

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.02.012

基于维修事件信息的船闸可靠性分析

冒刘燕¹,余向阳²,成虎³

(1. 东南大学交通学院,江苏 南京 210096; 2. 京杭运河江苏省交通厅苏北航务管理处,江苏 淮安 223002;
3. 东南大学土木工程学院,江苏 南京 210096)

摘要: 为挖掘维修信息中隐含的工程系统健康规律,构建并验证了基于维修事件数据的船闸寿命周期可靠性分析模型。以工程系统结构分解为技术支撑,集成船闸运行阶段的维修事件信息,依据复杂系统可靠性理论,用维修间隔时间来界定船闸寿命周期可靠性,定义大修间隔时间、中修间隔时间、故障维修时间和故障次数等作为船闸系统可靠性参数。借鉴制造业产品研制阶段可靠性分析的思路和方法,提出了基于维修事件数据的船闸系统可靠性分析模型,并采用京杭运河苏北段17座船闸的历史维修数据验证了模型的科学性。

关键词: 全寿命周期;维修事件信息;复杂系统可靠性;内河船闸

中图分类号: U641.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)02-0175-07

Waterway lock reliability analysis based on maintenance event information

MAO Liuyan¹, YU Xiangyang², CHANG Hu³

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Waterway Management Bureau of Great Canal in North Jiangsu Province, Huai'an 223002, China;
3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to explore the health patterns of engineering systems from the point of view of maintenance information, a life cycle reliability analysis model for waterway locks was developed and verified based on maintenance event data. With the engineering system breakdown structure used for technical support and in combination with maintenance event information during the waterway lock life process, the maintenance interval was used to measure the system life cycle reliability by means of the complex system reliability theory. The overhaul interval, medium maintenance interval, breakdown repair time, and failure frequency were defined as waterway lock reliability parameters. Referring to the ideas of reliability analysis in the product development stage in the manufacturing industry, a reliability analysis model for waterway locks was proposed based on maintenance event data, and its practicability was examined using historical maintenance records of 17 waterway locks on the Grand Canal in the north of Jiangsu Province of China.

Key words: whole life cycle; maintenance event information; complex system reliability; inland waterway lock

船闸作为水路运输通道上的关键基础设施,若不能正常运行,则会造成船舶大量滞留和货物在途延误,甚至还会危及企业的生产计划。以美国为例,由于船闸维修或故障,船舶在途平均每52 d就会有1 d延误,企业每年需为此多花费数亿美元^[1]。我国现有通航船闸1 041座^[2],随着高等级航道的建设,还需修建大量船闸。因此,深入研究船闸寿命周期的可靠性特征,对维持其规定性能和节约维修成本、保证航道畅通和社会生产具有重要作用。国内外学者基于结构可靠度理论,根据监测数据,采用概率分析^[3-5]、有限元组合分

析^[6]和状态检测^[7-9]等方法,以构件极限状态为指标^[10],对船闸重要组件的可靠性开展了大量研究。

从全寿命周期管理理论层面分析,工程的建设缺陷和问题只有在运行阶段才能被发现^[11]。研究运行阶段船闸的健康规律,反馈到新工程的规划、设计和施工中,将有助于促进基础设施建设领域的科技进步和可持续发展^[12]。如今,发达国家随着新建设施比例减少,建设活动更多地转向了维修改造,维修信息在设施寿命周期管理中的重要性已经得到了充分论述^[13],但缺乏利用方法的系统研究。

针对以上问题,笔者以工程系统结构分解为技术支撑^[14],集成船闸维修事件信息^[15],依据复杂系统可靠性理论,定义船闸系统可靠性参数。借鉴制造业产品研制阶段可靠性分析的思路和方法,构建基于事件数据的可靠性分析(reliability analysis based on event data,RABED)模型,并用17座船闸的历史维修数据验证模型的科学性,以期从维修信息中挖掘可靠性规律提出系统的解决方法。

