

中南大学地球科学学术文库  
中南大学地球科学与信息物理学院 组织编撰

# 基于电性参数的隧道围岩 完整性评价与分级方法

THE INTEGRITY EVALUATION AND CLASSIFICATION OF  
TUNNEL ROCKMASS BASED ON ELECTRICAL PARAMETERS

化希瑞 汤井田 周聪 著  
Hua Xirui Tang Jingtian Zhou Cong

---

有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室  
有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室

---

联合资助



中南大学出版社  
www.csupress.com.cn

·长沙·

中南大學  
地球科學  
學術文庫

丙申何繼善



# 内容简介

Introduction

该书着重阐述了基于岩体电性参数的深埋隧道围岩完整性判别方法。长、大、深埋隧道的围岩级别划分在隧道勘察设计、施工中起着至关重要的作用。由于该类隧道埋深大、洞程长、穿越地质单元复杂多样的特点，用常规物理勘探方法难以获得隧道围岩物性参数，围岩分级则主要以钻孔法为主，这种方法勘探效率低、费用大，且无法实现隧道轴向围岩质量连续评价。作者针对深埋隧道围岩分级存在的主要问题，以宜万、向莆等铁路长、大、深埋隧道为研究对象，采用理论分析、数值模拟、试验和工程验证等方法，通过在隧道地表观测高频大地电磁信号，以及通过数据处理获得隧道洞身附近岩体电阻率，建立岩体电阻率与岩体质量的相关关系，形成一套全新的用电阻率参数划分隧道围岩级别的方法和标准，实现了对深埋隧道围岩质量全面、快速、连续的评价。

书中基于岩体电性参数的深埋隧道围岩完整性评价方法已经应用于向莆、合福、杭长高速铁路，煤运通道重载铁路等长、大铁路干线深埋隧道勘察设计中，还可推广应用于高速公路、大型水电站引水隧道、矿山坑道等地下工程勘察设计领域。该方法为解决深埋隧道围岩分级这一工程难题提出了新的思路和方法。对于指导隧道开挖和支护方案设计，节省工程造价，保证施工安全等，都将具有显著的社会效益和经济效益。

## 作者简介

About the Author

**化希瑞** 男，中南大学博士。负责完成杭长、合福等铁路物探综合勘察项目 20 余项，负责和参与完成中国铁建股份有限公司科研项目 2 项，中铁第四勘察设计院集团有限公司科研课题 4 项。2013 年获得中国地球物理学会铁路分会铁路物探“青年精英奖”，2015 年获得铁四院“青年科技拔尖人才”称号，2016 年获得第十三届詹天佑青年奖。

**汤井田** 男，博士，中南大学教授，博士研究生导师。1992 年毕业于中南工业大学，获工学博士学位。1994 年晋升教授，1998 年被评为博士研究生导师，同年作为高级访问学者留学美国劳伦兹（伯克利）国家实验室；中国地球物理学会会员，美国勘探地球物理学家协会（SEG）会员。主要从事电磁场理论、应用及信号处理方面的研究，已发表学术论文 200 余篇。主持国家科技专项、国家“863”高技术研究发展计划、国家自然科学基金、湖南省自然科学基金等科研项目近 30 项。

**周聪** 男，中南大学博士，主要研究方向为电磁法理论、数据处理及解释。

# 编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

中南大学地球科学学术文库

## 主任

何继善(中国工程院院士)

## 副主任

鲁安怀(教授,国家“973”项目首席科学家,中南大学地球科学与信息物理学院院长)

戴前伟(教授,中南大学地球科学与信息物理学院党委书记)

## 委员

彭省临	戴塔根	刘石年	奚小双	彭振斌
赵崇斌	柳建新	汤井田	朱建军	刘兴权
吴湘滨	隆威	邹峥嵘	邵拥军	戴吾蛟
赖健清	朱自强	吴玺虹	张术根	刘继顺
曾永年	毛先成	张可能	谷湘平	刘亮明
周晓光	李建中	席振铎	李志伟	冯德山
杨牧	张绍和	邓敏		

