

高密度电法在富水隧道勘探中的应用

向江, 张成良

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 以云南上鹤(上关—鹤庆)高速公路军马场隧道富水段为例, 介绍了高密度电法在富水隧道勘探中的应用, 根据探测数据采用 Surfer 软件制作视电阻率等值线图, 在等值线图上根据视电阻率的变化特征结合已有地质资料对该隧道富水段作出地质解释, 为隧道安全施工提供参考。

关键词: 隧道; 富水围岩; 高密度电法

中图分类号: U456

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)04-0189-04

山区的自然环境和地质环境较为复杂, 在山区修建隧道经常会通过富水地区。地下水不仅会溶解、冲蚀、软化隧道围岩, 降低围岩强度, 还会给施工带来巨大难度和安全隐患。提前获取隧道水文地质情况, 通过对每段地质情况的分析提前做好预防措施, 可降低隧道施工危险。高密度电法是探测地下水的一种重要地球物理方法, 它将传统的电剖面法和电测深法相结合, 具有测点密度高、采集的信息量大和对探测的目标不造成影响等优点, 能有效探测地下水情况, 对工程建设具有重大参考价值。

1 高密度电法的工作原理

高密度电阻率法是一种阵列勘探方法, 也称为自动电阻率系统, 是直流电法的发展, 其功能相当于四极测深与电剖面法的结合。通过电极向地下供电形成人工电场, 其电场分布与地下岩土介质的电阻率 ρ 的分布密切相关, 通过对地表不同部位人工电场的测量, 了解地下介质视电阻率 ρ_s 的分布, 根据岩土 ρ_s 的分布推断、解释地下地质结构。该方法对围岩的含水情况特别敏感, 围岩破碎含水, 其视电阻率明显降低, 完整、坚硬岩石的视电阻率明显高于断层带或破碎带和富水带围岩的视电阻率。该方法的原理清晰, 图像直观, 是一种分辨率较高的探测方法。近年来随着计算机数据采集技术的改进, 其勘探效率大大提高, 剖面的覆盖面积和探测深度增大, 在强干扰的环境下也能取得可靠数据, 大大提高了信噪比, 可准确探测地质体。该方法在工程水文地质勘探和矿产、水利资源勘查中有着广泛而成功的应用。高密度电法的工作系统见图 1。

高密度电法是许多普通电法排列、测点的集合, 是将许多电极(60个以上)按一定极距(1~10m)

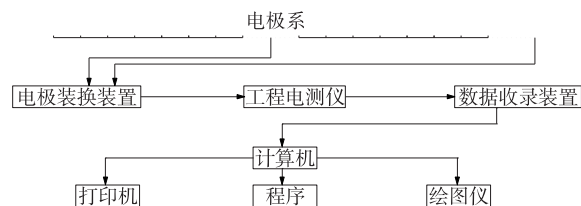


图1 高密度电法工作原理示意图

排列, 通过电缆、转换开关与测量仪器相连。测量时, 测量仪器通过指令控制转换开关以一定的排列顺序将电极转换成供电电极或测量电极。

岩体完整时, 视电阻率灰阶图像呈层状分布, 透过表层(水)后其视电阻率沿垂直方向呈升高趋势, 并且在冲积层(或覆盖层)和基岩的分界面有明显的视电阻率差异; 当岩体中存在断层、破碎带等渗水通道时, 图像中层状特征遭到破坏, 出现条带状或椭圆形低阻色块, 使某些层位被错开、拉伸发生畸变。

2 工程概况

云南上鹤(上关—鹤庆)高速公路军马场隧道位于川滇南北向构造带西南端、南岭纬向构造带西段、青藏歹字形构造体系的复合部位。根据相关地质资料, 隧道附近无区域性大断裂通过, 受内外地质作用影响, 隧址区节理裂隙发育。

根据钻探和地质资料, 该区地层自上而下为: 1) 第四系坡残积层。含碎石粉质黏土, 灰褐色, 硬塑状, 碎石成分为全~强风化玄武岩。承载力基本容许值为 250 kPa, 摩阻力标准值为 70 kPa。2) 二叠系玄武岩上段。分为 2 层。第一层, 灰褐色, 强风化, 斑状结构, 杏仁构造, 裂隙发育, 呈碎石状、碎块状, 存在差异风化, 局部呈中风化大块状。承载力基本容许值为 500 kPa, 摩阻力标准值为 140 kPa。第

