

谈地铁轨道监测的发展：从人工到自动化

金卫民

上海市测绘院第三分院

摘要：地铁在缓解城市交通压力方面有着重大的作用，然而随着国内城市轨道交通的迅猛发展，地铁施工和运营事故却逐渐频发。文章从近年国内地铁安全事故的数据出发，说明了地铁轨道监测的必要性。基于此，阐述了轨道监测的大体发展，主要概括人工监测以及自动化监测。其中以地铁沉降监测为例作具体描述，比较两种方法的优劣。最后对未来人工和自动化的结合做了简单的介绍。

关键词：地铁轨道；人工监测；自动化监测；沉降监测

一、监控需求

从改革开放之前只拥有一条线路，23.6公里的地铁里程，到目前的4642公里，中国地铁的发展速度是惊人的。而在地铁建设的热潮背后，地铁工程的安全及风险管理却并没有及时赶上这种建设速度，地铁施工和运营事故的逐渐频发已不可被忽视。对我国近十年地铁施工事故的统计分析工作可见[1]和[2]，其提供的一张图表值得被注意：



图1 我国内地2003~2017年地铁施工事故统计

由此可见我国地铁安全事故居高不下，而其中的原因是复杂的。在建设经验上本国存在不足，相比较伦敦地铁建设的140多年的历史，我国城市轨道交通建设历史只有短短的50年。同时，城市轨道交通本身就是高风险工程，周边环境的恶劣和地质条件的复杂，时时考验着前期设计理论的完善性和现场施工的技术。在建设热潮的推动下，地铁工期又普遍偏紧。相较国外，工期长且耗资大的地铁项目必定伴随着缜密细致的调研，工期时间充分。想要从根本上解决安全问题尚需时日，但安全问题是迫在眉睫的。

因此，通过对施工期和运营期隧道进行及时地监控或监测来高效地保证地铁隧道结构的安全是必要的。轨道交通在建设期间进行结构本体及周边环境的变形监测异常重要。地铁隧道通常位于软弱破碎岩层，地质条件稳定性相对较差。如果对地铁隧道结构变形监控不力，将会出现围岩迅速松弛，发生隧道冒顶坍塌、地表沉降、建筑物管线等变形，对地铁结构本体及周边建筑等的安全构成威胁。另一方面，地铁的运营过程和隧道周边地下环境的变化也会引起地铁结构的变形，尤其在地铁保护区内进行的建设施工对地铁结构的影响最为明显。不少地区对此类安全监控需求及其执行标准已纳入立法，例如《北京市轨道交通运营安全条例》和《南京市轨道交通条例》等。

二、人工监测

一种传统的地铁监护方法则是人工监测，本文将通过轨道沉降结构沉降监测这一特例来作详细阐述。

地铁隧道是承载列车运行的构筑物，轨道结构体狭长，柔性度大且埋深浅。若地铁隧道周围有新的工程项目，则施工过程中引起的土体变化，将极易对狭长的隧道主体结构造成影响。在运营过程中，如果产生结构受力失衡情况，也不可避免地促使隧道发生局部变形。这种主体结构的变化将进一步造成轨道线形的变化，而地铁高速且安全的运行对于轨道的平滑程度有着严苛的要求。对地铁轨道结构变形保持时刻监测是必要的，检测作业将监测结果及时反馈各方单位，以此保证轨道交通的正常运营并杜绝安全事故的发生。

监测隧道结构的沉降监测指的是对隧道内垂直位移量的观测，主要检测目标有隧道结构底板沉降，更本质的是对道床的观测。监护作业包括区间隧道和隧道与车站交接处的沉降监测，以此反应主体结构在垂直方向的提升或下降的程度。可用的传统人工观测方法有三角高程法和几何水准法。

