

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.03.010



基于 AHP 法的大口径 PCCP 管道断丝安全风险 管理

骆建军¹, 姚宣德²

(1. 北京交通大学 隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044;

2. 北京市水利规划设计研究院, 北京, 100048)

摘要:如何有效地对大口径 PCCP 管道断丝后管道结构的安全进行合理地评价, 以便采取积极有效的维修措施, 是减少南水北调大口径 PCCP 管道运营期间断丝安全风险的有效途径。提出利用层次分析方法(AHP)建立 PCCP 管道安全风险层次分析数学评价模型, 对影响南水北调地下大口径 PCCP 管道断丝的各种可能因素进行专家打分, 同时, 通过数值模拟计算, 建立 PCCP 管道安全失效的判断准则及判断标准, 实现大口径 PCCP 管道安全风险评价的定量化。在此基础上, 开发出一款专门针对南水北调中线 PCCP 管道工程安全运行风险实时监测的管理软件。该软件系统采用自动化实时监测技术和基于 Web-GIS 的风险管理系统。该系统能完成监测数据的实时采集、数据档案的电子化管理以及安全风险的动力评估与预警预报。

关键词: AHP; 大口径 PCCP; 管道; 断丝; 安全风险

中图分类号: TV312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)03-0065-08

Large diameter PCCP pipeline broken wires safety risk management based on APH method

Luo Jianjun¹, Yao Xuande²

(1. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiao-tong University, Beijing 100044, P. R. China; 2. Beijing Institute of Water, Beijing 100048, P. R. China)

Abstract: Effectively evaluating the safety on the structure of large diameter PCCP pipeline broken wires and taking effective measures to repair are the ways to reduce the safety risk of broken wires during South to North Water Diversion Project large diameter PCCP pipeline operation. Based on the method of analytic hierarchy process, the hierarchy analysis mathematical evaluation model is established. The possible factors of the influences of various of South to North Water Diversion Project of underground large diameter PCCP pipe broken wires are scored by experts. At the same time, the PCCP pipeline safety failure judgment criterion and the judgment standard are established through the numerical simulation. The quantification of safety risk assessment of large diameter PCCP pipe is realized. A specific PCCP North South Pipeline

收稿日期: 2015-08-16

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006BAB04A04)

作者简介: 骆建军(1971-), 男, 博士, 副教授, 主要从事隧道及地下工程研究, (E-mail) jj_luo@126.com.

Received: 2015-08-16

Foundation item: The National Key Technology Research and Development Program During the “11th 5-Year Plan” (No. 2006BAB04A04)

Author brief: Luo Jianjun (1971-), PhD, associate professor, main research interests: tunnel and underground engineering, (E-mail) jj_luo@126.com.

engineering safety running and risk management software is developed. With real-time monitoring automation technology and the risk management system of Web-GIS, the software can perform real-time acquisition of the monitoring data, data file of electronic management and dynamic assessment and early warning of safety risk.

Keywords: AHP; large diameter PCCP; pipeline; broken wire; safety risk management

作为新型输水管材,大口径 PCCP 管道的经济性、耐久性、抗震性相对其他管材具有显著的优势;同时,它易于安装、运行费用较低,且漏水率极低,因此被广泛采用。

从 20 世纪 40 年代起,美国、加拿大等国家采用 PCCP 管道进行长距离有压大管径输水工程^[1]。中国也从 1988 年开始,在水利、电力、市政工程领域使用 PCCP 管道,目前,南水北调北京段基本上采取了大口径 PCCP 管道(内径 4 m,见图 1(a))。



图 1 PCCP 管道及断丝图

Fig. 1 The map of PCCP Pipe and broken wire

大口径 PCCP 管道的管芯缠绕预应力钢丝,预应力钢丝通过在管芯上施加均匀的压预应力,以抵偿由内压和外荷载产生的拉应力。缠绕在管芯上的预应力钢丝决定了大口径 PCCP 管道的强度,但在施工和运行过程中,预应力钢丝会遭受不同程度的损伤,在外界环境及内部工作水压力的作用下,管道出现断丝甚至爆管现象,如图 1(b)所示,国外 PCCP 爆炸事故统计如表 1 所示。

