

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2022.0006

程德虎,郝泽嘉,何金平.引调水工程渠堤运行安全监控多指标评判准则[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):54-61. CHENG D H,HAO Z J,HE J P. Multi-index evaluation criterion for operation safety of the canal in water diversion project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(1):54-61. (in Chinese)

引调水工程渠堤运行安全监控多指标评判准则

程德虎¹,郝泽嘉¹,何金平^{1,2}

(1.南水北调中线干线工程建设管理局,北京 100038;2.武汉大学水利水电学院,武汉 430072)

摘要:为解决单个测点的定量数值安全监控指标难以实现渠堤工程整体安全监控问题,需要建立基于多源信息的渠堤工程安全定性评判准则。在将效应量测值异常现象归纳为数值大小异常、变化过程异常、变化趋势异常和变化规律异常等基本表现形式的基础上,汲取长距离引调水工程安全运行的工程经验和专家知识,基于不同测点测值异常表现上的关联性和空间分布上的关联性、不同监测效应量之间相互作用和相互影响的关联性、不同特性渠堤工程破坏机理在工程中的外在表现等因素,构建融合多测点、多效应量和巡视检查的渠堤工程运行安全多指标评判准则。定性安全评判准则与定量数值监控指标相互配合,可更好地保障引调水工程的安全运行。

关键词:引调水工程;运行安全;多源信息融合;多指标;评判准则

中图分类号:TV64 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



引调水工程是解决水资源时空分布不均造成部分地区水资源严重短缺问题的重要途径。据统计,截至 2020 年底,世界上已有 40 多个国家和地区建成了 350 余项大型调水工程^[1-2]。

南水北调工程是实现我国水资源优化配置、促进社会可持续发展的重大战略性基础设施,是一项“功在当代利在千秋”的宏伟生态环境工程^[3]。南水北调工程安全不仅是工程本身的安全问题,而且关系到沿线地区公共安全,确保南水北调工程安全对国民经济建设和社会发展稳定都具有重要意义^[4]。

监控指标是判断工程运行性态是否正常的一种科学判据^[5],利用工程监测资料拟定效应量运行安全监控指标,可以有效识别工程所处的安全状态,及时发现工程潜在的安全隐患,从而实现对工程的健康诊断和安全预警^[6-8]。目前调水工程安全监控研究主要集中在监测系统^[9-11]、数学模型^[12-13]、安全预警^[14]等方面,对监控指标的研究尚不深入。

监控指标的表现形式包括定量数值和定性准

则。定量数值主要是针对单个测点监测效应量的数值大小及其变化趋势所规定的安全界限值,定性准则是融合多测点多效应量监测信息而形成的若干定性评判准则或模型。

拟定定量监控指标的方法可概括为结构分析法、监测模型法和概率分析法^[15-17]。结构分析法基于结构稳定或强度条件,针对特定荷载组合工况,采用结构计算或数值模拟等方法计算效应量在该工况下的理论值,作为效应量实测值的监控指标;监测模型法基于监测数学模型可有效描述监测效应量变化规律的思想,以监测模型剩余标准差 S 为依据,结合统计学“3S 准则”,以置信区间作为效应量实测值的监控指标;概率分析法将监测效应量视为独立的随机变量,基于概率论中的极值原理和工程中的失效概率等概念,拟定在相应失效概率下效应量的估计值,作为效应量实测值的监控指标。结构分析法和概率分析法属于状态控制,主要针对不利荷载组合工况的监控;监测模型法属于过程控制,适用于效应量的全过程安全监控。

收稿日期:2021-08-18 修回日期:2021-09-29 网络出版时间:2021-10-18

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20211015.1608.004.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0406906)

作者简介:程德虎(1962—),男,湖北天门人,正高级工程师,主要从事水利工程建设 and 运行管理研究。E-mail:chengdehu@nsbd.cn

定量监控指标直观明确,应用方便,但针对的是单个测点,监控的是局部性态。引调水工程渠堤线路长,工程规模大,建造条件和运行条件复杂^[18],仅靠单个测点的定量数值指标难以全面监控工程安全,需要综合考虑多个测点、多种监测效应量的监测信息来实施工程的整体安全监控。同时,工程安全本身是一个具有模糊属性的不确定性概念,在边界上难以采用一个精确的、绝对的数值来界定。此外,表征工程安全的指标并不是都可以采用定量数值来衡量的,有些需要采用定性的方式来表达。因此,在研究定量数值监控指标的同时,也应研究定性安全评判准则。

定性评判准则以多测点多效应量监测信息和巡视检查结果等多源信息为基础,根据工程的作用机理(失效模式)和运行特点,依据工程经验和专家知识,构建基于多源信息的定性综合评判准则,以此对工程安全作出评判。定性评判准则是工程安全监控指标的一种重要表现形式,在判别工程运行性态、实施工程安全监控中具有特殊的重要地位,与定量数值安全监控指标相互配合,共同保障工程安全。现有研究在多指标融合评判模型方面已取得了一些成果^[19],但在定性评判准则方面,由于涉及对工程经验和专家知识的凝练,集成难度较大,挑战性较强,因此目前尚未取得系统性的研究成果。为此,本文以南水北调中线干线的渠堤工程为例,在对效应量测值异常表现形式进行总结分析的基础上,结合调水工程安全运行的工程经验和专家知识,分别针对多测点、多效应量监测信息和巡视检查结果,凝练出渠堤工程运行监控的若干定性评价准则,为渠堤工程安全运行提供一种技术保障。