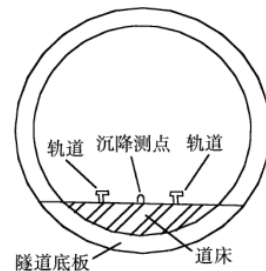


图2 沉降监测横断面示意图

进行区间隧道沉降监测作业时，监测点一般布设在道床的两轨之间，平均每隔50~60米设1个监测点，如果地质条件较差则需要增加额外的观测点。对隧道与车站交接处的沉降监测则比较简单（如图3所示），可以在隧道与车站交接缝两侧约1米处的道床上设立一对沉降观测点，用相同的测量方法挂差两点之间的高低变化，当偏差变化量大于3毫米时应视为预警，大于5毫米则应当立即汇报并采取相关措施。

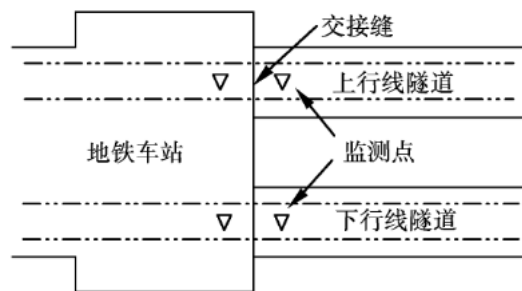


图3 隧道与车站交接处的沉降监测

三、人工监测的弊端

虽然人工检测是基础的，不可能被完全代替。但它也面临着一些难以避免的弊端，这里将通过三个方面来分析这些问题。

（一）作业的时间和空间限制

对地铁的人工监测作业一般遵从事先制定的实施方案。于是，在监测人员出入隧道的时间上是有严格安排的，每次的人工监测作业时间平均也被限制在2~3小时之间。人工监测无法获取运营期间结构的变形状况。因为需要完成的监测项数目较多并且每项由各个不同的监测作业组负责，各作业组需要穿插完成各自的工作，从而加大了监测难度。同时，隧道内繁多的基建设备也

给监测工作带来一些潜在的安全隐患；

(二) 地铁环境的特殊性

由于地铁隧道线路较长，实行每次监护需要逐环进行检查。隧道内灯光亮度不足，工作中充分的人工辅助照明是必要的。从[6]的工作中，可以看出地铁隧道病害的种类是繁多的，按大类可分有渗漏水、管片损伤、管片错台、接缝张开和道床与管片脱离。而每类病害的判别方法不尽相同，对监护人员的经验水平有着较高的要求；

(三) 监护所面临的现实情况

到2020年，我国轨道交通里程预计将超过8500公里，然而人工监测只能在有限的离散监护站点进行作业，其结果并不能全面反映隧道结构的总体形变趋势。传统的人工监测已经不能很好地满足当今和未来的需求，对更全面、更高效、更及时监测方法的需求迫在眉睫。因此，自动化和智能化监测已成当今趋势。

四、自动化监测

回顾轨道沉降结构沉降监测这一问题。除了上述所提到的两种人工检测法，如今更常用的一种方法则是液体静力水准法。液体静力水准法，即通过静力水准仪进行沉降观测，是使用液体连通器连接两个储液传感器，应用液体静止时在重力作用下保持同一水平的原理计算两地高低偏差值。如图4所示，为了计算A和B两个平面的高低差，分别设立储液器a和b在各个平面上。它们之间通过连通器相连，所以在静止状态下，两个容器内液面的绝对高度是一样的。由此可知，两个液面相对高度的差就是两个平面的高低差，根据读数可得高度偏差为 $H_a - H_b = (a_1 - a_2) - (b_1 - b_2)$ 。

这三种监测方法都各有他们的优点、缺点、适用性和局限性。液体静力水准仪利用液体静止时在重力作用下保持同一水平的原理监测高低偏差，不需要前后透视。由此，该方法比传统的人工监测方法更适合地铁隧道的狭长地形特点，完全适合地铁隧道内的工作环境。同时，液体静力水准仪观测精度高，监测过程中无须人工干预，并且可以实现24小时全天候不间断监测，尤其是在地铁运营期间仍可时刻进行观测。这种方法的缺陷则在于测量结果的精度容易受到仪器周围气压和温度变化的影响。若监测系统中如果存在局部或者不均匀的温度变化（例如平面A周围温度升高，但平面B周围温度降低），则两个容器中液面的升高或者降低量就会不同（温度较高则液面会偏高，而温度较低则偏低），对测量精度的有着严重的影响。另一方面，地铁运营过程中如果引起较强的空气流动，从而产生的气压变化也会造成监测结果的偏差。