目前,中国尚未有关于大口径 PCCP 管道爆管事故的报道,其原因或与采用这种管道的时间并不长有关。发达国家大口径 PCCP 爆管事故时有发生,这也给大口径 PCCP 在中国的进一步发展敲响了警钟,我们应当提前做好大口径 PCCP 管道由于断丝而引起爆管事故的安全风险管理工作,防患于未然。

国际上采取的管道风险管理系统 (PRMS),主要结合了 P-Wave 探测技术及 SoundPrint 监测数据,并基于 GIS 的界面管理和评价系统。通过建立

风险管理系统 PRMS,可以预测每节管道的剩余寿命,为全部管道的维修、维护、更换以及费用提供决策和支持,到达最大限度降低管道维护成本的目标。

表 1 国外 PCCP 爆管事故统计

Table 1 The PCCP burst accident statistics in foreign

序号	爆管时间	管道型式	管径/mm
1	1997	PCCP AWWA C301(L)	900
2	1999-04-26	PCCP AWWA C301(L)	900
3	2001-02-07	预应力混凝土管	1 500
4	2001-06-27	FG	750
5	2002-08-12	PCCP AWWA C301(E)	1 800
6	2002-08-29	AWWA C-303	400
7	2002-12-11	PCCP AWWA C301(L)	750
8	2003-01-30	RCWM	350
9	2003-06-28	PCCP AWWA C301(L)	900
10	2003-10-05	PCCP AWWA C301(L)	900
11	2003-10-17	PCCP AWWA C301(L)	900

根据检索和已查阅的文献资料表明,目前,中国在大口径 PCCP 管道的研究上,主要集中在 PCCP 管道断丝的承载能力方面的计算及试验工作。王五平^[2]介绍了国外用于 PCCP 爆管预警的光纤声监测系统组成及原理。张宏宇等^[3]、董乐等^[4]、王东黎等^[5]、胡少伟等^[6-7]、Valiente^[8]以及其他学者对 PCCP 管道预应力钢丝断丝对 PCCP 安全性进行了预测^[9-12]。

上述研究表明,目前对大口径 PCCP 管道的安全风险评估的研究仍然是一个空白。截止目前,南水北调工程已经运营了一段时间,每年的 9~10 月份的枯水期正是进行 PCCP 管道检修的时机,通过一定的仪器设备能够检测到管道的断丝情况。通过 PCCP 管道的断丝来预测 PCCP 管道的寿命,这对南水北调工程及应用大口径 PCCP 管道的工程意义重大,因此有必要进行相关的研究工作,以对中国大口径 PCCP 管道运营期间的安全风险起指导作用。

1 大口径 PCCP 管道风险评估的 AHP 分析法

1.1 PCCP 管道断丝风险主要因素分析

造成 PCCP 安全质量事故和影响 PCCP 结构运行安全的主要因素包括 PCCP 预应力钢丝的断裂和 PCCP 管道混凝土的开裂。由于大口径 PCCP 管道中的预应力钢丝的抗拉强度很高,工作压力可以到达 1.8 MPa,而且 PCCP 管道上的混凝土的抗压能力也非常强,所以 PCCP 管道在输水运营时能够承受较高的水压力。由于施工质量及其他原因,导致 PCCP 管芯中的混凝土出现裂缝,其寿命将会急剧降低;同时,由于 PCCP 埋置于地下,受到外界环境如地下水的酸性以及腐蚀质土壤的影响,预应力钢丝会发生松弛或断裂,当钢丝断丝的根数到达一定程度时就会有发生爆管的危险。另外,由于 PCCP 管长时间野外放置,造成预应力钢丝的松弛,也将使 PCCP 管受力状况发生改变,从而影响 PCCP 管的安全运行。由此可知,影响 PCCP 管安全运行的主要影响因素有:管道的渗漏、预应力钢丝的松弛和断丝、管道的管芯混凝土出现裂缝等。所以 PCCP 管道工程安全运行风险评估系统,应包含上述对 PCCP 管道安全运行产生影响的所有影响因素。

