

2021 年度四川省重点出版项目专项补助资金项目
典型铁路隧道工程创新技术丛书

浩吉铁路隧道 监控量测技术与信息化管理

主编 马兆飞 尚海松

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

浩吉铁路隧道监控量测技术与信息化管理 / 马兆飞,
尚海松主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2021.11
(典型铁路隧道工程创新技术丛书)
ISBN 978-7-5643-8358-9

I. ①浩… II. ①马… ②尚… III. ①铁路隧道-隧
道施工-安全监控-中国②铁路隧道-隧道施工-隧道测
量-中国 IV. ①U455

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 227413 号

典型铁路隧道工程创新技术丛书

Hao-Ji Tielu Suidao Jiankong Liangce Jishu yu Xinxihua Guanli

浩吉铁路隧道监控量测技术与信息化管理

出版人 / 王建琼
策划编辑 / 黄庆斌 李芳芳 李华宇
主编 / 马兆飞 尚海松
责任编辑 / 姜锡伟
封面设计 / GT 工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 四川玖艺呈现印刷有限公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 13 字数 323 千

版次 2021 年 11 月第 1 版 印次 2021 年 11 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-8358-9

定价 88.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

本书编写委员会

主 编	马兆飞	尚海松		
副主编	陈 野	陈礼伟	朱 超	皮 圣
委 员	万俊峰	徐海山	范文杰	冯文山
	詹显军	宋琳辉	刘建平	李丁可
	张艳梅	金成旭	冯 丛	伊志奎
	陈 强	李海峰	雷 蕾	吴学东
	邓 锐	张志明	雷继位	杨世武
	王 伟	赵 民	孟红梅	陈丽琴
	焦 健	杨慧涛	马 涛	谷 玥
	罗海风	王洪志	陈 博	汪小波
	李开华	李朝安	吴 洁	

交通基础设施建设关系国计民生，而其中铁路的发展对国家经济具有重要意义。随着我国铁路、公路、城市轨道交通建设里程的快速增长，隧道的修建也越来越多，尤其是进入 21 世纪，我国高速铁路客运专线、重载铁路、高等级公路、城市轨道交通的隧道修建数量和水平达到了前所未有的高度。但隧道施工地质条件极为复杂，存在诸多不确定性风险因素，长期以来都是铁路建设安全事故发生的高频区。监控量测作为隧道施工过程中不可或缺的工作，能够有效避免铁路隧道施工事故的发生。

在国家政策的引导下，伴随着铁路信息化发展和监控量测技术的进步，国内各大高校、研究机构及从事隧道研究的企业相继研究开发出了应用于铁路隧道的全站仪隧道施工监测系统软件，但是这些系统大多在预警值设置、预警及时性、功能等方面还有待完善，不能彻底解决监控量测问题。针对这一问题，在中国国家铁路集团有限公司（原中国铁路总公司）的正确指导下，经有关各方联合攻关，中铁西南科学研究院有限公司（本书简写为中铁西南院/西南院）开发了“隧道施工监测信息管理系统”。虽然有了一套全面、有效、科学的隧道施工监测信息管理系统，但是如果相应管理措施不完善，依然无法保证系统发挥应有作用。因此，蒙西华中铁路股份有限公司（后更名为浩吉铁路股份公司，本书简写为浩吉铁路公司）组织、中铁西南院参与，共同研究制定了与之对应的管理方案、措施，从而实现了“硬件”与“软件”的结合，降低了施工中的资源浪费，提升了隧道安全的监管有效性和科学性。

本书针对铁路高速发展亟待解决的各种隧道施工监控量测问题，详细阐述了“隧道施工监测信息管理系统”和监控量测配套管理方案，并通过案例分析了该系统在蒙华铁路（后更名为浩吉铁路）工程中的应用以及配套的管理办法、制度，取得了良好的效果，希冀为信息化手段管理项目提供类似的可行性经验。

本书共分 5 章，主要特点如下：

（1）以信息化为主要视角，以案例分析为辅助，强调全过程信息化，以期为铁路隧道信息化施工提供相关建议和思考。

（2）注重实践应用，同时兼顾理论阐释，充分将理论和实践应用相结合，竭力

为读者呈现“理论同实践结合”的读物。

(3) 实践性强。本书结合诸多工程实践案例和经验，可以为相关人员在铁路隧道施工中提供良好的管理思路和信息化思路。

(4) 案例选择多元化。本书针对不同地质条件提供了丰富而多元的案例供读者参考学习。

本书在编写过程中，案例部分使用了西南交通大学仇文革教授团队的发明成果，在此表达衷心感谢。同时，本书参考了大量文献资料，编者已尽可能在参考文献中详尽罗列，但因资料繁复且来源复杂，难以一一标明出处，在此向其作者和有关人员表示歉意和感谢。

