

文章编号: 1000-7598-(2008) 06-1489-06

基于 RES 的地下巷道工程稳定性全耦合分析方法

余伟健^{1,2}, 高 谦^{1,2}, 韩 阳³, 宋建国²

(1. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083;
3. 河南工业大学 土木建筑学院, 郑州 450000)

摘 要: 针对地下巷道工程稳定性问题, 基于岩石工程系统 (RES) 理论, 提出了全耦合分析法及优化设计思想。首先简要地叙述了全耦合分析过程的思想及流程, 并在收集的 27 个样本的基础上, 应用神经网络编码法建立了地下巷道工程的综合交互作用矩阵 (GIM), 分析了主要因素影响和作用机制。根据本巷道工程系统的稳定性能分析结果, 提出了稳定性评价参数, 给出了稳定状态范围。针对沙曲煤矿顺槽进行了优化支护设计举例, 并用 Q 系统岩体质量评价法对其进行对比分析及验证。现场监测及对比分析结果表明, 提出的全耦合分析法对稳定性分析及支护设计方法有实用价值。

关 键 词: 地下巷道工程; 全耦合; 支护设计; 岩石工程系统; 稳定性

中图分类号: TU 322

文献标识码: A

Study on full coupling analysis method for stability of underground roadway engineering based on RES

YU Wei-jian^{1,2}, GAO Gian^{1,2}, HAN Yang³, SONG Jian-guo²

(1. State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Beijing 100083, China;
2. School of Civil and Environmental Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China;
3. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Based on rock engineering system (RES) theory, a full coupling analysis method and optimization design idea for the stability problem of underground roadway engineering are put forward. At first, the full coupling analysis method and flow are described briefly; and then collecting twenty-seven lithology samples. Global interaction matrix (GIM) of roadway had been made up by artificial network coding method; and the main influential factors and effect mechanisms had been analyzed. And then the stability evaluation parameters are proposed from the results of stabilization capability analysis; and the stability state ranges are given. At last, taking Shaqu Coal Mine for example, stabilization analysis and supporting optimization design are made; and the Q system is applied to appraise rock body quality for contrast analyze and validate the design result. All the results show that the full coupling analysis method has practical value for stability analysis and supporting design.

Key words: underground roadway engineering; full coupling; supporting design; rock engineering system; stability

1 引 言

地下巷道工程稳定性问题一直是采矿工程中的热点和难点问题。随着地下采矿深度不断增加, 各种复杂岩性导致的支护困难问题日益突出, 在支护前及支护后对巷道的稳定性评价显得至关重要。由于影响巷道稳定性的因素具有不确定性、复杂性、模糊性, 因此, 很难找到一种合适的方法去合理地评价巷道稳定性。目前采用的评价方法主要依靠专家系统、数值模拟和模糊数学^[1-3]等, 这些方法已

经得到广泛应用并解决了许多问题, 但都呈现出“声誉高、信誉低”的特征。因为影响和控制着岩石工程状态的相关参数极其复杂多变, 并共同决定着整个工程的发展过程, 因此, 从现场实测数据出发, 应用岩石工程系统 RES (Rock Engineering System) 理论来分析并评价巷道稳定性是一个新的有效途径。目前, 在国内用 RES 理论分析巷道稳定性的研究尚不多见。本文针对地下巷道稳定性问题, 提出基于 RES 理论的全耦合分析法, 综合考虑影响巷道稳定性的复杂性, 利用现场实测数据, 采用神经网络

收稿日期: 2006-07-24

作者简介: 余伟健, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事地下岩土工程的数值分析、设计优化、工程力学等方面的研究。E-mail: ywjlah@163.com

络编码法得出综合相互作用矩阵,找出主要影响因素及作用机制,最终给出稳定性评价参数进行支护设计。

2 全耦合设计思想及方法

2.1 岩石工程系统

全耦合设计思想的根基是岩石工程系统 RES 理论,而岩石工程系统是最先由英国 Hudson 于 1992 年提出的基于综合考虑岩石工程中各种影响因素的理论。它把岩石工程看作一个完整的系统,所有岩石力学和施工因素中相关的物理变量对(或二元的)机制都不是固定搭配和孤立存在的,而是同时存在、并行作用和连续发生的动态过程^[4,5]。因此,全耦合设计思想主要是在整个分析及设计过程中,考虑每个影响巷道稳定性的所有系统变量、所有影响作用机制以及所有的机制反馈,针对系统功能及状态进行评价,最后找出主要影响稳定性因素,在此基础上进行支护设计。