大口径 PCCP 管道的管芯缠绕预应力钢丝,预应力钢丝通过在管芯上施加均匀的压预应力以抵偿主要由水压力所引起的内压和土荷载及车辆荷载等外荷载产生的拉应力。缠绕在管芯上的预应力钢丝决定了大口径 PCCP 管道的强度,但在施工和运行过程中,下列原因会致使大口径 PCCP 管道的预应力钢丝遭受损伤:

1) 选用了质量较差的钢丝,施加预应力过程中出现氢脆现象。

2) PCCP 管道制造过程中存在缺陷,特别是砂浆保护层质量差,出现麻面甚至裂缝。

3) PCCP 管道安装不当,由于碰撞等原因造成砂浆保护层出现裂缝。

4) PCCP 管道由于埋置与地下,当管道处于酸性及腐蚀性土壤中时容易诱发腐蚀的化合物侵入砂浆层腐蚀砂浆层。

5) 在输水运营过程中,由于没有按照操作规程进行正常启动阀及泵而引起的瞬时水压波。

预应力钢丝在酸性环境中腐蚀到一定程度后出现应力松弛甚至断裂,其所在部位管道强度有一定

程度的下降,如果预应力钢丝的腐蚀进一步发展,PCCP 管道同一部位将会出现更多的断丝,管道强度明显降低,当断丝数目到达一定数目后,将导致 PCCP 管道爆管,PCCP 爆管具有突发性、灾难性,事先没有征兆,爆管发生后,并不仅仅限于管道供水中断,还会引起洪灾以及公共安全事故^[2,13]。

1.2 PCCP 断丝 AHP 模型及模糊评价^[14]

采用 AHP 及模糊矩阵法确定大口径 PCCP 管道断丝影响因素的权重。模糊综合评价法可以分为单因素的模糊评价和多层次的模糊评价,这里运用多层次的模糊评价方法,其评价过程如下:

1) 确定底层单因素集 底层单因素的集合,即 $U = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 。

2) 给定各因素的权重 评价指针体系的层次性非常明显,可通过专家打分的方法确定各层单因素的权重,通常用权重向量 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 表示。可以根据统计计算的结果而得到底层单因素相对上层因素的权重向量

$$W_i = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$$

3) 建立评价等级集 评价者对评价对象可能做出的各种评价结果所组成的集合称为评价等级集,即 $V = (V_1, V_2, \dots, V_n)$ 。此处,评价小组的评价分为 5 个等级,即: $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{\text{风险非常大, 风险大, 风险小, 风险很小, 无风险}\}$ (如表 2 所示)。其中, $V_1 \in [80, 100]$ 、 $V_2 \in [60, 79]$ 、 $V_3 \in [40, 59]$ 、 $V_4 \in [20, 39]$ 、 $V_5 \in [0, 19]$ 。通常把各区间的中值作为等级的参数,则此参数列向量为 $G = (90, 70, 50, 30, 10)^T$ 。

4) 确定隶属关系,建立模糊评价矩阵。从 U 到 V 的一个模糊映射所确定的模糊关系 R 可以表示为一个模糊矩阵。

$$R = \{r_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n\}$$

表 2 管道结构极限状态风险等级

Table 2 Risk level of the pipeline structure limit state

类别	PCCP 管道细致描述	风险状态
V_5	没有损坏	无风险
V_4	腐蚀引起钢丝破坏,砂浆开始剥落	风险很小
V_3	钢丝持续破坏,砂浆破坏, 管道外壁开始出现裂缝	风险小
V_2	砂浆大量剥落,断丝持续增加, 达到钢筒屈服点	风险大
V_1	短期内爆管的风险很高	风险非常大

其中 r_{ij} 为隶属度,即第 i 个指标隶属于第 j 个评价等级的程度。

根据专家调查结果,采用模糊统计的方法构造隶属度函数,可以得到矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{22} & r_{33} & r_{44} & r_{55} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n-1,1} & r_{n-1,2} & r_{n-1,3} & r_{n-1,4} & r_{n-1,5} \\ r_{n,1} & r_{n,2} & r_{n,3} & r_{n,4} & r_{n,5} \end{bmatrix}$$

