

文章编号: 1001-831X(2001) 04-0254-8

# 数字式全景钻孔摄像技术与数字钻孔\*

葛修润 , 王川婴

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

**摘 要:** 数字式全景钻孔摄像技术代表了钻孔摄像技术的发展方向, 它的主要特征是全景技术和数字技术, 它获得的钻孔的数字信息是建立“数字钻孔”的基础。本文系统地介绍了数字式全景钻孔摄像技术的形成、理论基础、关键技术和应用情况, 提出了“数字钻孔”的基本概念, 分析了两者的相互关系。

**关键词:** 全景钻孔摄像; 数字钻孔; 平面展开图; “虚拟”岩芯图

中图分类号: P631.8

文献标识码: A

## 1 引言

岩体内的裂隙、节理、层理、断层等不连续结构面是工程地质研究的基础。由于它们具有很强的隐蔽性, 对其进行研究受到了限制, 因此一种先进、实用的探测技术、方法和手段是十分必要的。目前, 深部地质调查的主要手段是钻孔岩芯测定方法。虽然它简单、方便、直观、实用, 但是对于软弱或破碎岩体, 钻孔取芯率相对较低时, 完整、准确地获得钻孔内的地质资料则非常困难。这种利用人工进行测量、记录和分析的探测手段不仅工作强度大、工作效率低、人为因素多, 而且难以保证测量精度, 难以获得可靠的结果数据。因此, 在运用钻孔岩芯进行深部地质调查的同时, 不断地开拓和发展新的地质勘探手段当务之急。

随着科学技术的进步和发展, 地质勘探的新方法和新手段在不断地推陈出新。值得一提的是于本世纪中期发展起来的钻孔摄像技术, 它是利用光学原理直接对保持完整地质信息的钻孔孔壁进行探测的一种技术。这种技术发展的早期是模拟方式下以观察为主的钻孔照相和钻孔电视。但是, 随着数字视频技术和多媒体计算机应用技术的不断完善和发展, 一种新的技术展现在人们面前, 既数字式全景钻孔摄像技术。这种技术强调以数字方式对孔内多种信息进行采集、量测、存储、分析、管理、显示和应用, 而且具有三维和高精度的特征。正是因为这种技术的出现, 才使得“数字钻孔<sup>[1]</sup>”的概念应运而生, 可以说, 它是当今信息技术和数字技术发展的必然结果。当然仅仅有钻孔内的原始数字图像数据是不够的, 还必须利用其它手段建立与此相关的所有的文本文件, 并把所有的数据转换成可理解的信息分别以图形、图像、文本的形式提供服务。所以, “数字钻孔”可理解为对真实钻孔及其相关现象的统一性的数字化重现和认识,

\* 收稿日期: 2001-09-27

作者简介: 葛修润(1934-), 男, 上海人, 中科院武汉岩土力学所研究员, 中国工程院院士, 博士生导师, 从事岩体工程问题和数值分析方法以及岩体测试技术研究。

其相应的理论和技术主要包括数据结构理论、智能化信息提取理论、信息的认知理论、数字视频技术、多媒体计算机技术、三维虚拟现实技术等方面。

## 2 钻孔摄像技术的发展过程

### 2.1 钻孔照相

钻孔摄像技术起源于钻孔照相,随着钻孔电视的出现而逐渐被其取代。钻孔照相的最大优点是可以进入孔径较小的钻孔中,真实地再现深部的地质结构,它拓宽了照相术的应用范围,而它的基本思想和方法为钻孔摄像技术的发展奠定了基础。但是,由于受到当时技术水平的限制钻孔照相还存在着许多弊端,具体表现在:①缺乏实时性,④可靠性低,④精度低。

### 2.2 钻孔摄像

钻孔摄像系统,即钻孔电视<sup>[2]~[7]</sup>,分为钻孔黑白电视和钻孔彩色电视。钻孔黑白电视出现于 60 年代,到 70 年代得到推广应用,而钻孔彩色电视则出现于 70 年代末,至今仍在使使用。钻孔摄像除了具有钻孔照相的优点外,还具有实时监视能力,重复播放能力,并且提高了整个系统的可靠性和探测效率,可以说钻孔摄像系统基本上克服了钻孔照相中出现的问题,它比钻孔照相前进了一大步。

