由图 5 可知,  $Q$  随  $t$  的增大而逐渐减小; 在同一时间下,  $Q$  随  $u$  的增大而逐渐增大。从图 6 中可知,  $Q$  随  $r$  的增大而逐渐增大; 在同一影响半径下,  $Q$  随  $u$  的增大而逐渐增大。

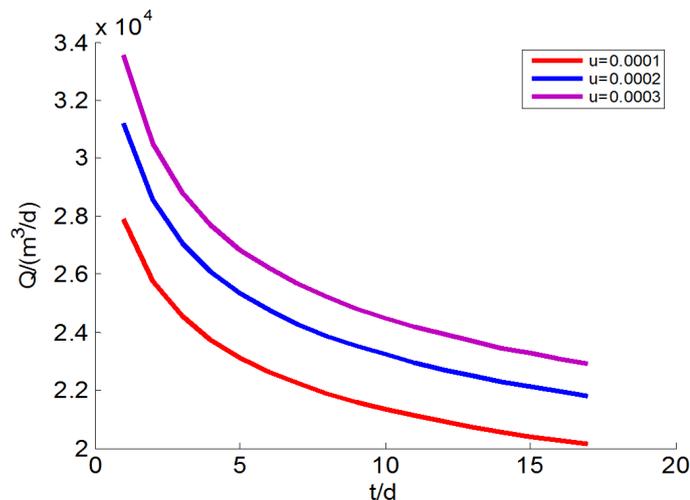


Figure 5.  $Q-t$  curve

图 5.  $Q-t$  曲线图

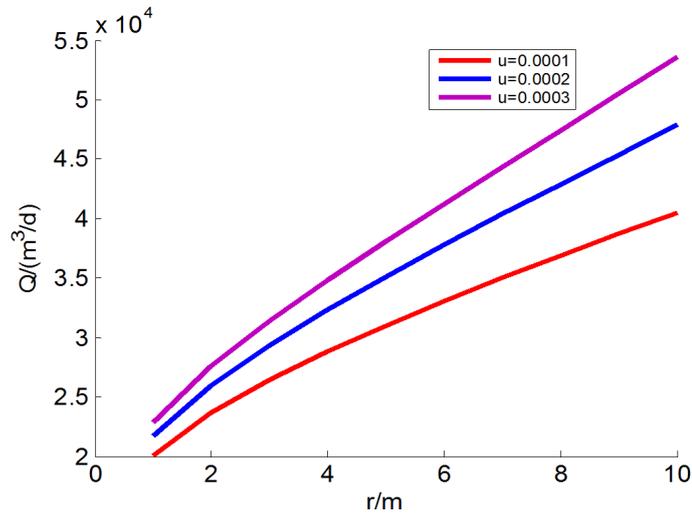


Figure 6.  $Q$ - $r$  curve  
图 6.  $Q$ - $r$  曲线图

### 3.2. 数值法

数值法分为有限差分法和有限元法, 利用近似分割原理和构造水文地质概念模型, 对复杂的含水层结构和内外边界条件进行量化[7]。目前数值法可用于解决层流和二维流问题, 而非层流问题处于研究讨论阶段, 计算三维流的过程非常复杂, 在一定条件下可采取为其他方式解决, 例如可将三维流看二维流或拟三维流来计算矿井涌水量。