# 总序

Preface

中南大学地球科学与信息物理学院具有辉煌的历史、优良的传统与鲜明的特色,在有色金属资源勘查领域享誉海内外。陈国达院士提出的地洼学说(陆内活化)成矿学理论,影响了半个多世纪的大地构造与成矿学研究及找矿勘探实践。何继善院士发明电磁法系统探测方法与装备,获得了巨大的找矿勘探效益。所倡导与实践的地质学与地球物理学、地质方法与物探技术、大比例尺找矿预测与高精度深部探测的密切结合,形成了品牌效应的“中南找矿模式”。

有色金属属于国家重要的战略资源。有色金属成矿地质作用最为复杂,找矿勘查难度最大。正是有色金属资源宝贵性、成矿特殊性与找矿挑战性,铸就了中南大学地球科学发展的辉煌历史,赋予了找矿勘查工作的鲜明特色。六十多年来,中南大学地球科学研究在地质、物探、测绘、探矿工程、地质灾害和地理信息等领域,在陆内活化成矿作用与找矿勘查、地球物理探测技术与装备制造、深部成矿过程模拟与三维预测、复杂地质工程理论与新技术以及地质灾害监测等研究方向,取得了丰硕的研究成果,做出了巨大的科技贡献,产生了广泛的社会影响。当前,中南大学地球科学研究,瞄准国际发展方向和国家重大需求,立足于我国复杂地质背景下资源勘查与环境地质的理论与方法创新研究,致力于多学科联合开展有色金属资源前沿探索与应用研究,保持与提升在中南大学“地、采、选、冶、材”特色与优势学科链中的地位和作用,已发展成为基础坚实、实力雄厚、特色鲜明、国际知名、国内一流的以有色金属资源为主,兼顾油气、岩土、地灾、环境领域的人才培养基地和科学研究中心。

中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室、有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室,联合资助出版“中南大学地球科学学术文库”,旨在集中反映中南大学地球科学

与信息物理学院近年来取得的系列研究成果。所依托的主要研究机构包括：中南大学地质调查研究院、中南大学资源勘查与环境地质研究院和中南大学长沙大地构造研究所。

本书库内容主要涵盖：继承和发展地洼学说与陆内活化成矿学理论所取得的重要研究进展，开发和应用双频激电仪、伪随机和广域电磁法系统所取得的重要研究成果，开拓和利用多元信息找矿预测与隐伏矿大比例尺定位预测所取得的重要找矿成果，探明和研发深部“第二勘查空间”成矿过程模拟与三维定量预测方法所取得的重要研究成果，预警和防治复杂地质工程与矿山地质灾害所取得的重要技术成果。本书库中提出了有色金属资源勘查理论、方法、技术和装备一体化的系统研究成果，展示了多项突破性、范例式、可推广的找矿勘查实例。本书库对于有色金属资源预测、地质矿产勘探、地质环境监测、地质灾害探查以及地质工程预防，特别对于有色金属深部资源从形成规律到分布规律理论与应用研究，具有重要的借鉴作用和参考价值。

感谢中南大学出版社为策划和出版该文库所给予的大力支持。感谢何继善先生热情指导和题词。希望广大读者对本书库专著中存在的不足和纰漏提出宝贵的意见，使“中南大学地球科学学术文库”更加完善。

是为序。



2016年10月

# 前言

Foreword

岩体完整性评价是深埋隧道勘察设计及施工领域中的关键环节,对于指导隧道开挖和支护设计,节省工程造价,保证施工安全等方面,具有显著的社会效益和经济效益。由于深埋隧道具有埋深大、洞程长、穿越地质单元复杂多样等特点,常规物理勘探方法难以获得隧道围岩物性参数,因此,在勘察设计阶段深埋隧道围岩分级主要以钻孔法为主,这种方法勘探效率低、费用大,且无法实现隧道轴向围岩质量连续评价。针对这一现状,本书以向莆、合福等铁路深埋隧道工程为研究对象,采用理论分析、数值模拟、试验和工程验证等方法,建立电性参数与岩体质量的相关关系,形成一套全新的用电性参数划分隧道围岩级别的方法,实现了对深埋隧道围岩质量全面、快速、连续的评价,为解决深埋隧道围岩分级这一工程难题提出了新的思路和方法。

本书主要的研究内容和成果概括如下:

(1)系统研究岩体电阻率与岩体完整性、岩体强度的相关关系,首次提出一种基于电性参数表征岩体完整性的量化指标——岩体完整性系数( $K_r$ ),经过实际工程验证,该参数可作为围岩完整性评价的量化指标。