### 2.3 数字式全景钻孔照相

被钻孔电视取代的钻孔照相,随着计算机及其图形学的发展,又重新得到了应用。这次它以数字化为其特征,以全新的概念出现,它就是于 70 年代末发展起来的数字式全景钻孔照相系统。在该系统中,首次引入了全景钻孔图像的概念,即包含有三维信息的平面图像,它是钻孔孔壁的 360 图像经过光学变换而成,这种光学变换即为截头的锥面反射镜。全景钻孔图像与以前的钻孔图像相比有很大区别,主要表现在:前者的可视范围大,包括了钻孔孔壁的 360 图像,由于它是经过变换后形成的,所以它发生了变形,不容易被观测,即缺乏直观性;后者的观测范围虽小,但是它未经变换,不会发生变形,因此能直接观测。由于全景钻孔图像缺乏直观性,难以对其进行观测与分析。为了解决这个问题,不得不将全景钻孔图像还原成原来的三维图像。当然截头的锥面反射镜作为逆向变换以形成三维图像不失为一种好方法,但是在计算机和图形学得到广泛应用的时候,就显得有些过时了。此时,人们想到的是如何利用图形输入设备将全景钻孔图像中的地质资料数字化以及如何利用计算机模拟上述的逆变换以形成还原变换算法,并且利用这个算法对已数字化的资料进行计算与分析,这就是数字式全景钻孔照相系统的精髓所在,标志着钻孔摄像技术已开始进入数字化时代。

### 2.4 数字式全景钻孔摄像

不论是钻孔照相还是数字式全景钻孔照相,似乎总是停留在概念阶段。这些新概念、新方法的确为钻孔摄像技术的发展奠定了基础,但是它们本身却很快地被其后出现的钻孔电视或数字式钻孔摄像所取代。这不是因为它们的技术水平不够,而是当今科学技术的发展太快了。正是因为科学技术发展的这个特点,使得数字式钻孔摄像技术在当今科学技术(特别是多媒体计算机应用技术)的推动下,于 80 年代末期展示在人们面前,它的出现使钻孔摄像技术真正进入数字化时代。在这里提到的数字化与数字式全景钻孔照相中提到的数字化在意义上有很大区别。数字式全景钻孔照相是以图形输入板为数据输入装置获取照片上的资料数据,并对其进行分析处理,它的数字化处理只是针对钻孔照相的分析处理部分,因此只有部分数字化意义。数字式钻孔摄像技术提出的数字化是对整个钻孔摄像过程进行的,具有整体数字化意义。它是

通过对原始图像进行数字化,而不是对其中的资料进行数字化,这样做的目的是可以获得原始图像的坐标数据,从而对其进行还原变换计算和实时显示,并且也可以从中提取资料进行分析与计算。在统计分析方面,数字式全景钻孔照相的图像是以照片的形式保存的,即使可以通过模拟变换的方式显示在圆筒上,也不过只是范围很小的一幅图像,而且只能观察,不能保存和输出,更不能完成多幅图像的拼接、显示、保存和输出,这样就使得那些跨越多幅图像的地质资料的统计分析更加困难。然而数字式全景钻孔摄像系统的出现,彻底改变了这一切,它的图像是以数字方式存储的,原始图像可以经过处理,如插值、变换、拼接、增强、压缩等,也可以形成各种直观的图像供观测、计算、分析、保存和输出,而且图像清晰、色彩逼真、结果准确。

钻孔摄像技术发展至今,按其功能特点可分为四个阶段,分别列于表 1:

		功能特点					表 1
发展阶段	功能特点	结 构 完整性	资 料 完备性	监 视 实时性	数 字 化 功 能	三 维 图 像	统 计 分 析
	钻孔照相						
	钻孔摄像						
	全景钻孔照相						
	数字式钻孔摄像						

从表中不难发现,数字式全景钻孔摄像,以其卓越的功能特点,特别是在确定结构面产状、形成平面图像和三维图像以及统计分析等方面,是其它几种方法无法比拟的。总之,数字式全景钻孔摄像系统是集当今最先进的科技成果于一体的达到国际先进水平的智能型勘探设备,它的最显著特征在于全景技术和数字化技术,全景技术是数字化技术基础,而数字化技术使全景技术的实现成为可能,二者的结合正是该系统先进性的具体体现。