1 测值的异常表现形式

工程运行性态异常,最直观的表现就是监测效应量实测值出现异常。对单个测点测值异常主要表现为数值大小异常、变化过程异常、变化趋势异常和变化规律异常4种基本形式。

研究测值的异常表现形式,可为识别工程异常现象和安全隐患提供科学依据,为建立基于多指标融合评判准则提供分类基础。当多个测点、多种效应量同时出现同一类型或多个类型的异常现象时,通过分析这些异常现象在不同测点、不同效应量之间的内在关联性,可实现对工程运行性态的综合判断。

1.1 数值大小异常

在各种荷载组合的作用下,效应量测值的数值大小应在一定范围内变化。效应量测值大小异常是指实测值在数值上超出了合理的变化范围,数值明显偏大或偏小。效应量的合理变化范围,可根据效应量的变化特性和是否具有监控指标等因素来确定。

1.2 变化过程异常

在工程正常运行条件下,效应量的变化是一个渐变的过程,不应该出现突变。若测值序列中出现了突变,则表明效应量变化过程出现异常。测值突变主要有3种典型的表现形式,分别为尖点型突变、台阶型突变和渐变型突变。

尖点型突变的基本特征是:在该时刻出现了一个孤立的、与之前及之后时刻测值明显偏大或偏小的测值,在过程线上表现为出现一个或数个尖点,见图1的测值A和测值B。

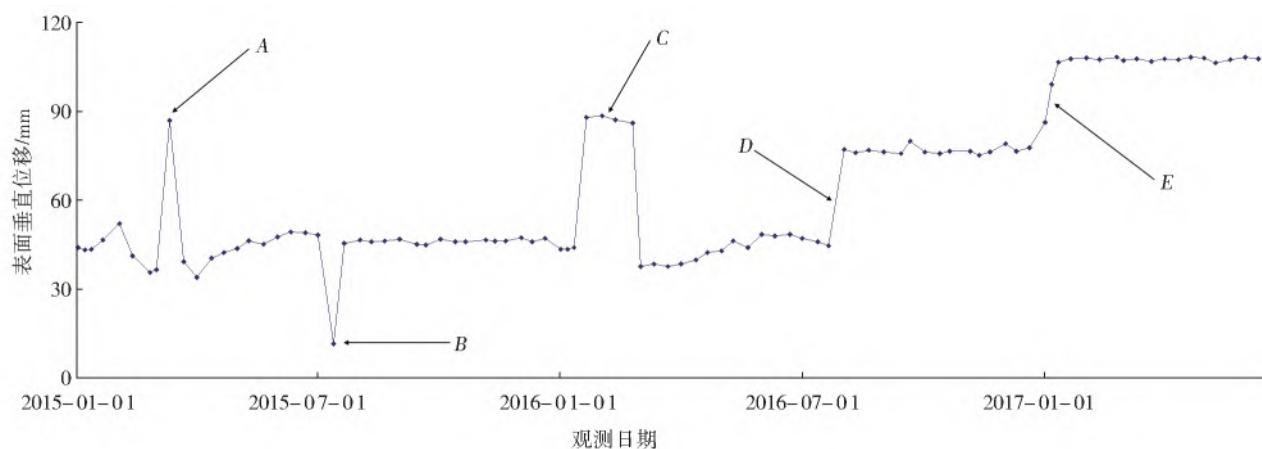


图1 测值突变的典型表现形式

Fig. 1 Representative type of mutation in monitoring value

台阶型突变的基本特征是:出现连续的、成片的明显大于或小于其他测值的测值序列,在过程线上

表现为一个台阶状数据序列(见图1中的D)或台坎状数据序列(见图1中的C)。

渐变型突变的基本特征是:短时间内出现连续逐渐增大或连续逐渐减小的多次测值,在过程线上表现为短期内逐渐增大或逐渐减小的一个数据序列,见图 1 中的 E。

1.3 变化趋势异常

渠堤由土体填筑而成,运行初期,在土体固结、地基压缩、蓄水或通水荷载等因素的综合作用下,效应量变化较快;随着土体固结和地基压缩的基本完成以及运行荷载条件的基本稳定,效应量的变化也逐渐趋缓,并最终趋于稳定或收敛。效应量的趋势性变化情况是衡量渠堤工程是否安全的一个重要指标。如果效应量表现出长期趋势性变化不收敛的异常现象,实际上就蕴含着测值序列中存在潜在的工程不安全信息。

效应量趋势性的典型表现形式见图 2^[20],其中:曲线 A 为趋势性收敛的状态,属于趋势性变化正常;曲线 B、C、D 为趋势性不收敛的状态,属于趋势性变化异常。