5) 进行一级模糊矩阵的运算,得到模糊综合评价结果为 $B_i = W_i \cdot R_{1i}$ 。

根据权重集 W_i 和模糊矩阵 R_{1i} ,则可以求出单因素评判向量 B_i ,计算结果为

$$B_i = W_i \cdot R_{1i} = (b_1, b_2, \dots, b_5)$$

其中 $b_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 分别为该层次因素的评价结果隶属于评语集的隶属度。

对上面的 $A_{11} \sim A_{1n}$ 单因素进行上述计算后,得出 B_1, B_2, \dots, B_n ,可以得到一级模糊矩阵 B 。

$$B = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & b_{n3} & b_{n4} & b_{n5} \end{bmatrix}$$

通过前面的统计分析,得出各因素 $A_{11} \sim A_{1n}$ 对目标事件影响的权重

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$$

进行二级模糊综合评判,得到模糊综合评判集

$$C = W \cdot B = (W_1, W_2, \dots, W_n) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & b_{n3} & b_{n4} & b_{n5} \end{bmatrix} = (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5)$$

式中: $c_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 分别为表示评价结果隶属于评语集的隶属度。

2 PCCP 管道断丝的风险控制标准

PCCP 管道经过长期运行后,管道会出现不同程度的断丝现象。断丝以后,钢丝会释放一定的拉力,从而可能影响到整个管道的承载能力。本文在

参考文献[9, 14]的基础上,利用 ABAQUS 软件分析内径 4 m 的 PCCP 管道断丝对 PCCP 结构安全的影响。

埋置式 PCCP-E 型管道由混凝土、钢筒、预应力钢丝和砂浆保护层 4 种材料构成。PCCP 管道长 5 000 mm,内径 4 000 mm,管芯厚度 350 mm,保护层厚度 32 mm,预应力钢丝实际直径 7 mm,实际绕丝面积为 $2\,694 \text{ mm}^2/\text{m}$,实际绕丝间距为 14.3 mm。PCCP 的材料参数见表 3。

表 3 PCCP 材料参数

Table 3 The material parameters of PCCP

材料	自重标准值/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/MPa	泊松比	受拉强 度/MPa	受压强 度/MPa
混凝土	25 000	28 598	0.167	4.018	48.0
钢筒	78 500	206 850	0.3	227.5	227.5
预应力 钢丝	78 500	193 050	0.3	1523.7	410
砂浆保 护层	24 000	25 272	0.167	3.57	37.9

为了更明确的表示出断丝后 PCCP 所处的受力状态,结合美国 AWWA C304 中的设计标准,将 PCCP 受力状态按如图 2 所示的 3 个极限状态进行分析,PCCP 断丝时应力分布如图 3 所示。

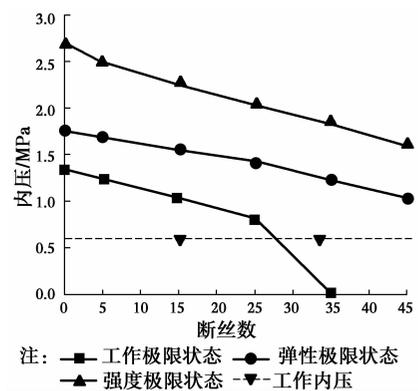


图 2 不同断丝数时各极限状态内压

Fig. 2 Press limit state in different number of broken wires

通过上述数值模拟计算分析可知:

1) 随着 PCCP 管道同一部位的断丝数目的增加,PCCP 管道的承载能力降低,同样,在这 3 种极限状态下,为了保证安全运营,PCCP 管道内所允许施加的内水压力应该逐渐降低,否则容易出现爆管现象。