### 3 数字式全景钻孔摄像技术

#### 3.1 基本原理

取一段钻孔孔壁,视它为一段圆柱面,其平面半径为  $r$ ,高为  $h$ 。将该段圆柱面置于三维直角坐标系中,如图 1。

为了观察圆柱面,将截头的锥面反射镜放入圆柱面内,观察点位于锥面反射镜的上部,观察方向垂直向下,观察的图像是圆柱面的某一段图像经过锥面反射镜反射成像于锥面反射镜底部的某一平面或近似平面上的图像,称该图像为全景图像,如图 2(a)所示。实现全景图像的方法就是采用截头的锥面反射镜。

全景图像与圆柱面具有一一对应关系。

圆柱面经过锥面反射镜变换后形成的全景图像呈圆环状,圆环的内圆表示该段圆柱面的顶面圆,圆环的外圆表示该段圆柱面的底面圆,沿着圆环的径向变化反映了圆柱面的轴向变化,即  $z$  方向变化,如图 2(b)所示。

钻孔孔壁被视为一个圆柱面,它经过锥面反射镜变换成为某一平面图像(即全景图像),这种变换是通过硬件方式实现的,称为硬件变换。然而全景图像在经过数字化处理和建立相应的坐标系统之后,根据它与圆柱面具有的一一对应关系,通过计算机软件实现将其还原成真实的

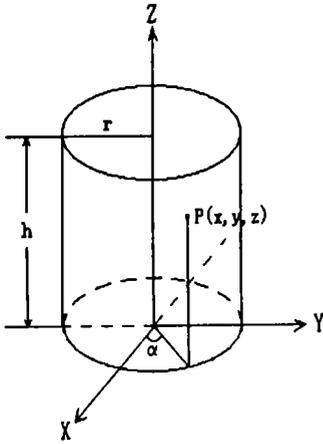


图 1 三维模型

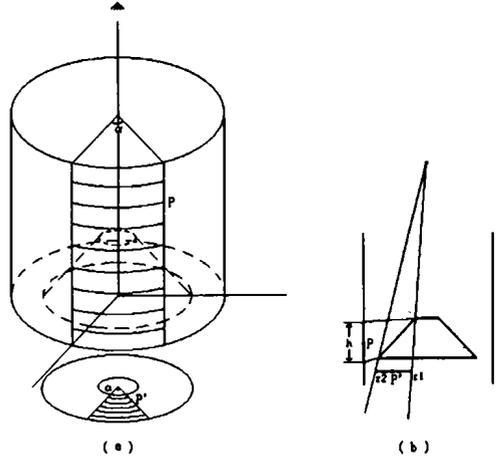


图 2 全景图像的形成示意图

钻孔孔壁图像,这种变换称为软件变换。软件变换是硬件变换的逆变换,也是该系统实现的基础。这种数字化的钻孔孔壁图像,经过计算机算法处理,可以用多种形式表示,如平面展开图和“虚拟”钻孔岩芯图,也可以对其进行量测和计算。

### 3.2 关键技术

数字式全景钻孔摄像技术是对钻孔内的全部地质信息从采集、量测、存储、分析、管理,到显示和应用的全过程,也是一系列技术方法的总和,因此,在可靠性、精细程度、自动化程度等方面必须满足人们的要求。这些技术方法依赖于相关科学技术的发展,其中主要包括两个大的方面:

#### (1) 全景技术

全景技术的核心是如何形成包含有空间信息的钻孔孔壁的全景图像。正如前面介绍的截头的锥面反射镜,它以硬件的形式实现了某一段钻孔孔壁的 360 图像到全景图像的映射变换,这种变换是模拟式的,形成的全景图像是平面图像,但包含有局部的三维信息。由于全景图像中的局部三维信息不能真实地反映钻孔的实际空间信息,因此,必须为每一帧全景图像建立实际的空间信息,这就需要在全景图像中叠加相应的实际空间信息,而钻孔内的实际空间信息可由全景图像所处的深度和平面方位确定。深度由专用的测量轮直接获得,它是一个高精度的数字量,有两个作用:其一是确定全景图像的准确位置;其二是进行自动探测的控制量,也是数字式全景钻孔摄像技术具有较高自动化程度的标志。深度和全景图像具有一一对应关系,可由二种方式确定:其一是把深度作为一个数字量,在由计算机控制捕获时,将它与捕获的全景图像对应,这种对应关系是不连续的,仅仅针对那些能覆盖整个钻孔的全景图像;其二是把深度作为一个字符图像,直接叠加到全景图像中,建立深度与全景图像实时、同步、连续地变化,这种对应关系是实时的、全局的,针对每一帧全景图像。平面方位直接由磁性罗盘提供,它安置于截头的锥面反射镜的中央,在获得全景图像时磁性罗盘的方位图像直接叠加其中,因此,全景图像和平面方位实现了实时、同步地变化。钻孔摄像是一个连续过程,其获得的全景图像与相应的深度和平面方位也都将同步地变化,不论采用哪种叠加方式,全景图像与相应的实际空间信息的对应关系,都能为连续地观察和量测整个钻孔奠定基础。