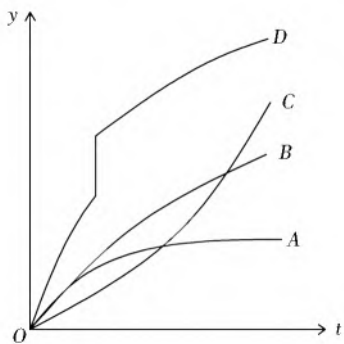


图 2 测值趋势性变化的典型表现形式

Fig. 2 Representative types of tendency in monitoring value

1.4 变化规律异常

渠堤工程在正常运行过程中,无论是时间上还是空间上,各监测效应量自有其客观的规律性。一旦实测成果偏离了这种应有的客观规律性,则可能是观测成果本身不可靠,或者是工程安全状况出现了异常。因此,实测效应量变化规律是否符合其自身应有的客观规律性,也是判断工程运行状态是否正常的一种评判指标。

2 多指标评判准则

南水北调中线干线工程规模宏大,包括渠道工程和各类建筑物。其中,渠道工程以明渠输水方式为主,局部采用管涵过水。从渠堤断面来看,包括挖方渠段、填方渠段和半填半挖渠段;从渠堤特性来看,包括膨胀土渠段、湿陷性黄土渠段、高地下水渠段、采空区渠段等。

2.1 基于多测点的评判准则

渠堤工程运行性态一旦出现异常,不会只在某一个孤立的测点部位得到反映,而是会在一定影响范围内的多个测点部位得到体现。因此,单个测点测值异常,并不代表该断面或该区域的运行性态就一定出现了异常,而应对该断面或该区域内的所有测点进行综合分析才能做出判断,并着重分析各测点监测信息之间的关联性。

基于多测点的评判准则,应在分析单测点测值异常现象的基础上,重点研究是孤立的单个测点出现了异常现象,还是成片的多个测点都出现了异常现象,以及所出现的异常现象在不同测点之间是否具有关联性。

多测点测值异常表现的关联性。渠堤工程安全监测主要以监测断面的形式布置,包括重点监测断面和一般监测断面。在同一监测断面上,布置有多个监测测点。渠堤工程运行性态一旦出现异常,在同一监测项目上的各测点测值都会表现出不同程度的异常;也就是说,异常现象通常不会只出现在孤立的单个测点上,异常现象在具有关联性的多个测点上会表现出一致性。因此,当监测断面上的某一个测点测值出现异常而其他测点测值均表现正常时,应首先核查异常测值的可靠性,并重点分析测点部位的局部性态;当监测断面上的多个测点测值均出现异常且异常现象的表现形式基本一致时,应首先核查工作基点的稳定性,观测仪器的准确性,并重点分析该监测断面所在渠段的整体运行性态是否出现了异常。比如,同一监测断面上布置有多个表面垂直位移测点时,如果只有个别测点测值偏大,或不收敛,则可能是测点所在的局部因填筑不密实或其他原因导致沉降较大;如果有多个测点的测值均偏大,或均不收敛,则应高度重视该监测断面处的渠堤整体运行性态是否出现了异常。

多测点测值时空分布的关联性。渠堤工程作为一个整体,各测点之间具有物理上的关联性,因而各测点测值在分布上具有协调性。对同一监测断面,各表面垂直位移测点的实测值与测点所在部位的堤高应具有协调性,堤顶测点的测值一般应大于马道测点的测值;一旦出现马道上测点的表面垂直位移测值过大,则需要重视边坡是否存在局部失稳的可能性。对同一监测区域,渠堤属于线性工程,同位于堤顶的多个表面垂直位移测点,沿线路方向在测值分布上应具有协调性,特别是填高接近、填料相似的渠段;一旦表面垂直位移沿渠堤线路方向的分布图存在锯齿状或漏斗状或驼峰状分布等异常分布现

象,则需要分析这些异常分布现象的成因,并重点判断渠堤运行性态是否出现了异常。对钻孔测斜管实测内部水平位移,其测值在竖向分布上应具有协调性,一般下部水平位移较小,接近孔口位置水平位移较大,呈渐变的“挠曲”分布;一旦竖向分布图在中间部位出现较大突变,则应分析测斜管在突变测点处是否穿过断层、破碎带等软弱结构面,且软弱结构面是否发生剪切破坏。

2.2 基于多效应量的评判准则

渠堤工程在运行过程中,在各种荷载组合的作用下,会产生各种效应量,如变形、渗流、应力应变等。这些效应量从不同的角度对工程安全状态给出反映,不同监测效应量之间也存在着相互作用和相互影响,因而也表现出一定的关联性。

基于多效应量的评判准则,以单测点异常现象的表现形式分析和多测点异常现象的关联性分析为基础,重点研究是某一类监测效应量出现了异常现象,还是多种效应量都出现了异常现象,以及所出现的异常现象在不同效应量之间是否具有关联性。

