

隧道超前地质预报综合分析方法

李天斌¹, 孟陆波¹, 朱 劲^{1, 2}, 李永林², 牟 力²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 四川达渝高速公路建设开发有限公司, 四川 达州 635000)

摘要: 通过隧道介质物性差异特点分析和常见物探超前预报方法适宜性对比评价, 提出“以地质分析为核心, 综合物探与地质分析相结合, 洞内外结合, 长短预测结合以及物性参数互补”的综合预报原则, 并建立较为完善的隧道超前地质综合预报方法体系和组织机构。针对隧道中断层、破碎岩体、富水情况、有无溶洞、软弱岩体5种常见不良地质情况, 提出合理的预报工作流程, 并提取相关地质参数和物探成果参数, 建立综合分级评价体系。最后, 采用模糊神经网络方法, 实现隧道常见不良地质情况的综合预报, 铜锣山岩溶隧道应用情况表明, 综合预报结果准确率达80%。

关键词: 隧道工程; 超前地质预报; 模糊神经网络; 综合分析

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)12 - 2429 - 08

COMPREHENSIVE ANALYSIS METHOD FOR ADVANCED FORECAST OF GEOLOGY IN TUNNELS

LI Tianbin¹, MENG Lubo¹, ZHU Jin^{1, 2}, LI Yonglin², MOU Li²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Sichuan Dayu Expressway Construction Co., Ltd., Dazhou, Sichuan 635000, China)

Abstract: By the analysis of physical difference of tunnel media and comparative evaluation of suitability of common advanced prediction of geology, a principle of comprehensive prediction that takes the geological analysis as the target, combining geological analysis and geophysical exploration, considering the condition inside and outside of the tunnel, employing long-term and short-term prediction methods, and adopting mutual geophysical parameters, is proposed. The system and organization of comprehensive geological prediction in tunnels are established. Then, the comprehensive prediction workflows of common unfavorable geological conditions such as fault, breaking of rock mass, enriched groundwater, karst, soft rock mass in tunnels are presented. Parameters of relevant geological and geophysical prospecting characteristics are given; and comprehensive classification system is built. Finally, a comprehensive prediction model for solving geological problems has been constructed with fuzzy neural network(FNN). The comprehensive prediction system is used in Tongluoshan karst tunnel and the accuracy of the prediction is 80%.

Key words: tunnelling engineering; advanced prediction of geology; fuzzy neural network(FNN); comprehensive analysis

1 引言

在隧道施工阶段开展超前地质预报工作对确保施工安全和进度具有十分重要的作用。隧道施工超

前地质预报方法历经几十年的发展, 已经由单一的地质分析预报阶段发展到地质分析结合地球物理探测的综合预报阶段, 并取得了许多成功的工程案例, 如孙广忠^[1]主持预报的军都山隧道, 李天斌^[2]主持预报的鹧鸪山隧道等。目前, 已有较多学者倡导和

收稿日期: 2009 - 06 - 29; **修回日期:** 2009 - 09 - 07

作者简介: 李天斌(1964 -), 男, 博士, 1988年毕业于成都地质学院, 现任教授, 主要从事地质工程、岩土工程和隧道工程方面的教学与研究工作。
E-mail: ltb@cduet.edu.cn

开展隧道超前地质预报的综合分析,但其适宜性和实用性还值得进一步研究。在圆梁山隧道^[3]、武隆隧道^[4]等特长隧道中做过一些综合超前地质预报工作,但仅仅局限于某一条隧道,推广应用还值得商榷。曲海锋等^[5]提出了隧道信息化施工中综合超前地质预报技术,但预报方法只采用了地面地质调查法、地质雷达和 TSP 法,没有将地质综合分析技术和一些新的物探超前预报技术纳入预报方法体系。李术才等^[6]在对综合超前地质预报方法研究基础上,优化综合超前地质预报的流程,并提出隧道地质灾害四色预警机制,制定相应的应急预案,但没有建立隧道常见不良地质体的综合预报模型。谭天元等^[7]建立深埋长大隧道综合预报体系和方法的框架较全面,但没有提出具体合适的综合预报模型。

从当前各种超前预报新旧方法的应用情况可知,每种方法都不可避免地存在局限性,并且各有优缺点。提高超前地质预报的准确性仍是国内外隧道与地下工程界急需解决的技术难题,有必要提出一种完善的、易于推广的综合预报体系。

2 隧道超前地质预报方法与评价

2.1 隧道介质的物性差异

隧道主要介质为岩土体、水、空气。空气的主要物性特点是电阻率最大;介电常数最小,一般为 1;电磁波速最高,衰减最小;地震波波速最小,纵波波速一般为 340 m/s^[8]。水的物性特点是介电常数最大,一般为 81;电磁波速最低;地震波波速较小,纵波波速一般为 1 430~1 590 m/s。干燥岩土体的物性特点是多数属于高阻介质,电磁参数有差异,但差异不大,介电常数为 4~9,电磁波波速中等;地震波波速相差很大,常见范围为 1 500~8 000 m/s。

