[文章编号] 1009－2846（2001）02－0023－04

立井井筒涌水量预测的优化数值法

黄建华

（广州市地铁建筑总公司，广东　广州　510003）

[摘要]　本文将煤矿立井井筒涌水量的预测视为求解地下水运动问题中的反演问题，根据求解逆问题的思想，建立预测井筒涌水量的优化模型，结合有限单元法求解地下水的运动模型，通过一维搜索的方法对井筒涌水量作出预测。

[关键词]　立井；井筒涌水量；逆问题；一维搜索法；有限单元法预测

[中图分类号]　TV131.4　　[文献标识码]　A

1　前　言

煤矿立井施工过程中，开挖地下含水层时，井筒涌水量的大小，对于建井方案、建井工期、施工安全及经济效益，具有决定性的作用。因此，正确预测立井井筒涌水量对于立井的建设是至关重要的。井筒涌水量预测的正确与否与诸多影响因素有关，归纳起来不外乎两个方面：一是水文地质条件；二是用以预测的计算模型。前者是基础，若重要的水文地质条件未查清楚，预测可能要犯大错误，但是，对于条件已基本查清的矿井，如果计算模型建立的不正确，其预测效果同样也不会好的。本文主要就后一问题作一讨论。

目前，我国用以井筒涌水量预测的方法仍是多年来一直沿用着的解析解法，类比外推法，水均衡法等等，尤以解析解法应用最广。解析法又都以地下水的稳定流理论为前提，各种计算公式差不多都是以裘布依稳定井流为基础，非稳定井流理论用于井筒涌水量预测的还不多见，数值法的应用则更少。

裘布依稳定井流理论的应用条件十分苛刻，其所要求的圆形定水头外边界条件在自然界很少见到，以此为基础的井筒涌水量预测，存在问题较多，大多数情况预计不准，误差有时达几倍甚至几十倍。建立在泰斯公式基础上的非稳定井流的理论，虽然比稳定井流理论有了很大的发展，它反映了地下水流的非稳定运动特点，但它对含水层、边界条件以及地下水的初始状态的要求，在生产实际中则很难完全满足，它的应用也因此而受到限制。至于类比外推法和水均衡法也因各种原因使其应用受到限制。因此可见，寻找新的、更好的预测立井井筒涌水量的方法，已成为立井建设中的当务之急。随着计算机技术的发展，数值法以成为求解地下水问题的一个有力工具，数值解虽然是一种近似解，但它可以处理含水层的非均质各向异性，复杂的内外边界条件，地下水流的不同初始状态以及自然界各种因素，能够较好地反映实际的地质、水文地质条件。因此，在条件清楚的情况下，数值解较能真实地反映实际地下水流的运动状态，将其用于预测井筒涌水量，可减少预测的误差，提高预测的精度。

本文考虑建井工期与建井要求，采用最优化技术方法结合有限单元法，对西鸡西立井（主井、副井）穿过保罗系上部强风化裂隙含水岩组时的井筒涌水量进行了预测，取得了满意的效果。

2　方法与原理

求解地下水运动问题，可分为二种类性：一是已知含水层特性，边界条件和各种源汇项，而求地下水水位的问题，称为正演问题；二是已知地下水水位的分布，反求含水层特性，或边界条件或源汇项等，称为反演问题（或逆问题）。立井井筒涌水量等于一定条件下将井筒范围内的地下水水位疏干至某一水平时的总涌水量，即地下水运动过程中的源项，因此属于反演问题范畴。此外，对井筒涌水量预测，需要考虑时间因素，一般要求在一定时间内，通过某一水平，相应于不同的要求就有不同施工方案，即预测某一水平

[作者简介] 黄建华（1965－）男，湖南人，大学本科，毕业于上海铁道学院，工程师。

万方数据

的井筒涌水量要考虑建井通过该水平的时间因素，换句话说，就是在满足一定条件下，疏干地下水引起的水位降深水平与在一定内井井筒穿过地层的标高水平最接近，此时的涌水量即为该水平的井筒涌水量。设F为目标函数值，h_i^k为第k时刻i点的地下水水位，H^K为第K时刻井筒穿过地层某一深度的标高，Q^K为第K时刻的疏干涌水量，则上述过程可表达为下列的优化问题：

$$\min F(Q^K)=\sum\left|h_i^k-H_i^k\right| \qquad (2-1)$$

（Ⅰ）
$$[A][h^k]=[b^k]+[Q^K] \qquad (2-2)$$
$$Q_l^k\leqslant Q^k\leqslant Q^k \qquad (2-3)$$
$$Qk\geqslant 0 \qquad (2-4)$$