鉴于作者水平有限，加之铁路隧道监控量测技术及信息化是不断前进和发展的，因此本书在编撰过程中也难免出现一些不足，欢迎广大读者和专家批评指正，以便后续修订。

作 者

2021年8月

1	第 1 章 绪 论001
	1.1 我国隧道工程建设状况001
	1.2 隧道监控量测的目的与意义003
	1.3 隧道监控量测技术现状003
2	第 2 章 浩吉铁路概况及监控量测基本方法007
	2.1 浩吉铁路工程概况007
	2.2 浩吉铁路隧道概况009
	2.3 浩吉铁路隧道建设理念及其特点021
	2.4 隧道监控量测项目023
	2.5 监控量测断面及测点布置024
	2.6 监控量测频率027
	2.7 主要监测项目操作要点027
	2.8 监控量测信息化基本原理032
3	第 3 章 信息化平台——隧道施工 监测信息管理系统 (TGMIS)046
	3.1 TGMIS 平台构建历程046
	3.2 TGMIS 平台关键技术047
	3.3 协同技术及其应用052
	3.4 TGMIS 平台模块组成052
	3.5 TGMIS 平台应用情况065

4

5

第 4 章 浩吉铁路隧道监测及信息化管理079

4.1 浩吉铁路隧道监控量测信息化管理079

4.2 隧道施工全过程信息化管理097

4.3 隧道监测标准及预警值动态调整探讨103

第 5 章 典型隧道变形分析109

5.1 概 述109

5.2 浩吉铁路围岩变形统计109

5.3 浩吉铁路围岩控制值统计116

5.4 阳山隧道黄土段126

5.5 王家湾隧道140

5.6 石岩岭隧道152

5.7 段家坪隧道高地应力水平岩层试验段156

5.8 中条山隧道 F₇ 断层变形段围岩变形及
初支结构内力173

参考文献183

附 录185

第 1 章

绪 论

1.1 我国隧道工程建设状况

随着我国铁路、公路、城市轨道交通建设里程的快速增长，隧道的修建也越来越多，尤其是进入 21 世纪，我国高速铁路客运专线、重载铁路、高等级公路、城市轨道交通的隧道修建水平达到了前所未有的高度。我国铁路隧道发展规模情况：据统计，截至 2020 年底，中国铁路营业里程达 14.5 万千米，其中，投入运营的铁路隧道共 16 798 座，总长约 19 630 km。1980—2020 年的 40 年间，中国共建成隧道 12 412 座，总长约 17 621 km（占中国铁路隧道总长度的 90%）。特别是近 15 年来，中国铁路隧道发展极为迅速，共建成铁路隧道 9 260 座，总长约 15 316 km（占中国铁路隧道总长度的 78%）。其中：“十一五”期间（2006—2010 年）建成铁路隧道 2 262 座，总长约 2 686 km（占比 14%）；“十二五”期间（2011—2015 年）建成铁路隧道 3 611 座，总长约 6 038 km（占比 31%）；“十三五”期间（2016—2020 年）建成铁路隧道 3 387 座，总长约 6 592 km（占比 33%）。为便于分析和研究，本书对中国铁路隧道发展规模情况进行了统计，以便更好地促进中国铁路隧道的发展。中国铁路隧道不同时期发展规模情况见表 1-1 和图 1-1。

表 1-1 中国铁路隧道不同时期发展规模情况（截至 2020 年底）

时 期	隧道座数	隧道总长度/km	备 注
至 1949 年底	429	112	新中国成立初期
至 1979 年底	4 386	2 009	改革开放初期
至 1999 年底	6 877	3 667	
至 2005 年底	7 538	4 314	
至 2010 年底	9 800	7 000	
至 2015 年底	13 411	13 038	
至 2020 年底	16 798	19 630	