马青山等[8]对比数值法和解析法预测的矿井涌水量值, 明确了数值法具有更高的精度, 其预测可作为矿井涌水量, 具体预测涌水量数值法依据的微分方程及其边界条件如下式所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial H}{\partial t}, (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z, t) \Big|_{t=t_0} = H(x, y, z, t_0) \\ K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \cos(n, x) + K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \cos(n, y) + K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \cos(n, z) \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t), (x, y, z) \in \Gamma_2 \\ H(x, y, z, t) = z \\ K_{xx} \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K_{yy} \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + K_{zz} \left( \frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial H}{\partial z} (K_{zz} + q_w) + q_w \Big|_{\Gamma_3} = u \frac{\partial H}{\partial t}, (x, y, z, t) \in \Gamma_3 \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $S_s$  为贮水率, 1/m;  $K_{xx}$ 、 $K_{yy}$ 、 $K_{zz}$  为含水层各向异性主方向渗透系数, m/d;  $H$  为点  $(x, y, z)$  在  $t$  时刻的水头值, m;  $W$  为源汇项, 1/d;  $t$  为时间, d;  $\Omega$  为计算区;  $H(x, y, z, t_0)$  为点  $(x, y, z)$  处的初始水位, m;  $q(x, y, z, t)$  为第二类边界上单位面积的补给量, m/d;  $H(x, y, z, t)$  为点  $(x, y, z)$  在  $t$  时刻的水头值,  $z$  为已知函数;  $\cos(n, x)$ 、 $\cos(n, y)$ 、 $\cos(n, z)$  为流量边界外法线方向与坐标轴方向夹角的余弦;  $\mu$  为饱和差(自由面上升)或给水度(自由面下降), 表示在自由面改变单位高度下, 从含水层单位截面积上吸收或排出的水量;  $q_w$  为自由面单位面积上的大气降雨入渗补给量, m/d;  $\Gamma_2$ 、 $\Gamma_3$  为第二类边界和自由面边界。

### 3.3. 水均衡法

水均衡法是根据物质守恒定理来建立潜在充水水源中的水量均衡方程。一般需详细分析矿区地下水

来源, 分别计算不同补给来源的矿坑涌水量, 总涌水量等于各部分涌水量之和; 该方法计算较复杂, 适用于露天采矿场和不同深度的地下巷道[9]。其表达形式为[10]:

$$Q_y = (Q_j + Q_e + Q_h + Q_r + Q_u) - (Q'_j + Q'_e + Q'_h + Q_2 + Q_p + Q_k) \pm u \frac{\Delta h}{\Delta t} F \quad (11)$$

式中,  $Q_j$  为通过径流流入均衡区的水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_e$  为通过越流流入均衡区的水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_h$  为地表水的补给水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_r$  为回灌补给的水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_u$  为大气降水入渗补给的水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q'_j$  为通过径流流出均衡区的水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q'_e$  为通过越流流出均衡区的水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q'_h$  为从均衡区含水层流入河流或地表水体的水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_2$  为蒸发、蒸腾引起均衡区含水层地下水的消耗量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_p$  为均衡区内矿井排水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_k$  为均衡区内供水取水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $u$  为潜水含水层时为给水度, 承压含水层为储水系数;  $F$  为均衡区面积,  $\text{m}^2/\text{d}$ ;  $\Delta h$  为均衡计算期;  $\Delta t$  内水位的变化值,  $\text{m}$ 。

### 3.4. 电模拟法

电模拟法是通过分析地下水运动和电流网络模型中的流动所遵循的微分方程, 并利用微分方程之间的相似性来比拟含水层, 用电位和电流强度比拟地下水水头、流量等物理量, 从而实现地下水运动的模拟, 不过电模拟法由于其具有很大的局限性, 故已不再使用该方法。

## 4. 非确定性预计方法

### 4.1. 水文地质比拟法

水文地质比拟法又可以分为单位用水量、富水系数法和  $Q$ - $S$  曲线法, 简单实用, 一般可定量预计。

#### 1) 富水系数比拟法

在一定时期内, 从矿坑中排出的水量, 与同一时期开采出的矿石质量之比, 称为富水系数  $K$ , 具体公式如下[11]:

$$K_p = \frac{Q}{P} \quad (12)$$

$$Q' = K_p P'$$

式中,  $Q$  为已知矿井的涌水量,  $\text{m}^3$ ;  $P$  为已知矿井同时期内生产能力,  $\text{t}$ ;  $P'$  为未知矿井同时期内生产能力,  $\text{t}$ 。