多效应量监测信息之间的关联性,也是分析渠堤工程运行性态的重要途径和判断指标。

同类多效应量之间的关联性。同类多效应量,是指同一大类(变形类、渗流类或应力应变类)内的多种监测效应量。同类效应量之间一般具有较强的关联性,因此,能更有效地描述工程的整体运行性态。以渠堤工程变形为例,渠堤变形包括表面变形与内部变形等。渠堤运行状态正常时,表面变形、内部变形的测值表现也会是正常的。渠堤工程运行性态如果出现异常,不仅会在表面变形测值中得到反映,在内部变形测值中也会有所体现。比如,表面垂直位移不收敛,同一部位的表面水平位移、内部水平位移(倾斜仪)等效应量也很有可能是不收敛的,如同时出现表面变形和内部变形均不收敛的情况,就应高度重视该部位渠堤工程的整体运行性态出现了异常。同类多效应量之间的关联性,在利用多效应量评判渠堤工程安全中比较常见。

非同类多效应量之间的关联性。非同类多效应量之间的关联性,是指变形类、渗流类与应力应变类这些大类监测效应量之间的关联性。渠堤工程作为一个整体,当运行性态出现异常时,在不同大类监测效应量中均会得到不同程度的反映。比如,如果渠堤工程的防渗系统被削弱,则渠堤内的实测渗压水位就会升高,渠堤填土性能就会随之下降,很可能导致渠堤水平位移和垂直位移也随之增大,一旦非同类多效应量同时出现了具有关联性的异常,则应高

度重视该渠段的整体运行性态是否出现异常。

2.3 基于巡视检查的评判准则

渠堤工程安全监控既包括仪器监测,也包括巡视检查,因此,渠堤工程安全评判既要依据效应量监测数据,也要依据巡视检查成果。

渠堤工程巡视检查应重点巡视特殊渠段,包括深挖方渠段(开挖深度大于15 m)、高填方渠段(填土高度大于6 m)、膨胀土渠段、高地下水渠段、采空区渠段^[21]、湿陷性黄土类渠段、砂土筑堤渠段等。

2.3.1 深挖方渠段

深挖方渠段应重点关注一级马道以上边坡的变形和地下水位变化情况,一级马道以下衬砌底板的隆起、塌陷等变形情况。如果出现以下情况,应对渠堤工程安全状况给予重点关注:

边坡土(岩)体出现滑坡迹象,如表面出现裂缝、土(岩)体发生崩塌或隆起等现象。

边坡排水不畅,地下水位升高,如排水管出现淤堵,一级马道排水沟出现渗水或积水等现象。

衬砌底板不稳定,变形异常,如衬砌底板出现隆起、塌陷、开裂等现象。

2.3.2 高填方渠段

深挖方渠段应重点关注渠堤堤顶的变形情况:外侧堤坡的稳定情况。如果出现以下情况,应对渠堤工程安全状况给予重点关注:

堤顶出现裂缝、塌陷、严重的不均匀沉降等异常变形现象。如果出现纵向裂缝,应重点分析是否存在堤坡发生滑坡失稳的可能性;如果出现横向裂缝,应结合表面垂直位移测值分析堤顶的不均匀沉降情况,判断渠堤是否存在填土不密实、填料不均匀或填筑材料不恰当等施工质量问题。

外侧堤坡出现滑坡迹象。如外侧坡脚出现隆起、开裂等异常变形现象,堤坡上部出现裂缝、塌陷等异常变形现象。

外坡脚出现渗透破坏迹象。如坡脚出现积水、浸泡、渗漏水等异常渗流现象和管涌、流土等渗透破坏现象,外侧堤坡下部出现散浸现象,反滤体出现塌陷、土体流失或淤堵等现象。

2.3.3 其他特殊渠段

膨胀土渠段。膨胀土特性与土体干湿变化相关,遇水膨胀、失水收缩,易产生裂隙,具有胀缩性、裂隙性等特点,其破坏模式可归纳为裂隙强度控制下的滑坡和膨胀作用控制下的滑坡,处理措施主要为换填法,即在一定范围内采用非膨胀土置换膨胀土。基于以上原理,对膨胀土渠段,应重

点关注膨胀土含水率变化引起的裂缝、塌陷、滑塌、隆起等异常变形现象。同时,膨胀土具有超固结土特性,在应力释放后土体变形会出现反弹,在渠堤表面变形上可能表现为上抬。因此应结合表面垂直位移观测成果,重点巡查和分析渠堤是否存在持续的上抬变形。

高地下水渠段。南水北调中线干线工程沿线穿越高地下水渠段(地下水水位高于渠底高程)约 470 km,其中地下水水位高于渠内设计水位的渠段约 160 km。对高地下水渠段,采取全断面混凝土衬砌结构,以避免外水渗入渠道影响水质。但是,受高地下水位的顶托,有可能导致渠道衬砌底板发生抗浮失稳,主要表现为衬砌底板隆起破坏。基于以上原理,对于高地下水渠段,应重点巡查衬砌底板结构的状况,以及导致衬砌底板抗浮失稳的主要影响因素。比如,重点巡查混凝土底板是否出现裂缝、隆起等现象,渠道集水井水位是否正常,渠道外水水位是否超过渠道水位,抽排水设施是否完好,逆止阀是否存在堵塞、损坏等现象。

