



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107193001 B

(45)授权公告日 2020.04.14

(21)申请号 201710414618.6

(22)申请日 2017.06.05

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 107193001 A

(43)申请公布日 2017.09.22

(73)专利权人 广西大学

地址 530004 广西壮族自治区南宁市乡塘区大学路100号

专利权人 广西新发展交通集团有限公司

(72)发明人 刘宗辉 周东 刘以阗 王业田

吴恒 朱沛成 韦鸿耀

(74)专利代理机构 广西南宁公平知识产权代理有限公司 45104

代理人 黄永校

(51)Int.Cl.

G01S 13/88(2006.01)

(56)对比文件

CN 104766090 A,2015.07.08,

CN 105334548 A,2016.02.17,

CN 105512635 A,2016.04.20,

CN 103558643 A,2014.02.05,

CN 103513293 A,2014.01.15,

CN 105353427 A,2016.02.24,

CN 103308946 A,2013.09.18,

US 8629799 B2,2014.01.14,

CN 105929024 A,2016.09.07,

赵文轲.探地雷达属性技术及其在考古调查中的应用研究.《中国博士学位论文全文数据库基础科学辑》.2013,

Lei Xiang,et al.An automatic algorithm for multi-defect classification inside tunnel using SVM.《Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar》.2012,

岳彬等.地质雷达技术在客专隧道超前地质预报中的应用.《工程勘察》.2014,

审查员 吕玉婷

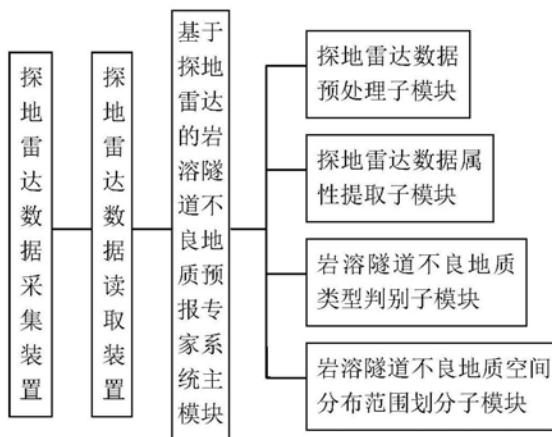
权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54)发明名称

基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统及实现方法

(57)摘要

一种基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统及实现方法,包括探地雷达数据采集装置、探地雷达数据读取装置以及岩溶隧道不良地质预报专家系统主模块;岩溶隧道不良地质预报专家系统主模块包括探地雷达数据预处理子模块、探地雷达数据属性提取子模块、岩溶隧道不良地质类型判别子模块、岩溶隧道不良地质空间分布范围划分子模块;专家系统通过人机交互界面控制并实现各子模块各自数据的输入与输出以及各子模块之间的数据交换。本发明能实现岩溶隧道超前地质预报探地雷达数据智能化解译,提高预报效率与预报精度。



1. 一种基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统,包括探地雷达数据采集装置、探地雷达数据读取装置以及岩溶隧道不良地质预报专家系统主模块,其特征在于,具体结构和连接关系为:岩溶隧道不良地质预报专家系统主模块包括探地雷达数据预处理子模块、探地雷达数据属性提取子模块、岩溶隧道不良地质类型判别子模块、岩溶隧道不良地质空间分布范围划分子模块;专家系统通过人机交互界面控制并实现各子模块各自数据的输入与输出以及各子模块之间的数据交换;

所述探地雷达数据采集装置包括探地雷达主机、发射与接收天线以及测点与测线空间坐标确定与记录系统;所述探地雷达主机分别连接并控制发射与接收天线、测点与测线空间坐标确定与记录系统;所述测点与测线空间坐标确定与记录系统用于确定与记录每个探地雷达数据采集点的具体位置;

所述探地雷达数据读取装置包括数据传输设备、不同型号的探地雷达数据读取器以及数据转换器;所述数据传输设备通过连接不同型号的探地雷达主机实现原始数据导入,所述不同型号的探地雷达数据读取器以及数据转换器用于读取原始数据并将其转换为专家系统设置的标准格式;

所述探地雷达数据预处理子模块包括常规处理、弱信号提取以及补偿增益;所述常规处理即数据编辑、解振荡、滤波与校准;所述弱信号提取基于剪切波变换理论实现探地雷达弱信号提取;所述补偿增益采用球面指数补偿增益方法;

所述探地雷达数据属性提取子模块包括探地雷达数据的属性特征值计算以及二维或三维属性体计算;所述探地雷达数据的属性特征值包括时域均方根振幅、时域相干性、频域-3dB带宽平均频率、频域-3dB带宽平均相位、时频域低频增加面积、时频域高频衰减面积;所述时频域低频增加面积、时频域高频衰减面积通过基于广义S变换及子波谱模拟的探地雷达波吸收衰减参数计算方法获得;所述二维或三维属性体包括三瞬属性、振幅属性、纹理属性以及相干属性;