2.2 基本方法及其作用矩阵编码方法

地下巷道工程是一个系统工程,其作用机制是同时存在、共同作用和连续发生的^[6]。在复杂的因素中,为寻求主要影响因素和关键作用路径,首先根据系统的物理性质、工程目标和分析目标,应用 RES “自上而下”分解的概念,确定系统变量和系统运行总体响应,从而找出对系统的主要影响因素和关键路径,最后进行优化设计与决策,见图 1。

在 RES 方法中,分析所有可能性的最基本方法是借助于构造岩石工程系统的全部状态变量的交互作用矩阵。目前,在 RES 中对相互作用矩阵采用的编码方法主要有^[6,7]:二值表示法、半定量的专家经验法 ESQ、参数斜率关系表示法、偏微分方程解表示法、数值分析表示法、基于图论和线性假定的复合相互作用的 FCM 方法。以上方法有的过于简单,有的要依靠专家经验知识,而且大多参数间的精确

关系很难测量或只局限于线性假定的前提,不太适合工程实际。由此, Hudson 提出的神经网络编码方式很好地解决了以上问题。在我国,杨英杰、张清首先提出了基于人工神经网络的岩石工程相互作用矩阵的相对作用强度 RSE 和综合相对作用强度 GRSE (可查文献[2]或文献[7])。这种神经网络产生的作用矩阵基于工程现场的实际测试数据,摆脱了传统的数学力学模型及专家经验知识,通过机器自己学习,可以动态地分析实际变化情况,因此,神经网络编码方法考虑更加全面。

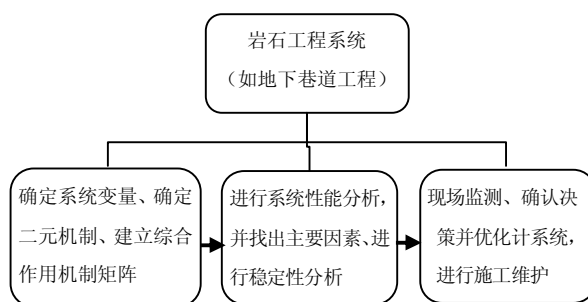


图 1 全耦合分析及设计流程

Fig.1 The flow chart of full coupling analysis and design

3 综合交互作用矩阵的建立

3.1 系统状态的确定及其归一化

地下巷道稳定性问题的存在主要由于各种复杂因素的影响,对几个矿区的调查发现,诱发巷道失稳的主要因素及变量为:原岩强度 X_1 、岩体结构 X_2 、开采深度 X_3 、岩体质量 RQD 指标 X_4 、巷道尺寸效应(主要是高跨比) X_5 、巷道断面形式 X_6 、支护方式 X_7 、支护时间 X_8 、地下水情况 X_9 、采动影响 X_{10} 、不连续面连续性 X_{11} 和不连续面的类型 X_{12} 。为便于计算,需将以上影响因素归一化处理,转换成数值计算的内部值,本文收集了 27 个样本。限于篇幅,表 1 只列出了前 10 个样本的内部值及稳定状态。

表 1 影响因素分析样本
Table 1 Analysis samples of influential factors

样本序列	因素变量												稳定状态
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	
1	0	0.78	1.0	0.00	1.0	0.5	0.25	0.5	0.5	1.0	0	0.65	0.0
2	1	0.78	1.0	1.00	1.0	1.0	0.75	1.0	0.5	0.0	1	1.00	1.0
3	1	0.90	0.5	0.50	0.0	0.5	0.50	0.5	0.5	1.0	0	1.00	1.0
4	1	0.78	0.5	0.50	0.0	0.5	0.50	0.5	0.0	1.0	0	1.00	0.5
5	0	0.78	0.0	0.25	0.0	0.0	0.25	1.0	0.0	1.0	1	0.00	0.5
6	0	0.66	0.5	0.25	1.0	0.0	0.75	0.5	0.5	0.5	1	0.00	0.0
7	0	0.66	0.5	0.00	1.0	0.0	0.75	0.0	1.0	0.0	1	0.00	0.0
8	1	0.90	0.5	0.75	0.0	1.0	0.75	0.0	0.0	0.0	1	0.65	1.0
9	0	0.00	1.0	0.00	0.5	1.0	0.75	1.0	0.5	0.0	1	0.00	0.0
10	1	0.25	1.0	0.50	1.0	1.0	0.50	1.0	0.0	0.0	0	0.65	0.5