2) 单位涌水量比拟法: 矿坑涌水量与矿坑面积或体积的扩大成正比增加, 收集现有生产矿坑的排水资料、矿坑面积或体积、水位降低值, 即可换算新的矿坑的涌水量[11]。

$$Q' = Q^m \sqrt[m]{\frac{F'}{F}} n \sqrt[n]{\frac{S'}{S}} \quad (13)$$

式中,  $S$ 、 $S'$  分别为已知矿井、未知井水位降低值,  $\text{m}$ ;  $F$ 、 $F'$  分别为已知矿井、未知矿井某阶段开采面积,  $\text{m}^2$ ;  $m$ 、 $n$  为待定系数, 由最小二乘法确定。

### 4.2. 回归分析法

回归分析法是一种数理统计方法, 就是利用矿井长期所积累的涌水量数据, 对其各影响因素(包括矿井开采深度、开采面积、矿井生产能力、大气降雨量、水位降深、充水含水层的水位等)进行分析, 提取主要因素, 得出其内在相互关系, 即相关系数, 以此预测涌水量及变化规律, 预测精度往往受这种相互关系的复杂性影响, 一般不需要考虑水文地质参数的求取所需数据量大, 但需要长期观测, 相关因子难以选择。

李孝朋[12]等人认为累计采空区面积、累计掘进进尺和累计煤炭产量等因素是影响矿井涌水量的相关因素,因而利用 SPSS 软件分析相关程度、Matlab 绘制散点图,采用 Matlab 曲线拟合工具箱 Cftool 对样本数进行多元非线性曲线拟合,并分别为 3 个影响因子选择合适的函数类型,使用最小二乘法求其参数求得涌水量与其各相关因子的数学关系式,具体数学关系式如下所示:

$$\begin{cases} Q = -0.0711S^2 + 21.291S + 961.59 \\ Q = 0.0294M^3 - 3.2205M^2 + 112.45M + 563.28 \\ Q = 2E - 06T^3 - 0.0048T^2 + 3.9423T + 708.34 \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $S$ 、 $M$ 、 $T$  分别为采空区面积( $m^2$ )、掘进进尺( $km$ )和产煤量( $t$ )。

通过矿井实例进行验证,结果表明使用多元回归分析法对矿井涌水量的预测具有较高的精确度。

### 4.3. 模糊数学法

苗阶[13]等根据模糊数学法理论,在现有矿山水文地质资料的基础上,对大孤山矿区深部涌水量进行了预测计算,计算结果比较理想,具体计算公式如下所示:

$$Q_2 = \beta^n \cdot Q_1 \quad (15)$$

式中,  $Q_2$  为预测涌水量;  $Q_1$  为已知涌水量;  $n$  指的是自然数( $n=1,2,3$  或  $4$ ),  $n$  的选取与影响涌水量因素的多少有关;  $\beta$  是指预测深度的各个影响因素均为已知深度对应因素的倍数;从达西渗流定律:  $Q = T \cdot B(\Delta H/\Delta L)$  可知,涌水量( $Q$ )与导水系数( $T$ )、断面宽度( $B$ )、水头降深( $\Delta H$ )均成正比关系;对一个矿山而言,一般认为开采面积、深度与涌水量成正比。

该方法综合性比较强,较简单全面,但很难确定发展趋势。

### 4.4. 灰色关联法

关联度是从广义上讲指的是两个事物之间的关联程度,在数学上则表示两者的相似程度。如果两个因素在系统发展过程中同步变化程度较高发展趋势的相似或相异程度为依据来衡量因素间关联程度的一种方法,也可称为“灰色关联度”。