二层,灰褐色,致密状,中风化,岩体较完整。承载力基本容许值为 1 500 kPa。

该区内构造如下:岩体受力断裂后两侧岩块没有显著位移而形成的小型断裂构造是隧址内的主要构造形式,按其成因可分为原生裂隙、构造裂隙、风化裂隙等。根据地质调查,玄武岩中发育三组裂隙,产状分别为 $65^{\circ}/70^{\circ}$ 、 $335^{\circ}/50^{\circ}$ 、 $190^{\circ}/45^{\circ}$ 。一般裂隙面平直、光滑,发育密集,部分弯曲,属张性节理,分布具有一定规律,其形成与区域构造相关。因风化作用沿原有构造裂隙、卸荷裂隙、成岩裂隙等控水结构面进行和扩展而形成风化裂隙,岩体破碎。

根据隧道区地下水的赋存、埋藏条件及水动力特征,地下水可分为第四系孔隙潜水和基岩裂隙水两大类。1) 第四系孔隙潜水。主要赋存于第四系土层中,分布在隧道区表层中。隧道区地下水位埋深浅,西侧和中部松散物质多由黏土和种植土组成,接受大气降水及地表水补给,潜水的埋深、径流条件较浅。2) 基岩裂隙水。基岩裂隙水又分为风化裂隙水和构造裂隙水。风化裂隙水一般分布于基岩表部的节理、裂隙中,含水层厚度较小,水位变化大,多为潜水,局部具承压性。基岩裂隙水常呈下降泉出露,水量不大。构造裂隙水赋存于断裂构造裂隙中,由于和地表相通,地表水易顺断裂构造下渗,形成导水作用。

3 高密度电法探测成果及解释

3.1 探测方案

电法数据采集使用 WGMD-4 高密度电阻率测量系统,点距 5 m,电极 60~120 个,排列长度最长 300~600 m,勘探深度可达 150 m。主要探测区域为军马场隧道出口 K4+850—250 段,其中在开挖隧道左幅 ZK4+690 位置时掌子面出现大股状涌水,并持续 1 个星期之久,掌子面掘进困难。根据现场地形地貌条件和探测目的,沿隧道出口向进口方向的左幅中心线、右幅中心线及左右幅连接之间的中线位置布置 3 条测线(Z1~Z3),垂直隧道轴线方向布置 4 条测线(H1~H4),基本上垂直于隧道,沿沟的延伸方向布置,尽可能消除地形、地物对测线的影响(见图 2)。根据平面图坐标,在现场测量放样,测设各测线起点、终点及各桩号现场位置。在探测过程中利用 GPS 和皮尺根据控制桩量测测点位置进行探测。

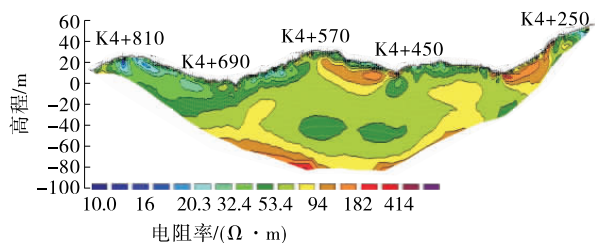


图 2 高密度电法测线布设

数据处理:将探测结果通过传输软件传输到电脑中,进行坏点删除、地形校正、格式转换、数据反演后,将数据导入 Surfer 软件,制作视电阻率等值线图。在等值线图上根据视电阻率的变化特征,结合已有地质资料进行地质解释,并绘制物探成果解图。