在隧道超前地质预报中,物探方法常以隧道介质的弹性和电性差异为基础。如 TSP 预报利用的物性差异是隧道介质的弹性,地质雷达预报利用的是介电常数,瞬变电磁法利用的是介质的视电阻率,BEAM 预报利用的是介质的激发极化效应。

2.2 隧道常见超前预报方法

(1) 地质分析预报法

地质分析预报是隧道超前预报中的一项基本方法,地质分析方法细分的种类很多,常见的有:地面地质调查、隧道掌子面地质编录、超前钻探等。其中,地面地质调查和掌子面地质编录与分析两种方法的优点是不干扰施工,设备简单,出结果快,预报效果较好,而且为整个隧道提供详细的地质资

料;缺点是对于隧道前方未开挖的不良地质容易漏报。超前钻探可以直观反映掌子面前方基本地质情况,是施工预报最有效方法之一,对岩体完整性、地下水和垂直隧洞轴线的地质结构面等预报效果较好,但需占用较长的施工作业时间,费用高,所以超前钻探只适用于针对某些重点疑难问题的预报。

(2) TSP 法

TSP(tunnel seismic prediction)法基于地震波的反射原理,是利用地震波在不均匀地质构造中产生的反射波特性来预报隧道施工前方的地质条件和岩石特性变化的一种方法^[9]。TSP 对掌子面前方遇到与隧道轴线近垂直的不连续面的预报结果可靠。地震波在断层等不连续面处产生较强发射,出现大量反射界面,同时 P 波波速 V_p 降低。由于溶洞(含空腔)发育复杂多变、大小不定、形态各异,几何形状变化大,地震反射波特征复杂,因此 TSP 对溶洞的预测效果稍差。常见表现特征为:地震波在空洞与岩体界面产生较强发射,空洞区域的纵波和横波波速都较低,在深度偏移剖面图中强弱反射界面交替出现等。对于地下水体, TSP 不甚敏感,预报水的准确性不是很高。对地下水体的判断一般依靠 V_p/V_s 的准确性, V_p/V_s 增加或泊松比突然增大,表明可能有流体的存在。对于岩体强度的判断,一般依据 P 波正负反射振幅,正反射振幅表明硬岩层,负反射振幅表明软岩层。

(3) 地质雷达法

地质雷达(ground penetrating radar, GPR)法是一种利用电磁波在不同介质中产生透射、反射的特性来进行超前地质预报的方法^[10]。对于探测破碎岩体,地质雷达效果好,由于岩石被节理裂隙切割,反射界面增多,反射波能量发生变化、频率降低,同相轴连续性变差,甚至错断,常表现为波形杂乱;对于溶洞,地质雷达探测效果较好,电磁波在含水溶洞周界发生反射,一般形成振幅较强的弧形反射波;当为干溶洞(空腔)时,地震波在空腔与周围岩体界面产生较强发射,强反射界面增多,波幅及相位变化较大,同相轴发生错断;当溶洞中充填碎块石时,则与破碎岩体相似;对于地下水,电磁波对水的反射界面较为敏感,但是由于对水的探测受到种种因素的干扰,效果不甚理想;对于围岩软硬情况,电磁波对均质的传播介质都具有同相轴连续的特征,因此,在软岩硬岩的反应上不易区分。

(4) 瞬变电磁法

瞬变电磁法(transient electromagnetic method, TEM)是一种时间域电磁法,它是利用阶跃电磁脉冲

激发, 不接地回线向掌子面前方发射一次场, 在一次场断电之后, 测量由介质产生的感应二次场随时间的变化, 来达到寻找各种地质目标的超前预报方法^[11]。瞬变电磁法通过对岩体自感二次场的探测, 获得全区视电阻率, 因此对地下水具有较好的敏感性, 而对岩体强度、岩体破碎程度、干溶洞等不易判断, 原因在于电阻率差异甚小。

(5) BEAM 法

BEAM(bore electrical ahead monitoring)法是由德国 GEO-HYDRAULIK DATA 公司开发的一种通过对岩层电阻率进行测试(激发极化法)来探知岩石质量、空洞和水体的物探方法^[12]。它通过聚焦频率域的激发极化法激发地质体的极化效应, 可以获得百分频率效应(PFE)和电阻率 2 种参数。其中 PFE 是一种表征存储电能能力的参数, 岩体孔隙率的大小直接与其相关, 因此 BEAM 对岩体的节理裂隙发育、破碎程度有较好的敏感性; 对于溶洞也呈现出同样的敏感性, 表现为 PFE 值低, 为-40~0, 呈不规则振荡、非均质变化。BEAM 对于水体也较为敏感, 电阻率降低表明前方岩体充水几率增大。对软硬岩的区分, BEAM 探测效果不甚理想。