1 维修事件信息集成

我国船闸维修以中修和大修为主,结合抢修来保障系统的正常运行,维修资料处于零散的“信息孤岛”状态,其中隐含的可靠性规律尚未被挖掘和有效利用。为了统一各船闸维修信息的汇集框架,对船闸功能面和专业工程要素进行分解,从系统、子系统和组件3个层次级别,构建船闸工程系统分解结构(waterway lock engineering breakdown structure,WLEBS)^[16]。根据全寿命周期运营维护集成管理需要,构建维护信息集成的霍尔三维结构模型(图1)。

a. 时间维。体现从规划、设计、施工到维护的整个过程,每一阶段均有大量重要数据和文件,可用于船闸寿命周期可靠性分析。

b. 结构维。是指系统结构层次和专业组成要素。各船闸在具体形式和尺寸上会有差异,但是工程对象系统(WLEBS)相同,可作为维修信息集成和健康规律研究的技术支撑。

c. 事件维。事件维将原先简单零散的维修记录和数据,依据WLEBS的结构化方式统一汇集,形成量化与质化知识系统。再根据使用目的进行关联,积累成为有用的信息,运用科学方法积淀成为船闸维护管理知识,最终成为相关机构管理与应用的智慧资本。

维护信息集成的霍尔三维结构,规范和统一了寿命周期内船闸的维修信息汇集结构,有效地解决了“维修信息孤岛”问题,为实现以数据驱动的船闸寿命周期可靠性分析提供数据支撑。

2 系统可靠性指标定义与体系构建

船闸结构复杂,由许多子系统组成。各子系统具有不同的功能和故障特性,采取的维修方式与策略也不同。本文以船闸整体工程为视角,以WLEBS各层次组成要素为对象,立足于全寿命周期,以复杂系统可靠性理论为基础,构建可靠性指标体系。

2.1 船闸系统可靠性界定的理论基础

复杂系统可靠性是指产品在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的能力。可靠性参数是从不同角度描述产品可靠性特性的度量。可修复系统的常用参数是平均故障间隔时间(mean time between failure,MTBF)^[17],它是指在功能单元寿命周期内的规定时间、规定条件下连续故障之间的平均时间。MTBF因为考虑了维修策略,直观方便,而且能形成对各子系统及部件的统一要求,被广泛用来反映系统的可靠性^[18]。

系统可靠性是使用时间的递减函数。随着使用时间的延长,可靠性逐渐下降,需要通过维修才能保持或恢复系统的可靠性,因此维修事件间隔时间反映了系统可靠性变化的快慢程度。

2.2 基于事件数据的船闸系统可靠性界定

船闸作为复杂工程技术系统,大修、中修和抢修等现场事件数据来自真实的使用过程,是重要的可靠性数据来源^[19],其分析结果是其寿命周期健康特征的重要体现。因此,笔者依据复杂系统可靠性理论,用维修

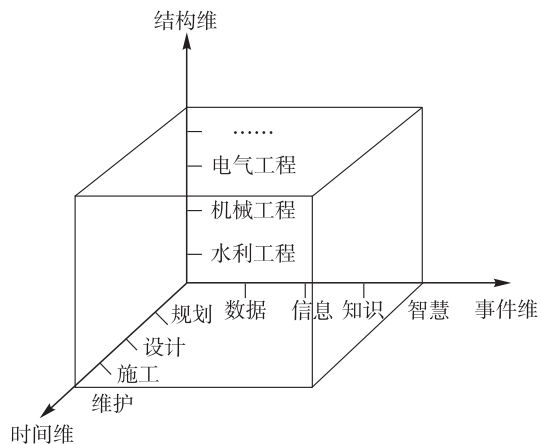


图1 船闸维修信息集成的霍尔三维结构
Fig.1 Hall three-dimensional structure formulated with waterway lock maintenance information

间隔时间来界定船闸寿命周期可靠性,从广义可靠性角度,定义大修间隔时间、大修维修时间、中修间隔时间、中修维修时间、故障间隔时间、故障维修时间和故障次数等作为系统可靠性参数。