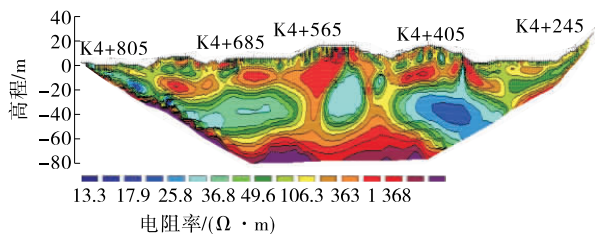
3.2 探测结果与分析

对探测数据进行计算、反演和成图,得到该隧道各测线高密度电法视电阻率断面图(见 3~9)。



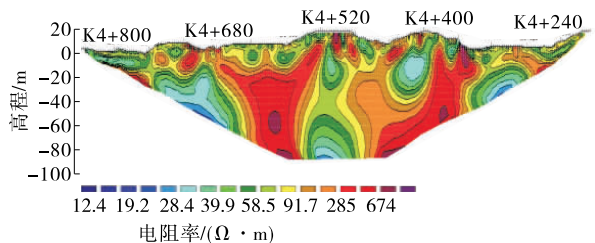
水平显示比例为 5.39 点/单位电极距;单位电极距=2.5 m;垂向放大倍数为 0.65;首电极位于 0.0 m,末电极位于 595.0 m。

图 3 Z1 测线右幅中心线 K4+850—250 探测结果剖面图



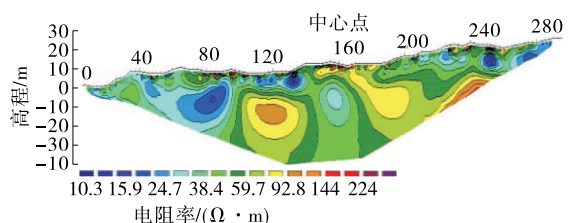
水平显示比例为 5.40 点/单位电极距;单位电极距=2.5 m;垂向放大倍数为 0.75;首电极位于 0.0 m,末电极位于 595.0 m。

图 4 Z2 测线左、右幅之间中心线 K4+845—245 探测结果剖面图



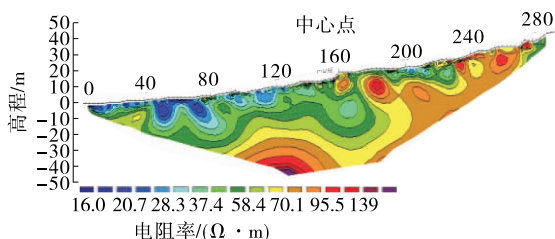
水平显示比例为 5.40 点/单位电极距;单位电极距=2.5 m;垂向放大倍数为 0.68;首电极位于 0.0 m,末电极位于 595.0 m。

图 5 Z3 测线左幅中心线 K4+840—240 探测结果剖面图



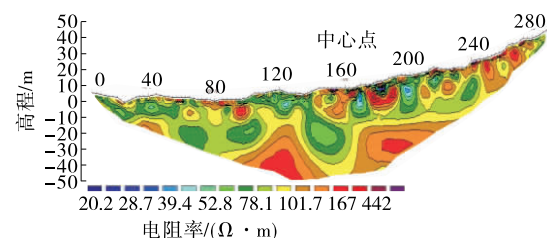
水平显示比例为10.88点/单位电极距;单位电极距=2.5 m;垂向放大倍数为0.66;首电极位于0.0 m,末电极位于295.0 m。

图6 H1测线 K4+375 沟探测结果剖面图



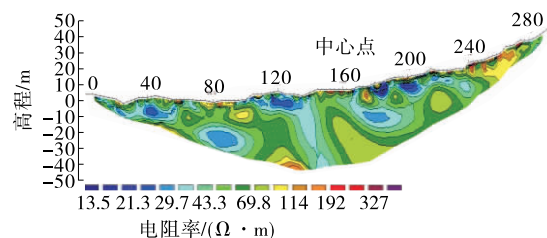
水平显示比例为10.80点/单位电极距;单位电极距=2.5 m;垂向放大倍数为0.58;首电极位于0.0 m,末电极位于295.0 m。

图7 H2测线 K4+480 沟探测结果剖面图



水平显示比例为10.80点/单位电极距;单位电极距=2.5 m;垂向放大倍数为0.58;首电极位于0.0 m,末电极位于295.0 m。

图8 H3测线 K4+600 断面探测结果剖面图



水平显示比例为10.80点/单位电极距;单位电极距=2.5 m;垂向放大倍数为0.66;首电极位于0.0 m,末电极位于295.0 m。

图9 H4测线 K4+670 沟探测结果剖面图

3.2.1 Z1 测线探测结果分析

Z1 测线为隧道右幅中心线 K4+850—250 段探测线。由图 3 可知:K4+820—630 段地表以下埋深 10~30 m 处为低阻异常区,低阻异常,呈串珠状分布,视电阻率值一般为 20~60 $\Omega \cdot \text{m}$,推测该部位为岩体富水区;K4+610—470 段地表以下埋深 50~80 m 处为低阻异常区,阻值低,多呈团块状的低阻异常状,视电阻率值一般为 40~80 $\Omega \cdot \text{m}$,推