#### (2) 数字技术

数字技术的关键在于如何对钻孔内的多种信息进行数字化及其综合处理。在全景图像中不仅有钻孔孔壁的图像信息而且还有相应的实际空间信息,它们以视频图像的形式传输,即模拟信号。视频图像信号可以被一种专用的图像卡实时地转换为数字图像,这一过程被称为视频图像的数字化。视频图像数字化的转换方式有二种:其一是连续方式,主要用于对全景图像及其变换图像的实时显示、快速观测以及现场分析,它具有非常大的数据流量和计算量,但不用保存数据;其二是静态方式,主要用于对全景图像的采样,并快速存储。在整个转换过程中,这二种方式在不断地交替进行。数字化的全景图像对应的深度值可由下面二种方法确定:其一是直接将计算机获得的深度值与相应的全景图像建立对应关系;其二是通过对叠加于全景图像中的深度字符图像的识别,获得其深度值,并建立对应关系。在这二种方法中,深度值都用于控制对全景图像的采样,并写入被采集的数字图像中。除了深度值的获取外,还需要确定全景图像的方位,这可以通过对叠加于全景图像中磁性罗盘的方位图像的识别来实现。

### 3.3 表现形式

作为一种摄像技术,它主要以图像的形式表现出来,可分为连续的和静止的图像。连续的方式主要用于对整个钻孔进行动态地观察,如孔隙水的流动、水位面的涨落等。静止图像的数量相对较少,但覆盖整个钻孔。它们可以被处理成各种各样的便于人们观察的图像,如在后面将展示的平面展开图和“虚拟”钻孔岩芯图,也可以对这样的多幅图像进行无缝拼接形成大幅图像。当然,这些图像只是该技术表现形式的一个方面,而另一个方面则是利用这些图像并从中获得所需的各种信息,在对这些信息的加工处理后,形成各式各样的图形、图表以及文本文档。

## 4 数字式全景钻孔摄像系统的研制与应用

### 4.1 系统研制

90年代末期,我们成功地研制出一套具有自主知识产权的数字式全景钻孔摄像系统。它的出现一方面代表了钻孔摄像技术的发展方向,填补了国内空白;另一方面为“数字钻孔”这一新概念的提出奠定了基础。该系统的总体结构如图3所示,它由硬件和软件两大部分组成,下面分别给予介绍。

硬件部分由全景摄像探头、图像捕获卡、深度脉冲发生器、计算机、录像机、监视器、绞车及专用电缆等组成。其中全景摄像探头是该系统的关键设备,它的内部包含有可获得全景图像的截头锥面反射镜、提供探测照明的光源、用于定位的磁性罗盘以及微型CCD摄像机。全景摄像探头采用了高压密封技术,因此,它可以在水中进行探测。

软件部分包括用于现场使用的实时监视系统和用于室内处理的统计分析系统两大部分。其中实时监视系统用于探测过程的实时监视与实时处理,实现对硬件的控制,对图像的快速存储、快速还原及快速显示,对探测结果的快速浏览等;统计分析系统用于室内的统计分析以及结果输出,图像数据来源于实时监视系统的结果,优化的还原变换算法保证了探测的精度,实现单帧和连续帧播放,实现对图像的处理,特别是图像的无缝拼接,保证了多幅图像连接处的无接缝痕迹,具有计算与分析能力,包括计算结构面产状和隙宽,实现对探测结果的统计分析,建立数据库等。