3.2 各因素对系统稳定性的综合作用

本文针对以上收集的样本建立模型，编码方式采用神经网络 BP 算法。由于所获取的样本有限，采用循环训练方法，在 27 个样本中，随机选出 5 个样本作用检测样本，其余作为训练样本。为了进行稳定性评价，所建立的网络模型具有 12 个输入节点（见表 1 中的 $X_1 \sim X_{12}$ ）和 1 个输出节点（即表 1 中的稳定状态）。采用三层结构，当隐含层节点数在学习当中进行多次动态调整后增加到 18 个，学习步数为 225 时，误差已达到 10^{-5} ，说明此网络性能是良好的。用余下的 5 个样本进行检验，误差不超过 20%，即只有一个样本误差比较大，其他 4 个检测样本误差很小。因此，此网络可以很好地达到预测目的，由所建立的网络可得出综合因素相关作用如图 2 所示。

从图中的影响值可以看出，在本巷道工程系统中，岩体结构、开采深度和地下水情况绝对值最大，说明这 3 个因素对巷道的稳定影响最大，岩体结构对稳定性的影响值为正值，说明岩体结构参数值越大，对巷道稳定性越有利；而开采深度和地下水情况的影响值为负值，则表明参数值越大，对巷道工程稳定越不利，在设计时应尽量避开。另外，原岩强度、 RQD 、巷道断面形式和不连续面的类型也对

巷道的稳定起着有利的作用，而巷道尺寸效应、支护结构和采动影响则相反。因此，作为矿井服务年限长的主要巷道，如运输大巷、通风大巷道等，应选择岩体强度高、结构好、能避开地下水流且采动影响小的围岩，断面形式一般采用半圆拱形，支护方式和时间应合理。这样，才能保证整个巷道工程安全稳定。

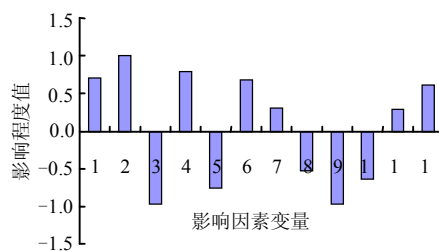


图 2 各因素对系统稳定性的综合作用
Fig.2 Global effect of every factor on system stability

3.3 各因素间的综合交互作用矩阵的确定

针对实例进行合理的相关性分析，必须确定适用于本巷道工程系统的综合相互作用矩阵模型。在此，同样也采用以上网络训练方法，但此时的网络输入、输出节点都是 12 个。此网络训练好后所产生的各因素的综合相互作用矩阵（GIM）如表 2。

表 2 综合交互作用矩阵（GIM）
Table 2 Global interaction matrix (GIM)

输入变量	输出变量											
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
X_1	1.00	-0.10	0.10	0.09	-0.07	0.02	-0.11	0.15	0.15	0.06	0.07	-0.06
X_2	0.01	1.00	0.14	0.07	-0.10	0.03	-0.16	0.21	0.21	0.08	0.09	-0.09
X_3	0.00	-0.01	1.00	0.01	-0.01	0.00	-0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	-0.01
X_4	0.00	0.11	-0.11	1.00	0.08	-0.02	0.12	-0.17	-0.17	-0.06	-0.07	0.07
X_5	-0.01	0.15	-0.15	-0.13	1.00	-0.03	0.17	-0.23	-0.22	-0.09	-0.10	0.09
X_6	0.00	0.10	-0.10	-0.09	0.07	1.00	0.11	-0.15	-0.14	-0.06	-0.06	0.06
X_7	0.00	0.19	-0.04	-0.04	0.03	-0.01	1.00	-0.06	-0.06	-0.02	-0.03	0.03
X_8	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	1.00	0.01	0.00	0.00	0.00
X_9	0.00	-0.09	0.09	0.08	-0.07	0.02	-0.10	0.13	1.00	0.05	0.06	-0.05
X_{10}	0.01	-0.14	0.14	0.12	-0.10	0.03	-0.15	0.21	0.20	1.00	0.09	-0.08
X_{11}	0.00	-0.04	0.04	0.04	-0.03	0.01	-0.05	0.06	0.06	0.02	1.00	-0.02
X_{12}	0.00	-0.09	0.08	0.08	-0.06	0.02	-0.10	0.13	0.13	0.05	0.06	1.00

4 稳定性评价参数

GIM 综合交互作用矩阵相当于 Jiao 提出的总的交互矩阵^[5]。可以认为， GIM 不仅是系统中所有关系解，而且也提供系统的状态解（输出值），即

$$k_i = p_i GIM \quad (1)$$

式中： k_i 为第 i 个样本系统输出值； p_i 为第 i 个样本输入值。为了分析巷道的稳定性，求出各个样本的输出值，并对稳定、中等稳定以及不稳定状态进

行统计归纳，得出各状态的 k_i 值，见表 3。可归纳出各稳定状态的输出值：不稳定时， $k_i = -0.78$ ；中等稳定时， $k_i = 0.63$ ；稳定时， $k_i = 1.84$ ；系统的综合作用性能为 0.51，属中等稳定。