此外, 尚有陆地声纳法、红外线探水法等超前物探方法。

2.3 隧道常见物探超前预报方法评价

分析 TSP、地质雷达等上述 4 种超前物探预报手段对断层、破碎岩体、富水情况、干溶洞、软弱岩体这 5 种不良地质条件预报的准确性, 对比评价情况如表 1 所示。如对于探测干溶洞(含空腔), 地质雷达和 BEAM 评价结果为 B, 预报结果准确度相对较高, 为优先考虑的方法; TSP 法评价结果为 C, 预报结果准确度较低, 可参考考虑; 瞬变电磁法评价结果为 D, 预报结果准确度低, 可不考虑。根据表 1, 可有针对性地选择一种或者几种准确率较高的物探预报方法进行综合预报。

表 1 4 种物探预报方法预报准确性对比评价
 Table 1 Accuracy evaluation of four geophysical exploration methods for prediction

物探方法	准确性评价				
	断层	破碎岩体	富水情况	溶洞(干)	软弱岩体
TSP	A	B	C	C	B
地质雷达	A	A	C	B	C
瞬变电磁法	D	D	A	D	D
BEAM	B	B	A	B	D

注: A, B, C, D 分别表示对应于某一种地质情况, 该方法与其他几种方法相比准确度高、较高、较低、低。

3 隧道综合超前地质预报体系

3.1 综合预报原则

隧道综合超前地质预报应以“地质分析为核心, 综合物探与地质分析结合, 洞内外结合, 长短预测结合, 物性参数互补”为原则:

(1) “以地质分析为核心”是指以地面和掌子面地质调查为主要手段(必要时开展超前钻孔), 并将地质分析作为超前预报的核心, 贯穿于整个预报工作的始终。

(2) “综合物探与地质分析结合”是指在开展 TSP、地质雷达、瞬变电磁法等综合物探工作的同时, 必须将物探解译与地质分析紧密结合。

(3) “洞内外结合”是指洞内、洞外预报相结合, 并以洞内预报为主, 如地面地质调查是洞外预报, 掌子面素描、超前钻探和各种物探方法是洞内预报。

(4) “长短预测结合”是指在长距离预报的指导下, 进行短距离精确预报, 如地面地质调查和 TSP 是长距离预报, 掌子面素描、地质雷达、超前钻探等是短距离预报。

(5) “物性参数互补”是指选取的物探预报方法其预报物性参数应相互补充配合。TSP、地质雷达、瞬变电磁法、BEAM 等物探方法不一定同时同等使用, 应在地质分析的基础上, 考虑“长短预测结合”等综合预报原则和物探方法适宜性, 选取适宜的一种或几种物探方法进行预报。如对于探测断层, 宜选用 TSP+GPR 或 TSP+BEAM 组合; 对于探测富水情况, 宜选用 TSP+TEM 或 TSP+BEAM 组合。

3.2 综合预报工作体系

在上述综合预报原则的指导下, 建立隧道超前地质综合预报工作路线, 如图 1 所示。

首先对隧址区勘察资料进行详细研究, 利用地面地质调查等方法, 确定断层和其他不良地质体与隧道轴线交点的大概位置, 估测岩层、断层和其他重要地质界面的产状, 预测地下水富存段。在此基础上, 根据宏观地质分析预测成果和掌子面地质调查, 结合各种物探方法的适宜性(见表 1), 有针对性的选择一种或者几种物性参数互补的物探方法进行超前探测与预报解译, 了解掌子面前方一定距离的详细地质特征信息。

通过上述地质分析和物探预报解译, 对掌子面前方的基本地质条件, 包括断层、岩体破碎情况、溶洞、地下水情况、岩体软硬程度等, 进行综合分析预报, 并判断是否存在不良地质体和施工地质灾害, 并采取相应的措施指导施工。

