

集装箱码头装卸系统多状态可靠性分析

黄雯娟¹ 周强¹ 虞伟杰²

1 武汉理工大学物流工程学院 武汉 430063

2 宁波市特种设备检验研究院 宁波 315048

摘要：基于多状态系统的可靠性理论，深入分析了集装箱码头装卸系统组成元素的关联结构与多状态特征，建立了集装箱码头装卸系统的多状态可靠性理论模型，结合码头规划设计的需求，应用该模型分析了机械设备优化配置的定量依据，验证了多态可靠性分析方法的工程价值。

关键词：集装箱码头；装卸系统；多状态；可靠性

中图分类号：U691 文献标识码：A 文章编号：1001-0785（2019）05-0071-05

Abstract: Based on the reliability theory of multi-state system, the paper thoroughly analyzes the related structure and multi-state characteristics of the components of container terminal handling system, and establishes the multi-state reliability theory model of container terminal handling system, analyzes the quantitative basis for optimal configuration of mechanical equipment by applying the model and combining requirements of terminal planning and design, and verifies the engineering value of multi-state reliability analysis method.

Keywords: container terminal; handling system; multi-state; reliability

0 引言

港口作为国家贸易运输枢纽，是我国“一带一路”战略框架的重要战略节点，其中集装箱码头的通过能力可直接影响全球供应链的运作效率，是反映一个国家、地区整体实力和综合竞争力的重要指标之一^[1]，研究集装箱码头装卸作业的可靠性问题对我国港航运输以及一带一路物流枢纽建设具有重要的现实意义。

集装箱码头装卸系统可靠性的影响因素众多，系统中任意一个环节出现故障或由于调度问题造成设备等待都可能会对其前后环节的作业产生掣肘，对整体运行的效率产生影响，从而影响系统运行的可靠性；同时也存在大量的外部影响因素，如天气状况以及传统集装箱码头不可避免的人为因素等，大大增加了集装箱码头装卸系统运行的不确定性，对码头装卸作业的可靠性产生影响。

以往对码头装卸系统的可靠性研究中，对装卸设备

单机的机械可靠性研究较多，如杨瑞刚等^[2]、杜习超^[3]等基于传统机械可靠性理论应力-强度模型对港口起重机的结构可靠性进行了研究；而将对于整个装卸系统的可靠性研究作为二态系统来研究，如张舒等^[4]、艾弯等^[5, 6]利用可靠性框图分别建立了传统散货码头和专业化筒仓煤炭码头装卸系统的可靠性分析模型。传统可靠性理论将分析对象看作只有两种状态，所有中间状态都被归入完全失效状态或完全可靠状态，对研究对象进行了过分的简化^[7]，这与实际情况不相符。多状态可靠性理论的研究解决了上述问题，在分析其可靠性的过程中可充分考虑到码头装卸系统可能出现的所有工作状态，从而得到更科学合理的可靠性指标。

本文选取集装箱码头中最重要的组成部分——装卸系统，运用多状态可靠性理论和相关分析方法，研究集装箱码头装卸系统的可靠性问题，其优势是：1）可比较同一任务水平下不同机械设备配置方案的系统可靠性，将其作为码头规划设计中机械设备优化配置

引用格式 黄雯娟,周强,虞伟杰.集装箱码头装卸系统多状态可靠性分析[J].起重运输机械,2019(5):71-75.

的依据; 2) 可通过系统可靠性变化探寻机械设备状态劣化的提前期, 将其作为设备更新的依据。

1 集装箱码头装卸系统结构关联关系与多状态可靠性

1.1 集装箱码头装卸系统的结构关联关系

集装箱码头装卸系统是典型的离散事件动态系统, 具有高度的随机性、非线性、动态性、耦合性等特性^[1], 该系统通常可按装卸区域及功能分为不同的子系统, 各个子系统中又包含多台装卸机械设备, 组成结构具有明显的层级与复杂的关联关系。