测该部位为赋水区;K4+500—370 段地表以下埋深 5~30 m 处为低阻异常区,阻值低,多呈团块状的低阻异常状,视电阻率值一般为 30~70 $\Omega \cdot \text{m}$,推测该部位为赋水区;K4+380—360 段地表以下埋深 30~60 m 处为低阻异常区,阻值低,呈串珠状、团块状的低阻异常状,视电阻率值一般为 30~80 $\Omega \cdot \text{m}$,推测该部位为赋水区~富水区。根据地表调查结果,结合探测结果,推测赋水区较为丰富的地段均在沟谷以下,即 K4+670、K4+480 和 K4+375 对应的沟谷位置。

3.2.2 Z2 测线探测结果分析

Z2 测线为隧道左、右幅之间的中线位置 K4+845—245 段探测线。由图 4 可知:K4+780—605 段地表以下埋深 35~60 m 处为低阻异常区,低阻异常,呈细带状或串珠状分布,视电阻率值一般为 30~80 $\Omega \cdot \text{m}$,推测该部位为富水区;K4+565—495 段地表以下埋深 35~67 m 处为低阻异常区,阻值低,多呈团块状的低阻异常状,视电阻率值一般为 30~70 $\Omega \cdot \text{m}$,推测该部位为赋水区;K4+480—350 段地表以下埋深 30~80 m 处为低阻异常区,阻值低,多呈团块状的低阻异常状,视电阻率值一般为 20~50 $\Omega \cdot \text{m}$,推测该部位为赋水区;根据地表调查结果,结合探测结果,推测赋水区较为丰富的地段均在沟谷以下,即 K4+670、K4+480 和 K4+375 对应的沟谷位置。

3.2.3 Z3 测线探测结果分析

Z3 测线为隧道左幅中心线 K4+840—240 段探测线。由图 5 可知:K4+760—670 段地表以下埋深 25~65 m 处为低阻异常区,低阻异常,呈细带状或串珠状分布,视电阻率值一般为 20~70 $\Omega \cdot \text{m}$,推测该部位为富水区;K4+580—520 段地表以下埋深 20~100 m 处为低阻异常区,低阻异常,呈细带状或串珠状分布,视电阻率值一般为 30~70 $\Omega \cdot \text{m}$,推测该部位为赋水区;K4+490—430 段地表以下埋深 20~50 m 处为低阻异常区,阻值低,多呈团块状的低阻异常状,视电阻率值一般为 30~80 $\Omega \cdot \text{m}$,推测该部位为赋水区;K4+380—320 段地表以下埋深 20~55 m 处为低阻异常区,阻值低,多呈团块状的低阻异常状,视电阻率值一般为 20~60 $\Omega \cdot \text{m}$,推测该部位为赋水区;根据地表调查结果,结合探测结果,推测赋水区较为丰富的地段均在沟谷以下,即 K4+670、K4+480 和 K4+375 对应的沟谷位置。

3.2.4 H1 测线探测结果分析

H1 测线为隧道沿 K4+375 沟垂直隧道轴线布置的探测线。由图 6 可知:水平距离 40~100 m 段地表以下埋深 5~40 m 处为低阻异常区,阻值低,多呈串珠状或团块状分布,视电阻率值一般为 15~50 $\Omega \cdot m$,推测该部位为富水区;水平距离 110~130 m 段地表以下埋深 5~20 m 处为低阻异常区,低阻异常,呈细带状或串珠状分布,视电阻率值一般为 15~60 $\Omega \cdot m$,推测该部位为富水区;水平距离 150~170 m 段地表以下埋深 15~40 m 处为低阻异常区,阻值低,多呈团块状的低阻异常状,视电阻率值一般为 20~55 $\Omega \cdot m$,推测该部位为赋水区;水平距离 210~280 m 段地表以下埋深 5~20 m 处为低阻异常区,低阻异常,呈细带状或串珠状分布,视电阻率值一般为 15~60 $\Omega \cdot m$,推测该部位为富水区;根据地表调查结果,结合探测结果,推测赋水区从高处向低处汇集,水平距离 0~150 m 段富水较多,隧道所穿越的位置在水平距离 120~160 m 段的正下方。