（Ⅰ）式中将地下水流模型（2－2）式作为一个约束条件，镶嵌于优化模型中，从而完成了优化模型与水流模型的结合，构成了优化模型（Ⅰ）。

求解（Ⅰ）式有许多方法，针对问题本文选取单目标最优化方法，即一维搜索法来求解。一维搜索法是对所要求的变量逐步修正，使目标函数达到最优的过程，其基本思路如框图1所示。

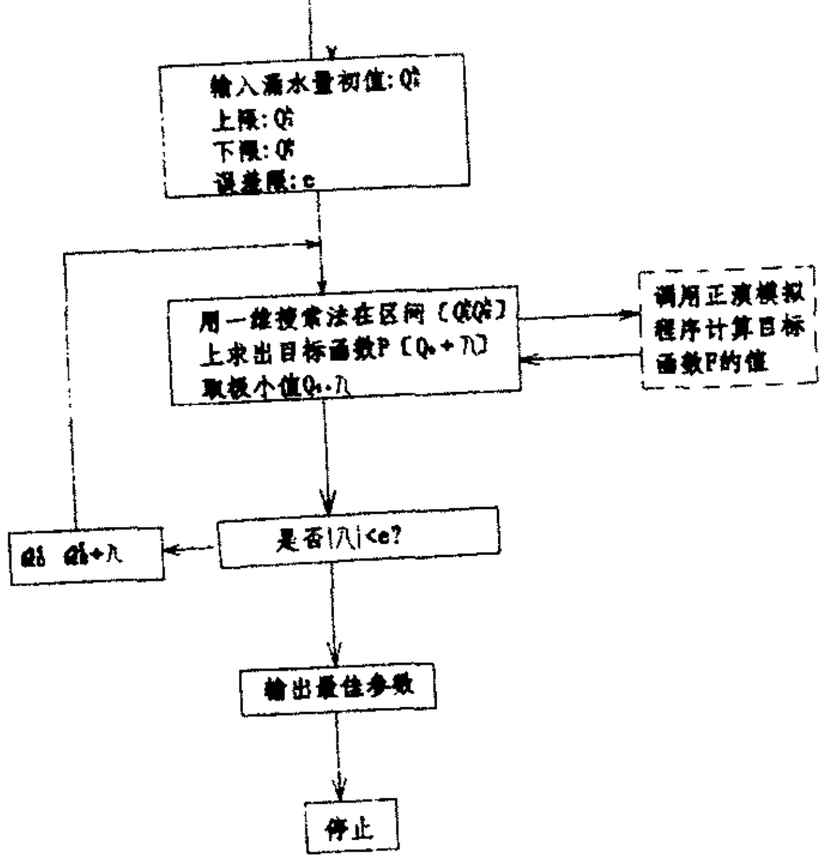


图1　一维搜索法确定涌水量程序框图

即：第一步，给出涌水量的初值Q_0^k，用一维搜索法在区间$[Q_L^K, Q_H^K]$优选出改进值$Q_0^K+\lambda$。

第二步，检验收敛准则是否满足，即看其修正量是否够小。

第三步，若收敛则停机，否则以改进值$Q_0^K+\lambda$代替初值Q_0^K返回第一步重作。

这一方法能保证在满足约束下逐步减小F值。一维搜索法中包含多次计算目标函数值(F)并比较它们的大小以决定对变量变化范围的取舍，我们的问题中计算目标函数值下要使用正演模拟程序算出水头分布，即反复要求解(2－2)式。