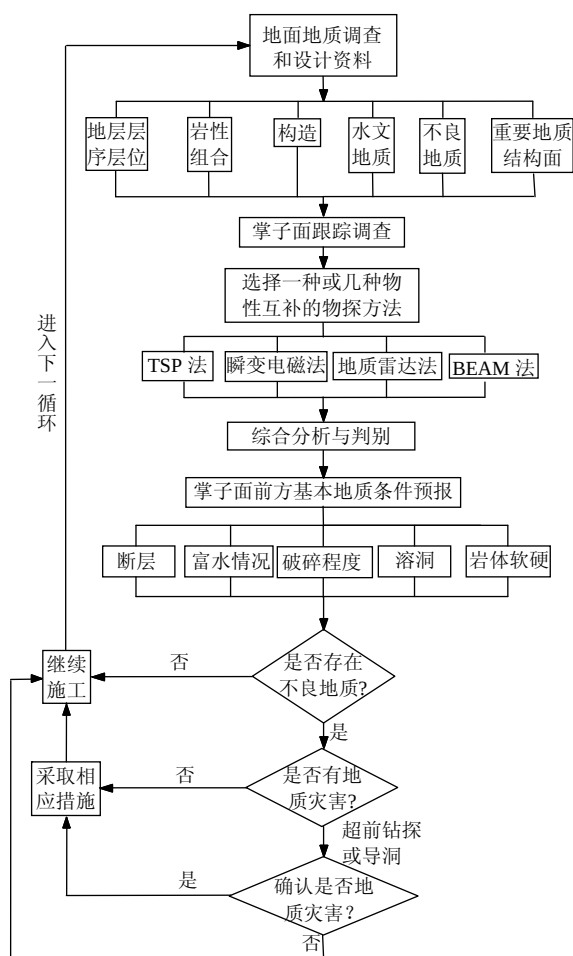


图 1 隧道超前地质综合预报工作路线图

Fig.1 Workflow chart of geological comprehensive prediction in tunnels

3.3 综合预报组织机构

在隧道超前地质综合预报工作中，成立以施工单位为主体的“超前地质预报综合分析现场组”（简称为现场组）；同时，成立有丰富理论知识和工作经验的专家组成的“隧道超前地质预报专家顾问组”（简称为专家顾问组）进行平行咨询。

现场组负责收集地质编录组、物探测试组(如 TSP 测试组等)的相关超前地质预报资料，并对其进行分析，形成综合预报初稿，并上报专家顾问组。在收到专家顾问组意见后，现场组讨论分析，必要时实施超前钻探，并形成最终综合预报报告。然后通过监理组组织的四方会议，根据预报结果形成工程决策来指导施工。其详细工作流程见图 2，为保证组织机构完整性，图 2 中列出了 4 个物探测试组，实际可根据隧道复杂程度，选择其中的一种或几种物探方法建立相应的物探测试组。

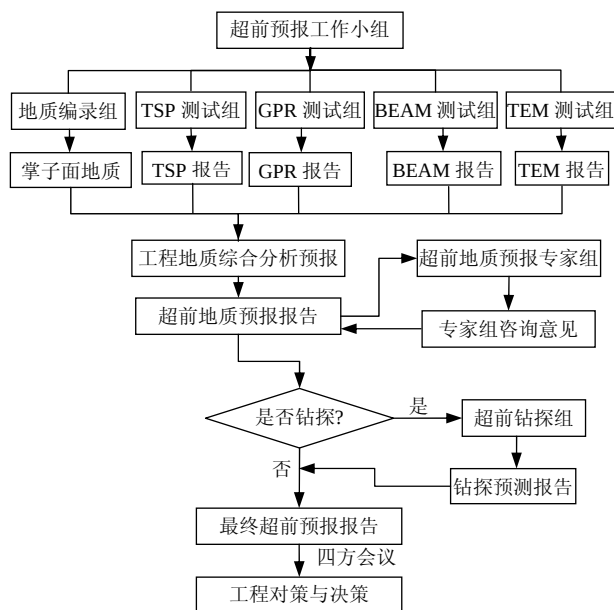


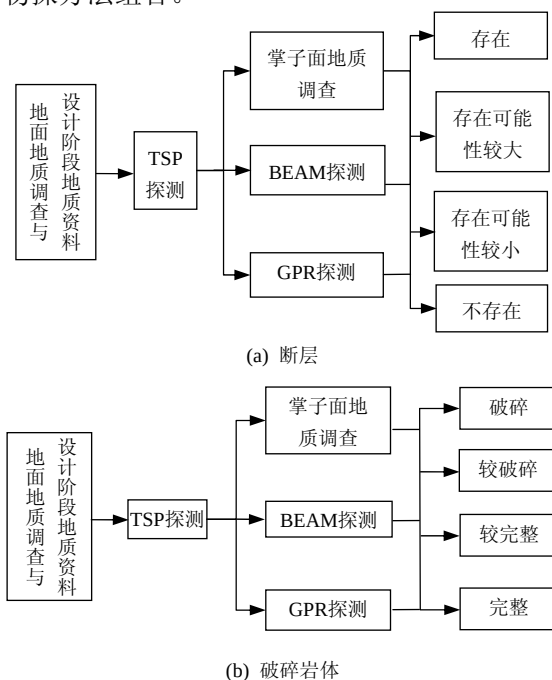
图 2 隧道超前地质综合预报组织机构工作流程图

Fig.2 Organization workflow chart of geological comprehensive prediction in tunnels

4 模糊神经网络综合预报方法

4.1 不良地质综合预报流程

依据上述隧道超前地质综合预报原则和综合预报工作体系，建立综合预报断层、破碎岩体、富水情况、溶洞、软弱岩体等不良地质情况的工作流程，如图 3 所示。为保证预报模型完整性，图 3 包含了预报上述不良地质情况基本可用的物探方法，实际综合预报中，可依据物探方法适宜性评价和“物性参数互补”等综合预报原则，选取适宜的一种或几种物探方法组合。