所述岩溶隧道不良地质类型判别子模块通过建立岩溶不良地质类型判别高斯多元分类模型实现;所述岩溶不良地质类型判别高斯多元分类模型包括学习样本库、高斯多元分类学习模块、待预测数据属性特征值导入模块、不良地质类型预测模块以及结果输出与保存模块;

所述岩溶隧道不良地质空间分布范围划分子模块通过建立探地雷达多属性聚类分割模型实现;所述探地雷达多属性聚类分割模型包括探地雷达数据二维或三维属性体导入模块、多属性主成分分析模块、模糊聚类分割模块以及结果输出与保存模块。

2. 根据权利要求1所述的基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统,其特征在于,该专家系统的实现方法包括以下步骤:

(1) 使用探地雷达数据采集装置在隧道掌子面采集待预测隧道段探地雷达原始数据资料,并记录各测点与测线空间坐标;

(2) 使用数据读取装置读取现场采集的探地雷达原始数据,并将其转换为专家系统设置的标准格式,按隧道掌子面里程、测点与测线空间坐标保存于数据库中;

(3) 启动数据预处理子模块,按系统要求依次对探地雷达原始数据进行常规处理、弱信号提取以及补偿增益,将预处理后的数据按隧道掌子面里程、测点与测线空间坐标保存于数据库中;

(4) 启动探地雷达属性提取子模块,导入预处理后待预测的探地雷达数据;依据专家系统指示设置相关参数,系统自动计算待预测探地雷达数据的属性特征值以及二维或三维属性体;将结果按隧道掌子面里程、测点与测线空间坐标保存于数据库中;

(5) 启动岩溶隧道不良地质类型判别子模块,将所提取的待预测数据属性特征值导入岩溶不良地质类型判别高斯多元分类模型,依据专家系统指示设置相关参数,系统自动输出岩溶不良地质类型判别结果;将判别结果按隧道掌子面里程、测点与测线空间坐标保存于数据库中;

(6) 启动岩溶隧道不良地质空间分布范围划分子模块,将所提取的待预测数据的二维或三维属性体导入探地雷达多属性聚类分割模型,依据专家系统指示设置相关参数,系统自动输出岩溶隧道不良地质空间分布范围划分结果,并将划分结果按隧道掌子面里程、测点与测线空间坐标保存于数据库中;

(7) 通过人机交互界面将岩溶隧道不良地质类型判别结果以及岩溶隧道不良地质空间分布范围划分结果输出,生成最终报告。

3. 根据权利要求1所述的基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统,其特征在于,所述基于剪切波变换理论实现探地雷达弱信号提取的具体方法为:首先采用方向自适应扩散方法来平滑Fine尺度层中噪声对应的剪切波系数,从而辨识出有效信号系数,然后在多尺度阈值的基础上,采用方向自适应阈值的方法来压制噪声信号,最后采用jitter欠采样的剪切波变换稀疏约束方法对雷达数据重构。

4. 根据权利要求1所述的基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统,其特征在于,所述岩溶不良地质类型判别高斯多元分类模型具体实现过程如下:

①从大量已开挖验证过的探地雷达实际资料中提取属性特征值,建立学习样本 $D = \{(x_i, y_j)\} i = 1, 2, 3 \dots, n$,其中 $x_i \in R_d, y_j \in \{1, 2, 3, \dots, C\}$, n 为训练样本数, d 为所提取的雷达属性特征值向量维数, C 为样本所包含岩溶不良地质类别数;

②结合地质资料及其它地质预报方法结果初步判断可能存在的不良地质类型,对于已明确不可能存在的不良地质不再作为学习和预测过程中的类别,这样可以在一定程度上提高分类精度;

③根据高斯二元分类学习方法对样本进行学习,在学习过程中,记第 j 类不良地质为 $y \in \{+1\}$,其它的不良地质类别即为 $y \in \{-1\}$,通过二元分类训练算法,可得到关于第 j 类不良地质的分类器,并获得最优超参数;采用相同方法,依次从第1类到第 C 类不良地质进行训练,可得到一个最优超参数向量;

④从待预测的雷达数据中提取属性特征值,建立待预测数据特征值向量 x_* ,通过第 j 类不良地质的分类器及最优超参数判断 x_* 属于第 j 类的概率 P_{j*} ,最后获得一个概率向量 $p_* = [p_{1*}, p_{2*}, \dots, p_{c*}]$,概率向量最大概率所对应的类别即为 x_* 对应的不良地质类别;

⑤记录实际开挖情况,将每次实例数据属性特征值转换为新的样本保存于数据库中,不断积累,优化学习模型。

基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统及实现方法

技术领域

[0001] 本发明涉及隧道地质领域,特别是一种基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统及实现方法。

背景技术

[0002] 岩溶的存在严重制约着隧道施工工期、造价,并给人员生命及财产安全带来严重威胁,准确预报岩溶隧道不良地质体,成为隧道施工过程中亟待解决的关键问题。岩溶发育具有复杂多变、形态各异等特点,虽然宏观方面可以预见和推定,但在局部具有随机性和不可预见性。在同一隧道施工往往会遇见多种岩溶类型及充填物,其对隧道施工的影响不同,最后治理方案也将不同。从隧道地质角度考虑和施工需要出发,岩溶不良地质需要查明的主要内容有两个方面:一是不良地质的空间位置及几何形态,二是不良地质的物质属性。