(2)研究了我国中南、东南地区大地电磁场信号活动特征,统计分析了高频段(100 Hz ~ 100 kHz)电磁信号的频谱分布规律,论证了其电磁信号强度及相关性均满足深埋隧道勘察要求。

(3)统计分析不同岩性高频大地电磁视电阻率的分布特征,研究提出了相位递推电阻率的概念及计算方法,利用近地表真实电阻率数值和高频大地电磁相位信息计算的相位递推电阻率,在数值上近似等于岩体真实电阻率,解决了采集深埋隧道围岩真实电阻率的难题。

(4) 提出采用 HILBERT - HUANG 变换分析高频大地电磁资料, 提出利用能量随时间、频率的分布关系抽取原始时间序列, 提高数据精度, 在时间域中利用 EMD 分解算法的多尺度滤波特征, 可以有效地除去信号的噪声干扰, 充分保留信号的局部特征。

(5) 系统研究了复杂地形地质条件下深埋隧道的高频大地电磁法围岩分级的数据处理关键技术, 包括噪声压制、静态校正、地形校正、反演等, 改善了数据质量, 提高了解释的准确性。

(6) 提出了高频大地电磁法综合围岩分级方法以及应用条件, 编制软件实现了隧道围岩完整性自动分级。采用该方法对宜万铁路、向莆铁路等深埋隧道进行围岩分级, 分级结果与施工围岩级别符合度高, 验证了基于电性参数评价岩体完整性的优越性和准确性。

本书是作者长期从事深埋隧道检测和围岩完整性研究的结晶, 书中所引用的实例都是近年来作者科研成果的体现。本书在撰写过程中, 广泛吸取了国内外相关文献的成果, 并尽量反映了国内外在高频大地电磁数据处理、深埋隧道围岩电性参数采集方法以及完整性评价等领域的最新研究成果和进展。本书的出版得益于中南大学出版社的大力支持, 在此表示感谢! 在撰写过程中, 本书参考了大量相关领域的文献, 已列示于书后的参考文献部分, 但仍可能有遗漏。在此谨向已标注和未标注的参考文献的作者们表示诚挚的谢意!

由于作者水平有限, 书中难免有疏漏和不妥之处, 衷心希望广大读者不吝指正。

# 目录

Contents

第1章 绪论 .....	(1)
1.1 研究目的和意义 .....	(1)
1.2 隧道围岩分级国内外研究现状 .....	(2)
1.3 存在的问题及研究思路 .....	(6)
第2章 电性参数评价隧道围岩质量的有效性研究 .....	(9)
2.1 影响岩体质量的因素 .....	(9)
2.2 隧道围岩分级 .....	(12)
2.2.1 基于岩石强度的围岩分级方法 .....	(12)
2.2.2 基于岩体完整性的围岩分级方法 .....	(14)
2.2.3 组合多种因素的围岩分级方法 .....	(15)
2.3 岩石的电性特征 .....	(17)
2.3.1 岩石电阻率的主要影响因素 .....	(18)
2.3.2 完整岩体电场分析 .....	(21)
2.3.3 节理岩体电场分析 .....	(22)
2.4 岩体电性参数评价岩体完整性有效性分析 .....	(24)
2.4.1 岩体电阻率与岩体完整性相关分析 .....	(24)
2.4.2 $K_r$ 的主要参数的测试 .....	(27)
2.4.3 $K_r$ 判识岩体完整性的有效性分析 .....	(30)
2.5 岩体电阻率评价岩体强度有效性分析 .....	(36)
2.5.1 孔隙度与岩体强度相关关系 .....	(36)
2.5.2 孔隙度与电阻率相关关系 .....	(39)
2.6 本章小结 .....	(42)
第3章 深埋隧道围岩电阻率参数采集方法研究 .....	(43)
3.1 复杂地形条件下隧道围岩电阻率采集方法的选择 .....	(43)
3.2 高频大地电磁法勘探 .....	(45)