胡建平[14]用灰色关联分析法对打通二煤矿矿井涌水量进行了相关分析,找出了矿井涌水量的主相关因素,并根据水文地质比拟法原则,采用主相关因素建立起了矿井涌水量计算的公式。首先是确定矿井涌水量的相关因素:设矿井涌水量数据序列组成集合:  $x_0(K) = \{x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(n)\}$ ; 由矿井涌水量相关因素数据序列分别组成下列集合:

$$\begin{aligned} x_1(K) &= \{x_1(1), x_1(2), x_1(3), \dots, x_1(n)\} \\ x_2(K) &= \{x_2(1), x_2(2), x_2(3), \dots, x_2(n)\} \\ &\vdots \\ x_m(K) &= \{x_m(1), x_m(2), x_m(3), \dots, x_m(n)\} \end{aligned} \quad (16)$$

其次,需要计算关联系数并根据关联度确定相关因素;最后则令主相关因素为水文地质比拟法中已知矿井、未知矿井某阶段开采面积和已知矿井、未知井水位降低值,根据水文地质比拟法的公式则可求出矿井涌水量值。

该方法易操作,精度较高数据模拟,但波动强烈时取得结果不可靠。

### 4.5. 神经网络法

BP 网络使用最速下降法来学习并存储大量的输入-输出模式映射关系,其原理是通过反向传播来不

断调整网络的权值和阈值, 来保证网络误差平方和的值最小。BP 神经网络模型以影响涌水量大小的因素和涌水量组合为输入神经元, 涌水路径为隐含层神经元, 预测涌水量为输出神经元来预测矿井的涌水量, 如图 7 所示。

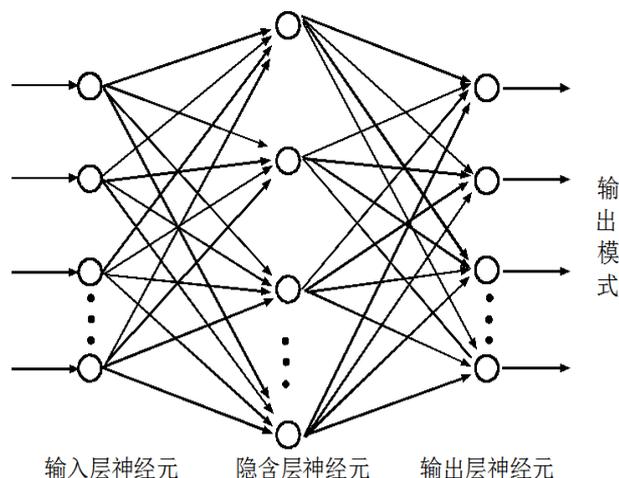


Figure 7. BP neural network model

图 7. BP 神经网络模型图

谭大国等[15]分析了利用 BP 神经网络模型预测矿井涌水量的可行性, 收集淮南新集二矿的资料对已建立的神经网络进行训练, 并将结果与实际值相对比可得知该模型收敛性能良好, 预测精度高, 可操作性强; 凌成鹏等[16]通过对徐州韩桥煤矿进行研究分析, 采用了 BP 神经网络法, 测得的结果与实际值相吻合, 表明该模型适用性较好。

该方法持久性, 适时预报性, 但需要首先去分析预测矿井的类型。

#### 4.6. 时间序列分析法

时间序列分析(Time series analysis)是一种动态数据处理的统计方法。它的内容可包括一般统计分析、关于时间序列的最优预测、控制与滤波以及统计模型的建立与推断等方面。与传统的统计分析相比, 时间序列分析更加着重于研究数据序列相互依赖的关系。后者实际上是对离散指标的随机过程的统计分析, 所以又可以将其看作是随机过程统计的一个组成部分。唐依民等[17]在对矿井涌水量时间序列进行分析之后, 获得了有关分形的相关信息, 并在此基础上通过计算得到了相应的分形维数, 其结果间接地显示了矿区地下水系统在演化过程中所具有的分形性。计算时间序列维数有很多种算法, 主要包括 G-P 算法、R/S 分析法频法等等, 而这些算法一般适用于求取时间序列的单维数。