[0003] 探地雷达近年来已成为隧道超前地质预报中最主要的短距离物探手段,其在岩溶异常探测方面具有探测精度高、目标位置定位准确等其它物探方法无法比拟的优势。但由于地质条件复杂多变,探地雷达数据中存在大量的多次反射、绕射等杂波,简单环境中的反演、偏移成像方法难以取得理想的效果。岩溶隧道地质预报时,不良地质体区域的检测及物质属性判别异常困难,已成为探地雷达在隧道超前地质预报应用的一个瓶颈。目前,人们根据探地雷达反射电磁波数据解释地质异常体时,主要还是依靠相关专家经验对目标信号特征进行识别,解释角度常常为振幅、相位或频率,且大部分的探地雷达配套软件只能提供常规的数据处理功能,这样则导致探地雷达资料中大量信息被浪费,预报的准确性与效率难以保证。因此,在现有探地雷达以及人工智能技术的基础上,开发岩溶隧道不良地质预报专家系统,将对完善探地雷达岩溶不良地质智能识别技术、减少岩溶隧道地质预报结果多解性具有重要意义。

发明内容

[0004] 为了克服上述现有技术的不足,本发明提出一种基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统,它能实现岩溶隧道超前地质预报探地雷达数据智能化解译,提高预报效率与预报精度。

[0005] 为实现上述目的,本发明采用的技术方案是:一种基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统,包括探地雷达数据采集装置、探地雷达数据读取装置以及岩溶隧道不良地质预报专家系统主模块,其特征在于,具体结构和连接关系为:岩溶隧道不良地质预报专家系统主模块包括探地雷达数据预处理子模块、探地雷达数据属性提取子模块、岩溶隧道不良地质类型判别子模块、岩溶隧道不良地质空间分布范围划分子模块;专家系统通过人机交互界面控制并实现各子模块各自数据的输入与输出以及各子模块之间的数据交换;

[0006] 所述探地雷达数据采集装置包括探地雷达主机、发射与接收天线以及测点与测线空间坐标确定与记录系统;所述探地雷达主机分别连接并控制发射与接收天线、测点与测线空间坐标确定与记录系统;所述测点与测线空间坐标确定与记录系统用于确定与记录每

个探地雷达数据采集点的具体位置；

[0007] 所述探地雷达数据读取装置包括数据传输设备、不同型号的探地雷达数据读取器以及数据转换器；所述数据传输设备通过连接不同型号的探地雷达主机实现原始数据导入，所述不同型号的探地雷达数据读取器以及数据转换器用于读取原始数据并将其转换为本发明专家系统设置的标准格式；

[0008] 所述探地雷达数据预处理子模块包括常规处理、弱信号提取以及补偿增益；所述常规处理即数据编辑、解振荡、滤波与校准；所述弱信号提取基于剪切波变换理论实现探地雷达弱信号提取；所述补偿增益采用球面指数补偿增益方法；

[0009] 所述探地雷达数据属性提取子模块包括探地雷达数据的属性特征值计算以及二维或三维属性体计算；所述探地雷达数据的属性特征值包括时域均方根振幅、时域相干性、频域-3dB带宽平均频率、频域-3dB带宽平均相位、时频域低频增加面积、时频域高频衰减面积；所述时频域低频增加面积、时频域高频衰减面积通过基于广义S变换及子波谱模拟的探地雷达波吸收衰减参数计算方法获得；所述二维或三维属性体包括三瞬属性、振幅属性、纹理属性以及相干属性；

[0010] 所述岩溶隧道不良地质类型判别子模块通过建立岩溶不良地质类型判别高斯多元分类模型实现；所述岩溶不良地质类型判别高斯多元分类模型包括学习样本库、高斯多元分类学习模块、待预测数据属性特征值导入模块、不良地质类型预测模块以及结果输出与保存模块；

[0011] 所述岩溶隧道不良地质空间分布范围划分子模块通过建立探地雷达多属性聚类分割模型实现；所述探地雷达多属性聚类分割模型包括探地雷达数据二维或三维属性体导入模块、多属性主成分分析模块、模糊聚类分割模块以及结果输出与保存模块；

[0012] 一种基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统，包括以下步骤：

[0013] (1) 使用探地雷达数据采集装置在隧道掌子面采集待预测隧道段探地雷达原始数据资料，并记录各测点与测线空间坐标；

[0014] (2) 使用数据读取装置读取现场采集的探地雷达原始数据，并将其转换为本发明专家系统设置的标准格式，按隧道掌子面里程、测点与测线空间坐标保存于数据库中；

[0015] (3) 启动数据预处理子模块，按系统要求依次对探地雷达原始数据进行常规处理、弱信号提取以及补偿增益，将预处理后的数据按隧道掌子面里程、测点与测线空间坐标保存于数据库中；

[0016] (4) 启动探地雷达属性提取子模块，导入预处理后待预测的探地雷达数据；依据专家系统指示设置相关参数，系统自动计算待预测探地雷达数据的属性特征值以及二维或三维属性体；将结果按隧道掌子面里程、测点与测线空间坐标保存于数据库中；