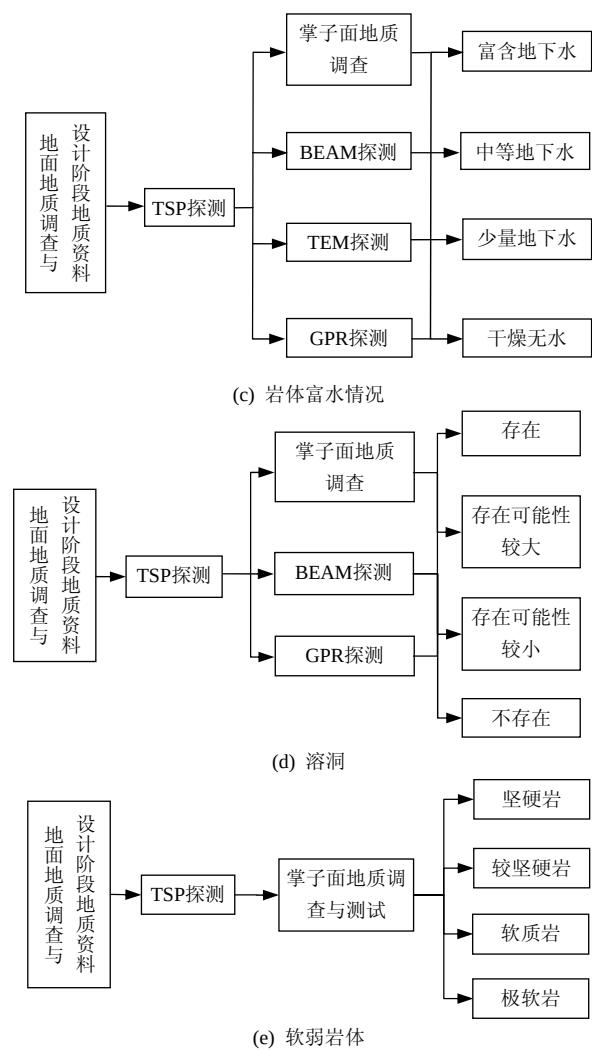


图 3 不良地质条件的综合预报工作方法流程图
 Fig.3 Workflow chart of comprehensive prediction for unfavorable geological conditions

4.2 预测指标选取与分级

根据上述综合预报流程，结合地质资料和物探方法对断层、破碎岩体、溶洞、富水情况、软弱岩体五种不良地质情况的响应特点，选取适宜的地质和物探参数指标，并根据各个指标对预报结果的影响对其进行分级。

(1) 断层预测指标及其分级

将断层预测目标划分为 4 个级别：存在、存在可能性较大、存在可能性较小、不存在。选择六类

因子作为断层的预测指标：设计阶段区域断层信息；掌子面断层调查情况；TSP 反射界面和 V_p 变化特征；地质雷达波的综合特征；BEAM 的 PFE 值。总结各因子对应于断层的表现特征，确定各断层评价指标分级情况(见表 2)。

(2) 破碎岩体预测指标及其分级

将岩体破碎程度划分为 4 个级别：完整、较完整、较破碎、破碎。选取五类因素作为掌子面前方岩体破碎程度综合分析预报的预测因子：设计阶段地质资料；掌子面节理裂隙发育情况；TSP 的 P 波 V_p 波速特征；BEAM 的 PFE 值；地质雷达波的综合特征。总结各因子对应于不同破碎程度的表现特征，确定破碎岩体预测指标分级情况(见表 3)。

(3) 围岩富水情况预测指标及其分级

将围岩富水情况划分为 4 种不同类型，选取 6 种因子作为预测指标，分别为设计阶段富水信息、掌子面出水情况、TSP 的 P 波波速与 S 波波速之比 V_p/V_s 的变化情况、BEAM 测得电阻率值、瞬变电磁测得视电阻率变化、地质雷达波波形综合特征。总结各指标对应于不同富水情况的表现特征，并参考 C. W. Zang 等^[13]的分级经验，确定富水情况预测指标分级情况(见表 4)。

(4) 溶洞预测指标及其分级

将溶洞预测目标划分为 4 个级别：存在、存在可能性较大、存在可能性较小、不存在。选取五类因素作为有无溶洞综合分析预报的评价因子：设计阶段地质资料；掌子面溶洞调查情况；TSP 的 V_p/V_s 变化特征；BEAM 的 PFE 值；地质雷达波的综合特征。最终确定的溶洞预测指标分级情况如表 5 所示。

(5) 软弱岩体预测指标及其分级

将软弱岩体预测目标划分为 4 个级别：坚硬岩、较坚硬岩、软岩和极软岩。选取三类因素作为软弱岩体的综合分析预报指标：设计阶段地质资料；掌子面岩体强度调查测试情况；TSP 探测的 P 波波幅正负特征。最终确定软弱岩体预测指标分级情况如表 6 所示。

表 2 断层预测指标及其分级

Table 2 Prediction factors and their classification for faults

断层预测	设计阶段地质信息	掌子面断层调查	TSP 反射界面	V_p 变化特征	电磁波波形特征	PFE 值/%
存在	存在断层信息	有断层前兆	存在强烈反射界面	有明显下降	离散化，强振幅反射波	<0
存在可能性较大			反射界面较多	有下降	杂波形式	0~90
存在可能性较小	无断层信息	无断层前兆	反射界面较少	有少许下降	波幅变化不大，接近连续的同相轴	0~90
不存在			基本无反射界面	稳定无变化	低振幅，高频，密集，平滑和连续的同相轴	≥90