ARIMA 模型全称为自回归积分滑动平均模型(Autoregressive Integrated Moving Average Model, 简记 ARIMA), 是由博克思(Box)和詹金斯(Jenkins)在 70 年代初提出的时间序列(Time-series Approach)预测方法。

$p$  阶自回归模型 AR( $p$ ) [18]:

$$\begin{aligned} Z_t &= \phi_1 z_{t-1} + \phi_2 z_{t-2} + \cdots + \phi_p z_{t-p} + \varepsilon_t \\ Z_t &= y_t - u \end{aligned} \quad (17)$$

式中,  $Z_t$  为  $t$  时刻测量值;  $y_t$  对长期平均值  $\mu$  的离差;  $t$  为测量时间;  $\phi$  为系数,  $\mu$  为长期平均值;  $y_t$  为原时间序列;  $\varepsilon_t$  为  $t$  时间的随机误差。

ARMA 模型(Auto-Regressive and Moving Average Model)是由 AR 模型与 MA 模型“混合”构成的,是研究时间序列的重要方法之一。ARMA( $p, q$ )模型中包含了  $p$  个自回归项和  $q$  个移动平均项,其模型为 [19]:

$$x_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t \quad (18)$$

式中,  $\varepsilon_t$  为  $t$  时间的随机误差;  $\phi$ 、 $\theta$  为系数。

该方法较为简单,但需要精确原始数据长度。

#### 4.7. 混沌模型法

混沌模型法是以 Packard 等提出的重构相空间理论为基础所建立的非确定性预计方法之一,其指出系统中任一分量的发展进程都是由其它相互作用着的分量所决定的,而每一个分量中都蕴藏着相关的信息,所以只有把该分量扩展到更加高维的相空间中,才能将相空间中的信息完整表达出来 [20]。

#### 4.8. 非确定预计方法的适用条件及影响

对比各种非确定性预计方法,其中人工神经网络法在矿井涌水量预测方面具有持久性,适时预报性的特点,但因其特有的地域性而尚需研究;水文地质比拟法、回归分析法、灰色系统法、时间序列法等对矿井原始涌水量数据的积累和准确性具有严格的要求,且矿井涌水量与其影响因素之间的非线性关系难以描绘,但操作较为简单实用;水均衡法虽也简单易操作,但因其均衡要素的难以准确测定而无法确保精度。因此在实际工程中,一般采用多用方法耦合的形式预测矿井涌水量,从而提高涌水量预测精度。

### 5. 矿井涌水量预测方法评价

矿井涌水量的方法有很多种,根据相关资料分析并总结不同预测方法所测得的涌水量,可得出不同方法的优缺点及其适用性,见表 1。

**Table 1.** Evaluation of prediction method of mine water inflow

**表 1.** 矿井涌水量预测方法的评价

预测方法	特点	优点	局限性
解析法	合理概化实际问题,构造解析公式	快速、简便、经济	适用于水文地质条件简单的矿区
电模拟法	利用电网络模拟	预测结果接近实际	通用性差
数值法	主要采用 visual mudflow 建模	直观、简洁	近似解,用于工程控制程度高的复杂大水矿床
水均衡法	物质守恒定律	简洁、易操作	很难确定一些要素值
水文地质比拟法	地质、水文地质和开采方法相同的水文地质资料设计涌水量	简单实用	近似定量预计
回归/相关分析	数理统计方法	不需要考虑水文地质参数的求取	所需数据量大,需要长期观测,相关因子难以选择
模糊数学模型	考虑多种因素	综合性比较强,较简单全面	很难确定发展趋势
灰色系统理论	研究分析输出序列	易操作,精度较高	数据模拟波动强烈时取得结果不可靠
BP 网络	非线性网络	持久性,适时预报性	需要分析预测矿井的类型
时间序列分析	研究分析输出序列	简单	精确要求原始数据长度