[0017] (5) 启动岩溶隧道不良地质类型判别子模块，将所提取的待预测数据属性特征值导入岩溶不良地质类型判别高斯多元分类模型，依据专家系统指示设置相关参数，系统自动输出岩溶不良地质类型判别结果；将判别结果按隧道掌子面里程、测点与测线空间坐标保存于数据库中；

[0018] (6) 启动岩溶隧道不良地质空间分布范围划分子模块，将所提取的待预测数据的二维或三维属性体导入探地雷达多属性聚类分割模型，依据专家系统指示设置相关参数，系统自动输出岩溶隧道不良地质空间分布范围划分结果，并将划分结果按隧道掌子面里

程、测点与测线空间坐标保存于数据库中；

[0019] (7)通过人机交互界面将岩溶隧道不良地质类型判别结果以及岩溶隧道不良地质空间分布范围划分结果输出,生成最终报告。

[0020] 所述基于剪切波变换理论实现探地雷达弱信号提取的具体方法为:首先采用方向自适应扩散方法来平滑Fine尺度层中噪声对应的剪切波系数,从而辨识出有效信号系数,然后在多尺度阈值的基础上,采用方向自适应阈值的方法来压制噪声信号,最后采用jitter欠采样的剪切波变换稀疏约束方法对雷达数据重构。

[0021] 所述岩溶不良地质类型判别高斯多元分类模型具体实现过程如下:

[0022] ①从大量已开挖验证过的探地雷达实际资料中提取属性特征值,建立学习样本 $D = \{(x_i, y_j)\} (i = 1, 2, 3 \dots, n)$,其中 $x_i \in R_d, y_j \in \{1, 2, 3, \dots, C\}$,n为训练样本数,d为所提取的雷达属性特征值向量维数,C为样本所包含岩溶不良地质类别数;

[0023] ②结合地质资料及其它地质预报方法结果初步判断可能存在的不良地质类型,对于已明确不可能存在的不良地质不再作为学习和预测过程中的类别,这样可以在一定程度上提高分类精度;

[0024] ③根据高斯二元分类学习方法对样本进行学习,在学习过程中,记第j类不良地质为 $y \in \{+1\}$,其它的不良地质类别即为 $y \in \{-1\}$,通过二元分类训练算法,可得到关于第j类不良地质的分类器,并获得最优超参数;采用相同方法,依次从第1类到第C类不良地质进行训练,可得到一个最优超参数向量;

[0025] ④从待预测的雷达数据中提取属性特征值,建立待预测数据特征值向量 x_* ,通过第j类不良地质的分类器及最优超参数判断 x_* 属于第j类的概率 p_{j*} ,最后获得一个概率向量 $p_* = [p_{1*}, p_{2*}, \dots, p_{c*}]$,概率向量最大概率所对应的类别即为 x_* 对应的不良地质类别;

[0026] ⑤记录实际开挖情况,将每次实例数据属性特征值转换为新的样本保存于数据库中,不断积累,优化学习模型。

[0027] 本发明的突出优点在于:

[0028] 充分利用探地雷达数据资料中的信息,实现岩溶隧道超前地质预报探地雷达数据的智能化解译,能够帮助探地雷达使用者更好地开展岩溶隧道地质预报工作。对完善探地雷达岩溶隧道不良地质目标识别技术、减少岩溶隧道地质预报结果多解性具有重要意义。

附图说明

[0029] 图1为本发明所述的基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统整体结构示意图。

[0030] 图2为本发明所述的基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统工作流程示意图。

[0031] 图3为本发明第五组应用实例预处理后的探地雷达数据图像。

[0032] 图4为本发明第五组应用实例划分岩溶不良地质空间分布范围后的结果。

具体实施方式

[0033] 下面结合附图对本发明技术方案作进一步说明。

[0034] 如图1所示,本发明所述的基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统,包括

探地雷达数据采集装置、探地雷达数据读取装置以及岩溶隧道不良地质预报专家系统主模块,其特征在于,具体结构和连接关系为:岩溶隧道不良地质预报专家系统主模块包括探地雷达数据预处理子模块、探地雷达数据属性提取子模块、岩溶隧道不良地质类型判别子模块、岩溶隧道不良地质空间分布范围划分子模块;专家系统通过人机交互界面控制并实现各子模块各自数据的输入与输出以及各子模块之间的数据交换;

[0035] 所述探地雷达数据采集装置包括探地雷达主机、发射与接收天线以及测点与测线空间坐标确定与记录系统;所述探地雷达主机分别连接并控制发射与接收天线、测点与测线空间坐标确定与记录系统;所述测点与测线空间坐标确定与记录系统用于确定与记录每个探地雷达数据采集点的具体位置;

[0036] 所述探地雷达数据读取装置包括数据传输设备、不同型号的探地雷达数据读取器以及数据转换器;所述数据传输设备通过连接不同型号的探地雷达主机实现原始数据导入,所述不同型号的探地雷达数据读取器以及数据转换器用于读取原始数据并将其转换为本发明专家系统设置的标准格式;

