

隧道全寿命周期监测预警技术与系统平台应用

隧道全寿命周期监测预警技术与 系统平台应用

段军 李科 杨志华 郭鸿雁 金飞 编著
王宾 主审

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

>>>> 【 编委会 】

主 编： 段 军 李 科 杨志华 郭鸿雁 金 飞

主 审： 王 宾

参编人员： 杨 林 江星宏 代绍海 杨希文 王忠伟

念培红 王甲贤 方义明 刘 波 闻乃军

张家颖 刘 波 张良翰 周轶峰 贾述顶

赵宝才 马鑫云 黄灿荣 艾成原 何汝苗

涂 雄 邱挎琼 杨锐槐 苏军伟 宋恒祥

姚成睿 肖仕来 崔向阳 程 亮 李文锋

曹 鹏 夏杨于雨

隧道是一类重要的交通基础设施，在缩短交通出行距离和时间、改善交通通行条件方面意义重大。随着我国经济的快速发展，处于服役期的隧道数量急剧攀升。截至 2018 年底，我国已建成公路隧道 17 738 处、1 723.61 千米，其中特长隧道 1 058 处、470.66 千米，长隧道 4 315 处、742.18 千米。

在隧道建成量快速增加的同时，隧道结构由于地质环境等多种原因产生的病害现象日益显现，既有隧道结构受周边建设影响出现变形破损等问题时有发生。这些病害与损坏，对隧道通行安全是极大的威胁，将降低隧道的交通通行能力，破坏隧道运营的环境条件，甚至造成人员伤亡。对隧道结构进行安全监测预警，是避免灾害事故发生、保障隧道交通作用的一种重要手段与方法。

我国隧道结构的监测工作起步相对较晚，但发展较快。隧道的监测可充分利用其他基础设施监测已成功应用的硬件装备与方法，在研究完善隧道结构安全评价方法的基础上，形成完备的全寿命期隧道结构安全监测预警体系。

本书依托国家重点研发计划项目“城市典型交通基础设施运维安全关键技术研究”（2017YFC0806000）、云南省交通运输厅科技项目“隧道施工运营期结构安全监测与智能预警关键技术研究”的研究成果，结合云南保施高速隧道工程监测研究的应用实践，对隧道工程全寿命期监测体系进行了构建。

全书共分为 8 章。第 1 章介绍了隧道监测预警的需求背景；第 2 章介绍了隧道自动化智能监测技术现状；第 3 章介绍了隧道全寿命周期结构安全监测方法；第 4 章介绍了隧道环境下的无线通信技术；第 5 章介绍了隧道监测数据的处理方法；第 6 章介绍了隧道结构安全评价方法与标准；第 7 章介绍了隧道监测预警平台，并介绍了该预警平台的工程应用案例；第 8 章对隧道监测预警进行了总结与展望。

本书汇集了招商局重庆交通科研设计院有限公司、云南建设基础设施投资股份有限公司、施甸县保施高速公路投资开发有限公司在隧道结构监测预警方面的研究与应用成果，公路隧道建设技术国家工程实验室多名研究人员参与了编写。

限于作者水平，书中难免有不足之处，敬请读者不吝指正。

作 者

2020年3月

目 录

第 1 章	绪 论	001
第 2 章	隧道自动化智能监测技术现状	003
	2.1 隧道结构安全实时监测技术现状	003
	2.2 基于机器视觉的病害监测技术现状	004
	2.3 隧道变形监测技术研究现状	006
第 3 章	隧道全寿命周期结构安全监测方法	010
	3.1 主要监测内容与指标	010
	3.2 结构受力状态监测方法	011
	3.3 结构位移状态监测方法	032
	3.4 结构病害状态监测方法	043
	3.5 本章小结	050
第 4 章	隧道环境无线通信技术	051
	4.1 无线通信抗干扰设计	051
	4.2 无线通信距离的估算	053
	4.3 直序列扩频通信技术	054
	4.4 复杂环境通信解决方案	063
	4.5 本章小结	064
第 5 章	监测数据处理方法	065
	5.1 数据异常值的检验及剔除方法	065
	5.2 一元数据处理方法	069
	5.3 多元数据处理方法	081
	5.4 本章小结	097