### 6. 结论

1)系统地总结了矿井涌水量的预测方法,对主要矿井涌水量预测的方法进行了相关的阐述,每种方

法的原理皆不相同,其表达形式也有所不同。在进行矿井涌水量的预测时,需要根据矿井的地质条件、水文地质条件和矿井的补、给、排等因素选取适当的预测方法以保证预测结果的真实有效性。

2)解析法和数值法是最常用的矿井涌水量预测方法。在稳定流解析法中,在其他参数固定的情况下, $Q$  随水柱高度的增大而逐渐增大;而  $Q$  与含水层厚度则成抛物线关系,呈先增大后减小的趋势;在非稳定流解析法中,在其他参数不变的情况下, $Q$  随  $t$  的增大而逐渐减小,随  $r$  的增大而逐渐增大。解析法一般适用于水文地质条件简单的矿区,而数值法包括有限差分法和有限元法,在实际预测中常利用 visual modflow 预测涌水量,结果简单直观,预测精度相对较高,适用于工程控制程度高的复杂大水矿床。

## 参考文献

- [1] 左文喆,王斌海,程紫华,张耀斌. 矿井涌水量预测方法综述[J]. 化工矿物与加工, 2016, 45(9): 71-74.
- [2] 曹中初. 国外井筒涌水量预测工作的研究现状[J]. 矿井地质, 1996(1): 8-12.
- [3] 傅耀军,杜金龙,牟兆刚,等. 基于煤矿井地下水含水系统的矿井涌水量预测方法-释水-断面流法[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(9): 37-43.
- [4] 刘启蒙,胡友彪,张宇通,刘浩. 矿井涌水量预测方法探讨[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2017, 37(6): 1-7.
- [5] 崔杰. 矿井涌水量计算方法评述[J]. 水力采煤与管道运输, 2009(4): 1-4+95.
- [6] 施鑫源,阮森森,王世杰,等. 供水水文地质手册[M]. 北京:地质出版社, 1983.
- [7] 魏军. 矿井涌水量的数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2007.
- [8] 马青山,骆祖江. 解析法和数值法在矿井涌水量预测中的比较[J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(4): 63-66+71.
- [9] 黄欢. 矿井涌水量预测方法及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(S1): 127-130.
- [10] 陈酩知,刘树才,杨国勇. 矿井涌水量预测方法的发展[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(1): 68-72.
- [11] 杜敏铭. 矿井涌水量综述[J]. 地质学报, 2009, 29(1): 70-73.
- [12] 李孝朋,谢道雷,徐万鹏,张延飞,张宪峰,吴霞. 多元回归分析在矿井涌水量预测中的应用[J]. 煤炭技术, 2016, 35(10): 189-190.
- [13] 苗阶,刘帅,刘超. 模糊数学在预测大孤山铁矿深部涌水量中的应用[J]. 地质找矿论丛, 2014, 29(2): 295-298.
- [14] 胡建平. 灰色关联分析在矿井涌水量计算中的应用[J]. 煤炭工程师, 1996(3): 40-42+48-49.
- [15] 谭大国,李璇璇. 基于 MATLAB 的 BP 神经网络模型在矿井涌水量预测中的应用[J]. 绿色科技, 2014(10): 240-242.
- [16] 凌成鹏,孙亚军,杨兰和,姜素,邵飞燕. 基于 BP 神经网络的孔隙充水矿井涌水量预测[J]. 水文地质工程地质, 2007(5): 55-58.
- [17] 唐依民,肖江,杨喜陶,沈洪远. 矿井涌水量时间序列的多重分形维数谱计算[J]. 煤炭学报, 2001(4): 394-398.
- [18] 宋颖霞. 矿井涌水量时间序列预测方法研究[J]. 绿色科技, 2014(7): 268-269.
- [19] 熊斌,夏克勤. 鱼田堡煤矿矿井涌水量时间序列分析[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(11): 95-98.
- [20] 汪伟,罗周全,王益伟,管佳林. 基于混沌理论的矿井涌水量预测研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(4): 51-56.