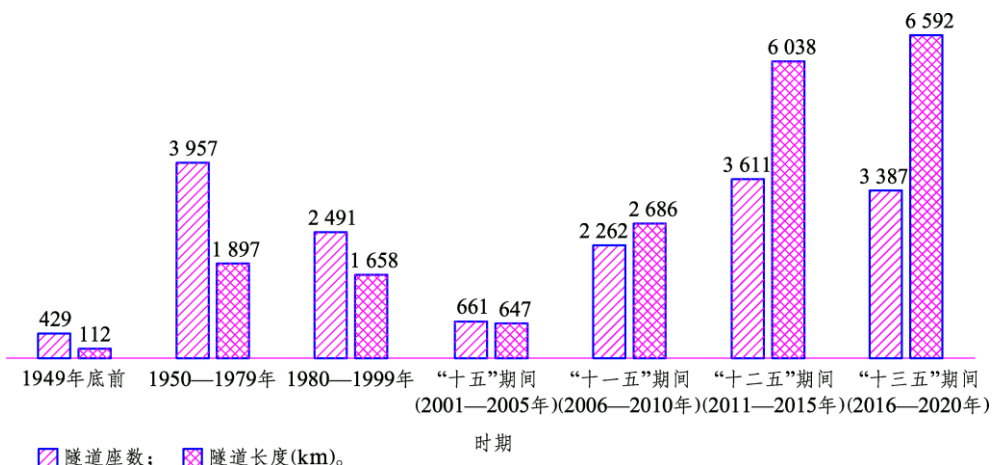


图 1-1 中国铁路隧道不同时期发展规模情况（截至 2020 年底）

我国特长铁路隧道建设规划情况：2020 年新增开通运营铁路隧道 714 座，总长约 1 589 km，其中特长隧道 39 座，总长约 498 km；在建铁路隧道 2 746 座，总长约 6 083 km；规划铁路隧道 6 354 座，总长约 16 255 km。截至 2020 年底，中国已投入运营的特长铁路隧道共 209 座，总长 2 811 km。其中，长度 20 km 以上的特长铁路隧道 11 座，总长 262 km。

我国高速铁路隧道建设规划情况：截至 2020 年底，中国已投入运营的高速铁路总长约 3.7 万千米，投入运营的高速铁路隧道共 3 631 座，总长约 6 003 km，其中特长隧道 87 座，总长约 1 096 km。① 新增运营。2020 年中国新增运营有隧道工程项目的高速铁路共 9 条，总长约 2 389 km；共有隧道 189 座，长约 508 km。其中，特长隧道 15 座，总长约 176 km。② 在建。中国正在建设的有隧道工程项目的高速铁路共 47 条，总长约 8 327 km；共有隧道 1 811 座，总长约 2 750 km。其中，特长隧道 50 座，总长约 645 km。③ 规划。截至 2020 年底，中国规划的有隧道工程项目的高速铁路共 93 条，总长 20 970 km；共有隧道 3 525 座，累计长度约为 7 966 km。其中，特长隧道 134 座，总长 1 867 km^[1]。

随着我国铁路隧道建设规模的不断扩大，一方面给我们的交通出行和生活带来了方便，促进了我国交通事业快速发展；另一方面，隧道工程建设因其地质条件复杂多变、施工空间条件有限等因素，也出现了许多安全事故。据统计分析：在 2008 到 2016 年期间，我国隧道施工事故共发生 62 次，隧道施工事故年度与次数的关系如图 1-2 所示。