第 6 章	隧道结构安全评价方法与判定标准	099
6.1	衬砌结构评级体系	099
6.2	单指标判定标准	106
6.3	多指标综合判定标准	121
6.4	本章小结	131
第 7 章	系统平台设计与实施	132
7.1	系统架构与功能	132
7.2	前端传感与数据采集	135
7.3	数据传输与网络通信	143
7.4	系统管理平台	147
7.5	保场隧道工程应用	151
7.6	小官市隧道工程应用	156
7.7	本章小结	161
第 8 章	结论与展望	162
参考文献	163

【 第 1 章 】 >>>>

绪 论

随着社会经济的持续发展和人们对生活质量要求的不断提高，中国的交通运输及工程建设规模与数量在总体上呈现出不断增长的趋势。隧道作为交通运输线路上的工程结构物，具有重大的社会效益和经济效益。隧道在山岭地区可克服地形或高程障碍，改善线形，缩短里程，节省时间，减少对植被的破坏；在城市可减少地面用地，对疏导交通起到积极的作用；在江河、海峡和港湾等地区，可不影响水路通航，提高舒适性，增加隐蔽性且不受气候影响。由此可见，隧道建设对交通的发展起着积极的促进作用。

近年来，我国的隧道呈现出了非常明显的增长趋势，具体表现为总里程数不断增加，特长和长大隧道以及大规模隧道群不断涌现，以隧道方式跨越水域的工程日益增加。1979年，我国公路隧道通车里程仅为52千米，共374座；2000年，我国隧道通车里程已达628千米，共1684座，隧道平均长度达到373米，公路隧道通车里程比1979年增长了12倍多；到2017年年底，全国公路隧道达16229处、通车里程15285.1千米，其中特长隧道902处、通车里程8267.2千米，长隧道3841处、通车里程6599.3千米。我国最大公路隧道长度由20世纪90年代初的单洞3千米左右，发展到现在超过10千米，甚至20千米；隧道形式从过去的两车道隧道到今天的三车道隧道、四车道隧道；隧道的布置方式由过去的分离式双洞隧道到今天的连拱隧道、小净距隧道、分岔隧道，还有“地下立交”“桥隧混合”等布置形式。此外，公路隧道的改扩建工程也在逐年增加。近30年来，一大批重大科研项目和重大公路隧道工程的完成，表明我国公路隧道建设与运营管理技术水平已经取得了很大发展，设计施工技术已处于国际先进水平。

随着大量隧道的投入运营，隧道内交通量也逐年上升，上到国家层面，下到隧道的运营单位，在役隧道的运行状态和运营安全成为道路交通行

业发展的焦点。目前，桥梁等其他地上结构的运行状态监测已日趋成熟，隧道与地下工程的运行状态监测仍在发展当中，由于隧道与地下工程的特殊性，在役隧道运行状态监测领域还有大量的问题未得到有效解决。

对于隧道运行状态监测来说，获得稳定可靠的原始数据是健康监测的核心与基础。目前，在隧道与地下工程监测中缺乏专用设备，照搬或引用其他行业的技术与设备产生的问题较为突出。因此，研究针对隧道全寿命周期结构安全保障的快速、准确、实时的监测技术与装备，形成成熟有效的公路隧道全寿命周期结构安全监测成套技术及系统，填补或完善隧道与地下工程在该方向的缺失或不足，具有一定的现实意义，也有利于推动相关行业技术的不断进步。

【 第 2 章 】 >>>>

隧道自动化智能监测技术现状

2.1 隧道结构安全实时监测技术现状

从 20 世纪中叶开始,隧道实时在线监测的重要性越来越受到人们的关注,但由于其检测、监控技术相对落后,一直制约着现场施工的应用,从而使该技术难以得到推广和重视。直到近些年来,实时监测技术才得到专家的极大关注,监测技术得以快速发展。实时监控技术的概念,不仅在相关智能材料与结构国际研讨会上被提出,还成为一项专门的研究课题。在 1996 年国际结构控制工作会议上,专家学者在欧洲、亚洲和美国分别成立了实时监控专项任务小组,专门研究实时监测问题。从 1997 年开始,关于实时监测的国际专题研讨会,每隔一年都会在美国的斯坦福大学举行。2002 年 7 月,第一届欧洲 SHM(结构健康监测)国际专题研讨会在巴黎举行,会议集中讨论和总结了国际 SHM 领域的研究成果,并提出了有待进一步研究和解决的问题,此举极大地推动了监测技术的发展。公路隧道修筑与维护技术发达的国家,这项研究开展得比较早,并且这些国家的高速公路建设管理部门十分重视隧道安全性监控的研究工作。另外,许多国家的各级建设管理部门根据本国的地区特点,在大量隧道施工监控应用研究的基础上,投入了相当大的财力、物力,特别是对重大隧道工程设立了长期安全性监控系统,制定监控制度,并建立了严格的监控项目实施章程。