一维搜索法中有许多算法，如斐波那契法、抛物线法、切线法和黄金分割法等等。我们采用黄金分割法来进行优化（又称0.618法），其程序框图如图2。

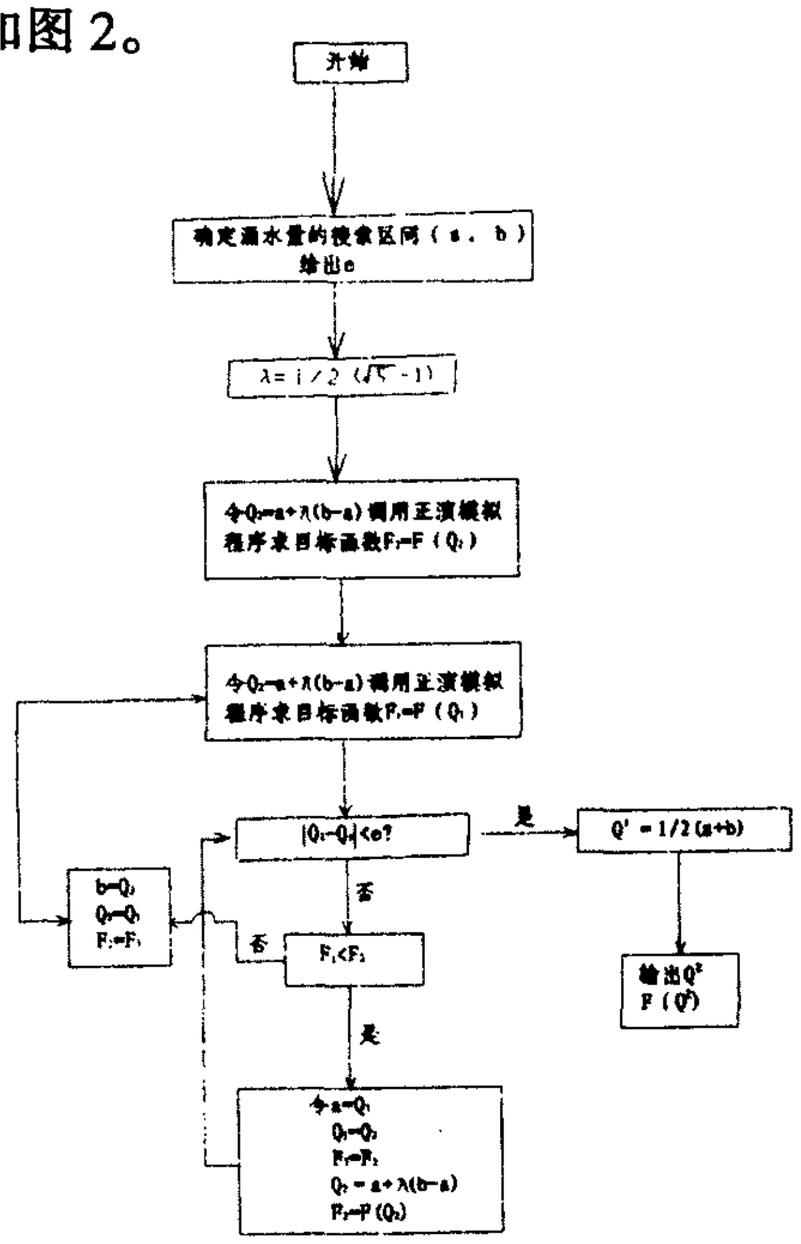


图2　0.618法确定井筒涌水量程序框图

从上面的优化过程可以看出，这种求解方法实际上属于求逆问题的间接解法，间接法的一个显著特点就是反复调用求解地下水的正演程序，因此对（2－2）式的求解就显得尤为重要，本文采用有限单元法求解正演问题。

3　应　用

根据前面所叙述的方法原理，笔者对西鸡西矿区立井井筒（主井、副井）穿过保罗系上部强风化裂隙含水岩组时的涌水量进行了预测。

西鸡西矿区位于穆棱河河谷中央，所选研究区位于包括矿区主副井在内的穆棱河河谷范围内，面积约7.5km^2，南部以河谷冲积层与低山丘陵区的分界线作为隔水边界，此部以穆棱河河床中央为界，作为定水头边界处理，东西两边根据地下水等水位线图，以地下水等水位线193.0m和187.0m作为上下游定水头边界，各距立井约1500m。据资料立井（主井、副井）将要通过的主要含水层为3m多厚的第四孔隙潜水含水层和60多m厚的侏罗系穆棱组风化裂隙含水组。本文着重对立井通过侏罗系穆棱组风化裂

万方数据

隙含水岩组时的井筒涌水量进行预测。

穆棱组风化裂隙含水岩组由砂岩、粉砂岩、泥岩交互沉积组成，间夹有煤，凝灰岩岩层，层间风化裂隙发育，亦有构成裂隙存在，部分粉砂岩中孔隙亦较为发育。整个含水岩组裂隙密度较大，分布均匀，赋存于其中的地下水略具承压性。