[0037] 所述探地雷达数据预处理子模块包括常规处理、弱信号提取以及补偿增益;所述常规处理即数据编辑、解振荡、滤波与校准;所述弱信号提取基于剪切波变换理论实现探地雷达弱信号提取;所述补偿增益采用球面指数补偿增益方法;

[0038] 所述基于剪切波变换理论实现探地雷达弱信号提取的具体方法为:首先采用方向自适应扩散方法来平滑Fine尺度层中噪声对应的剪切波系数,从而辨识出有效信号系数,然后在多尺度阈值的基础上,采用方向自适应阈值的方法来压制噪声信号,最后采用jitter欠采样的剪切波变换稀疏约束方法对雷达数据重构。

[0039] 所述探地雷达数据属性提取子模块包括探地雷达数据的属性特征值计算以及二维或三维属性体计算;所述探地雷达数据的属性特征值包括时域均方根振幅、时域相干性、频域-3dB带宽平均频率、频域-3dB带宽平均相位、时频域低频增加面积、时频域高频衰减面积;所述时频域低频增加面积、时频域高频衰减面积通过基于广义S变换及子波谱模拟的探地雷达波吸收衰减参数计算方法获得;所述二维或三维属性体包括三瞬属性、振幅属性、纹理属性以及相干属性;

[0040] 所述基于广义S变换及子波谱模拟的探地雷达波吸收衰减参数计算方法实现过程为:

[0041] ①对待预测探地雷达反射波进行广义S变换处理,得到高分辨率的二维时频分布;

[0042] ②对选定时刻的振幅谱曲线进行子波振幅谱模拟,子波振幅谱模拟的数学表达式为

$$[0043] \quad |W(f)| = |f|^k \exp\left(\sum_{n=0}^N a_n f^n\right)$$

[0044] 其中,f为频率, a_n 为关于f的多项式,k、n为常数,一般情况下, $0 \leq k \leq 10, 4 \leq n \leq 7$;

[0045] ③待预测区域后一个时刻子波振幅谱减去前一个时刻子波振幅谱除以时间差,求取待分析区域单位时间时频域低频增加面积、时频域高频衰减面积;

[0046] 所述子波振幅谱模拟采用自动寻优算法进行拟合,如果整段曲线拟合效果不好时,可进行分段拟合;模拟子波能很好地逼近实际振幅谱,能有效解决激发子波和地层背景

值等影响因素难以直接求取的问题；

[0047] 所述岩溶隧道不良地质类型判别子模块通过建立岩溶不良地质类型判别高斯多元分类模型实现；所述岩溶不良地质类型判别高斯多元分类模型包括学习样本库、高斯多元分类学习模块、待预测数据属性特征值导入模块、不良地质类型预测模块以及结果输出与保存模块；

[0048] 所述岩溶不良地质类型判别高斯多元分类模型具体的实现方法为将高斯二元分类预测模型推广至多元分类，这种方法的主要思想是将多元分类问题分解成若干个二元分类问题，分别对多种不良地质类型进行“是与非”的判别。具体的实现过程如下：

[0049] ①从大量已开挖验证过的探地雷达实际资料中提取属性特征值，建立学习样本 $D = \{(x_i, y_j)\} (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ ，其中 $x_i \in R_d, y_j \in \{1, 2, 3, \dots, C\}$ ， n 为训练样本数， d 为所提取的雷达属性特征值向量维数， C 为样本所包含岩溶不良地质类别数；

[0050] ②结合地质资料及其它地质预报方法结果初步判断可能存在的不良地质类型，对于已明确不可能存在的不良地质不再作为学习和预测过程中的类别，这样可以在一定程度上提高分类精度；

[0051] ③根据高斯二元分类学习方法对样本进行学习，在学习过程中，记第 j 类不良地质为 $y \in \{+1\}$ ，其它的不良地质类别即为 $y \in \{-1\}$ ，通过二元分类训练算法，可得到关于第 j 类不良地质的分类器，并获得最优超参数；采用相同方法，依次从第1类到第 C 类不良地质进行训练，可得到一个最优超参数向量；

[0052] ④从待预测的雷达数据中提取属性特征值，建立待预测数据特征值向量 x_* ，通过第 j 类不良地质的分类器及最优超参数判断 x_* 属于第 j 类的概率 p_{j*} ，最后获得一个概率向量 $p_* = [p_{1*}, p_{2*}, \dots, p_{c*}]$ ，概率向量最大概率所对应的类别即为 x_* 对应的不良地质类别；

[0053] ⑤记录实际开挖情况，将每次实例数据属性特征值转换为新的样本保存于数据库中，不断积累，优化学习模型；

[0054] 所述岩溶隧道不良地质空间分布范围划分子模块通过建立探地雷达多属性聚类分割模型实现；所述探地雷达多属性聚类分割模型包括探地雷达数据二维或三维属性体导入模块、多属性主成分分析模块、模糊聚类分割模块以及结果输出与保存模块；