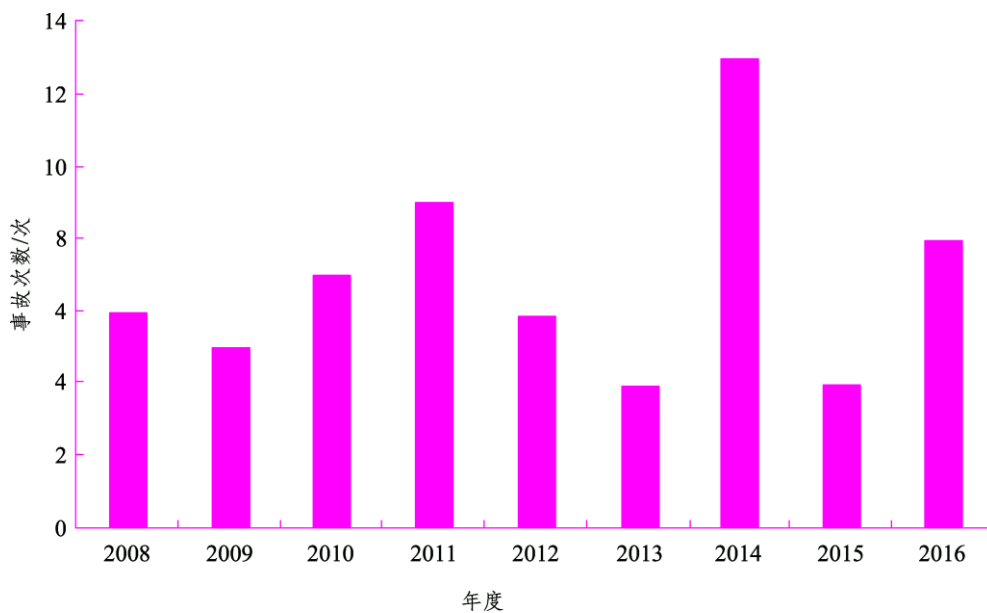


图 1-2 隧道施工事故年度与次数的关系

从图 1-2 中可以看出，从 2008 年至 2011 年，事故发生次数平缓上涨，在达到 2011 年的较高数值后，各单位对隧道施工安全引起了重视，对施工人员加强安全培训与工程管理，采取更为有效的安全措施，以降低事故发生的次数。从而在 2011 到 2013 年间，事故发生次数逐年下降，在 2013 年降低到了 6 年内的最低值，这说明在足够重视安全生产与风险管理意识的条件下，隧道施工事故次数是可以达到相应要求的。但是由于放松警惕或其他原因，事故次数在 2014 年发生了明显反弹，达到了 7 年内的最高值，这更说明了隧道施工安全意识要随

时加强，切不可有了一点改善就掉以轻心^[2]。隧道工程施工存在工点数量多、地质条件复杂、需要控制的风险因素多等特殊情况，监控量测技术能够提前预测和感知隧道施工风险、指导施工，监控量测管理能够强化隧道施工人员的安全意识和风险防范意识。两者结合能够有效地预防隧道事故的发生，为隧道施工安全提供保障。因而监控量测技术与管理的相关研究具有重要意义。

1.2 隧道监控量测的目的与意义

在隧道的施工过程中，使用各种仪器设备和量测元件，对地表沉降、围岩与支护结构的变形、应力、应变进行量测，据此来判断隧道开挖对地表环境的影响范围和程度、围岩的稳定性和支护的工作状态，这种工作称为现场监控量测。现场监控量测被认为是新奥法的三大支柱之一，其目的与意义可归纳为下述四点：

(1) 为隧道施工提供安全信息。

通过采集监控量测数据，得知开挖后围岩的沉降、收敛等相关位移、形变信息，结合隧道地质、埋深等条件分析当前围岩-初期支护结构是否稳定，从而判断隧道施工状态是否安全。当监控量测形变值或速率值数据达到预警值时，及时停止施工，开展风险排查，并针对发现的风险因素和可能失稳的区段或局部薄弱的部位采取相应的加固或其他补强措施，保证隧道施工人员和隧道结构安全。

(2) 为设计和修正支护结构形式与参数提供依据。

进行隧道工程设计时必须依靠工程地质调查和试验来提供必要的依据和信息，但由于围岩地质情况复杂多变，工程地质调查和试验取得的数据很难全面、正确地反映岩体的真实性。所以在施工过程中通过围岩与支护的变形和应力测试数据，可对原设计予以修正，或者为重新计算和设计提供依据。

(3) 可正确选择开挖方法和支护施作时间。

通过分析量测数据，可以确定符合具体工程要求和地质条件的施工方法和支护结构的施作措施，以充分利用围岩自承能力，然后通过量测分析，再确定适宜的二次支护时间；在侧压力较大的地层中，利用量测数据，可以确定最佳的仰拱施作时间。

(4) 是研究新奥法理论的重要途径。

通过施工监控量测，可以深入、系统地研究围岩与支护结构共同作用的力学机制，和不同条件、不同类型岩体的变形、破坏机理，对更好地理解和研究隧道新奥法、完善隧道设计和正确指导施工，从而保证隧道工程施工的安全性、科学性和经济性，具有重要意义。

1.3 隧道监控量测技术现状

1.3.1 国外研究现状

在国外，针对传统的数据监测管理方法中存在的不足，集数据输入、存储、管理和应用

分析等功能于一体的监测数据处理分析等信息系统被不断用于监测数据的管理和综合分析。下面是国外的一些隧道施工监测信息化现状的介绍。

意大利研究开发的隧道施工计算机辅助监测系统 (MAMs), 可以实现量测数据采集、传输、校验、存储和分析并具备实时的数据分析判断和报警等功能。意大利还研究开发了 ACD-RS 系统, 并将该系统应用于本国 Vaglia 隧道施工管理中; 系统被用于隧道围岩变形监测, 能够及时掌握隧道地质情况, 从设计阶段开始, 通过综合分析隧道的地质来制订不同阶段的不同施工方案, 同时在施工过程中根据不同时期开挖后的应力和围岩位移变化特性等, 提出合理的隧道开挖方法和支护结构方式。