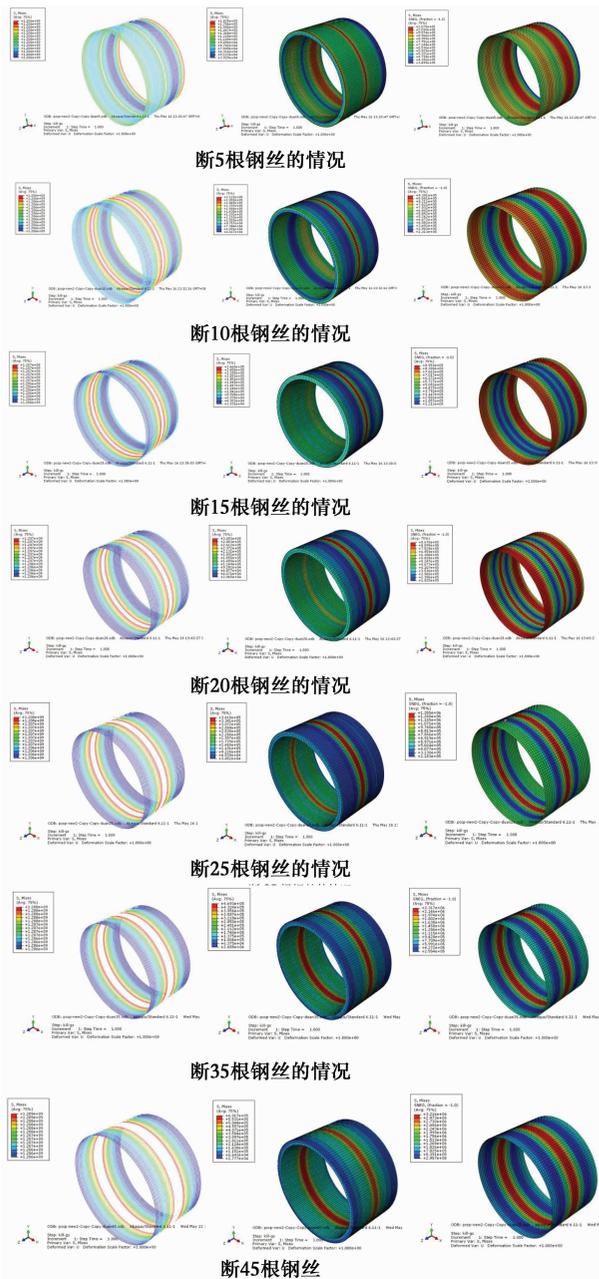


图3 预应力钢丝从 PCCP 结构中部往两边逐步断丝时的应力分布示意图

Fig. 3 The stress distribution when pre-stressed steel wire gradually broken from the middle to both sides of the PCCP

2) PCCP 某一环向部位出现断丝后,该部位混凝土由于受到断丝的拉伸力而出现裂缝,随着管道内水压力的增大,断丝部位的钢筒也更容易受到内水压力施加给钢筒向外的压力而屈服。沿 PCCP 管道纵向部位,未断丝的钢丝离断丝部位越近,其受到的应力越大,也越容易屈服。

3) 通过数值计算分析,当 PCCP 管道同一部位的预应力钢丝的断丝数目少于 25 根时,PCCP 管道

仍可以在较高的内水压力、管道外部水土荷载和管自重应力的共同作用下保持良好的整体工作性能。

4) 当 PCCP 管道同一部位的预应力钢丝的断丝数超过 25 根时,在无内水压力而仅仅有外部荷载作用下,PCCP 管道混凝土由于断丝对混凝土的拉伸就已经开裂。此时,如果未及时进行断丝的修补,当管道处于运营状态时,管道中的压力水通过混凝土裂缝流至钢筒或钢丝层,钢筒或钢丝浸水后,将处于被腐蚀(侵蚀)状态,耐久性也将遭受影响。在这种情况下,虽然管道在达到弹性极限状态(钢筒屈服)之前 PCCP 仍能承担一定的内水压力,但随着运营时间的推移,钢筒或钢丝的锈蚀以及混凝土的劣化会增加爆管的风险^[3-4]。

3 基于 GIS 的 PCCP 管道断丝风险管理系统

PCCP 管道工程安全运行风险评估和风险管理系统应包括:管道、环境和运行状态等基础数据库,管道安全运行监测系统、管道安全运行风险评估系统(其中包括:风险评估准则,监测数据的分析、评估与评价,管道安全运行风险的预测预报等)和基于 GIS 的界面的风险管理系统(其中包括:结合结构状态和结构损坏模型及资产管理准则,对管道剩余寿命的预测,并对全部管道的维修、维护、更换情况等进行管理)。