随着 20 世纪后期中国经济的腾飞、交通基础设施建设进入了一个前所未有的高速发展时期,大量的隧道逐步建成。但是无论在建设阶段还是运营阶段,这些隧道都可能会出现一些意想不到的异常现象。为减少或避免出现隧道病害多、维修难度大的情况,设计师要求从设计理念出发,在隧道施工和运营期间,对隧道结构的安全性进行实时监测。

我国从 1950 年开始,先后在国家高技术研究发展计划(863 计划)和攀登计划等重大项目中,投入了相当大的资金,用于扶植大型基础、结构健康自动诊断的研究,并且随后取得了一定的科研成果。实时监测系统的费用较高,我国目前主要在一些重点建设的大跨度桥梁工程中使用。例如上海徐浦大桥结构监测系统,该系统包括测量环境温度、桥梁应变、桥梁挠度、主梁震动、斜拉索震动和车辆荷载六个监测子系统;香港的青马大桥健康监测系统使用了近千个传感器来监测桥梁的损伤;江阴长江大桥也效仿青马大桥,安装了结构健康监测系统;在广州国际会议展览中心大跨度张弦梁中,赵新宇、舒宣武等人将结构预警系统作为实时监测系统的一个重要子系统,并且在该项目上实施应用。相对而言,隧道结构的安全性实时监测技术的发展,明显落后于桥梁建设的监测技术发展。一方面是由于科研人员和社会对隧道结构健康监测的关注度不高,另一方面是由于隧道结构的复杂性比较高和设备安装的难度比较大。随着监测技术的发展,监测数据的处理和应用不仅是发挥隧道监控最为关键的环节,更是技术含量比较高的一个环节。

归纳国内外隧道实时监测技术的发展现状,主要有以下几个方面:

(1) 应力应变类传感器比较成熟,主要有振弦式、电阻式、光纤光栅式等。

(2) 表观病害类监测传感器比较少,目前主要有裂缝计,通过点式监测裂缝宽度,但无法获得长度和密集度等参数。渗漏水监测方面主要有定位漏水检测绳,但只能对渗水部位进行定位,无法获取渗漏水病害参数。

(3) 结构位移监测方面,主要有静力水准仪(布设安装困难)、测量机器人(成本较高)和激光测距仪(布设安装困难)等监测设备。

综上所述,目前的传感器能够监测的指标形式比较单一,多指标监测时,监测系统繁杂。基于图像分析的监测具有一定的先天优势,通过简单的图像分析,可以同时获取表观病害和结构位移等多个参数,并发现新病害。目前,隧道表观病害监测装备 V1.0 已研发完成,尚有待优化,同时,基于图像的位移监测在土木工程试验和室外结构物监测方面发展已经比较成熟。

2.2 基于机器视觉的病害监测技术现状

随着信息处理技术和传感器技术的进步,针对隧道结构各种病害损伤情况的评价问题,有条件开发使用各种检测仪器。目前,对于隧道衬砌结构图像采集,多采用稳定性强、拍摄速度快、拍摄精度高的工业相机。多台工业

相机组成相机阵列,连续快速非接触拍摄整个隧道断面。但是这将会产生较大的数据量,这就要求系统可以通过图像处理自动准确识别病害的位置。

里斯本技术大学 H. OLIVEIRA 等提出一种基于图像动态阈值选择及非重叠的裂缝分块图像熵的裂缝检测分类方法,该方法能够在一定程度上对水平裂缝路面、竖直裂缝路面、杂乱裂缝路面以及完好路面进行正确分类,表明非重叠分块图像熵可以作为公路裂缝图像的裂缝特征来进行使用。