为了保证巷道工程的安全，经过统计分析，可以用以下修正范围判断其稳定性。稳定状态时， $k_i > 1.84$ ；中等稳定状态时， $1.84 > k_i > 0.51$ ；不稳定状态时， $0.51 > k_i > -0.78$ ；极不稳定状态时， $k_i < -0.78$ 。

表 3 各样本的系统状态值
Table 3 System state values of samples

样本	稳定性	对应 k_i 值	样本	稳定性	对应 k_i 值	样本	稳定性	对应 k_i 值
1	0.0	-1.53	10	0.5	0.30	19	1.0	1.33
2	1.0	1.32	11	1	2.79	20	0.5	0.10
3	1.0	1.23	12	1	2.42	21	0.0	-0.29
4	0.5	1.60	13	0.5	0.22	22	0.0	-0.41
5	0.5	0.17	14	0.5	0.58	23	1.0	1.33
6	0.0	-0.95	15	0	-0.61	24	0.0	-0.66
7	0.0	-1.05	16	0.5	1.14	25	0.0	-1.15
8	1.0	3.30	17	0.5	0.96	26	1.0	1.27
9	0.0	-1.19	18	0	-1.24	27	1.0	1.61

假设有某一巷道工程的状态值已经确定, 设为 p , 那么这个工程的状态值对系统的影响作用 k 可用 $pGIM$ 来表示, 如果这一待评价的巷道工程影响值 k 小于系统的综合作用性能 0.51, 那么该工程处于不稳定状态, 需要进行优化设计和进一步加固; 如果 k 大于 0.51, 则该巷道工程处于中等稳定或稳定状态, 如属中等稳定, 应根据实际使用要求进行进一步优化设计, 确保安全生产。

表 4 优化前及优化后的内部值
Table 4 Interior values before and after optimization

内部值	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
优化前	0.5	0.25	1	0.25	1	1	0.25	0.5	0	0.5	1	1
优化后	0.5	1.00	1	0.25	1	1	0.75	0.5	0	0.5	1	1

将原开挖巷道进行稳定性评价, 求得 $k = 0.13$, 因此, 可以断定本工程处于不稳定状态。分析其原因, 从整个巷道工程来考虑, 巷道围岩全为破碎结构, 原来只用喷射混凝土, 由于理论指导的缺乏和施工经验的不足, 即使进行了锚杆支护, 锚杆锚固端并没有打入顶板老顶, 致使锚杆只形成拱的作用, 起不到悬吊作用, 因而只能起到局部加固作用, 不能有效地改善围岩的力学作用, 需进行二次优化设计支护。本巷道工程受其自然地质条件及生产条件的限制, 并不允许有更多的选择, 致使一般进行煤矿巷道的稳定性优化通常只能考虑支护情况。本例将系统地遵循支护优化设计原则, 进行几个优化方案拟选, 考虑选用锚杆和锚索联合支护, 建议矿井选用的 3 种拟选方案如表 5 所示。针对这 3 种方案进行正交及数值计算, 优化设计结果见表 6, 表明第 3 方案为最优方案。

联合支护的作用系统如图 3 所示。根据松动圈理论, 采用锚杆及锚索联合支护时, 首先由锚杆形成一个组合拱, 可抑制一部分裂隙的进一步发展, 并在松动圈内形成一定结构的承载体, 而锚索的作用是起到传递和悬吊的作用, 对顶板进行深部锚固。形成了一种很安全的力传递系统, 沿巷道走向产生

5 设计应用及作用机制评价

5.1 全耦合分析及设计

应用本系统模型对沙曲焦煤煤矿 14 105 工作面顺槽巷道进行开挖与支护的稳定性评价, 并在此基础上进行锚固优化设计。按照以上思想, 将影响未支护巷道的各个工程状态量进行归一化, 如表 4 所示。

了对顶板的连续支撑点, 产生较大预紧力从而减缓了顶板的下沉。从图 4 中可以看出, 经支护后, 顶板下沉位移已经基本上没有变化。

以上现象可以用全耦合方法解释为: 支护方式 X_7 对系统其他变量的影响程度, 即支护方式除自身的作用外, 对围岩结构影响最大 (表 2 中的影响因子为 0.19), 即这种联合支护方式能提高岩体的整体结构, 而对其他影响较小。优化后的岩体内总值如表 4 中所示。通过分析计算得出该支护后的巷道工程系统 k 值为 1.03, 巷道处于中等稳定状态。经现场 2 个多月的监测, 顶板相对下沉量小于 0.2~0.5 mm/d, 这完全能满足矿井生产服务要求。