2.3 可靠性参数定义

将船闸从全新投入使用到被拆除的时间区间,记为 $[0, t(h)]$ 。寿命周期维修事件发生过程如图2所示。

定义符号: S_i 为第 i 次大修开始时间, F_i 为第 i 次大修结束时间; $S_{p,j}$ 为第 j 次中修开始时间, $F_{p,j}$ 为第 j 次中修结束时间; $S_{f,k}$ 为第 k 次故障发生时间, $F_{f,k}$ 为第 k 次故障抢修结束时间。则船闸可靠性参数定义为:大修间隔时间 $T_i = S_i - F_{i-1}, (i = 1, 2, \cdots, n)$;大修维修时间 $D_i = F_i - S_i, (i = 1, 2, \cdots, n)$;中修间隔时间 $t_j = S_{p,j} - F_{p,j-1}, (j = 1, 2, \cdots, m)$;中修维修时间 $d_j = F_{p,j} - S_{p,j}, (j = 1, 2, \cdots, m)$;故障间隔时间 $T_{f,k} = S_{f,k} - F_{f,k-1}, (k = 1, 2, \cdots, r)$;故障维修时间 $D_{f,k} = F_{f,k} - S_{f,k}, (k = 1, 2, \cdots, r)$;故障次数 $C = \text{count}(r)$ 。其中: n 为大修次数; m 和 r 分别为一个大修周期内的中修次数和抢修次数; $\text{count}(\ast)$ 为计数函数。

3 可靠性分析(RABED)模型构建

3.1 基本假定

依据对系统可靠性恢复程度,维修决策理论将维修分为“完全维修”、“不完全维修”和“最小维修”^[20]。根据《船闸管理办法》,大修是为了恢复船闸系统的原设计标准,中修则是某些部位的单项修理,抢修只是对临时故障的突击修复。据此,作如下几点合理假设:(a)假设大修为“完全维修”,即大修结束后系统可靠性恢复到初始状态;(b)假设中修为“不完全维修”,即中修完成后系统整体可靠性仅得到部分恢复;(c)假设抢修为“最小维修”,即抢修仅仅恢复了临时故障,对系统整体可靠性不产生影响。

基于以上假设,得出一个大修周期内维修活动与船闸系统可靠性之间的关系(图3)。

3.2 RABED 总体思路构建

制造业产品研发阶段可靠性分析,依据寿命试验数据,利用数理统计方法,确定产品的失效分布类型,通过参数估计求得可靠性特征量的估计值,从而了解产品寿命分布的统计规律^[21]。受此启发,若将船闸的寿命过程看作是寿命试验,则大修、中修和抢修等维修事件,作为重要的可靠性活动,从它们的维修记录中提取和筛选出可靠性参数样本值,采用统计推断方法,得到维修间隔时间的概率分布特征,揭示船闸寿命周期的健康规律。基于事件数据的船闸系统可靠性分析(RABED)思路如图4所示。

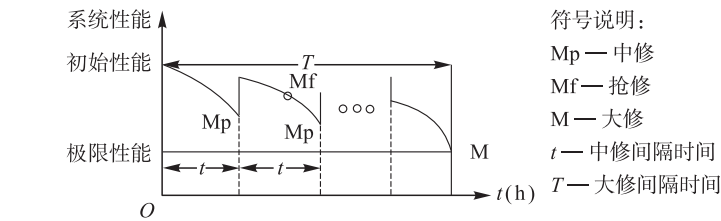


图3 维修活动与船闸系统可靠性关系
Fig.3 Relationship between maintenance events and reliability of waterway locks

3.3 RABED 流程设计

RABED 分析包括单个船闸事件数据采集、多个船闸事件数据集成、可靠性模型与参数估计方法的选择等3个具体步骤,具体流程见文献[16]。

3.3.1 单个船闸事件数据采集

单个船闸事件数据的采集是 RABED 分析的基础。数据的质和量对可靠性分析的结论影响很大。数据的采集工作需要细致部署。根据可靠性数据分析的要求,提出船闸事件数据采集程序。

a. 根据研究目标,进行需求分析。船闸种类多样,不同形式的船闸可靠性参数值不同。因此,收集对象应尽可能选择同一种形式且使用环境相似的船闸。同时要充分论证需要收集的信息,防止数据收集完成后因不完整等原因而无法使用。

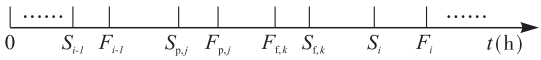


图2 维修事件发生过程
Fig.2 Maintenance event process

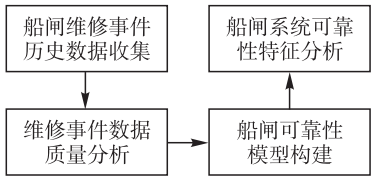


图4 船闸系统 RABED 总体思路
Fig.4 General idea for reliability analysis of waterway locks based on of maintenance events data