[0055] 所述探地雷达二维或三维属性体包括三瞬属性、振幅属性、纹理属性以及相干属性；

[0056] 所述多属性主成分分析主要目的为对多种属性进行降维处理以提高系统运行效率；

[0057] 所述多属性融合分割采用K-means模糊聚类分割方法；

[0058] 所述岩溶隧道不良地质预报专家系统各模块所涉及的数据通过数据库管理系统进行管理；所述数据库管理系统包括数据库本身以及数据库管理两部分；所述数据库本身用于储存系统运行所需的各类数据资料以及系统运行最终结果，包括探地雷达原始数据资料、预处理后的探地雷达数据资料、探地雷达图像数据属性特征值资料、岩溶隧道不良地质类型判别结果以及空间分布范围划分结果；所述数据库管理部分的功能具包括对数据库中的资料进行检索、调取、插入以及修改；

[0059] 所述岩溶隧道不良地质预报专家系统主模块人机交互界面选用Visual C++6.0设计；所述数据库管理系统采用数据库工具Access设计；所述各子模块具体功能在MATLAB环

境中实现；本系统采用Visual C++6.0与MATLAB引擎互连实现对MATLAB函数调用，采用ADO技术实现Visual C++6.0对Access数据库访问；

[0060] 如图2所示，本发明提供一种基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统的实现方法：

[0061] (1) 使用探地雷达数据采集装置在隧道掌子面采集待预测隧道段探地雷达原始数据资料，并记录各测点与测线空间坐标；

[0062] (2) 使用数据读取装置读取现场采集的探地雷达原始数据，并将其转换为本发明专家系统设置的标准格式，按隧道掌子面里程、测点与测线空间坐标保存于数据库中；

[0063] (3) 启动数据预处理子模块，按系统要求依次对探地雷达原始数据进行常规处理、弱信号提取以及补偿增益，将预处理后的数据按隧道掌子面里程、测点与测线空间坐标保存于数据库中；

[0064] (4) 启动探地雷达属性提取子模块，导入预处理后待预测的探地雷达数据；依据专家系统指示设置相关参数，系统自动计算待预测探地雷达数据的属性特征值以及二维或三维属性体；将结果按隧道掌子面里程、测点与测线空间坐标保存于数据库中；

[0065] (5) 启动岩溶隧道不良地质类型判别子模块，将所提取的待预测数据属性特征值导入岩溶不良地质类型判别高斯多元分类模型，依据专家系统指示设置相关参数，系统自动输出岩溶不良地质类型判别结果；将判别结果按隧道掌子面里程、测点与测线空间坐标保存于数据库中；

[0066] (6) 启动岩溶隧道不良地质空间分布范围划分子模块，将所提取的待预测数据的二维或三维属性体导入探地雷达多属性聚类分割模型，依据专家系统指示设置相关参数，系统自动输出岩溶隧道不良地质空间分布范围划分结果，并将划分结果按隧道掌子面里程、测点与测线空间坐标保存于数据库中；

[0067] (7) 通过人机交互界面将岩溶隧道不良地质类型判别结果以及岩溶隧道不良地质空间分布范围划分结果输出，生成最终报告。

[0068] 应用实施例

[0069] 运用所述基于探地雷达的岩溶隧道不良地质预报专家系统，对广西岩溶区的布亮隧道、三叉岭隧道、下刁隧道和甘村隧道4座高速公路隧道的5处掌子面进行预报，结果表明本发明的预报结果可信，具有很好的实用价值。

[0070] 根据宏观地质预报结果，5组应用实例的掌子面前方可能存在的岩溶不良地质类型分别为：无充填型溶洞、干燥松散粘土夹碎石充填溶洞、充软塑状粘土溶洞、无水破碎带以及富水破碎带。为便于表述，对可能存在的岩溶不良地质类型依次编号为：I、II、III、IV、V。

[0071] 按本发明使用步骤操作，5组应用实例的岩溶不良地质类型预测结果如下：

[0072] 第1组应用实例隧道名称为布亮隧道，采集探地雷达数据的掌子面里程为ZK88+685，五个预测样本的预测概率向量最大概率值分别为0.93、0.92、0.78、0.66、0.85，最大概率值所对应的不良地质类型：I无充填型溶洞，即为预测结果。现场实际开挖情况为无充填型溶洞，开挖结果与预测结果吻合。

[0073] 第2组应用实例隧道名称为三叉岭隧道，采集探地雷达数据的掌子面里程为K1+370，五个预测样本的预测概率向量最大概率值分别为0.91、0.82、0.90、0.80、0.82，最大概

率值所对应的不良地质类型：V 富水破碎带，即为预测结果。现场实际开挖情况为富水破碎带，开挖结果与预测结果吻合。

[0074] 第3组应用实例隧道名称为下刁隧道，采集探地雷达数据的掌子面里程为K74+550，五个预测样本的预测概率向量最大概率值分别为0.86、0.75、0.62、0.82、0.72，最大概率值所对应的不良地质类型：III 充软塑状粘土溶洞，即为预测结果。现场实际开挖情况为充软塑状粘土溶洞，开挖结果与预测结果吻合。