同济大学刘学增等以隧道衬砌渗漏水面积为检测目标,提出了一种包括去噪、锐化、分割、修正的一整套数字图像处理算法。

同济大学黄宏伟等针对渗漏水的红外图像特征,利用 MATLAB 编写的程序提取热图像中的渗漏水面积等信息,为隧道渗漏水车载动态检测软件系统的开发奠定基础。

同济大学王平让等提出了一种基于图像局部网格特征的隧道衬砌裂缝自动识别方法。

北京交通大学王耀东等提出了一种全局与局部相结合的预处理算法,以及基于连通区域的多级滤波算法,能较好地实现地铁隧道表面裂缝的检测。

北京交通大学朱力强等利用 Mask 匀光等预处理算法改善了隧道图像的质量,而后基于模板 Hough 变换、SVM(支持同量机)等分析方法对隧道表面裂缝图像各成分进行提取分析,提升了裂缝图像识别的准确度。

2010年8月,日本勘测检验公司开发了 MIMM 公路隧道检测车,由 MIS(移动成像技术系统)和 MMS(移动地图系统)两部分组成。其中, MIS 部分由 CCD 摄像机和 LED 照明设备组成,可以识别 0.2 mm 以上的渗水和裂缝。在普通公路隧道中,其探测速度可达 50 km/h,在高速公路隧道中,其探测速度可达 80 km/h。MMS 部分配备了激光扫描仪、数码相机编码器和 GPS。MIMM 可进行图像拼接,获得 3D 图像,绘制隧道病害扩展图。

2013年,西班牙的 Euroconsult 公司开发了隧道检查设备 Tunnelings。它能以 30 km/h 的速度探测公路隧道,检测精度为 1 mm,并且可以在所有类型的照明条件下运行,且提供高品质的数据。此外, Tunnelings 使用高速相机、自定义光学和激光线投影机,以获取 2D 图像和高分辨率 3D 剖面来检查隧道。目前,该装置已成功地在西班牙和日本的部分地区运用。

瑞士 Terra 研制的裂缝检测设备 tCrack 可用于城市轨道交通隧道裂缝检测,可检测宽度 0.3 mm 以上的裂缝,检测速度大约为 2.5 km/h。它可以记录每一个裂缝的三维坐标,tCrack 产生的文件可为裂缝检查、养护工作的规划执行和记录提供依据。

2017年, 同济大学的黄宏伟研制出了隧道检测系统 MTI-100, 这台机器最快的检测速度为 8.4 km/h, 识别精度为 0.3 mm, 但该系统需要一定的人工辅助来进行裂缝的检测。

2.3 隧道变形监测技术研究现状

隧道工程一般规模较大, 工程条件复杂, 要准确、快速、长距离、实时和大范围获得隧道围岩的变形数据和变化规律并非易事, 随着计算机和物联网技术的不断发展, 一些变形自动实时监测技术不断出现, 带来了一定程度的技术革新。

1. 多传感器集成的隧道变形监测技术

刘洪震提出了适用于城市交通繁忙、不易立尺地段的地表沉降观测新方法。该方法利用全站仪固定测站三角高程测量精度公式、三角高程测量, 可满足二等水准测量要求, 并根据大量的实测数据以及全站仪三角高程法与 NA2 水准仪法结果对比分析, 得出采用全站仪固定测站的方法。该方法可满足城市交通繁忙地段市政道路的地表沉降观测, 值得借鉴和推广。

贵慧宏从多传感器变形监测集成系统使用客户的总体业务流程和系统功能需求出发, 设计了具备允许多种传感器和 GPS 接入、多源测量数据集成管理、变形量实时综合解算和自动预测报警等特点的系统架构; 研究集成了多种传感器或测量系统构建 MSDMIS 的方式; 针对变形监测成果的单一化和时序性, 选择时间序列分析方法预测变形量。

李伟、孙立光在杭州地铁 1 号线某盾构隧道沿线选取了 3 幢建筑物进行静力水准监测, 总结分析了建筑物变形在时间和空间上的分布规律。

戴加东、褚伟洪通过工程测量中的应用实例, 充分体现了静力水准自动化监测系统的优越性, 证明液体静力水准测量是一种精密的水准测量方法, 对高差的观测精度可达到 20 μm , 甚至更高。可以预见, 集成多种新型倾斜传感器、数字静力水准传感器和 GPS 位置传感器等新型传感器的地表变形监测技术是未来的发展方向。