采空区渠段。南水北调中线干线工程在禹州管理处穿越 4 处煤矿采空区,累计长度 3.11 km,从采空区顶板岩层向上形成垮塌带、裂隙带、弯曲带“三带”破坏形式。穿越采空区的渠堤工程包括全挖方、全填方和半填半挖方渠段型式。为保障工程运行安全,对采空区采用注浆法进行处理。基于以上原理,对采空区渠段,应重点巡查穿越采空区的渠堤是否存在裂缝、塌陷等破坏现象,严重的不均匀沉降、不收敛的倾斜及水平位移等异常变形现象,渗漏等异常渗流现象。同时,采空区范围大,影响范围广,因此巡查范围应扩大到渠堤以外的地表,重点巡查地表下沉、地表裂缝等破坏现象,以及严重的大范围不均匀沉降等异常变形,特别是地表是否形成凹陷洼地。

3 应用实例

以南水北调中线干线工程一段约 1.5 km 长度的典型高填方渠段为例,采用多指标评判准则对该渠段进行安全评判。该填方渠段填高 9~17 m,地面高程 119~122 m,该渠段内布置了多个变形监测断面,包括表面垂直位移监测断面、表面水平位移监测断面、测斜管内部水平位移(倾斜)监测断面、沉降仪内部垂直位移监测断面等。该渠段平面布置见图 3。

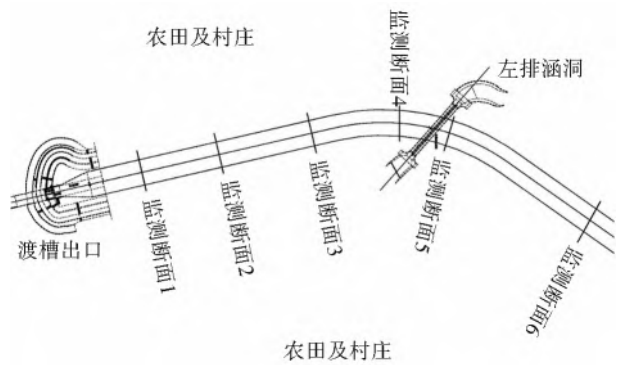


图 3 该渠段平面布置

Fig. 3 Layout plan in the canal section

3.1 表面垂直位移

该渠段布置了 17 个表面垂直位移监测断面,共 66 个测点。各表面垂直位移测点整体上呈下沉变化,自 2016 年 5 月起,部分测点的累计沉降量开始超过设计警戒值(100 mm),同期工程巡查发现堤顶出现裂缝,外侧路肩存在隆起、裂缝、空洞等损坏现象。截至 2018 年 12 月,最大值超过设计参考值(50 mm)的测点共 22 个,最大值超过设计警戒值(100 mm)的测点共 4 个。该渠段左岸堤顶代表性测点表面垂直位移过程线见图 4。由图 4 可以看出,该渠段多个测点持续下沉的趋势性变化尚未收敛,少数测点趋势性有所增大。

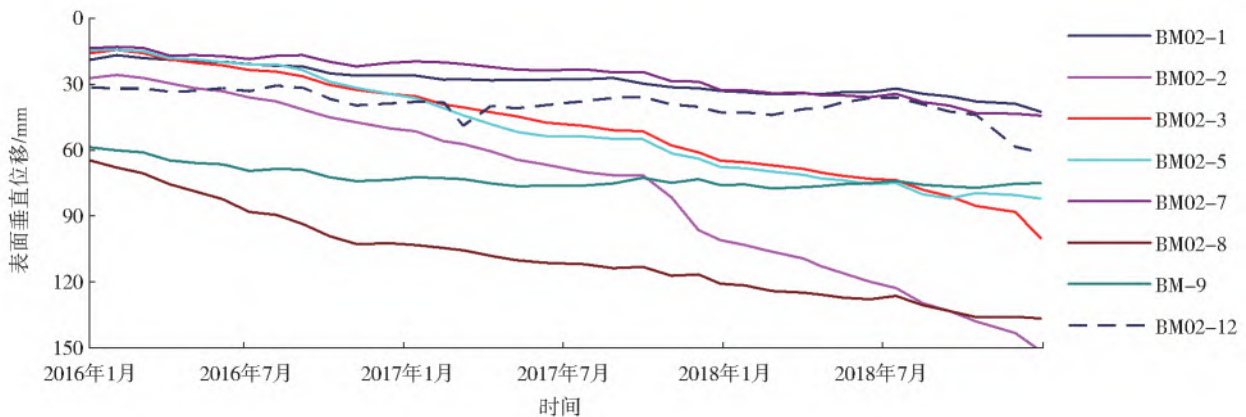


图 4 该渠段代表性测点表面垂直位移过程线

Fig. 4 Process line of surface vertical displacements of representative monitoring points in the canal