根据上述矿区水文地质条件，对研究区建立了非稳定的地下水运动数学模型：

$$a/ax(KxM\,aH/ax)+a/ay(KgM\,aH/ay)+Q+B=S\,aH/at$$

$$H|_{\Gamma_1}=H_1$$

$$(\text{Ⅱ})\ aH/an|_{\Gamma_2}=0$$

$$H|_{t=0}=H_0$$

式中主要变量意义如下：H 表示地下水水位；K_X、K_Y 表示 X、Y 方向的渗透系数；M 表示含水层厚度；Q 表示涌水量；B 表示源汇项（不包括涌水量）。

优化模型（Ⅰ）与定解问题（Ⅱ）构成了井筒涌水量预测的数学模型，联合求解（Ⅰ）和（Ⅱ）得到优化的涌水量。

采用有限单元法求解定解问题（Ⅱ），具体过程这里不作深入讨论。对研究区采用三角形单元进行剖分，共计有 422 个单元，237 个节点。立井包含在第 122 单元，由节点 70、77、78 组成，副井包含在第 141 单元，由节点 82、87、88 组成，（如图 3）。预测采用的初始流场如图 4 所示。

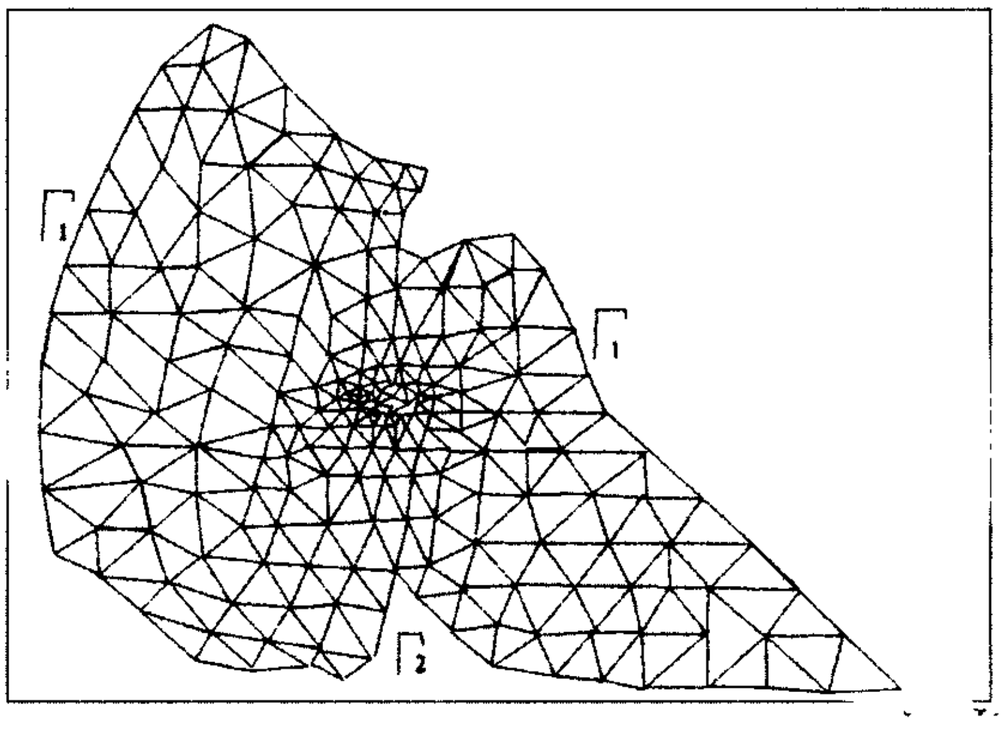


图 3　计算域网格剖分图

根据图 1，图 2 的框图，笔者编制了一维搜索法预测井筒涌水量的应用程序 OPT，其中包括有限单元法求解定解问题（Ⅱ）的子程序 ELEMENT2。

该程序考虑了大气降水，地表水体渗补给因素，对地下水呈承压、无压或二者混合状态以及疏干作了自动处理。优化主井井筒涌水量时，以 122 单元的三个节点 70、77、78 的水位降深满足要求为准则，优化副井井筒涌水量时，以 141 单元的三个节点 82、87、88 的水位降深满足要求为准则。