b. 确定数据收集点。根据船闸所处区域以及使用环境,选择有代表性的流域或河段,选择同种形式船闸数量较多,管理规范,能代表典型环境和使用条件的船闸管理所。

c. 制定数据收集表格。RABED 研究的核心问题是用维修事件数据来表征系统可靠性。在船闸寿命过程中,大修事件仅发生有限数次,中修和抢修事件次数则相对较多。因此应根据维修类型确定数据采集需要的时间区间和调查深度,制定调查表格。大修事件调查,自船闸建成投入使用开始(表1)。中修事件调查,需明确具体部位、维修实施时间和费用。抢修事件调查,需收集故障部位及现象、故障原因和处理方法、维修费用和停航时间等资料。

d. 确定数据收集方法。专人走访船闸管理单位,调查船闸维护管理的实际情况和维修档案,获得可靠性研究所需资料,同时聘请工作人员核实和确认有疑问的数据,确保数据真实和完整有效。

3.3.2 多个船闸事件数据集成

多个船闸事件数据的集成是 RABED 分析的关键技术问题。通过数据转换、数据分类和数据集成 3 个过程,利用维修信息集成霍尔三维模型,统一和标准化众多船闸零散的事件信息,使之具有可比性和参照性,形成可靠性分析的样本数据信息库。

a. 数据转换。将按日历记载的船闸寿命过程维修事件记录,按照可靠性参数的定义,转换成为可靠性参数样本数据。

b. 数据分类。按照维修方式和 WLEBS 的组成要素,对样本数据进行分类,形成样本数据集合。

c. 数据集成。从 WLEBS 和维修类型 2 个维度进行综合集成,得到系统层次结构上各组成要素的故障间隔时间、中修间隔时间和大修间隔时间等可靠性参数样本数据集合。

3.3.3 可靠性模型与参数估计方法的选择

根据系统层次级别和样本数据质量,选择可靠性模型和参数估计方法,分 3 个步骤实现:(a)样本数据质量分析。用单因素方差分析方法,检验样本数据的一致性。(b)选择可靠性模型。根据 WLEBS 层次结构,以抢修事件数据为基础,采用故障模式、影响和危害度(failure model, effects and criticality analysis, FMECA)分析,直接关注对系统运行维护 and 安全性影响较大的组件和故障模式;以中修和大修事件数据为基础,采用寿命分布模型研究子系统和系统的可靠性,得到中修和大修间隔时间等参数的统计分布特性。(c)根据样本数量,选择参数估计方法。通常样本容量 $n>20$ 时,称为大样本^[22],直接利用经典统计模型进行可靠性分析与评估;若仅有少量样本数据,则需先进行小样本数据信息处理。

4 模型验证

4.1 数据收集点的确定

京杭运河苏北段为北煤南运主通道,是名副其实的黄金水道,船闸数量多,管理规范,尺度相似,可充分满足模型验证的需要。因此选择该航段上 7 个航运梯级的 17 座人字门船闸,作为模型验证的研究对象。

4.2 事件数据的采集

现场调查得到了 17 座船闸的维修信息,其中 12 座经历过大修。为了保证事件数据的可比性和满足数据集成的需要,确定了各类维修事件数据的采集对象和时间跨度(表2)。

4.3 事件数据的集成

4.3.1 组件故障次数样本数据集合

17 座船闸 5 a 累积工作时间为 29 387 d,共 133 份故障维修记录,涉及 8 个子系统 24 个组件(表3)。

表 1 船闸大修情况调查表范例
Table 1 Waterway lock overhaul survey table format

船闸名称	建成时间	大修次数	开始时间	结束时间	费用
------	------	------	------	------	----

注:时间格式为:xxxx 年 xx 月 xx 日;大修次数指的是第几次大修,例如,第一次大修,则填数字“1”。

表 2 事件数据采集

Table 2 Event data collection table		
维修类型	数据采集的时间区间	船闸数量/座
大修	最初建成—2013-12-31	12
中修	1997-01-01—2013-12-31	12
抢修	2009-01-01—2013-12-32	17