3.2.1	高频大地电磁场信号特征 .....	(45)
3.2.2	高频大地电磁法视电阻率特征 .....	(52)
3.2.3	HMT 视电阻率与岩层真电阻率的关系 .....	(55)
3.3	辅助电性资料校正视电阻率 .....	(57)
3.3.1	阻抗相位与视电阻率的关系 .....	(58)
3.3.2	由阻抗相位计算视电阻率的递推公式 .....	(58)
3.3.3	相位递推电阻率与地层真电阻率关系 .....	(59)
3.4	HMT 数据分辨率研究 .....	(61)
3.4.1	横向(水平)分辨率 .....	(61)
3.4.2	纵向(垂向)分辨率 .....	(63)
3.4.3	提高 HMT 数据纵向分辨率 .....	(63)
3.5	本章小结 .....	(71)
<b>第 4 章</b>	<b>高频大地电磁法数据处理研究 .....</b>	<b>(72)</b>
4.1	Hilbert - Huang 变换与噪声压制 .....	(72)
4.1.1	HMT 噪声类型 .....	(72)
4.1.2	Hilbert - Huang 变换原理 .....	(73)
4.1.3	基于 HHT 能量谱筛选 MT 时间序列 .....	(74)
4.1.4	工频电干扰信号矫正 .....	(76)
4.1.5	振动干扰信号矫正 .....	(81)
4.2	静态效应及压制 .....	(82)
4.2.1	静态效应对数据处理的影响 .....	(83)
4.2.2	辅助电性资料和相位静校正方法 .....	(86)
4.3	复杂地质地形条件下 HMT 响应规律分析 .....	(88)
4.4	高频大地电磁带地形二维反演研究 .....	(94)
4.4.1	最小二乘光滑约束反演 .....	(94)
4.4.2	灵敏度矩阵计算 .....	(95)
4.4.3	正则化因子选取 .....	(96)
4.4.4	起伏地形下 HMT 二维反演结果验证 .....	(97)
4.5	本章小结 .....	(108)
<b>第 5 章</b>	<b>深埋隧道围岩完整性分级研究 .....</b>	<b>(109)</b>
5.1	高频大地电磁法判识深埋隧道岩体完整性的可行性分析 .....	(109)
5.1.1	高频大地电磁法判识深埋隧道岩体完整性的依据 .....	(109)
5.1.2	基于岩体完整性系数( $K_r$ )分级 .....	(111)

5.1.3 岩体孔隙度围岩分级 .....	(112)
5.2 高频大地电磁法判识隧道岩体完整性 .....	(114)
5.3 深埋隧道自动岩体完整性分级软件 .....	(118)
5.4 本章小结 .....	(122)
<b>第6章 基于电性参数的隧道围岩分级应用 .....</b>	<b>(123)</b>
6.1 宜(昌)万(州)铁路 .....	(124)
6.1.1 别岩槽隧道 .....	(124)
6.1.2 齐岳山隧道 .....	(129)
6.1.3 云雾山隧道 .....	(132)
6.2 向(塘)莆(田)铁路 .....	(138)
6.2.1 宝台山隧道 .....	(138)
6.2.2 青云山隧道 .....	(144)
6.2.3 戴云山隧道 .....	(147)
6.2.4 高盖山隧道 .....	(152)
6.3 高速公路隧道 .....	(154)
6.3.1 宁武高速地坪隧道 .....	(154)
6.3.2 西铭隧道 .....	(157)
6.3.3 花山隧道 .....	(158)
6.4 卡拉水电站长引水隧洞 .....	(162)
6.5 本章小结 .....	(167)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(168)</b>

# 第1章 绪论

## 1.1 研究目的和意义

进入21世纪以来,中国铁路高速发展。“十二五”期间,全国铁路固定资产投资完成3.58万亿元,新线投产3.05万公里,根据《中长期铁路网规划》,“十三五”期间全国新建铁路里程将不低于2.3万公里,总投资不低于2.8万亿元。

在大规模铁路建设形势下,隧道及地下工程以其基本不占用地面土地资源、缩短空间距离、克服高山峡谷等地形障碍方面的突出优势,在铁路建设中发挥着越来越重要的作用,不仅隧道的总里程持续大幅度增长(据有关部门统计,2001—2013年我国运营铁路隧道里程增长情况见图1-1),而且单座隧道也具有向长度大、埋深大发展的趋势。例如石太铁路太行山隧道长27.9公里,晋中南铁路吕梁山隧道长23.46公里,向莆铁路青云山隧道长22.175公里等,长度大于10公里的特长隧道屡见不鲜。可以说,“多、长、大、深”,即数量多、长度大、大断面、大埋深将是21世纪我国隧道工程发展的总趋势<sup>[1-2]</sup>。