### 4.2 基本应用

自从数字式全景钻孔摄像系统的研制成功,它已在多项重大的岩土工程项目中得到了应

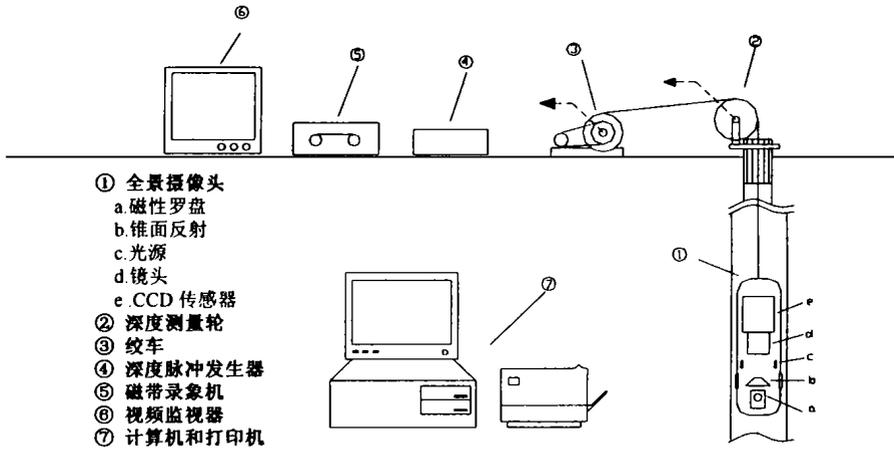


图 3 系统框图

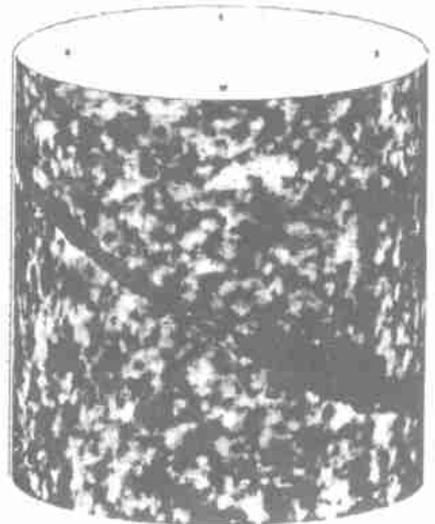
用,取得了圆满的成功,并得到了令人满意的结果。值得一提的是在三峡工程和核废料埋设工程中,其获得的清晰图像和对孔内地质资料的准确计算、统计及分析,为工程的顺利实施提供了直观、可靠的依据。下面将其应用的情况作简要介绍。

(1) 确定结构面产状和隙宽

结构面一般被认为是一个平面,而平面可由空间中的三个点唯一确定,因此,在具有空间坐标的钻孔孔壁图像中选择结构面上的三个点,只要这三个点不在同一直线上,就能确定结构面产状。结构面的隙宽可由钻孔孔壁图像中的二个点直接求得。图 4 为典型的缓倾角裂隙的一组图像,其中裂隙的产状为 S18 E 32°;平均隙宽为 5.158mm。