表 3 故障次数样本数据集
Table 3 Sample data of fault frequency

序号	组件名称	故障次数	序号	组件名称	故障次数	序号	组件名称	故障次数	序号	组件名称	故障次数
1	闸门*	49	8	启闭机附属设施	4	15	电源	2	22	配电柜	1
2	阀门轨道	15	9	导航墙	3	16	桩基础	1	23	电缆线路	1
3	阀门附属设施	12	10	闸门止水	3	17	墩身	1	24	监控系统	1
4	阀门运转部件	9	11	阀门止水	3	18	闸门附属设施	1	25	软件	1
5	计算机监控系统	7	12	启闭机轴承	3	19	闸门缓冲器	1	26	合计	133
6	闸门运转部件	4	13	变频器	3	20	闸门修理门	1			
7	阀门门体	4	14	闸门平压设施	2	21	启闭机连接杆	1			

注：* 故障是由于水下异物引起的闸门关闭不到位,不涉及闸门具体组件。

4.3.2 子系统中修间隔时间样本数据集

12 座船闸 17 a 共有 173 个中修数据,平均每个船闸 14.41 个,与中修实际情况相符。由于中修仅仅部分恢复了系统可靠性,根据故障理论对可靠性数据分析的要求^[18],仅能选取每次大修之后的第一次中修数据,用于分析子系统可靠性。中修间隔时间样本数据集见表 4。

4.3.3 系统大修间隔时间样本数据集

12 座船闸均有两次以上(含 2 次)的大修,共计发生了 36 次大修事件,得到了 36 份大修间隔时间样本数据(表 5)。

表 4 中修间隔时间样本数据集 Table 4 Sample data of medium maintenance intervals	
子系统名称	样本值 月
引航道	65,60,25,60,52,22, 11,19
靠船建筑物	41,53,24,38,46,23,57,69
阀门	48,70,52,78,17, 39,59,64,51
信号监控与控制系统	48,71,35,64, 51

表 5 大修间隔时间样本数据集 Table 5 Sample data of overhaul intervals		d
船闸编号	样本值	船闸编号 样本值
101	2485 3692 3397 3681 3228	102 1931 1357
201	2999 4049 2678 3609 3589	202 2070 3830
301	1616 4318 4279 3872 3346	302 2138 3211
401	3367 3420 4337	402 2845 2538
501	5037 4933 4595	502 3607 3034
601	3586 3725 3112	602 2480 4555

4.4 可靠性模型与参数估计

4.4.1 组件 FMECA 分析

对表 3 的故障样本数据进行 FMECA 分析。结果表明:故障部位频率最高为人字闸门,约占 36.84%,与已有研究成果一致^[23],证实了 133 份样本数据是有效可靠的。分析 133 份维修记录,归纳出 8 大类型 32 条细目故障模式和 20 种故障原因。根据累积工作时间和子系统的故障总次数,计算得到平均故障率,综合考虑故障引发的停航时间和所需的维修费用等因素,采用危害性矩阵分析方法得出:(a) 阀门危害度最高。因为它处于水下工作,零部件脱落等故障不易察觉,直至引发停航故障。(b) 闸门故障次数最多。闸门故障大多是由水下异物引起,清除异物即可恢复系统正常运行,不需要备品备件的保障,从维修管理的角度而言相对较易。

FMECA 分析得到船闸的重要功能组件和关键子系统,危害度从高到低,依次为阀门、闸门、启闭机、监控与控制系统、引航道、供电系统、靠船墩和电线电缆系统,可以作为管理部门运营维护的重点对象,以及制定维修策略的参考。

4.4.2 中修间隔时间分布特征与参数估计

分析样本数量,中修间隔时间分布特性与参数估计是小样本问题。由于船闸工程系统的单一性,缺乏先验信息,故采用模糊信息扩散理论,将样本进行集值化处理^[24]。具体过程如下:

船闸大修周期一般为 10 a(120 月),故选定中修间隔时间的扩散论域为(0,120]。给定初始点 $x_0=0$,步长 $\Delta=3$,得到信息监控点组成的扩散论域 $U=\{0,3,6,\cdots,120\}$ 。根据样本数量和最大值、最小值,计算扩散系数。此基础上,将样本值作为随机变量母体观测值,扩散到各监控点上,得到中修间隔时间样本落在各监

控点的概率密度。以危害度最高的阀门子系统为例,其信息扩散计算结果见表6。

表6 阀门中修间隔时间信息扩散计算结果

Table 6 Calculation results based on medium maintenance interval information diffusion