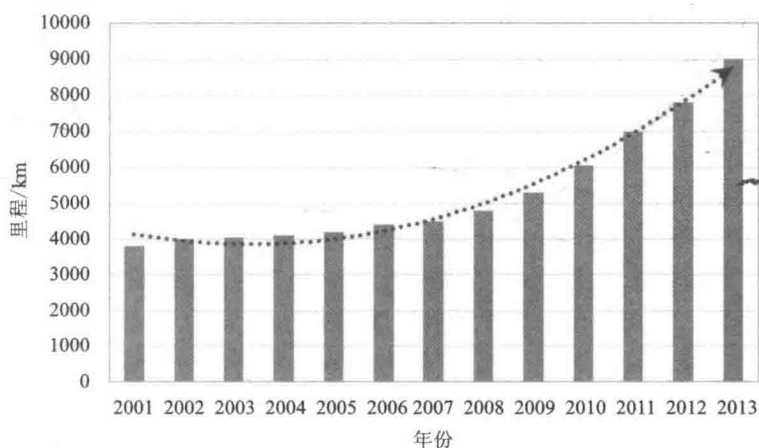


图1-1 2001—2013年我国运营铁路隧道里程增长图

长、大、深埋隧道由于埋深大、洞程长、穿越地质单元复杂多样,在勘察设计、施工过程中会遇到一系列方法技术难题,隧道洞身附近的围岩破碎、岩溶洞穴及断裂等不良地质现象,都将对隧道施工产生安全隐患,危及施工人员的生命及国家财产安全<sup>[3]</sup>。因此针对该类隧道围岩级别的判识是隧道设计与施工的关键环节,对于指导隧道开挖和支护方案设计、合理地控制项目投资、降低施工风险、避免工程事故发生、保护生命财产安全等方面,具有明显的社会效益和经济效益。

## 1.2 隧道围岩分级国内外研究现状

隧道围岩分级的研究最早始于18世纪,由欧洲人罗曼以定性描述的形式提出,距今已有两百多年历史,其间国内外众多学者都对此进行了大量的探索和实践,并提出了上百种围岩分级方法<sup>[4-5]</sup>。

1926年,苏联学者普洛托吉雅柯诺夫提出基于岩石坚固性系数分级法,简称普氏分级法,它利用一种抽象的系数即普氏坚固性系数,来表示岩石的坚固程度,并按其数值大小将岩石共分为十级<sup>[6]</sup>。

1946年,美国 Terzaghi 提出以岩石岩性描述和岩石荷载相结合的综合分级方法,将岩石共分为十级,其后又作了补充,把裂隙间距和指标也联系在一起<sup>[6]</sup>。

1958年, H. Lauffe 提出按隧道围岩自稳时间进行分级的方法,他给出了隧道暂时稳定时间的表达式,并以隧道稳定性为基础将围岩分为七类<sup>[6]</sup>。

1967年,美国 Deere 提出岩体质量分级法(RQD 分级),RQD 是综合反映岩体的强度和破碎程度的指标。RQD 是以单位长度钻孔中10 cm 以上的岩芯占有的比例来定义的,根据 RQD 值将岩石分为五级<sup>[7]</sup>。

1968年,日本岩石力学委员会提出以抗压强度和岩体平均龟裂间距为基本指标的岩石稳定性分级法,之后,为了更全面地评价岩石的坚固性,又增加了岩石弹性波速度的指标<sup>[6]</sup>。

1972年,美国 Wickham 提出岩石结构评价分类法<sup>[6]</sup>,这种方法首先根据岩体地质结构、节理状态和含水情况分别确定三个参数数值,然后再根据这三个参数评价数的总和,即 RSR 值的大小对岩石级别进行评价。

1973年,南非 Bieniaski 提出节理化岩体地质力学分级法,或称 RMR 分级法<sup>[8]</sup>,它采用单轴抗压强度、RQD、节理间距等七项分级指标,根据实际地质情况对指标分别赋予不同的得分,并按其总分值对岩体做出不同级别的评价。

1974年,挪威 Barton 等人提出岩体质量  $Q$  值的定量分级法<sup>[9-10]</sup>,它首先根据 RQD、节理组数、裂隙水等六项分级指标数值按相应公式计算岩体质量  $Q$  值,再按  $Q$  值大小对岩体做出不同级别的评价。