(1) 平面展开图

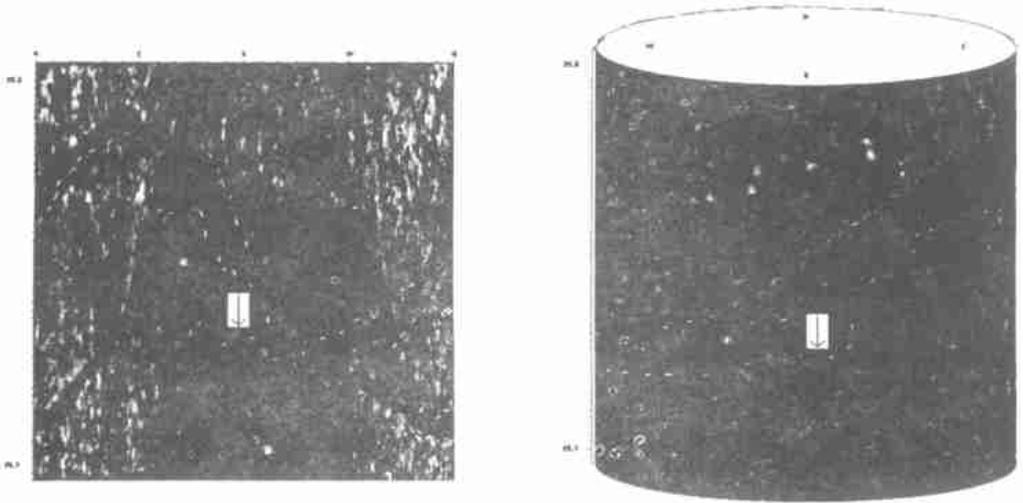


(2) “虚拟”岩芯图

图 4 典型的缓倾角裂隙

(2) 识别不同的岩层

在不同岩层的分界处,由于岩石结构和性质发生了变化,必然导致钻孔孔壁图像的变化,主要表现在:颜色、明暗度、纹理、颗粒大小的变化。由于数字化的全景图像是真彩色图像,它具有色彩逼真、高清晰度等特点,因此很容易识别图像在分界出的变化。如果将图像再作特殊处理,则效果更好。图 5 为典型的岩层分界处的一组图像。



(1) 平面展开图

(2) “虚拟”岩芯图

图 5 典型的岩层分界

### (3) 检查混凝土浇注质量

混凝土浇注质量的好坏直接影响到工程的质量和安 全,而利用该系统对其进行检查则具有清晰、直观、快捷等特点,因此,它的检查结果将为评价工程的施工质量提供可靠的依据。

### (4) 探明地下水活动情况

对孔内地下水位的变化,裂隙、溶洞及断层水流情况进行探测,为钻孔内水文地质调查提供直观可靠的依据。

## 5 数字钻孔与数字式全景钻孔摄像技术的关系

正如在引言中所阐述的,“数字钻孔”是对真实钻孔及其相关现象的统一性的数字化重现和认识。虽然它是一个新概念,但是,它涉及到的大部分理论、技术、数据和应用都与现有的直接相关。这种相关性不代表等同性,它仍然需要一些全新的理论和技术,因此,“数字钻孔”与现有工作的根本区别在于它是从更高的层次、系统论和一体化的角度来组合和应用已有和正在发展的理论、技术和数据,从而更广泛地、更深入地、更有效地为国民经济建设服务。明确“数字钻孔”与当前地质勘探技术发展的关系有助于深入认识和理解“数字钻孔”,把握当前地质勘探技术的发展方向和目标。

### 5.1 数字式全景钻孔摄像技术是“数字钻孔”获取信息的基础

在“数字钻孔”中,各种信息来自对钻孔进行各种不同探测的结果,包括钻孔的图像信息、空间信息、各种物探和钻探的结果,它们需要进行定位和组织,并建立“数字钻孔空间信息框架”。该框架的核心是由数字式全景钻孔摄像技术得到的钻孔图像信息和空间信息组成的最基

本的数据集, 各种物探和钻探的结果在经过数字化后以文档的形式加入该框架, 并建立与钻孔空间信息的对应关系。该框架的内容一般包括钻孔的空间模型、变换的数字图像、统计结果的图形图表、各种物探和钻探结果的记注等。“数字钻孔空间信息框架”一方面为探测和分析钻孔内的地质特征提供了最基本的数据集; 另一方面为添加各种与空间位置有关的信息提供了坐参参考。从而实现对“数字钻孔”的各种信息进行有效的定位、组织、集成和应用。

## 5.2 数字式全景钻孔摄像技术为“数字钻孔”提供技术支援

数字式全景钻孔摄像技术是实现了对钻孔空间信息的获取、量测、存储、分析、管理、显示和应用的重要手段, 它的不断发展为“数字钻孔”的建立提供了可靠的技术保证。高清晰度、高精度、深或超深型的数字式全景钻孔摄像系统的研制和应用, 单孔或多孔的统计分析技术的进一步完善, 各种物探钻探技术的不断发展, 都为“数字钻孔”各种数据的及时更新与更多、更广的信息提取提供了保证。三维地层信息系统的研究与发展, 面向对象的软件体系结构的出现, 真三维图像的分析 and 显示, 都为“数字钻孔”的信息查询和应用提供了方便。虚拟现实技术的发展和在地下空间信息表示中的应用为“数字钻孔”的广泛应用创造了条件, 它把抽象的数据变得更加直观、可操作, 从而满足各种不同层次的需要。