5.2 Q 系统的对比分析及验证

本文为了进行全耦合分析法的差异性及验证分析结果, 采用实用性强、考虑全面的 Q 系统作定性、定量地分析。根据实测参数的资料得出 6 个参数值 (见表 7), 通过巴顿公式可求出岩体的 Q 值。依据各类岩体与地下开挖当量尺寸间的关系 (高 3 m×跨度 4 m 的矩形巷道), 可分析出巷道的稳定性, 表 7 列出了分析结果。进行优化后, 主要通过节理因素改善了反映岩体质的 3 个指标, 即提高了岩体

的完整性、通过支护结构改善了结构面形态、减少了其他应力或水对岩体的影响,这与前文分析相符。

因此, Q 系统分析结果和全耦合分析法基本上是一致的, 差异性不大, 进一步验证了全耦合的实用性。

表5 三种推荐支护方案的参数值

Table 5 Parameters of three support projects recommended for roadway

方案	顶板锚杆支护参数			顶板锚索支护参数			两帮锚杆支护参数		
	长度/m	根数/根	排距/m	长度/m	根数/根	排距/m	长度/m	每一帮锚杆数/根	排距/m
1	1.8	6	0.8	6.0	2	3.6	1.8	3	0.8
2	2.0	6	0.8	6.0	1	2.0	1.8	3	0.8
3	2.0	6	0.8	8.0	1	2.4	1.8	3	0.8

表6 巷道支护参数优化结果

Table 6 Optimized parameters results for roadway supporting

参数 方案	位移矢量 /cm	顶底板位移/cm		相对收敛率 /%	两帮位移/cm		相对收敛率 /%	稳定安全 系数 F_s
		顶板	底板		左帮	右帮		
1	28.76	-28.16	10.73	10.81	11.23	-11.28	5.92	1.205
2	18.25	-16.24	9.56	7.17	10.43	-10.46	5.50	1.310
3	17.20	-14.32	8.40	6.31	10.82	-10.57	5.63	1.383

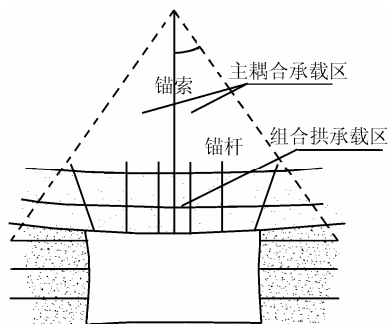


图3 锚索和锚杆联合支护形成的承载系统

Fig.3 Supporting system being made of cable and bolt

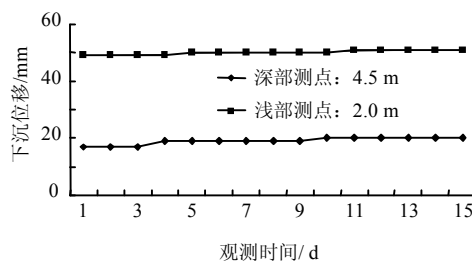


图4 距工作面 50 m 处顶板离层观测数据

Fig.4 Observation data in 50m place away from working face by absciss layer apparatu

表7 Q 系统的对比分析及验证结果Table 7 Contrast analysis and verified result by Q system

岩体参数	RQD 值 /%	节理组 数 J_n	节理粗糙 系数 J_r	节理蚀变 系数 J_a	节理水折减 系数 J_w	应力折减 系数 SRF	Q 值	岩体 评价
优化前	25	20	1	15	1	5	0.17	很差, 需支护

6 结 语

基于岩石工程系统的全耦合方法, 全面地考虑了巷道稳定性的复杂因素, 能客观地评价实际的巷道工程非线性交互影响作用。从建立的综合影响矩阵可以分析出各因素对系统的影响程度以及系统对各因素的影响程度; 通过系统状态方程可以判断整个巷道工程系统的稳定性能, 提出的稳定性评价参数为支护提供可靠的依据。因此, 基于 RES 系统方法的全耦合分析法在巷道安全稳定性分析及评价中具有现实指导意义。

参 考 文 献

- [1] 冯夏庭. 智能岩石力学(3)——智能岩石工程[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 38—40.
FENG Xia-ling. Intelligent rock mechanics (3) —— intelligent rock engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(16): 38—40.
- [2] 杨英杰, 张清. 神经网络在岩石工程参数分析中的应用研究[D]. 北京: 北方交通大学, 1996: 40—60.
- [3] 王涛, 陈晓玲, 于利宏. 地下洞室群围岩稳定的离散元