1975年,中国铁道部颁布的《铁路隧道设计规范》初步提出了以围岩地质条件定性描述为主,岩石强度、岩体结构特征及其他定量因素为辅的综合分级方法<sup>[5]</sup>。

1986年,中国铁道科学研究院西南所提出工程岩体质量指标RMQ, RMQ由公式 $RMQ = Q + K + C$ 确定,其中, $Q$ 为岩体质量分级评分,由饱和岩石单轴抗压强度( $R_c$ )、岩石点荷载强度、岩体纵波强度确定; $K$ 为岩体完整性分级评分,由岩体完整性系数( $K_v$ )、岩体体积节理数和RQD确定; $C$ 为修正参数之和,由地下水、主要结构面产状方位与隧道轴线方位关系和岩体初始应力状态系数确定。根据RMQ值大小(0~100分)将围岩质量分成I~V级<sup>[11]</sup>。

1986—2001年,铁道部第四勘察设计院成立了中南、华东地区弹性波隧道围岩分类试验组,进行弹性波隧道围岩分类试验研究工作。实验总结出了一套中南、华东地区弹性波速度隧道围岩分类标准<sup>[12]</sup>(见表1-1)。实践证明这套标准对于隧道围岩类别的划分大部分是正确的,为隧道的设计和施工提供了可靠的依据。

表1-1 中南、华东地区弹性波围岩分级表

级别 岩性	V	IV	III	II	I
岩浆岩类	$A < 2.9$	$2.9 \leq A < 4.0$	$4.0 \leq A < 4.9$	$4.9 \leq A < 6.0$	$A^* \geq 6.0$
碳酸盐岩类	$A < 3.3$	$3.3 \leq A < 4.3$	$4.3 \leq A < 5.3$	$5.3 \leq A < 6.2$	$A^* \geq 6.2$
碎屑岩类	$1.8 \leq A < 2.2$	$2.2 \leq A < 2.9$	$2.9 \leq A < 3.9$	$3.9 \leq A < 4.8$	$A^* \geq 4.8$
凝灰岩类		$A < 2.8$	$2.8 \leq A < 3.6$	$3.6 \leq A < 4.5$	$A^* \geq 4.5$
黏土岩类	$A < 2.4$	$2.4 \leq A < 3.7$	$3.7 \leq A < 5.2$	$A^* \geq 5.2$	
板岩类	$A < 2.0$	$2.0 \leq A < 3.3$	$3.3 \leq A < 4.8$	$A^* \geq 4.8$	
片岩类	$A < 2.3$	$2.3 \leq A < 3.6$	$3.6 \leq A < 4.9$	$A^* \geq 4.9$	

注: \* 表示推断结果;碳酸盐岩类包含灰岩、灰岩夹页岩、白云岩、白云岩夹页岩;岩浆岩类包含花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩、流纹岩、火山岩、辉绿岩、辉长岩;碎屑岩类包含砂岩、砾岩、砂岩夹板岩、砂岩夹页岩、变质砂岩。

2005年,由中国铁道部颁布的《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)中,虽然仍以围岩工程地质条件的定性描述为主,但引入了岩石强度和围岩弹性波速度两个定量参数<sup>[5]</sup>。

自2000年以来,随着数据采集技术、信号处理技术、正反演算法的快速发展,电磁法类勘探方法被广泛地应用于深埋隧道的勘察设计中,该方法能够查明

深埋隧道中的断层等不良地质构造、岩性分界、地下水发育情况,为隧道围岩分级提供依据,科学指导钻孔布设并大量减少钻孔数量,大大地降低了勘察成本,缩短了勘察周期,提高了勘察质量。且由于探测深度大,该方法已经发展成为深埋隧道中的主要勘察手段之一。