综合来看,该渠段实测表面垂直位移多个测点“测值偏大”,且“存在未收敛的趋势性变化”,因此可以初步判断该渠段表面垂直位移实测性态存在异常。

3.2 表面水平位移

由于该渠段多个表面垂直位移测点测值出现异

常,2016年6月在该渠段A、B、C和D共4个监测断面上增设了13个水平位移测点,A、B、C和D监测断面分别位于表面垂直位移的4号、6号、11号和14号监测断面处。B监测断面表面水平位移变化过程线见图5。

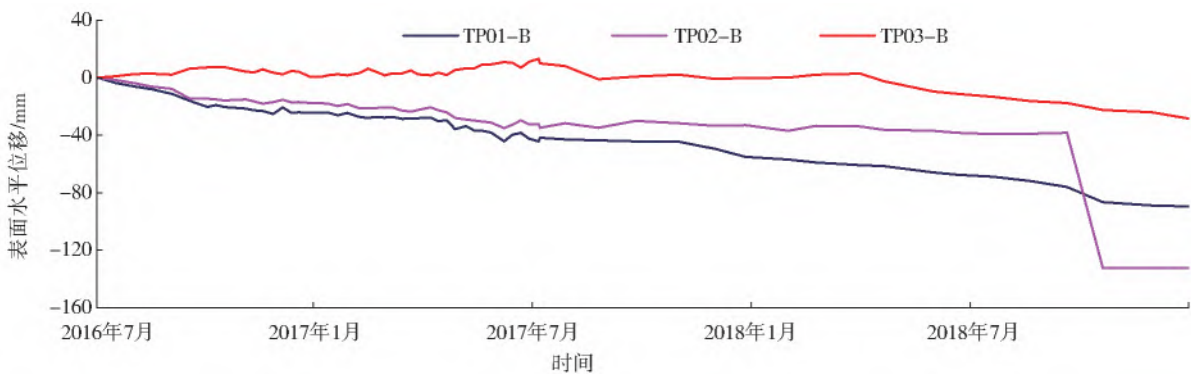


图5 B监测断面代表性测点表面水平位移变化过程线

Fig. 5 Process lines of surface horizontal displacements of representative monitoring points in B monitoring section

从图5可以看出,该断面右岸的TP01-B、TP02-B和TP03-B共3个测点均存在向渠道外侧的趋势性变形,其中:TP01-B、TP03-B两测点2018年4月以来的水平位移变化速率大于前期,属于“存在未收敛的趋势性变化”;TP02-B测点于2018年10月发生了突变,表面水平位移由-39.5 mm突变为-116.1 mm,经查该突变系受10月份钻充填孔灌浆施工扰动影响所致,不属于渠堤结构变异引起的运行性态异常。

3.3 内部水平位移

2016年6月在该渠段A、B、C共3个监测断面上各新增1根测斜管(IN01-A、IN01-B、IN01-C)观测渠堤内部水平位移。

截至2018年12月,3根测斜管实测最大累计内部水平位移分别为-58.7、-208.7、-60.1 mm,均位于孔口或接近孔口;各测斜管实测内部水平位移主要表现为上大下小,位移分布基本合理;但实测内部水平位移“存在未收敛的趋势性变化”,与相应部位表面垂直位移、表面水平位移的趋势性变化基本一致。

此外,部分测斜管孔口累计水平位移2018年11月08日发生了由-155.51 mm至-221.39 mm的突变。经查,该突变是由于11月初该断面渠堤二级马道进行土方填筑碾压造成的,不属于渠堤结构变异引起的运行性态异常。

3.4 综合评判与处理

综合上述分析,该高填方渠段内多个表面垂直位移监测断面上的多个测点表现出“测值偏大”且

“存在未收敛的趋势性变化”的异常现象,且异常现象在多测点之间具有较强的关联性,适用于多测点评判准则;多个表面水平位移测点和多个内部水平位移测点实测过程线表现为“存在未收敛的趋势性变化”,且异常现象在多效应量之间具有较强的关联性,适用于多效应量评判准则。因此,基于本文提出的“多测点”“多效应量”评判准则,可以判定该渠段运行安全性态出现了较为明显的异常。

2018年5月—2019年6月对该渠段进行了加固处理,对堤身进行了加宽加厚,并设置了防渗体。处理后,各监测效应量变化趋势有所减缓,并趋于收敛,目前该部位运行安全性态已得到明显改善,该问题已由“重点异常问题”降低为“一般异常问题”。

4 结语

监控指标是保障引调水工程安全运行的科学判据。定量数值形式的监控指标主要针对单个监测测点和工程局部性态,对长距离引调水工程则需要基于多源信息、工程经验和专家知识凝练出定性评判准则,与定量监控指标相互配合,共同保障引调水工程安全。

定性评判准则的建立以单测点测值异常表现为依据,以监测数据和巡检成果为基础,重点研究多源信息之间的关联性。其中,基于多测点的评判准则重点突出多测点测值异常表现上的关联性和空间分布上的关联性,基于多效应量的评判准则重点突出不同监测效应量之间相互作用和相互影响的关联性,基于巡视检查的评判准则重点结合不同特性渠堤工程的破坏机理。在对渠堤工程整体运行性态作出评判时,应综合分析多测点、多效应量以及巡视检