3.1 PCCP 管道断丝安全风险管理系统开发

大口径 PCCP 管道断丝安全风险管理系统采用基于光纤光栅传感技术的自动化实时监测技术和 Web-GIS 的风险管理系统。软件采用 B/S 架构和面向对象技术,包括数据采集,信号解调处理,风险评估处理模块,Web-GIS 及实时监测技术。并采用 PHP 和 HTML 语言进行软件源码编程。

该系统能实时采集监测数据,能够对断丝安全风险事件进行动态评估与预警预报,从而为及时针对风险做出应对措施提供依据;可切实降低了工程管道的安全运行风险,有效预防或减少了事故的发生。同时能够方便运营管理人员对工程管道结构安全状况进行监控和管理维护。

南水北调中线 PCCP 管道工程安全运行风险管理系统,主要由光纤光栅传感器数据采集、数据解调仪、数据传输和安全运行风险预警预报 3 部分组成。软件框架如图 4 所示。

图 5 中给出了该风险管理系统的主要工作流程。其中,外场设备主要通过高性能光纤光栅传感

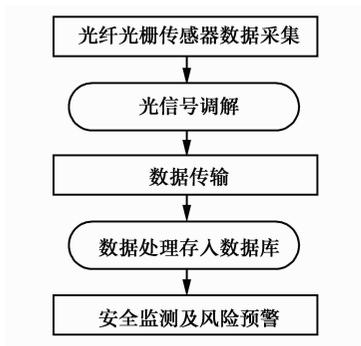


图 4 软件框架

Fig. 4 Software framework

器,对工程管道关键部位结构数据或周围环境数据进行实时信息提取,通过光信号解调技术转化为有效物理数据信号;然后通过数据传输层写入中心数据库,并通过有限元分析模型进行求解,所得物理量具有实时变形监控的功能。如果发生异常错误,系统进行风险事件预警,并产生相应事件日志提示。用户可根据提示信息进行管道安全风险补救和预防措施。

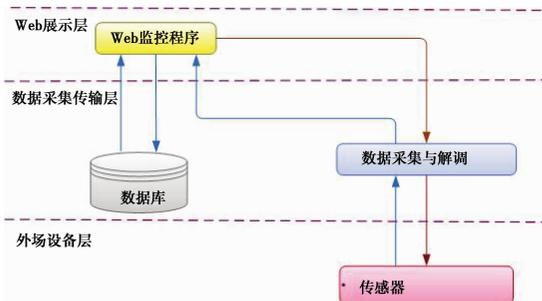


图 5 软件工作主要流程图

Fig. 5 The flow diagram of main software work

通过 Web-GIS 对南水北调工程现场设备采集到的数据进行分析整理,进而将系统、直观、准确的数据展现给用户,使用户可以根据报表信息及时做出相应的决策。

该软件使用户能够方便的对工程管道的安全状况进行实时监控,为管道的安全运营提供专业软件平台,其具有以下特点:

- 1) 界面友好,便于用户操作。
- 2) 基于 GIS 地理信息系统技术,实现管道的统一监测和管理。
- 3) 基于 B/S 架构,可实现远程监控管理。
- 4) 采用光纤光栅传感测试技术,可高效采集管道结构安全数据。
- 5) 可根据采集数据进行安全预警。

图 6 给出了基于 Web-GIS 的实时监控数据图,图 7 是实时监测系统监测数据管理系统的管理界面。

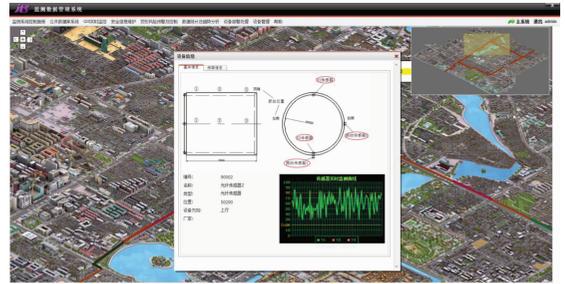


图 6 基于 Web-GIS 的实时监控数据图

Fig. 6 Real time monitoring data based on Web-GIS diagram



图 7 实时监测系统监测数据管理系统

Fig. 7 Real time monitoring data management system

3.2 基于 GIS 的管道断丝实时监控系统

基于上述的层次分析法并辅以专家打分等方法,开发了基于层次分析法的大口径 PCCP 管道断丝安全风险监测(检测)系统,如图 8 所示。图中的背景图是主界面中大地图按一定比例缩小形成的,背景图上面是可以鼠标拖动、键盘控制的层,通过控制这个层,进一步控制大地图在主界面上的显示。