[0075] 第4组应用实例隧道名称为甘村隧道，采集探地雷达数据的掌子面里程为K269+900，五个预测样本的预测概率向量最大概率值分别为0.65、0.78、0.82、0.77、0.71，最大概率值所对应的不良地质类型：II 干燥松散粘土夹碎石充填溶洞，即为预测结果。现场实际开挖情况为干燥松散粘土夹碎石充填溶洞，开挖结果与预测结果吻合。

[0076] 第5组应用实例隧道名称为布亮隧道，采集探地雷达数据的掌子面里程为ZK88+545，五个预测样本的预测概率向量最大概率值分别为0.52、0.77、0.61、0.82、0.57，最大概率值所对应的不良地质类型：IV 无水破碎带，即为预测结果。现场实际开挖情况为无水破碎带，开挖结果与预测结果吻合。

[0077] 按本发明使用步骤操作，第5组应用实例的岩溶不良地质空间分布范围划分结果如下：

[0078] 图3为第5组应用实例预处理后的探地雷达数据图像，图4为第5组应用实例采用本发明划分岩溶不良地质空间分布范围后的结果，图中虚线范围即为无水破碎带区域。现场实际开挖情况显示实际无水破碎带区域与本发明预测结果基本吻合。

[0079] 表1

[0080]

实例编号	隧道名称及掌子面里程	预测样本序号	预测概率					综合预测结果	实际开挖情况
			I	II	III	IV	V		
1	布亮隧道 ZK88+685	1	0.93	0.01	0.03	0.01	0.01	I	无充填型溶洞
		2	0.92	0.01	0.04	0.02	0.02	I	
		3	0.78	0.00	0.02	0.28	0.01	I	
		4	0.66	0.01	0.02	0.30	0.01	I	
		5	0.85	0.01	0.01	0.18	0.02	I	
2	三义岭隧道 K1+370	6	0.00	0.01	0.04	0.02	0.91	V	富水破碎带
		7	0.00	0.01	0.14	0.03	0.82	V	
		8	0.00	0.00	0.07	0.02	0.90	V	
		9	0.00	0.01	0.17	0.03	0.80	V	
		10	0.01	0.02	0.22	0.01	0.82	V	
3	下刁隧道 K74+550	11	0.01	0.07	0.86	0.04	0.02	III	充软塑状粘土 溶洞
		12	0.00	0.23	0.75	0.01	0.01	III	
		13	0.01	0.34	0.62	0.02	0.01	III	
		14	0.00	0.14	0.82	0.01	0.03	III	
		15	0.02	0.05	0.72	0.20	0.09	III	
4	甘村隧道 K269+900	16	0.00	0.65	0.05	0.19	0.11	II	干燥松散粘土 夹碎石充填 溶洞
		17	0.02	0.78	0.01	0.01	0.20	II	
		18	0.03	0.82	0.03	0.12	0.00	II	
		19	0.00	0.77	0.02	0.15	0.05	II	
		20	0.01	0.71	0.05	0.25	0.01	II	
5	布亮隧道 ZK88+545	21	0.10	0.25	0.12	0.52	0.01	IV	无水破碎带
		22	0.00	0.23	0.00	0.77	0.00	IV	
		23	0.00	0.38	0.00	0.61	0.00	IV	
		24	0.01	0.28	0.00	0.82	0.00	IV	
		25	0.02	0.41	0.01	0.57	0.01	IV	