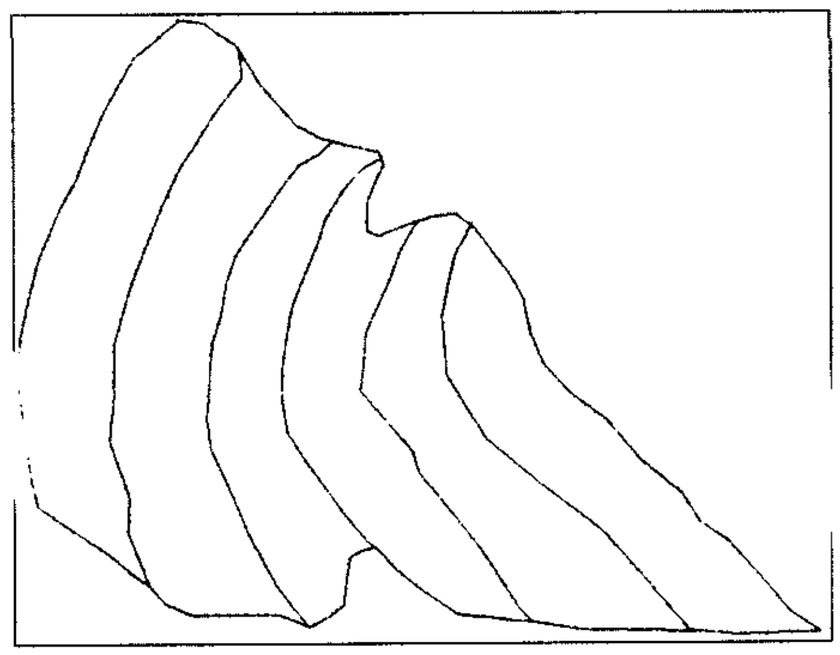


图 4　计算域初始流场图

由（2－1）式，主井的目标函数可写成：

$$F=|SZD\ (70)-H|+|SZD\ (77)-H|+|SZD\ (78)-H|$$

副井的目标函数可写成：

$$F=|SZD\ (82)-H|+|SZD\ (87)-H|+|SZD\ (88)-H|$$

上两式中：SZD 表示节点在要求时刻的降深；H 表示从初始水位算起，建井要求时间内所要达到的井筒深度。

根据设计，立井井径 d＝6m，副井井径 d＝7m，建井中掘进侏罗系风化裂隙带的速度为 3m/d，按此速度对 60～70m 厚的侏罗系风化裂隙含水岩组约需 24d 左右的时间可掘进完成。

经优化计算后，按建井的速度要求，主井在掘进侏罗系风化裂隙带的不同水平时井筒涌水量见表 1，副井在掘进侏罗系风化裂隙带的不同水平时井筒涌水量见表 2。

表 1　侏罗系风化裂隙带中的不同掘进水平时主井筒涌水量

时间（d）	5.69	9.02	12.35	15.68	19.01	24
降深（m）	13.54	23.54	33.54	43.54	53.54	66
涌水量（m^3/d）	669.8	1008.7	1268.6	1456.0	1595.0	1685.7

表 2　侏罗系风化裂隙带中的不同掘进水平时副井筒涌水量

时间（d）	5.69	9.02	12.35	15.68	19.01	24
降深（m）	13.54	23.54	33.54	43.54	53.54	66
涌水量（m^3/d）	676.0	1010.8	1407.9	1618.9	1762.0	1882.4