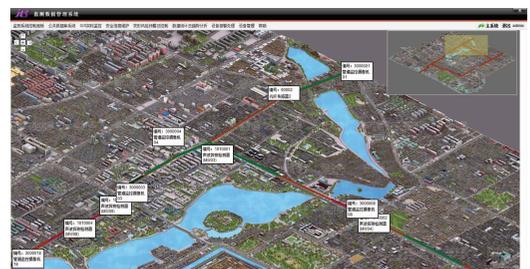


图 8 地图浏览

Fig. 8 The map view

3.3 管道变形风险预警及控制

在菜单或者导航按钮区中,选择【变形风险预警及控制】,单击它进入风险评价页面,如图 9 所示。

管道断丝风险评估由两部分组成,第 1 部分是人工对管道相关构件进行损害评价,第 2 部分为系统用传感器数据进行自动化评估,如图 10 所示。



图 9 管道变形预警

Fig. 9 The pipeline deformation forecasting

1) 构件损坏评估 你可以根据风险因素进行损坏的人工选择,系统已裂缝为例,损坏程度有 3 种选择,不同的选择会对评估结果具有不同程度的影响。

2) 自动化评估 该工作模式下,系统自动根据监测数据实时计算评估,结合第一步的损害评估结果,进行综合评价,并对变形风险进行打分。



图 10 管道风险自动化评估

Fig. 10 Automation risk assessment of pipeline

3.4 数据统计及趋势分析

在菜单中或者导航按钮区中选择【数据统计及趋势分析】,单击它进入多因素对比趋势分析界面,在选择了传感器与分析时段的开始与结束时间后,点击趋势分析,就可以对比该时间段内,多个传感器的数据在相同时间点时的变形变化曲线,便于对多因素进行对比分析,如图 11 所示。

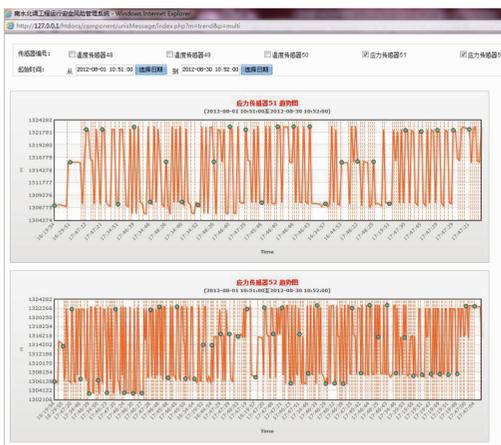


图 11 实时监测数据传输分析

Fig. 11 Analysis of real time monitoring data transmission

4 结 论

1)建立了基于层次分析法(HAP)的大口径 PCCP 管道断丝安全风险评估模型及评价方法,能够实现大口径 PCCP 管道断丝的安全风险定量化评估。

2)通过对管道断丝的分析,确定了 PCCP 管道断丝对结构安全影响的风险评估准则。

3)开发出一款专门针对南水北调中线 PCCP 管道工程安全运行风险实时监测的管理软件,能采用自动化实时监测技术和基于 Web-GIS 的风险管理系统。该系统能完成监测数据的实时采集、数据档案的电子化管理以及安全风险的动态评估与预警预报。

参考文献:

[1] FORTNER B. Main line mending [J]. Civil Engineering, 1999, 69: 25-42.