2. 测量机器人隧道变形自动监测技术

21 世纪初, 解放军测绘学院包欢、徐忠阳、张良琚开发了 TCA 自动化全

站仪自动变形监测系统。实际应用表明,该系统稳定可靠,可以胜任地铁结构变形监测的工作。

杨松林、刘维宁、王梦恕等用自动全站仪结合计算机组成隧道围岩变形量测及分析系统,提出全站仪双站自由设站三维坐标非接触量测、单站独立坐标测线、双站独立坐标测线等围岩变形量测的理论和方法,并建立相应的数学平差模型,使围岩变形非接触监测具有更好的可靠性和精度。同时,以全站仪机载软件为基础设计和开发了数据处理软件,在机载软件控制下,无须进行对中和量仪高,全站仪可自动完成对目标点的监测,由计算机进行所有数据处理、回归分析和预报,及时为隧道施工提供信息反馈。

刘永中利用测量机器人具有高智能、高精度、方便编程的特点,通过对测量机器人自动化变形监测的研究与应用,实现了地铁隧道在狭长空间的自动监测,解决了实时监测的难题。

李鹏、徐顺明通过徕卡 ADMS 测量机器人对深圳地铁新建区间运营中 1 号线盾构隧道进行的自动化监测实例,验证了自动化监测在地铁测量中具有的应用价值与前景。

测量机器人隧道变形自动监测系统已经有很多的应用案例,虽然可以自动监测成批的目标点,但由于安装棱镜数目有限,且测量机器人价格昂贵,整个系统造价较高,应用于隧道施工过程的防干扰保护问题较难解决,无疑为其广泛应用带来了困难。

3. 三维激光扫描变形监测技术

三维激光扫描技术又被称为实景复制技术,是 20 世纪 90 年代中期开始出现的一项高新技术,是继 GPS 之后又一项测绘技术的新突破。托雷提出一种基于三维激光点云的隧道断面连续截取方法,该方法在数据拼接和断面截取方面均能达到工程应用的精度要求,能够快速准确地提取出隧道的形变信息。李万莉、曹筠、周奇才等自行研制了隧道激光扫描监测车及拟合算法,并针对断面形变监测数据,结合开发的监测系统,提出一种断面监测数据融合的数学模型,将采集数据进行有效融合,能够比较准确地反映出隧道的变形情况,为运营隧道的形变监测提供直观可靠的数据。瑞士还采用动态测量方式把隧道激光扫描技术应用于隧道竣工验收测量,用于检测施工后的轨道状态能否满足施工及设计规范要求,同时检测车还可以对轨道进行动态检测。

三维激光变形监测技术突破了传统的单点测量方法,具有高效率、高精度的独特优势。三维激光扫描技术通过高速激光扫描测量的方法,大面积高

分辨率地快速获取被测对象表面的三维坐标数据，可以快速、大量地采集空间点位信息，为快速建立物体的三维影像模型提供了一种全新的技术手段。

4. 分布式光纤变形监测技术

近年来，光纤传感技术在隧道工程的应用逐渐增多，施斌、徐学军等重点介绍了光纤结构监测（SOFO）、布拉格光纤光栅（FBG）和分布式光纤传感器（BOTDR）3种光纤传感技术的基本原理、功能及其在隧道结构健康监测系统中的作用。研究成果表明，该技术应用在隧道安全监测和健康诊断中是十分可行的，也是十分有效的。丁勇等应用BOTDR分布式应变测量技术，对隧道拱圈截面变形进行了分布式应变监测。日本NTT公司开发了基于BOTDR的共同沟隧道监测系统，通过应变测量对日本名古屋的共同沟隧道进行损伤探测，10 km范围内其变形测量误差仅为0.1 mm，并通过室内试验对共同沟隧道监测系统的可靠性、抗震性和测量精度进行了验证。张帅军、李云以广州地铁5号线小北站工程为例，介绍了光纤传感技术的基本原理及光纤传感监测系统的组成，阐述其在城市地铁工程监测的应用方法和监测成果，通过对温度、混凝土应变规律、钢筋应变计的监测结果分析，表明光纤传感器耐腐蚀，反应灵敏且数据稳定，能够细微地反映出各种变化，在地下工程监测中具有广阔的应用前景。分布式光纤传感监测技术的优点，可以弥补目前在隧道工程中常用的检测和监测技术存在的不足，是新一代检测和监测技术的发展方向。