日本也开发出一些关于隧道施工过程的信息化管理系统软件。例如: 佐藤工业株式会社研究开发的“STI 系统”可以把隧道洞内的监控量测采集的数据、施工中的机械和渣土运输车辆运行状态数据、实时通信数据等关键信息, 通过通信线路实时传输到洞外, 实现了隧道洞内施工的一体化管理。日本西松株式会社利用计算机技术和隧道工程技术相结合的方法, 也开发出了“隧道综合管理信息系统”, 该系统是由隧道信息化施工、设计支援、质量管理和形状管理 4 个子系统所构成的。其中, 信息化施工子系统是由地质超前预报技术和施工监控量测技术组合而成的系统, 而设计支援子系统则由隧道内施工的实际情况和支护结构模式、辅助工法等内容组成。

在南美洲, 哥伦比亚把隧道信息化施工技术成功运用在高速公路修建中, 顺利通过断层带及高地应力、泥沙等极其复杂困难地质地段, 达到了对隧道内复杂地质施工的有效管理。

1.3.2 国内研究现状

在国内, 一些院校、科研机构, 如同济大学、北京城建设计发展集团股份有限公司、北京市市政工程研究院、中国铁道科学研究院、中国人民解放军理工大学*、中国科学院武汉岩土力学研究所、上海交通大学、广东工业大学、中国矿业大学、成都理工大学、西南交通大学、北京交通大学、长安大学、东北大学、中铁隧道局集团有限公司、中铁西南院等单位, 在隧道及地下工程方面均进行了有益探索和研究。

阴鹏等^[3]对比了当前主流 WebGIS 开发平台及平台的性能特点, 深入分析了隧道施工安全监测系统的功能需求、系统实现目标, 从而建立了系统功能模型。在此基础上开发的隧道施工安全监测系统, 实现了对地图的基本操作, 并能够方便地操作监测数据, 包括数据存储、查询、修改、删除。系统实现了对监测点的布置和监测信息展示, 在用户导入各监测点数据时, 系统依据监测基准, 可自动计算出报警和预警的监测点, 并在地图上以醒目的颜色展示出来, 以实现预、报警功能并且生成相应的监测曲线, 使用户及时了解到监测对象形变或沉降的程度。

胡承军^[4]结合上海长江隧道工程施工背景, 研究了软土隧道工程施工的自动监测方案, 同时对自动监测数据进行了动态分析研究, 并研究了隧道工程施工监控报警值的合理确定方法, 且从监测数据分析的角度进行了确定报警值的研究, 同时对隧道安全状态进行了评估, 对隧道工程施工过程中的安全状态进行了安全等级划分。针对不同的安全状态, 他分别给予

* 编者注: 2017 年, 以中国人民解放军理工大学和中国人民解放军军械工程学院主体为基础组建了中国人民解放军陆军工程大学。

相应的控制措施和建议，确保隧道工程建设的安全进行。

北京市市政工程研究院^[5]采用无线技术把三维激光扫描、人机定位、各种传感器数据采集、通信视频、风险管理、施工预案及应急响应等集成在一起，实现了：隧道施工掌子面图像实时采集、显示与编录分析、掌子面稳定性监测、掌子面人员与车辆定位管理，隧道必测项目与断面扫描技术的结合以预测围岩变形和超欠挖，选测断面各种传感器的无线数据采集与综合分析，三维数字化虚拟隧道与实际施工同步。

李亮^[6]以吉茶（吉首—茶洞）高速公路坡头隧道施工监控为依托，开发了基于浏览器/服务器（Browser/Server）构架的隧道施工监控数据管理分析系统；针对围岩的变形规律，运用 C#.NET 开发了 MATLAB 中多种回归模型的接口函数，对隧道变形的时间效应和空间效应进行了综合分析，采用样条插值算法生成了围岩变形的时空效应图，为研究监控数据的变形规律提供了支持。

邓洪亮等^[7]结合北京密云县密兴路火郎峪隧道施工监控实践，建立了岩质公路隧道施工监控资料分析与预警系统，得到了隧道爆破施工参数、振动波传播规律、应力-应变规律和隧道施工期间的围岩收敛与拱顶沉降规律，提出了隧道施工的合理组织方案和施工措施。