[2] 王五平, Jack Elliott, 宋人心, 等. PCCP 爆管预警的光纤声监测系统 [J]. 水利水电技术, 2009, 40(3): 68-70. WANG W P, JACK E, SONG R X. Acoustic fiber optic monitoring system for forewarning of PCCP failure [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(3): 68-70. (in Chinese)

[3] 张宏宇, 彭华. PCCP 受载响应全过程有限元分析 [J]. 水利水电技术, 2014, 45(10): 60-64. ZHANG H Y, PENG H. Finite element analysis on whole process of load-bearing response of PCCP [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(10): 60-64. (in Chinese)

[4] 董乐, 王法武, 杨杰, 等. 缠丝张拉应力对 PCCP 受力性能的影响研究 [J]. 山西建筑, 2014(18): 42-43. DONG L, WANG F W, YANG J, et al. The influence research on winding tension stress to PCCP stress performance [J]. Shanxi Architecture, 2014(18): 42-43. (in Chinese)

[5] 王东黎, 郑征宇, 胡少伟, 等. 超大口径 PCCP 管道结构安全与质量控制研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 26-31. WANG D L, ZHENG Z Y, HU S W, et al. Study on structural safety and quality control of large diameter PCCP [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 26-31. (in Chinese)

[6] 胡少伟, 沈捷. 超大口径 PCCP 内断丝对其承载能力影响研究 [J]. 水利水电技术, 2011, 42(4): 41-44.

- HU S W, SHEN J. Study on impact from wire-breaking inside of super-large diameter PCCP on its bearing capacity [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011, 42(4): 41-44. (in Chinese)
- [7] 胡少伟. 南水北调超大钢管混凝土管道结构安全评估 [J]. *水利水运工程学报*, 2009(4): 74-82.
HU S W. Study on structural safety evaluating technique for pre-stressed concrete cylinder pipe (PCCP) in the South-to-North Water Diversion Project [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2009(4): 74-82. (in Chinese)
- [8] VALIENTE A. Stress corrosion failure of large diameter pressure pipelines of prestressed concrete [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2001(8): 245-261.
- [9] 张霄杰, 滕海文, 代春生, 等. 预应力钢丝断丝对 PCCP 性能的影响 [J]. *人民黄河*, 2014(3): 138-140.
ZHANG X J, TENG H W, DAI C S, et al. Analysis the performance of PCCP with broken prestressed steel wires [J]. *Yellow River*, 2014(3): 138-140. (in Chinese)
- [10] 王倩玲. 预应力钢丝螺距对 PCCP 受力性能影响分析 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
WANG Q L. Analysis the influence of behavior of prestressed steel wire pitch on PCCP [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics, 2013. (in Chinese)
- [11] NOWAK A, SZERSZEN M. Calibration of design code for buildings (ACI 318) Part I and Part II [J]. *ACI Structural Journal*, 2003, 100(3): 383-389.
- [12] 窦铁生, 燕家琪. 预应力钢管混凝土管(PCCP)的破坏模式及原因分析 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2014(1): 29-33.
DOU T S, YAN J Q. Prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) analysis of the failure modes and causes [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2014(1): 29-33. (in Chinese)
- [13] 王五平, Jack Elliott, 宋人心, 等. 大型调水工程 PCCP 爆管预警及风险管理技术 [C] // 中国水利水电勘测设计协会调水工程应用技术交流会论文集, 2009: 574-578.
WANG W P, JACK E, SONG R X, et al. Early warning and risk management technology of detonation tube of large water transfer project PCCP [C] // China Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Association of Water Diversion Engineering Application Technology Exchange Conference, 2009: 574-578. (in Chinese)
- [14] 韩润波. 浅埋暗挖法隧道施工风险评估系统研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
HAN R B. Study on the risk assessment system of shallow buried tunnel construction [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [15] YOU R. Analysis of circumferential cracking due to wire breaks in PCCP [J]. *Advanced Materials Research*, 2012: 2860-2864.
- [16] YONGJEI L J, EUN-TAIK L. Retrofit design of damaged prestressed concrete cylinder pipes [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2013, 7(4): 265-271.
- [17] YONGJEI L J, EUN-TAIK L. Analysis of prestressed concrete cylinder pipes with fiber reinforced polymer [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015, 19(3): 682-688.

(编辑 王秀玲)