表 3 破碎岩体预测指标及其分级

Table 3 Prediction factors and their classification for rock mass integrity

岩体完整性预测	设计阶段地质信息 (围岩完整性)	掌子面调查 节理裂隙发育情况	V_p 变化特征	电磁波波形特征	PFE 值/%
岩体完整	节理裂隙不发育, 岩体呈整体结构、块状结构或层状结构	不发育	稳定无变化	低振幅, 高频, 密集, 平滑和连续的同相轴	≥ 90
岩体较完整	节理裂隙较发育, 岩体呈层状镶嵌结构	较发育	有少许下降	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	15~90
岩体较破碎	节理裂隙发育, 岩体呈镶嵌结构	发育	有下降	杂波形式	0~15
岩体破碎	节理裂隙很发育或发育断层破碎带, 岩体呈散体结构	很发育	有明显下降	离散化, 高振幅, 同相轴错断	-40~0

表 4 富水情况预测指标及其分级

Table 4 Prediction factors and their classification for groundwater

富水情况预测	设计阶段地质信息	掌子面出水情况	V_p/V_s	电磁波波形特征	视电阻率变化	电阻率/ $(\Omega \cdot m)$
富含地下水	富水可能性极大	淋水及股状水	非常大	离散化, 强振幅反射波	严重降低	0~35
含中等地下水	富水可能性较大	线状水	较大	杂波形式	降低较大	35~100
含水量地下水	可能含水	潮湿、滴水	略大	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	稍有降低	100~275
干燥无水	基本无水	干燥无水	基本无变化	低振幅, 高频, 平滑和连续的同相轴	平稳无变化	≥ 275

表 5 溶洞预测指标及其分级

Table 5 Prediction factors and their classification for cavities

溶洞预测	设计阶段地质信息	掌子面溶洞调查	PFE 值/%	电磁波波形特征	V_p/V_s
有溶洞	岩溶区	有溶洞前兆标志	< 0	离散化, 强振幅反射波	非常大
存在可能性较大			0~90	杂波形式	较大
存在可能性较小	非岩溶区	无溶洞前兆	0~90	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	略大
无溶洞			≥ 90	低振幅, 高频, 密集, 平滑和连续的同相轴	几乎没有变化

表 6 软弱岩体预测指标及其分级

Table 6 Prediction factors and their classification for rock mass strength

岩体软硬预测	设计阶段地质信息	掌子面岩体强度测试	P 波波幅正负特征
坚硬	坚硬岩区	岩质坚硬	强正反射振幅
较坚硬	较坚硬岩区	岩质较坚硬	弱正反射振幅
软弱	软岩区	岩质软弱	弱负反射振幅
极软弱	极软岩区	岩质极软	强负反射振幅

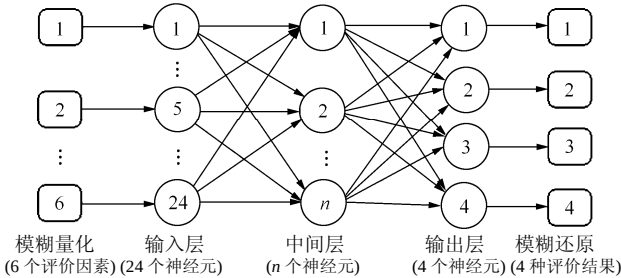


图 4 模糊神经网络结构示意图

Fig.4 Sketch of fuzzy neural network structure

4.3 模糊神经网络综合预报

上述隧道不良地质情况综合预报体现的是一种工作方法, 整个预报过程仍需进一步可操作化。本文采用模糊神经网络方法, 建立上述隧道不良地质情况的模糊神经网络综合预报模型进行综合预报。

模糊神经网络(fuzzy neural network)结合了人工神经网络和模糊系统的优点, 两者结合形成的模糊神经网络同时具有模糊逻辑易于表达人类知识和神经网络的分布式信息存储以及学习能力的优点^[14, 15]。

(1) 模糊神经网络结构

采用串联型模糊神经网络, 神经网络为 3 层 BP 网络, 网络第一层前接模糊量化评价, 网络第三层输出后进行模糊还原, 模糊神经网络结构见图 4。

(2) 模糊量化评价

在超前预报综合分析评判中, 根据建立隶属度的基本原则, 将评价因子分为 2 种方式分别计算:

第一类: 当评价因子为用文字描述定性指标时, 因其指标离散化, 故其隶属函数采用特征函数。即

$$u(x)=\begin{cases} 1 & (u=u_i(i=1,2,\cdots 6)) \\ 0 & (u\neq u_i(i=1,2,\cdots 6)) \end{cases} \quad (1)$$

第二类: 当评价因子为数值式的定量指标时, 建立代表隶属度和指标数值之间的函数关系, 即隶属函数。隶属函数种类很多, 综合各因子数据的分布特征, 采用“梯形”和“三角”分布形式。