监控点 (月)	概率密度 估计值	监控点 (月)	概率密度 估计值	监控点 (月)	概率密度 估计值	监控点 (月)	概率密度 估计值	监控点 (月)	概率密度 估计值	监控点 (月)	概率密度 估计值
0	0.0095	21	0.0341	42	0.0512	63	0.0371	84	0.0121	105	0.0015
3	0.0122	24	0.0379	45	0.0511	66	0.0333	87	0.0095	108	0.0010
6	0.0152	27	0.0414	48	0.0503	69	0.0294	90	0.0074	111	0.0007
9	0.0186	30	0.0445	51	0.0488	72	0.0255	93	0.0056	114	0.0004
12	0.0223	33	0.0471	54	0.0467	75	0.0218	96	0.0041	117	0.0003
15	0.0262	36	0.0492	57	0.0439	78	0.0182	99	0.0030	120	0.0002
18	0.0302	39	0.0505	60	0.0407	81	0.0150	102	0.0021		

在此基础上,得到中修间隔时间累积分布函数估计结果:

$$F(t)=\Phi\left(\frac{t-48.073}{22.953}\right)$$

(1)

式中: Φ ——标准正态分布函数; t ——中修间隔时间。

利用 d 检验判断模型和观测数据的吻合程度。根据样本观测值计算出偏差统计量 D 值为 0.1654,取显著性水平 $\alpha=0.1$,查表可得临界统计量 $D_{n,\alpha}=1.22/\sqrt{n}=0.4067,D<D_{n,\alpha}$,表明式(1)建立的累积分布函数模型与观测数据的吻合程度较好,可以用来描述阀门中修间隔时间的累积分布情况。由此得到阀门平均中修间隔时间为 53.95 月,中修间隔时间的可靠度函数为

$$R(t)=1-F(t)=1-\Phi\left(\frac{t-48.073}{22.953}\right)$$

(2)

4.4.3 大修间隔时间分布特征与参数估计

a. 样本数据的一致性检验。以大修间隔时间为因变量,船闸编号为自变量,对表5中36份样本数据进行方差齐性检验和单因素方差分析。Levene法检验统计量为2.121,自由度

$df_1=11$ 和 $df_2=24$,对应的 P 值为 0.060,认为样本总体满足方差齐性的要求。单因素方差分析检验统计量 U 为 2.630,显著性 (Sig.) P 值为 0.023,认为样本数据总体均值不存在差异(表7)。因此,36个样本数据来自同一总体。

b. 大修间隔时间分布特征与参数估计。应用经典统计分析模型,得到大修间隔时间的可靠度函数为

表7 大修间隔时间样本数据单因素方差分析

Table 7 One-way analysis of variance of overhaul

interval sample data					
变异来源	平方和	df	均方	F	显著性
组间	15317497.533	11	1392499.776	2.630	0.023
组内	12707253.467	24	529468.894		
总数	28024751.000	35			

$$R(T)=1-F(T)=1-\Phi\left(\frac{T-3335.46}{958.03}\right)$$

(3)

式中: T ——大修间隔时间。

平均大修间隔时间 3348.50 d,标准差为 894.82;取 $\alpha=0.05$,得到 95% 置信水平下的置信区间为 (3056.19,3640.81)。

5 结 论

本文以维修事件数据为基础,研究如何从维修信息中挖掘船闸寿命周期可靠性规律,构建并验证了船闸系统可靠性分析的 RABED 模型。首先构建了船闸维护信息集成模型,解决了“维修信息孤岛”问题;然后从复杂系统广义可靠性的视角,定义了大修间隔时间、中修间隔时间、故障次数等船闸系统可靠性参数,提出了 RABED 的总体思路,设计了 RABED 流程;最后以 17 座人字门船闸的历史维修信息为基础,系统地完成了从数据收集点确定、事件数据采集、样本数据集成,到可靠性参数估计的全面分析过程,得到了繁忙河段船闸的故障特征和关键组件,以及中修间隔时间、大修间隔时间等可靠性参数的分布特征,从维修事件视

角量化了系统的可靠性,验证了维修信息集成模型和 REBED 模型的科学性。研究成果突破了可靠性理论在土木工程领域的具体应用,为从维修信息中挖掘船闸寿命周期可靠性规律,提供了一套系统的解决方法,对其他基础设施寿命周期管理亦具有借鉴作用。

参考文献:

- [1] ASCE. 2013 Report card for America's infrastructure [M]. Washington D. C. : ASCE, 2013.
- [2] 中国现有通航建筑物逾千座船闸行业实现快速发展[EB/OL]. [2012-10-29]. <http://www.hb.chinanews.com/news/2012/1029/122063.html>.
- [3] ZHENG Ruohua, BRUCE R E. Role of non-destructive evaluation in time-dependent reliability analysis[J]. Structural Safety, 1998, 20:325-339.
- [4] KELEJIAN H H. Probability model of lockage stalls and interferences[J]. Transportation Research Record, 1991, 1313:91-97.
- [5] 陈一梅, 马丽佳, 王建民. 船闸底枢可靠性模型及其应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(1):205-209. (CHEN Yimei, MA Lijia, WANG Jianmin. Reliability model of lock bottom assembly and its application [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(1):205-209. (in Chinese))
- [6] MCALLISTER T P, ELLINGWOOD B R. Evaluation of crack growth in miter gate weldments using stochastic fracture mechanics [J]. Structural Safety, 2001, 23(4):445-465.
- [7] BILAL M A, MARK P K, ROBERT C P, et al. Loads for fatigue life assessment of gates at navigation locks[J]. Journal of Infrastructure Systems, 1997, 3:68-77.
- [8] ALLEN C E, DAN M F, STUART D F. Updating reliability of steel miter gates on locks and dams using visual inspection results [J]. Engineering Structures, 2004, 6(3):319-333.
- [9] KEVIN L R, RUI L, STUART D F. Sustainable approach for optimal steel sheet pile structure assessment, maintenance, and rehabilitation[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 27(2):181-190.
- [10] U S Army Corps of Engineers. ETL-1110-2-532 Reliability assessment of navigation structures[S]. Washington D. C. : U S Army Corps of Engineers, 1992.
- [11] 成虎. 工程全寿命期管理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [12] 孙成双, 申立银. 基于信息流分析的建设项目可持续性研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增刊2):316-320. (SUN Chengshuang, SHEN Liyin. Study on the construction project sustainability based on information flow analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Sup2):316-321. (in Chinese))
- [13] MILL T, ALT A, LIAS R. Combined 3D building surveying techniques-terrestrial laser scanning (TLS) and total station surveying for BIM data management purposes[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2013, 19(Sup1):23-32.
- [14] 成于思, 成虎. 工程系统分解结构的概念和作用研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(4):125-130. (CHENG Yusi, CHENG Hu. Concept and application of engineering breakdown structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(4):125-130. (in Chinese))
- [15] 冒刘燕, 成虎. 大型工程设施全寿命期健康管理研究[J]. 建筑经济, 2012, 362(12):28-30. (MAO Liuyan, CHENG Hu. Study on large-scale engineering facility life cycle health management[J]. Construction Engineering, 2012, 362(12):28-30. (in Chinese))
- [16] 冒刘燕. 基于可靠性理论的内河船闸维修决策研究[D]. 南京:东南大学, 2015.
- [17] 丁定浩, 陆军. 可靠性、维修性、保障性参数指标体系探讨[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(2):170-174. (DING Dinghao, LU Jun. Discussion on the system of reliability, maintainability and supportability parameters[J]. Journal of CAEIT, 2011, 6(2):170-174. (in Chinese))
- [18] KUMAR U D, CROCKER J, KNEZEVIC J, et al. 可靠性、维修与后勤保障:寿命周期方法[M]. 刘庆华, 宋宁哲, 译. 北京:电子工业出版社, 2010.
- [19] 赵宇. 可靠性数据分析教程[M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
- [20] 左洪福, 蔡景. 维修决策理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2008.
- [21] 王金武. 可靠性工程基础[M]. 北京:科学出版社, 2013.
- [22] 郭波, 武小悦. 系统可靠性分析[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2001.
- [23] 宣国祥, 张瑞凯, 宗慕伟. 葛洲坝2号船闸运行故障情况分析 & 运行可靠度估算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1997, 25(6):48-54. (XUAN Guoxiang, ZHANG Ruikai, ZONG Muwei. Operation analysis and reliability calculation for No. 2 ship lock of Gezhouba project[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 1997, 25(6):48-54. (in Chinese))
- [24] 黄崇福. 自然灾害风险评估理论与实践[M]. 北京:科学出版社, 2005.