大地电磁勘探法是 20 世纪 50 年代初由 A. N. Tikhonov (1950)<sup>[13]</sup> 和 L. Cagniard (1953)<sup>[14]</sup> 提出的。自 19 世纪 70 年代开始,国外学者将该方法用于深部资源勘探,取得了不错的效果<sup>[15-21]</sup>; 90 年代铁道部第一勘察设计院首先将该方法应用于中国第一座特长越岭隧道——秦岭隧道地质勘察中,查明了隧道地区岩带、断裂带及富水带、岩性接触带的平面分布和剖面延伸方向,采用  $V_s$  大地电磁法完成了最大埋深 1600 m 的隧道物探地质纵断面图,为施工设计提供了地质资料。安志国、底青云等人(2006)<sup>[22]</sup> 利用可控源音频大地电磁(controlled source audio-frequency magnetotellurics, CSAMT)资料对典型构造的视电阻率进行分析,特别是对正常地层、断层和破碎带的视电阻率特征进行了对比分析,探讨了 CSAMT 法对深埋隧道洞线岩性判识的可行性。铁道部第四勘察设计院曹哲明、顾湘生等人(2009)<sup>[23]</sup> 利用高频大地电磁(high frequency magnetotellurics, HMT)资料对宜万铁路 18 座具有岩溶风险的隧道进行岩溶宏观预测,系统论证了 HMT 法在深埋隧道勘察中可以确定宏观地质构造框架,基本确定向斜、背斜构造在隧道纵断面上的展布形态、地层的大致产状,推断具有一定宽度的断层及其产状和沿断层带出现的溶蚀和岩层破碎情况。杨毅明等(2009)采用高频大地电磁法(HMT 法)进行深埋隧道勘探,利用其资料有效地揭示了隧道岩性界线、岩溶及隐伏断裂不良地质体,对施工区的地质构造和不良地质体的赋存状态进行了超前的宏观预测。许广春(2010)<sup>[24]</sup> 针对浅层地震折射法在取得深埋隧道围岩的纵波速度方面存在很大限制的现状,讨论了大地电磁测深法进行隧道围岩分级的可行性。李坚(2013)<sup>[25]</sup> 通过大量越岭隧道实例提出大地电磁测深成果资料可用于埋深大于 300 m 的隧道围岩初步分级中。铁路隧道围岩分级见表 1-2。

表 1-2 铁路隧道围岩分级

级 别	围岩主要工程地质条件		围岩开挖后 的稳定状态	弹性波速度 $V_p / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
	主要工程地质条件	结构特征和完整状态		
I	硬质岩( $R_c > 60 \text{ MPa}$ ), 受地质构造影响轻微, 节理不发育, 无软弱面(或夹层); 层状岩层为巨厚层或厚层, 层间结合良好, 岩体完整	呈巨块状整体结构	围岩稳定、无塌方, 可能产生岩爆	>4.5

续表 1-2

级 别	围岩主要工程地质条件		围岩开挖后 的稳定状态	弹性波速度 $V_p / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
	主要工程地质条件	结构特征和完整状态		
II	硬质岩( $R_c > 30 \text{ MPa}$ ), 受地质构造影响较严重, 节理发育, 有少量软弱面和贯通微张节理, 但其产状及组合关系尚不致产生滑动, 层状岩层为中层或厚层, 层间结合一般, 很少有分离现象	呈大块状砌体结构	暴露时间长, 局部出现小塌方, 侧壁稳定, 层间结合差的平缓岩层, 顶板易塌落	3.5 ~ 4.5
III	硬质岩( $R_c > 30 \text{ MPa}$ ), 受地质构造影响较严重, 节理发育, 有层状软弱面(或夹层), 但其产状及组合关系尚不致产生滑动, 层状岩层为薄层或中层, 层间结合差, 多有分离现象, 软硬岩互层	呈块(石)碎(石)状镶嵌结构	拱部无支护时可产生小塌方, 侧壁基本稳定, 爆破震动过大, 易塌方	2.5 ~ 4.0
	软质岩( $15 < R_c \leq 30$ ), 受地质构造影响较严重, 节理较发育; 层状岩层为薄层、中厚层或厚层, 层间结合一般	呈大块状结构		
IV	硬质岩( $R_c > 30 \text{ MPa}$ ), 受地质构造影响极严重, 节理很发育, 层状软弱面已经基本破坏	呈碎石状压碎结构	拱部无支护时, 可产生较大的坍塌, 侧壁有时失去稳定	1.5 ~ 3.0
	软质岩( $5 < R_c \leq 30$ ), 受地质构造影响严重, 节理发育	呈块(石)碎(石)状镶嵌结构		
	土体: 1. 具有成岩作用的黏性土、粉土及砂类土; 2. 黄土( $R_c$ 、 $Q$ ); 3. 钙质碎石土、卵石土、大块石土	1和2呈大块状压密结构, 3呈巨块状完整结构		