(3) 神经网络算法

采用误差反向传播 BP 神经网络算法, 标准 BP 算法在迭代计算过程中存在易陷入局部最小值和收敛速度慢的问题, 为克服以上 2 个问题, 采用加入自适应学习率和动量的改进算法。

5 工程应用

铜锣山隧道穿越三叠系须家河组、雷口坡组和嘉陵江组以及侏罗纪地层, 主要岩性为泥质岩、砂岩、灰岩、白云质灰岩、岩溶角砾岩等。受地层岩性、地质构造控制, 隧道区岩溶较发育, 其富水地段存在严重涌(突)水的可能性。在隧道施工过程中采用本文提出的综合超前地质预报方法和工作体系, 对该隧道左右线双洞进行了 65 次、共计 5 000 多米的超前地质综合分析预报, 预报结果准确率较

高, 避免了施工地质灾害的发生, 确保了施工安全, 为工程建设取得了较好的经济效益。

这里以围岩富水情况的模糊神经网络综合预报为例, 训练样本取自表 4 分级标准构筑的样本和铜锣山隧道实际探测的典型实例。富水情况模糊神经网络典型训练样本如表 7 所示, 训练样本网络的回判结果良好, 与网络输出完全一致。网络训练完成后, 对隧道采用多种物探测试的地段进行岩体富水情况综合预报, 其结果见表 8。由此可见, 综合预报结果与开挖揭示的实际地下水情况基本一致。通过各段预报结果准确度统计, 总体准确率达 80%。

表 7 富水情况模糊神经网络典型训练样本
 Table 7 Typical training samples of fuzzy neural network for groundwater

编号	设计阶段富水情况	掌心面出水情况	V_P/V_S 的变化特征	电磁波波形综合特征	视电阻率变化情况	电阻率/ $(\Omega \cdot m)$	网络输出
1	富水可能性极大	淋水及股状水	非常大	离散化, 强振幅反射波	严重降低	<10	含大量地下水
2	富水可能性较小	潮湿、滴水	非常大	离散化, 强振幅反射波	降低较大	-	含大量地下水
3	富水可能性较小	潮湿、滴水	略大	杂波形式	严重降低	-	含大量地下水
4	富水可能性极大	线状水	基本无变化	杂波形式	-	<5	含大量地下水
5	富水可能性大	线状水	较大	杂波形式	降低较大	50	含中等地下水
6	富水可能性大	潮湿、滴水	略大	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	严重降低	-	含中等地下水
7	富水可能性较小	潮湿、滴水	较大	杂波形式	降低较大	-	含中等地下水
8	富水可能性大	潮湿、滴水	略大	杂波形式	-	60	含中等地下水
9	富水可能性较小	潮湿、滴水	略大	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	稍有降低	180	含少量地下水
10	富水可能性较小	干燥	较大	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	稍有降低	-	含少量地下水
11	基本无水	潮湿、滴水	略大	杂波形式	稍有降低	-	含少量地下水
12	基本无水	潮湿、滴水	较大	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	-	120	含少量地下水
13	基本无水	干燥无水	基本无变化	低振幅, 高频, 平滑和连续的同相轴	平稳无变化	300	干燥无水
14	富水可能性较小	潮湿、滴水	略大	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	平稳无变化	-	干燥无水
15	富水可能性较小	干燥无水	略大	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	-	400	干燥无水

表 8 富水情况模糊神经网络典型应用样本
 Table 8 Typical actual samples of fuzzy neural network for groundwater

桩号	设计阶段富水情况	掌心面出水情况	V_P/V_S 的变化特征	电磁波波形综合特征	视电阻率变化情况	电阻率/ $(\Omega \cdot m)$	综合预报结果	实际开挖富水情况	预报准确情况
YK35+706~YK35+676	富水可能性极大	大面积淋水	基本无变化	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	-	20	含大量地下水	大面积淋水状出水	准确
YK35+671~YK35+636	富水可能性大	浸润状	基本无变化	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	-	50	含少量地下水	潮湿~渗水	准确
YK34+554~YK34+589	富水可能性较小	浸润状~滴水状	较大	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	稍有降低	-	含少量地下水	潮湿~渗水	准确
YK34+819~YK34+854	富水可能性较小	浸润状~滴水状	略大	杂波形式	降低较大	-	含大量地下水	线状流水	不够准确
YK 34+854~YK34+884	富水可能性较小	浸润状	较大	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	稍有降低	-	含少量地下水	潮湿~渗水	准确
K35+042~K34+967	富水可能性大	浸润状~滴水状	略大	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	稍有降低	-	含少量地下水	潮湿~渗水	准确
K34+771~K34+806	富水可能性较小	浸润状	基本无变化	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	稍有降低	-	含少量地下水	潮湿~渗水	准确
K34+526~K34+561	富水可能性较小	浸润状~滴水状	较大	波幅变化不大, 接近连续的同相轴	稍有降低	-	含少量地下水	潮湿~滴水	准确

6 结 论

(1) 总结隧道中常用的物探超前预报方法, 如 TSP、地质雷达、瞬变电磁法和 BEAM 法, 分别评价了其对于断层、破碎岩体、富水情况、溶洞、软弱岩体等隧道不良地质情况的响应特征和适宜性, 可为选择适宜的物探方法提供依据。