## 6 结 语

“数字钻孔”的提出是数字化和信息化的必然产物, 它不仅在当前的国民经济建设中而且在未来的知识经济社会中都具有十分重大的作用。它所提供的数据和信息还将在水利、土木、能源、交通、地质、矿山、环境等领域产生显著的社会和巨大的经济效益。数字式全景钻孔摄像技术作为“数字钻孔”的技术基础将得到迅速发展, 一方面“数字钻孔”的研究和建设为数字式全景钻孔摄像技术的发展创造了条件; 另一方面数字式全景钻孔摄像技术的发展为“数字钻孔”的建设提供了强有力的技术支持。

数字式全景钻孔摄像系统的研制成功, 标志着我们在该技术方面已经达到了国际先进水平, 也为“数字钻孔”的提出奠定了基础。目前, 该系统已形成了系列产品, 也成功地地在多项重大的岩土工程项目中得到了应用, 取得满意的结果。同时, 也培养了一大批具有较高素质的中青年科研骨干, 为学科的发展作出了贡献。最近, 在昆明举行的第十三届全国发明展览会上, 该项技术获得了金奖, 得到了许多专家的高度评价。

## 参考文献:

- [1] Al Gore, The Digital Earth: Understanding our planet in the 21st Century at the California Science Center [J]. Los Angeles, California, on January 31, 1998.
- [2] 王德福, 于景良, 孙鼎俊, 等. 侧视式孔内电视系统测量孔斜的研究[J]. 大坝观测与土工测试, 1998, V2(1).
- [3] 于景良, 王德福, 倪志刚, 等. 全景电视系统的研究[J]. 天津大学学报, 1990, (3) 2P91~97.
- [4] 王德福, 于景良, 孙鼎俊, 等. 全景式水井检测彩色电视系统的应用[J]. 探矿工程, 1998(3).
- [5] Side Scan Down Hole Video Tool Having Two Camera[J]. United States Patent, US 565261.
- [6] Beyer, R.; Jacobs, A. M. Borehole TV[J]. Engineering and Mining Journal. V187, n5, May 1986, P36 - 38.
- [7] Beyer, R.; Jacobs, A. M. Borehole Television for Geotechnical Investigations. International Water Power & Dam Construction[J]. V38, n9, September 1986, p16-18.

# UNDERGROUND SPACE

Vol. 21 No. 4

(Serial No. 87) Quarterly

Dec. 2001

## CONTENTS AND ABSTRACTS

### · Papers ·

Investigation on Metro Construction in Russia ..... QIAN Qihu(241)

[ **Abstract** ] Based on investigation into Russian metro and acquaintance with the metro in large cities of other countries, the change and development of metro design and advance in construction method in Russia were introduced. Introduced in particular is the principle of metro lines selection, the distance between metro stations in large cities of different countries, design of metro lines, protection from noise and vibration and design of metro buildings and structures. The versions and classification of metro stations were analyzed as well.

[ **Keywords** ] Russia; metro design; transition station; separated running; parallel running

Digital Panoramic Borehole Camera Technique and Digital Borehole ... GE Xiu-run et al(254)

[ **Abstract** ] Digital Panoramic Borehole Camera Technique (DPBCT) represents a direction of development for borehole camera technology. Its main characteristic is panoramic technique and digital technique. The digital information gained in borehole is the basis of setting Digital Borehole(DB). In this paper, the formation, basic theory, key technique and application of the DPBCT are discussed systematically. The basic conception of the DB, and the relationship between DPBCT and DB is analyzed.

[ **Key words** ] panoramic borehole camera, digital borehole, expanded image, virtual coregraph

Progress in Analysis of Slope Stability ..... ZHENG Yingren et al.(262)

[ **Abstract** ] In this paper the progress in analysis on slope stability by limit equilibrium and finite element methods was introduced. Based on limit equilibrium, an equation for calculating the safety factors of stability of multi-step slope and the angle of sliding surface has been derived, which is important for design of rock slope. A united equation for present various slice methods has been derived. For non-strict slice method the safety factor can be obtained by one equilibrium equation given the orientation of force action between the slices. For strict slice method the safety factor can be obtained by two equilibrium equations given the orientation or the point of force action between the slices. The united equation is a simple iterative one and the calculation can be performed simply with high accuracy. Two methods for obtaining safety factors of slope stability by FEA have been presented.