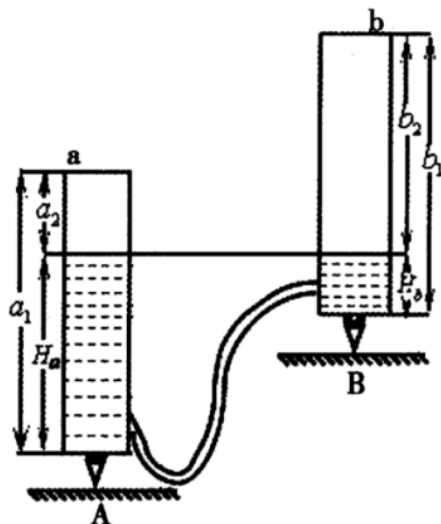


图4 液体静力水准仪

虽然液体静力水准法同样存在着一些弊端，但它在当下的广泛使用是有原因的。参照第三部分对人工检测弊端的分析，液体静力水准法在时间上不再有很大的限制，全天候的监测时刻反应着轨道情况。在设立监测点后，监测过程不在需要人工干预，作业过程中对空间上的要求不复存在。这种方法对地铁特殊工作环境的适应度也较高，仪器工作过程不再需要辅助灯光，通过合理的设置多个监测点可应对地铁轨道狭长的特点，也同样符合如今高速建设下的监护需求。方法被证明是实用可靠的，人工检测数据和自动化监测数据在[5]中进行了比较，两种方法的结果是非常相近的。

五、进一步的研究

随着地铁里程的高速扩张以及对精度要求不可避免的提，单一的监测手段，无论是手工监测还是自动化监测，都不足以应对未来的监测需求。追求人工手段和自动化系统的结合，即智能化监测，是大势所趋的。其中典型的一种方法则是构建项目信息网络云平台，其结构组成可见图6。这种平台的优势之一是信息共享，工程项目负责人可时刻查阅轨道监测数据，则在异常情况发生时可以与监测单位相合作，更本质地解决异常问题。另一个优势则在于数据分析，大数据时代下，丰富的数据分析和人工智能方法可以用来处理平台上所储存的监测数据，从而预测未来异常情况发生的时间。

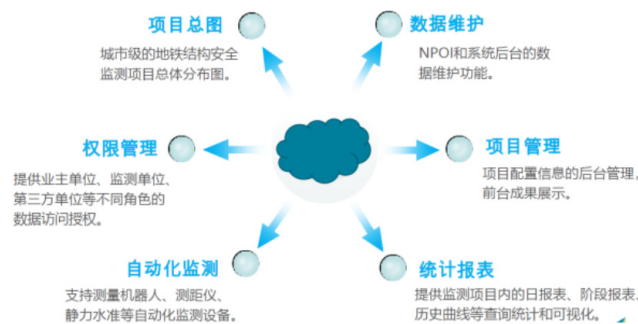


图6 网络云平台的组成

参考文献

[1] 李皓燃, 李启明, 陆莹. 2002-2016年我国地铁施工安全事故规律性的统计分析[J]. 都市轨道交通, 2017(1).

[2] 王勇, 赖发宇, 陈秋兰, et al. 我国地铁施工事故统计分析与研究[J]. 工程管理学报, 2018(4): 70-74.

[3] 段伟, 王敏, 钟金宁, et al. 地铁隧道结构稳定性自动化监测系统的研究与应用[J]. 测绘通报, 2015(9).

[4] 黄腾, 孙景领, 陶建岳, et al. 地铁隧道结构沉降监测及分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(2): 262-266.

[5] 韩易. 地铁保护区沉降自动化监测与人工监测的数据对比分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2016(2): 186-188.

[6] 乔书光. 地铁工程结构病害研究[J]. 湖北广播电视大学学报, 2009(07): 162.