3.2.5 H2 测线探测结果分析

H2 测线为隧道沿 K4+480 沟垂直隧道轴线布置的探测线。由图 7 可知:水平距离 0~170 m 段地表以下埋深 5~30 m 处为低阻异常区,低阻异常,呈细带状或串珠状分布,视电阻率值一般为 20~60 $\Omega \cdot m$,推测该部位为赋水区;根据地表调查结果,结合探测结果,推测赋水区从高处向低处汇集,水平距离 0~170 m 段富水较多,隧道所穿越的位置在水平距离 120~160 m 段的正下方。

3.2.6 H3 测线探测结果分析

H3 测线为隧道沿 K4+600 断面垂直隧道轴线布置的探测线,该测线布设标高远大于沟谷,在该位置隧道埋深大。由图 8 可知:在探测范围内未发现明显赋水情况,仅发现表层存在孔隙水;根据地表调查结果,结合探测结果,推测赋水区主要集中在沟谷范围内。

3.2.7 H4 测线探测结果分析

H4 测线为隧道沿 K4+670 沟垂直隧道轴线布置的探测线。由图 9 可知:水平距离 0~70 m 段地表以下埋深 5~25 m 处为低阻异常区,低阻异常,呈细带状或串珠状分布,视电阻率值一般为 15~50 $\Omega \cdot m$,推测该部位为富水区;水平距离 70~110 m 段地表以下埋深 20~50 m 处为低阻异常区,阻值低,多呈团块状的低阻异常状,视电阻率值一般为

20~50 $\Omega \cdot m$,推测该部位为赋水区;水平距离 100~160 m 段地表以下埋深 5~60 m 处为低阻异常区,低阻异常,呈细带状或串珠状分布,视电阻率值一般为 20~55 $\Omega \cdot m$,推测该部位为富水区;水平距离 160~240 m 段地表以下埋深 5~40 m 处为低阻异常区,低阻异常,呈细带状或串珠状分布,视电阻率值一般为 15~55 $\Omega \cdot m$,推测该部位为赋水区;根据地表调查结果,结合探测结果,推测赋水区从高处向低处汇集,水平距离 0~240 m 段富水较多,隧道所穿越的位置在水平距离 120~160 m 段的正下方。

3.2.8 探测结果评价

高密度电法探测结果与后期隧道施工所遇到的水文地质情况大致吻合,隧道左幅涌水量总体大于右幅涌水量且左幅涌水量起伏较大。如左幅 K4+760—680 段涌水量突增,拱顶呈大股状渗水,而 K4+640—600 段无涌水,拱顶较为干燥。说明高密度电法用于隧道富水段探测可行、有效。

4 结语

该文通过高密度电法在军马场隧道富水段的探测应用实例,对高密度电法在隧道富水段勘探中的可行性、有效性进行分析。高密度电法能对地层进行连续性勘探,对隧道水文地质条件的预测能取得较好效果。在后期隧道施工中,针对高密度电法不同探测结果采用不同的施工方法,从而保证隧道的顺利贯通。

参考文献:

- [1] 杨天春,许德根,张启,等.高密度电法在隐伏溶洞勘探中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(2).
- [2] 余灿鑫.高密度电法在炸山嘴隧道勘探中的应用[J].国防交通工程与技术,2016(5).
- [3] 朱保健,郭灿灿.高密度电法勘探在铁路路基地质勘察前期中的应用[A].2016 年全国工程勘察学术大会论文集(上册)[C].2016.
- [4] 陈康,李世峰,张政杰,等.高密度电法勘探数据三维处理技术及城市勘察中的应用[J].工程地质学报,2015,23(1).
- [5] 谢芳.高密度电法勘探工作的几个关键要素[J].中外企业家,2015(9).
- [6] JTG C20—2011,公路工程地质勘察规范[S].
- [7] 宋劲.煤矿冲刷带探测中的高密度电法勘探方法[J].河

(下转第 208 页)