5. 基于影像的测量方法

摄影测量很早就应用于隧道变形监测。吴世棋、孔健等在20世纪90年代初期用近景摄影测量方法对某长大隧道进行了为期2年、6个周期的变形监测。曾卓乔、马莉等还研制了一套观测隧道变形的数字化近景摄影测量系统。系统采用一个手持式普通相机，在设有多个标志点（20~30个点）的观测断面上，摄取4张以上照片，扫描为二进制图像文件并由计算机进行像点量测。进入21世纪，刘大刚、王明年研究认为，数码摄像技术作为一种方便、快速、可靠的高科技技术，在隧道的测量中有着极大的发展潜力。田胜利、葛修润等提出一种基于数字化近景摄影测量技术的非接触测量方法，该方法使用非量测数码相机，不需在现场布设像控点，完全自由设站，可获得大量监测点在同一时刻变形的整体信息。

虽然摄影测量应用于隧道变形监测的研究已经持续一段时期，并且也产

生了一批富有创新的成果，但距离先进并实用的基于影像的自动测量系统还有一段距离，仍需深入研究。

综上所述，测量机器人、三维激光扫描技术以及摄影测量技术的诞生，使得隧道变形监测的自动化、智能化成为可能，一些新技术和新设备在实际工程中得到了应用，但大部分是在运营隧道中使用，且受成本和施工干扰的限制，很难在隧道施工过程中大规模使用，也难以替代人工，因此该监测技术未来必将朝着低成本、低功耗、抗干扰能力强的方向发展。

【 第 3 章 】 >>>>

隧道全寿命周期结构安全监测方法

3.1 主要监测内容与指标

根据隧道结构的受力特点，反映隧道结构安全的关键性指标主要包括结构应力状态、结构位移状态以及结构病害状态 3 类。其中部分指标属于检测评定指标，不随时间的变化而变化；而对于结构隧道结构安全监测，则需要通过长期观测的手段或动态变化的数据。结合目前的技术手段，对隧道工程能够做到长期监测的内容与指标如表 3-1 所示。

表 3-1 主要监测内容与指标

序号	监测项目	监测内容	监测指标
1	结构受力状态	二衬背水压力	水压力
2		初支与二衬接触压力	接触压力
3		二衬混凝土外侧应力	应变（应力）
4		二衬外层钢筋应力	
5		二衬内层钢筋应力	
6		二衬混凝土内侧应力	
7		二衬混凝土表面应变	
8	结构位移状态	结构净空断面	断面轮廓
9		结构拱顶沉降	变形
10		结构周边收敛	
11		结构错台变形	
12		路面底鼓变形	
13		路面不均匀沉降变形	

续表

序号	监测项目	监测内容	监测指标
14	结构病害状态	裂缝	形态、部位、长度、宽度、深度
15		渗漏水	状态、部位、面积、流量
16		起层、剥落	部位、面积
17		破损掉块	部位、面积、深度
18		路面积水	状态、部位、面积、深度

表 3-1 给出了隧道结构安全监测的通用内容与指标, 实际操作过程中需要根据隧道的实际情况选取合适的监测内容与指标, 具体的选取原则如下:

(1) 根据隧道检测报告反映的病害状况, 并根据现场踏勘选择监测段落和主要的监测项目。

(2) 根据所选的监测段落, 对结构安全性进行分析(必要时进行数值分析), 根据稳定性分析结果选取合适的监测断面。

(3) 根据实际调研、稳定性分析以及现有的成熟的监测技术与方法确定具体的监测内容与指标。

3.2 结构受力状态监测方法

应力测量是隧道结构试验的重要试验项目, 通过应力测量可以了解结构的应力分布情况。当前的技术条件难以对结构实现应力的直接测量, 通常对结构表面的应变量进行测量, 再根据材料力学中的胡克定律 $\sigma = E\varepsilon$ 转换成应力值, 即将隧道结构的应力测量转换成了对隧道结构应变的测量。应变测量的方法很多, 各种方法具有不同的特点, 本节对应变电测技术、光纤应变测试技术、振弦式应变测量技术、工具式表面应变传感器应变测试技术进行了详细归纳和总结, 并对各类测试方法的优缺点进行了比较。

3.2.1 应变电测技术

应变电测技术是应变测量中使用最广泛的一种测试方法, 它通过测量粘贴在结构表面应变片的阻值变化, 并转换为电压或电流的变化, 最后获得应变读数。其转换过程如图 3-1 所示。