郭中堂等^[8]公开了一种隧道施工安全预警管理系统，包括通过线性调频连续波测量隧道围岩的微小位移信息的围岩形变量测雷达终端，施工人员及施工设备实时位置监测系统，用于实时监测隧道内的气体、水位信息的环境监测终端。

张秀丽^[9]将地铁隧道施工实时监测系统应用于某地铁盾构隧道衬砌管片的应力监测中，对钢筋应力计传感器的预埋设、保护措施以及隧道施工过程中的管片内力监测数据的无线传输进行了研究。

王浩^[10]针对地下工程施工期监测的特点，围绕着信息化施工的需要，较全面、系统地总结了地下工程中的监测方法、监测数据分析、建模方法，建立了二维地下工程施工期监测信息管理、预测预报系统。他以工程第一线的施工、监理、管理人员为主要用户，建立了操作简单、可靠性高、集成度高和可扩充性强的二维地下厂房施工期监测信息管理、预测预报系统，并将其成功应用于小湾电站。系统集成以下四个方面的功能：数据库管理、数据录入与处理、图形可视化和图形-属性数据双向联动、数据建模及预测。

肖林萍等^[11]研究了国家高速公路旦架哨隧道建设，内容主要包括现场监控量测锚杆轴力、对围岩和钢拱的弯矩等。同时，他们结合地面地质调查、隧道内地质观测等，通过数据的采集、处理和反馈，建立了大跨度隧道信息化施工地质灾害预报系统。通过这一系统，该隧道的地质灾害已预测、预报成功。隧道是在科学的动态管理下设计和施工的，信息化保证了隧道的安全施工。

Li Xiaojuan 等^[12]提出了一种基于 BOTDA 技术的隧道结构安全监测系统。该系统具有良好的现场适应性，能实时监测隧道结构安全性，具有分布广、远距离、高精度等优点。

Chen Lihua 等^[13]开发的系统提供了多种浏览模式的三维模拟视图，还提供了三维交互操作、监控数据录入查询和分析、施工进度模拟、自动报警和趋势预测功能。系统改进了可视化施工现场监测的安全状态分析。

Pan Weidong 等^[14]通过分析建设过程、安全监测、监测项目、监测预警系统、测量数据、预警系统的监测和预警系统的工作原理，提出了建设过程中的安全监测方案。

中铁西南院开发了基于 B/S（Browser/Server，浏览器-服务器）和 C/S（Client/Server，

客户-服务器结构)混合架构的隧道施工监测信息管理系统(简称 TGMIS),集现场数据采集及分析处理、远程监控于一体,包含现场数据采集端、远程服务器端和客户端程序,可同时满足量测和监管人员的不同工作需求。这套系统已成功在宝兰线、西成线等投入使用。目前,该系统已在铁路、公路、地铁等多条线路中得到了推广应用,测试项目覆盖了变形、应力、应变等。

1.4 存在的问题

随着信息技术的不断发展,国内外信息管理系统也有了一定突破和进步,但隧道监测信息管理系统还存在一些问题,主要如下:

(1) 数据处理与分析技术有待提高。不论是采用传统的数据管理方法还是通过监测数据信息管理系统方法进行数据处理,基本上都是采用回归分析法、灰色理论、BP神经网络、时间序列分析法等进行预测分析,但回归分析法需要充足的数据资料才能得到较好的预测结果,灰色理论、BP神经网络、时间序列分析法等目前还停留于研究阶段,在实际中应用的可靠性还需要进一步研究^[15]。

(2) 监测信息管理系统需进一步完善。目前,隧道施工监测信息管理系统具有三维可视化平台的并不多见,尤其是三维GIS和虚拟现实技术的开发与应用还处于初步研究阶段。很多系统的研发最多还处于试用阶段,有的甚至还在研究阶段,由于一些原因(如开发周期比较长、费用比较高、对开发人员的能力要求较高)而不能得到改进、完善和推广。同时,隧道监测信息系统在软件功能的完备性、易用性、健壮性和安全性等实用性方面与成熟商业软件标准还存在明显差距。

(3) 目前,国内外还没有统一的预报标准。采用一个预报标准一般不能满足信息反馈的准确性要求,且隧道受地质条件、操作误差等多种因素的影响,要使监测信息能够更好地反馈于设计和施工,有必要对预报标准进行综合。