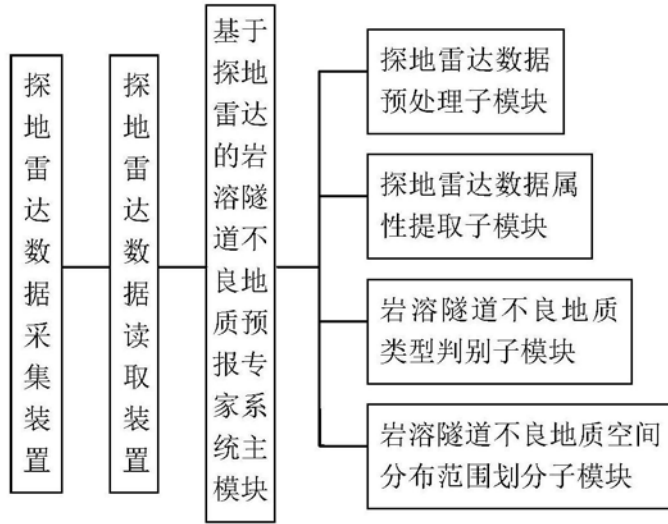


图1

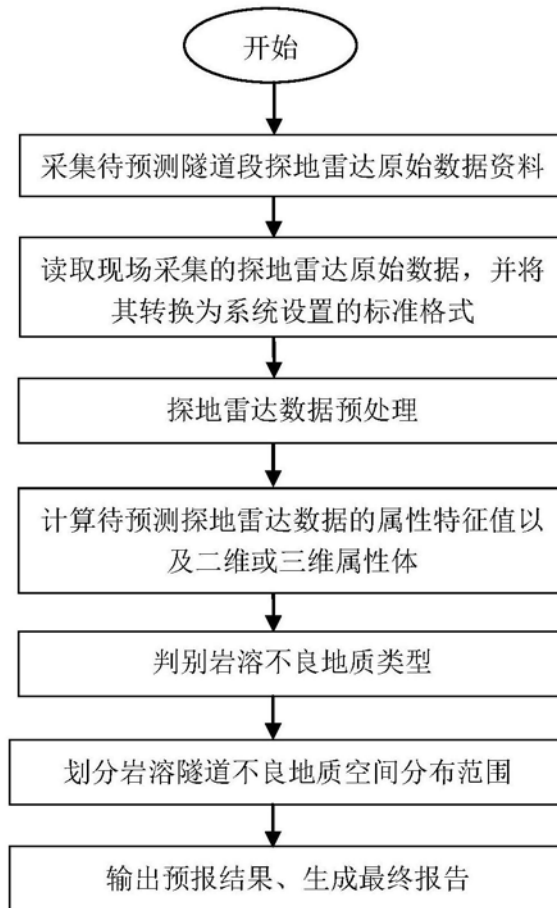


图2

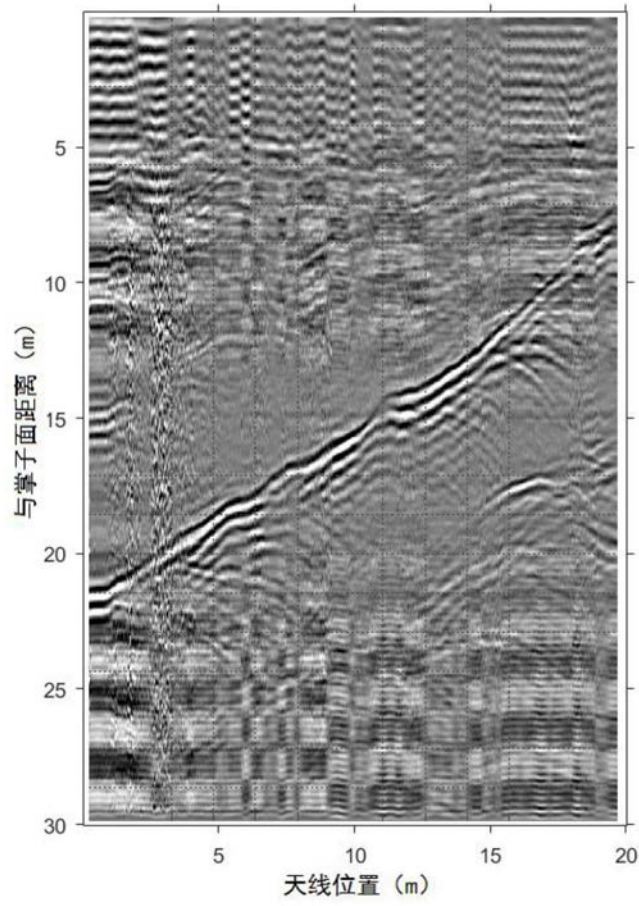


图3

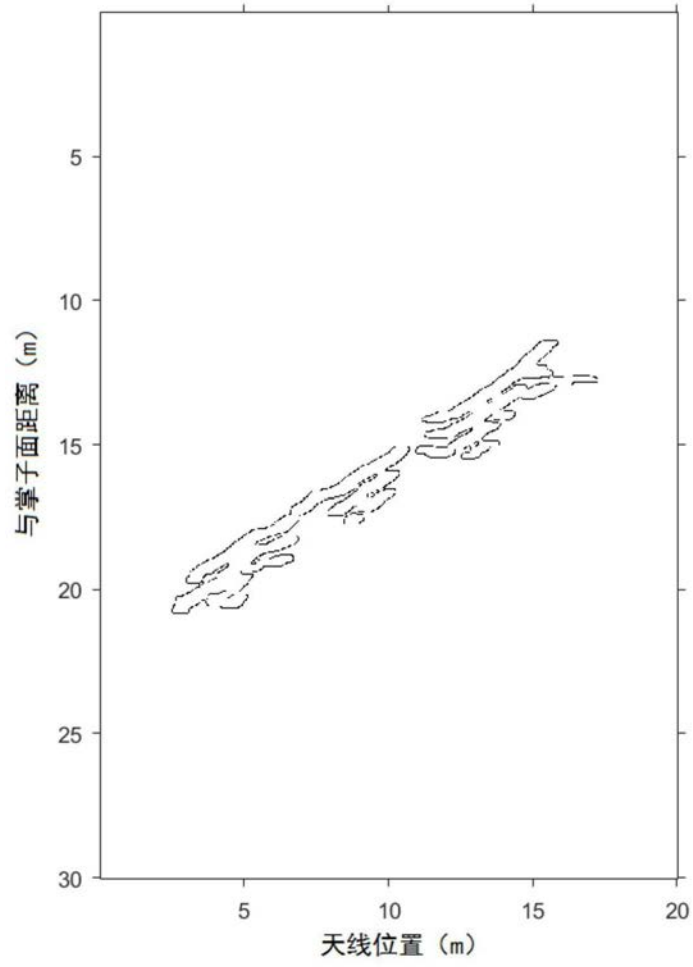


图4