机可非常清晰地拍摄设施表面,可进一步提高无人机对天气和场地影响的抗干扰能力。

正因为无人机具有上述其他设备无可比拟的优势,其在高速公路巡航、异常事件监测等方面也得到了广泛应用。

2 智能无人机检测系统介绍

2.1 总体概述

高速公路养护设施安全隐患智能检测系统的总体结构见图1。该系统主要由数据采集和数据分析两大模块组成,其中数据采集模块由高清图像拍摄平台、数据无线传输平台和数据存储3个子模块组成,数据分析模块由智能检测标记、危险设备智能预警和人工二次确认3个子模块组成。

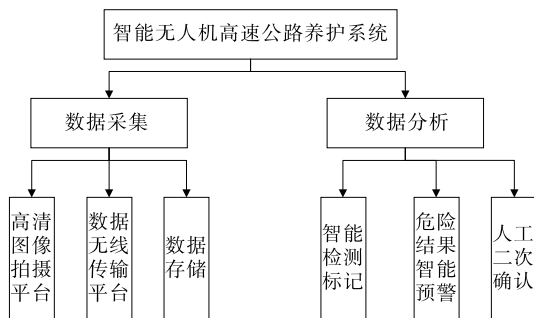


图1 智能无人机检测系统的总体结构

2.2 各模块概述

(1) 高清图像拍摄平台模块。目前利用无人机拍摄图像基本上是将摄像机安装在无人机下方,但该系统不仅要拍对无人机下方空间进行拍摄,有时还要对上方空间进行拍摄。如检测桥洞或涵洞表面裂痕时,需要将无人机飞到桥洞或涵洞下方,对其上方空间进行数据采集。因此,该模块需考虑在机身或机翼上方安装摄像机。

(2) 数据无线传输平台。利用无人机进行航拍时需将航拍的画面实时传输给操作员,方便操作员根据拍摄画面进行调整。因此,该模块主要解决如何将高清图像远距离无线传输至操作员的问题。

(3) 数据存储。主要用于存储所接收的数字图

像及安全隐患实时检测结果,实现采集数据的重复利用和安全隐患检测结果的二次确认。

(4) 智能检测标记。该模块利用计算机视觉技术、数字图像处理技术等对实时拍摄图像进行安全隐患(如裂缝、变形和砼脱落等)自动检测,并对可能存在安全隐患的地方进行标记,方便后续人工确认。

(5) 危险设备智能预警。该模块对智能检测标记模块里的检测结果进行安全级别划分,如安全、轻微隐患、一般隐患、危险隐患等,根据安全级别的严重程度从高到低进行排序,并给出显著的颜色标记信息,进行预警提示。

(6) 人工二次确认。检测结果且标记出来后,需要专业的高速公路养护人员对检测结果进行二次确认,保障检测结果的准确性。

3 结语

该文提出了一种高速公路养护设施安全隐患智能检测系统,该系统通过在现有无人机设备的基础上增加卫星处理器芯片,利用计算机视觉技术和无人机技术完成对高速公路危险路段设施的检测,实现自动化检测与预警,从而提高高速公路养护管理水平与工作效率。

参考文献:

- [1] 谭飞刚,黄玲,翟聪,等.一种用于大型交通枢纽的跨摄像行人再识别算法研究[J].铁道学报,2017(1).
- [2] 谭飞刚,刘建.一种基于计算机视觉的地铁站台异物检测算法[J].铁路计算机应用,2017(1).
- [3] 叶云.基于机器视觉的道路标线损坏智能检测设想[J].公路与汽运,2016(3).
- [4] 吴烈阳,刘明生,夏冬媛.无人机在江西高速公路监控领域的应用[J].中国交通信息化,2015(9).
- [5] 李辉.无人机航测在高速公路勘测中的应用及经济性分析[J].价值工程,2016(25).
- [6] 郑玮.简析高速公路养护巡查的重要性及注意事项[J].黑龙江交通科技,2012(1).

收稿日期:2017-05-01

(上接第192页)

南理工大学学报:自然科学版,2014,33(4).

[8] 胡晓娟.地下空间异常体高密度电阻率影像数值模拟与应用[D].福州:福州大学,2014.

[9] 严琴芳,刘嘉.隧道衬砌无损检测技术的研究与应用

[J].公路隧道,2016(1).

[10] 梁德显.高速公路隧道监控量测及无损检测技术[J].交通世界,2016(21).

收稿日期:2017-02-19