查等多源信息。

定性评判准则是渠堤工程安全监控指标的一种重要表现形式,在工程安全监控中具有特殊的重要地位。本文提出了一个基于定性准则的渠堤工程安全评价思路,以期促进定性评判准则的深入研究,这些定性准则还有待在工程运行中进一步检验和补充,并加强定性准则在计算机实现方面的研究。

参考文献(References):

- [1] 沈滢,毛春梅. 国外跨流域调水工程的运营管理对我国的启示[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 391-394. (SHEN Y, MAO C M. The operation and management of inter-basin water diversion projects abroad and its inspiration to China [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 391-394. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/J. cnki. nsbdqk. 2015. 02. 044.
- [2] 韩占峰,周曰农,安静泊. 我国调水工程概况及管理趋势浅析[J]. 中国水利, 2021(21): 5-7. (HAN Z F, ZHOU Y N, AN J B. The general situation and management trend analysis of water diversion projects in China[J]. China Water Resources, 2021(21): 5-7. (in Chinese)) DOI: 1000-1123(2020)21-0005-03.
- [3] 王浩,雷晓辉,尚毅梓. 南水北调中线工程智能调控与应急调度关键技术[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 1-8. (WANG H, LEI X H, SHANG Y Z. Key technologies of intelligent control and emergency regulation for the Middle Route Project of South-to-North Water Diversion[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 1-8. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/J. cnki. nsbdqk. 2017. 02. 001.
- [4] 程德虎,苏霞. 南水北调中线干线工程技术进展与需求[J]. 中国水利, 2018(10): 24-27. (CHENG D H, SU X. Technical advancement and demand of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. China Water Resources, 2018(10): 24-27. (in Chinese)) DOI: 1000-1123(2018)60-0024-04.
- [5] 吴中如,顾冲时,沈振中,等. 大坝安全综合分析和评价的理论、方法及其应用[J]. 水利水电科技进展, 1998, 18(3): 2-6. (WU Z R, GU C S, SHEN Z Z, et al. Theory and application of dam safety comprehensive analysis and assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1998, 18(3): 2-6. (in Chinese))
- [6] LI B, YANG J, HU D X. Dam monitoring data analysis methods: A literature review[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2020, 27(3): e2501. 1-e2501. 14. DOI: 10. 1002/stc. 2501.
- [7] QIN X G, GU C S, ZHAO E F, et al. Monitoring indexes of concrete dam based on correlation and discreteness of multi-point displacements[J]. PLoS ONE, 2018, 13(7): e0200679. DOI: 10. 1371/journal. pone. 0200679.
- [8] 唐贤琪,杨海云,吴凡,等. 基于改进 POT 模型的混凝土坝监控指标研究[J]. 水利水运工程学报, 2021(2): 117-123. (TANG X Q, YANG H Y, WU F, et al. Determination of monitoring index for concrete dam based on improved POT model[J]. Hydro-science and Engineering, 2021(2): 117-123. (in Chinese)) DOI: 10. 12170/20200404003.
- [9] 王珍萍,刘枫,马洪亮. 南水北调中线干线工程中的安全监测[J]. 人民长江, 2015, 46(23): 91-94. (WANG Z P, LIU F, MA H L. Safety monitoring of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Yangze River, 2015, 46(23): 91-94. (in Chinese)) DOI: 1001-4179(2015)23-0091-04.
- [10] 郝泽嘉,姜云辉,聂鼎. 基于 B-S 结构的南水北调中线工程安全监测自动化应用系统设计及实现[J]. 水利信息化, 2019(15): 62-64. (HAO Z J, JIANG Y H, NIE D. Design and implementation of safety monitoring system for the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Informatization, 2019(15): 62-64. (in Chinese)) DOI: 1000-1123(2019)15-0062-03.
- [11] 何军,马啸. 南水北调中线安全监测应用系统提升改造实践[J]. 中国水利, 2021(8): 31-32. (HE J, MA X. Upgrading and reforming practice of the safety monitoring system for the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. China Water Resources, 2021(8): 31-32. (in Chinese)) DOI: 1000-1123(2021)08-0031-02.
- [12] 刘明堂,田壮壮,齐慧勤,等. 基于 Kalman-BP 融合的南水北调高填方渠道渗漏监测模型研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 179-185. (LIU M T, TIAN Z Z, QI H Q, et al. Research on leakage monitoring model for high-filled canal of the South-to-North Water Diversion Project based on Kalman-BP fusion network[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 179-185. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/J. CNKI. NSB-DQK. 2018. 0141.
- [13] 李慧媛,蒋雨婷,廖阳权. 渠堤工程填方渠段表面变形监测统计模型研究[J]. 水电与新能源, 2020, 34(9): 12-15. (LI H Y, JIANG Y T, LIAO Y Q. Statistical model of surface deformation monitoring of embankment section in canal projects[J]. Hydropower and New Energy, 2020, 34(9): 12-15. (in Chinese)) DOI: 1671-3354(2020)09-0012-04.
- [14] 范哲,黎利兵,商玉洁. 南水北调中线工程安全监测预警机制研究[J]. 水利水电快报, 2019, 40(4): 57-60. (FAN Z, LI L B, SHANG Y J. Research on early warning mechanism of safety monitoring for the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project