主井、副井井筒涌水量与地下水水位降深的关系曲线分别如图 5、图 6 所示。

万方数据

在建井施工时，若采取疏干的方法，进行地下水的防治，则在计算的最优涌水量作用下，主井、副井在 66m 掘进水平时地下水流场分别如图 7、图 8 所示。

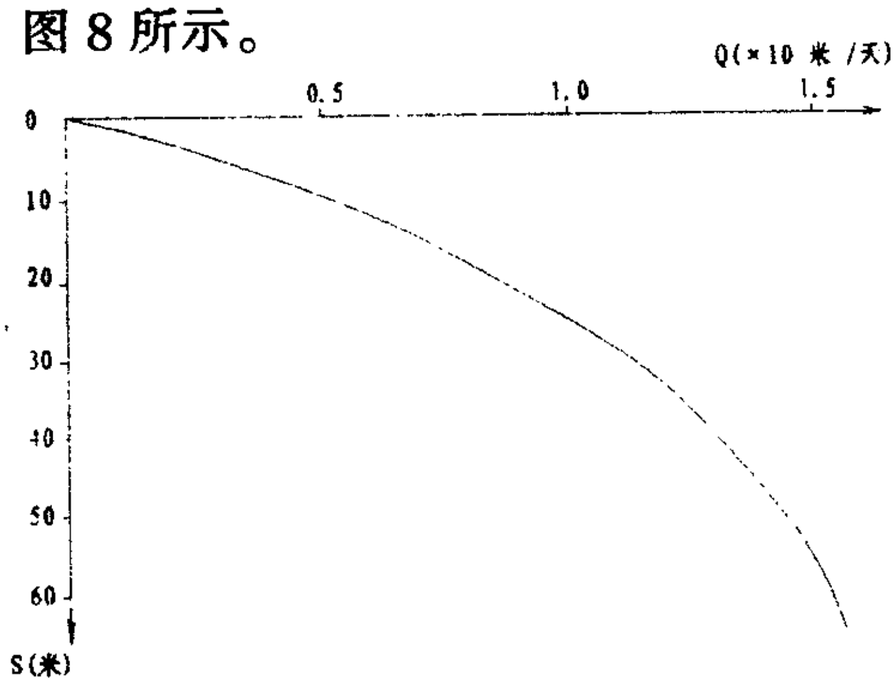


图 5　主井井筒涌水量与地下水位降深关系曲线

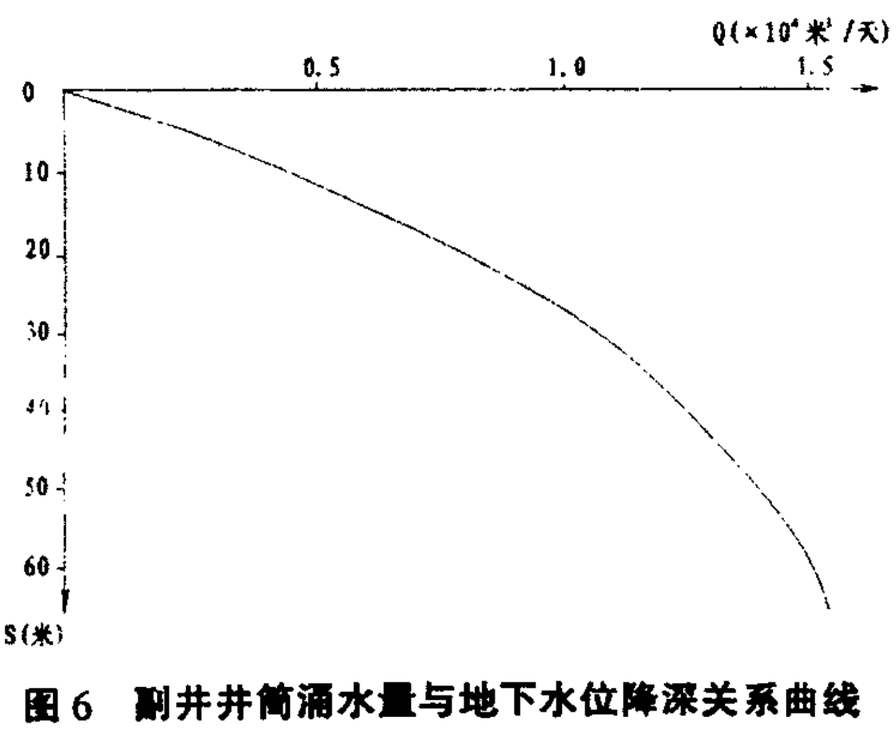


图 6　副井井筒涌水量与地下水位降深关系曲线

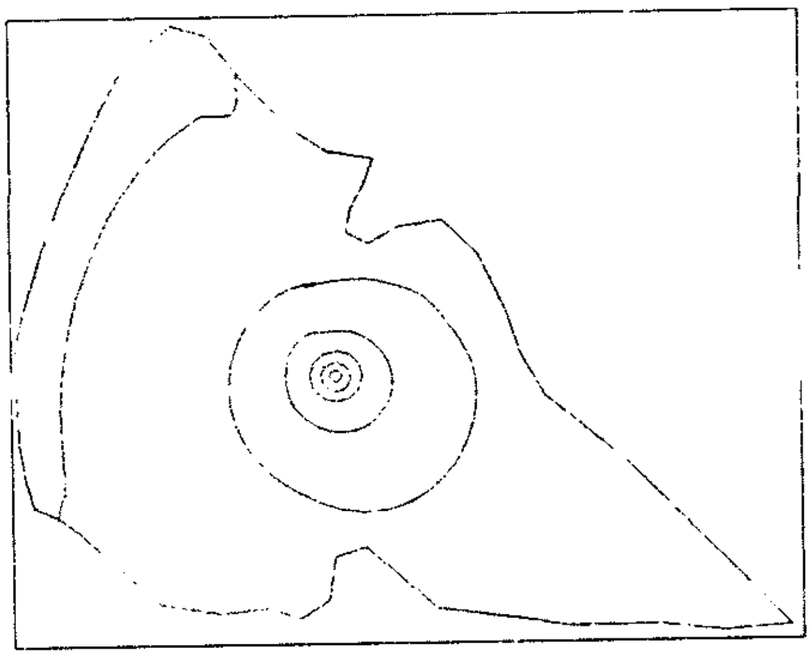


图 7　主井井筒掘进至 66.00m 时地下水流场图

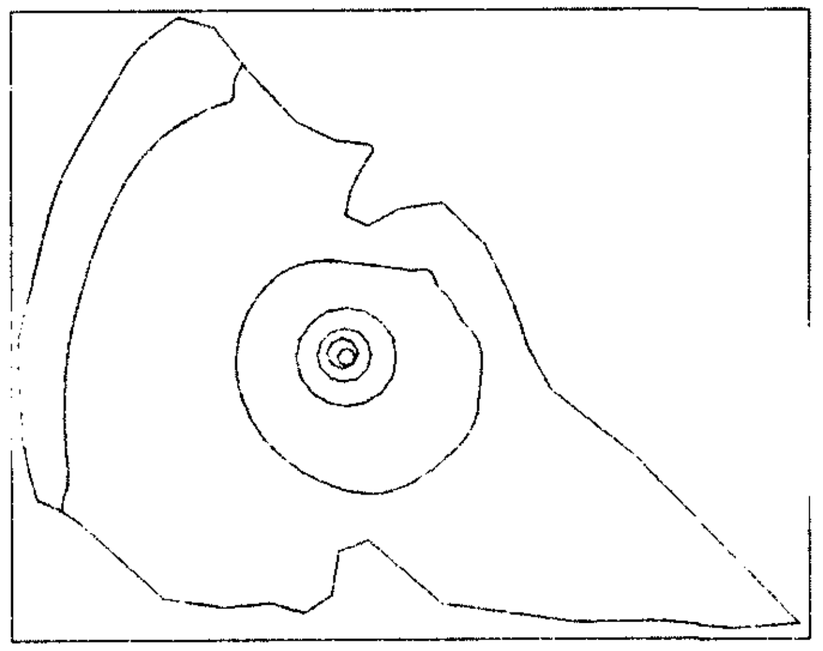


图 8　副井井筒掘进至 66.00m 时地下水流场图

4　结　论

（1）数值法结合最优技术法预测立井井筒涌水量，可考虑各种影响因素。不受边界条件的制约，且采用优化的思想，无疑较传统的预测方法在精度和应用条件上有了较大的提高。

（2）求解逆问题和优化模型的方法有许多，可视问题而定，不局限于某种方法。

（3）数值模型的解依赖于所建数学模型的准确与否，因此查清井筒所处区域的水文地质条件是至关重要的。这就需要有一定的勘探精度作保证。

（4）本文对西鸡西立井井筒涌水量的预测，基本上与实际涌水量一致，与物探流量测井所得的最终井筒涌水量基本吻合。因此采用该方法是可行的。□

参考文献

[1]《矿坑涌水量计算方法研究》，陈崇希等，武汉地质学院出版社 1985。

[2]“煤矿竖井井洞涌水量预测中心的若干问题”，李勤千，郑世书，《矿井地质》试刊。

[3]《地下水流的数学模型与数值模拟》孙纳正，地质出版社 1981。

[4]《运筹学》李德，钱颂迪，清华大学出版社 1985。

Optimal Numerical Mothod Used in Prediction of Affluent from Pit shaft for Vertical Pit

Huang Jianhua

Abstract: In this paper, the author thought the prediction of affluent from pit shaft for vertical pit of mine as solving inversion question of the movement of groundwater. Based on the idea of solving inverse question, establishing the optimal modal to predict affluent from pit shaft, combined with finite element method to solve the movement modal of groundwater, and predicting affluent from pit shaft by means of one dimension method of approach.

Keywords: vertical pit; affluent from pit shaft; inverse question; one dimension method of approach; finite element method prediction

万方数据