(2) 建立了“以地质分析为核心, 综合物探与地质分析结合、洞内外结合、长短预测结合及物性参数互补”的综合预报原则和完善的隧道超前综合预报工作方法体系、综合预报组织机构, 为隧道超前地质综合预报提供一种较为完善的综合预报模式。

(3) 针对隧道工程中断层、破碎岩体、富水情况、溶洞、软弱岩体 5 种常见不良地质情况, 建立了相应的综合预报流程, 并提取相关地质参数和物探成果参数, 建立了上述不良地质情况的综合分级评价体系 and 模糊神经网络综合预报模型, 为具体隧道工程超前地质预报综合分析提供了新的方法。

(4) 运用本文提出的隧道超前地质综合预报体系和方法对铜锣山岩溶隧道左右线双洞进行了共计 5 000 多米的超前地质综合分析预报, 经统计, 总体预报结果准确率达 80%, 确保了隧道施工安全, 取得了较好的经济效益。

参考文献(References):

- [1] 孙广忠. 军都山隧道快速施工超前地质预报指南[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990.(SUN Guangzhong. Fast fore geological prediction in Jundushan tunnel[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1990.(in Chinese))
- [2] 李天斌. 复杂地质条件下公路隧道施工地质预报研究[R]. 成都: 成都理工大学, 2005.(LI Tianbin. Study of fore geological prediction in highway tunnel of complex geological conditions[R]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005.(in Chinese))
- [3] 齐传生, 王洪勇. 圆梁山隧道综合超前地质预报技术[J]. 铁道勘察, 2004, (5): 52 - 56.(QI Chuansheng, WANG Hongyong. Technique of comprehensive geological prediction in Yuanliangshan tunnel[J]. Railway Survey, 2004, (5): 52 - 56.(in Chinese))
- [4] 李苍松, 何发亮, 丁建芳. 武陵隧道岩溶地质超前预报综合技术[J]. 水文地质工程地质, 2005, (2): 96 - 100.(LI Cangsong, HE Faliang, DING Jianfang. Synthesis prediction technology of karst geology in Wulong tunnel[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, (2): 96 - 100.(in Chinese))
- [5] 曲海峰, 刘志刚, 朱合华. 隧道信息化施工中综合超前地质预报技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 246 - 1 251.(QU Haifeng, LIU Zhigang, ZHU Hehua. Technique of synthetic geologic prediction ahead in tunnel informational construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1 246 - 1 251.(in Chinese))
- [6] 李术才, 薛翊国, 张庆松, 等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1 297 - 1 307.(LI Shucai, XUE Yiguo, ZHANG Qingsong, et al. Key technology study of comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1 297 - 1 307.(in Chinese))
- [7] 谭天元, 张伟, 陈友辉. 深埋特长隧道超前地质预报体系综合技术研究[J]. 水力发电, 2008, 34(7): 35 - 37, 51.(TAN Tianyuan, ZHANG Wei, CHEN Youhui. Comprehensive technological research on geological forecast system in deep and distinctive long tunnels[J]. Water Power, 2008, 34(7): 35 - 37, 51.(in Chinese))
- [8] 吴功建, 林清溪, 高锐. 地球物理方法及在地质和找矿中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1998.(WU Gongjian, LIN Qingyuan, GAO Rui. Physical geography methods and its application to geology and minerals[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.(in Chinese))
- [9] 何刚. TSP - 203 系统在隧道超前地质预报中的应用研究[硕士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2005.(HE Gang. Study of TSP - 203 system for advanced geological prediction in tunnels[M. S. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2005.(in Chinese))
- [10] 白哲. 地质雷达在隧道超前预报中的应用[硕士学位论文][D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.(BAI Zhe. Application of GPR in geology forecast for tunnel[M. S. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.(in Chinese))
- [11] 武军杰. 瞬变电磁新技术在隧道超前地质预报中的应用研究[硕士学位论文][D]. 长安: 长安大学, 2005.(WU Junjie. Study of transient electromagnetic new method for advanced forecast of geology in tunnels[M. S. Thesis][D]. Chang'an: Chang'an University, 2005.(in Chinese))
- [12] GEOHYDRAULIK D. Beam real-time ground prediction[R]. Kirchvers: Geohydraulik Data, Corp, 2004.
- [13] ZANG C W, HUANG H W, ZHANG Z X. Forecasting the starta condition of a long road tunnel by using fuzzy synthetic judgment[J]. International Journal of Rock Mechanics Science, 2004, 41(3): 1 - 6.
- [14] 张吉礼. 模糊 - 神经网络控制原理与工程应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.(ZHANG Jili. Fuzzy-neural network control principle and its engineering application[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004.(in Chinese))
- [15] 袁清梅. 模糊神经网络用于目标识别的研究[硕士学位论文][D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.(YUAN Qingmei. The application of fuzzy neural network to target recognition[M. S. Thesis][D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.(in Chinese))