- [J]. Express Water Resources and Hydropower, 2019, 40 (4): 57-60. (in Chinese)) DOI: 1006-0081 (2019)04-0057-04.
- [15] 何金平,唐贤琪,郝泽嘉.南水北调中线工程运行安全监控指标研究[A].中国水利学会2019学术年会论文集[C].北京,2019:956-963.(HE J P,TANG X Q,HAO Z J. Safety monitoring index for operating period of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[A]. Proceedings of 2019 Annual Conference of Chinese Hydraulic Society [C]. Beijing, 2019:956-963. (in Chinese))
- [16] 程德虎,孙一清,杜智浩.南水北调中线工程渠堤变形安全监控指标研究[J].水利信息化,2019(2):19-23.(CHENG D H,SUN Y Q,DU Z H. Study on safety monitoring index of channel embankment deformation in the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources Informatization, 2019(2):19-23. (in Chinese)) DOI:10.1936/j.1674-9405.2019.02.004.
- [17] 谷艳昌,王士军,庞琼,等.基于管理风险的混凝土坝变形预警指标拟定研究[J].水利学报,2017,48(4):480-487.(GU Y C,WANG S J,PANG Q,et al. Study an early warning index of concrete dam's deformation based on the risk management[J]. Journal of Hydraul
- ic Engineering, 2017, 48(4): 480-487. (in Chinese)) DOI:0559-9350(2017)04-0480-08.
- [18] 王志强,李广城.中国长距离调水工程地质问题综述[J].工程地质学报,2020,28(2):412-420.(WANG Z Q,LI G C. An overview of geological problems on long-distance water diversion projects in China[J]. Journal Engineering Geology, 2020, 28(2): 412-420. (in Chinese)) DOI:10.13544/j. enki. jeg. 2019-193.
- [19] 程德虎,伞兵,敖圣锋,等.基于冲突证据融合的南水北调渠道工程健康诊断[J].中国水利,2019(8):1-4.(CHENG D H,SAN B,AO S F,et al. Channel engineering health diagnosis of South-to-North Water Diversion Project based on conflict evidence fusion [J]. China Water Resources, 2019 (8): 1-4. (in Chinese)) DOI:1000-1123(2019)08-0001-04.
- [20] 何金平.大坝安全监测理论与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.(HE J P. Theory and application of dam safety monitoring[M]. China Water resources and Hydropower Press, 2010. (in Chinese))
- [21] DING R W, LIU H D, YUAN G X, et al. Deformation and subsidence prediction on surface of Yuzhou mined-out areas along Middle Route Project of South-to-North Water Diversion [J]. Open Geosciences, 2018, 10(1): 834-843. DOI:10.1515/geo-2018-0065.

Multi-index evaluation criterion for operation safety of the canal in water diversion project

CHENG Dehu¹, HAO Zejia¹, HE Jinping^{1,2}

(1. Management Bureau of Trunk Canal of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion, Beijing 100038, China; 2. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The safety of water diversion project is a public safety problem related to the national economy and people's livelihood, and the monitoring index is the scientific criterion to ensure the project operation safety. The quantitative monitoring index defined the safety boundary in the form of numerical value and tendency of the monitoring effect variables, but it focused on a single monitoring point and the local behavior. It was difficult to monitor the overall safety behavior of the canal by the quantitative monitoring index for a single monitoring point because the line of the canal was too long, and the construction and operation conditions of canal were complex in water diversion project, so it is necessary to establish the qualitative evaluation criteria to provide a scientific basis for canal safety evaluation based on multi-source information.

The abnormal phenomenon of a single monitoring point was the basis of establishing qualitative evaluation criteria, to be summarized as monitoring value, variation process, variation trend, and variation regularity. The abnormal value of a single monitoring point did not mean the operation behavior of the monitoring section or the monitoring area were abnormal. To assess the overall operation behavior of the canal, multi-point information was used in combination. The qualitative evaluation criteria of canal safety with multi-point information were established based on the study of the correlations of monitoring information among different monitoring points on the same monitoring section or monitoring area, which included the correlation in abnormal performance and distribution of multi-monitoring points.

Deformation, seepage, stress, and strain were occur under the action of various load combinations during the operation of the canal, and these effect variables described the operation behavior of the canal from different angles. The qualitative evaluation criteria of canal safety with multi-monitoring effect variables information were established based on the analysis of interaction and mutual influence and the study on the correlations among different effect variables.

The qualitative evaluation criteria of canal safety with the information from field inspection were established based on the analysis of the working mechanism of the canal with different characteristics and the study on the outward manifestation of the working mechanism. The qualitative evaluation criterion was an important form of safety monitoring index of the canal and played a specially important role in canal safety monitoring. Operation safety of the canal in water diversion projects can be more safeguarded by the combination of qualitative safety evaluation criteria and quantitative numerical monitoring index.

Key words: water diversion project; operation safety; multi-source information fusion; multi-index; evaluation criterion