设本文所研究系统的边界为码头前沿泊位到集装箱堆场之间的装卸系统。该系统主要包含三个子系统: 装卸船作业子系统、水平运输子系统、堆场作业子系统。装卸船作业子系统的功能是利用前沿装卸设备将集装箱从码头前沿交接区的水平运输设备上提取装载到停靠在泊位的船上以及将集装箱从船上卸载至码头前沿交接区的水平运输设备上; 水平运输子系统的功能是负责集装箱从码头前沿到堆场之间的运输; 堆场作业子系统的功能是从堆场交接区的水平运输设备上提取集装箱放置到堆场相应的箱位以及将堆场箱区中的集装箱搬运至堆场交接区的水平运输设备上。以泊位、前沿交接区、堆场交接区及堆场为点, 以装卸机械设备为边, 建立集装箱码头装卸系统组织结构网络模型, 如图 1 所示。图 1 中泊位及堆场是码头上实际存在的, 前沿交接区及堆场交接区是为建立模型所设置的虚拟区域, 分别指实际码头中的前沿装卸桥下方以及堆场箱区的集装箱交接区域。

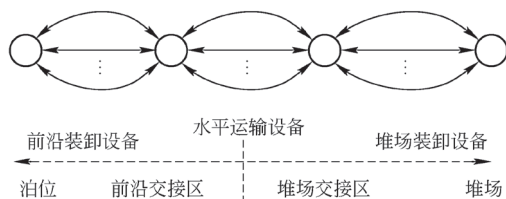


图 1 集装箱码头装卸系统组织结构网络模型

由图 1 所示的组织结构网络模型可知每个子系统内的装卸设备功能相同, 互相独立, 状态性能呈现并联关系, 构成子系统工作状态; 三个子系统之间功能上互相衔接, 状态性能呈现为串联关系, 构成集装箱码头装卸

系统的工作状态。集装箱码头装卸系统结构与状态关联关系如图 2 所示。

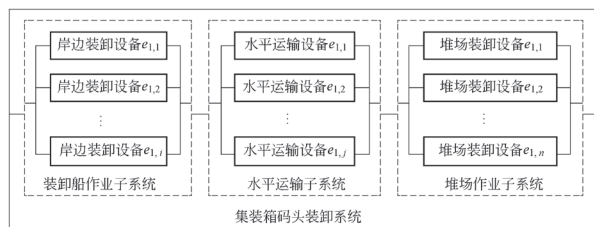


图 2 集装箱码头装卸系统结构与状态关联关系

装卸设备处于不同的工作状态对应不同的性能值, 导致其所在路径不同的通过量, 集装箱码头装卸系统总通过量减少代表系统运行水平向着降低的方向转移, 则系统可靠性下降, 可以建立一个多状态可靠性模型对集装箱码头装卸系统可靠性进行评估。

1.2 集装箱码头装卸系统的多状态可靠性

集装箱码头装卸系统的多状态可靠性是指集装箱码头装卸系统在规定的时间内、规定的条件下、实现规定功能的概率。

集装箱码头装卸系统是典型的多状态系统。多状态系统是指具有有限多个工作状态或运行水平的系统。这类系统既能真实地表征复杂系统多状态的特点, 又能反映出系统性能与组成单元的性能、系统可靠性与单元可靠性的关系^[8], 研究这类系统可靠性的理论被统称为多状态可靠性理论。传统的可靠性理论只考虑系统具有正常运行与故障停机两种状态, 而现实世界中的很多系统都是由具有不同性能参数和多种故障模式的元件组成的多状态系统。随着贝叶斯网络理论、分数阶理论、马尔科夫理论、Petri 网等基础理论的发展, 使复杂系统/元件的多状态可靠性研究进入了一个新的发展阶段^[9], 多状态可靠性理论逐渐成熟, 并被运用到许多领域中。集装箱码头装卸系统中装卸设备具有多种不同的工作状态, 逐层构成系统的多态性。因此, 可运用多状态可靠性理论进行集装箱码头装卸系统可靠性研究。

装卸设备单机的状态可分为以下 5 种:

- 1) 所有元件正常, 设备状态优良, 技术性能能充分正常, 甚至超水平发挥;
- 2) 个别辅助元件有轻微瑕疵或疲劳, 设备状态良好, 性能正常发挥;

3) 有些元件有一定程度的疲劳劣化, 状态表现一般, 设备性能逐渐下降, 更新后设备性能可以恢复到前二种状态;

4) 关键元件或结构件处于劣化疲劳中后期状态, 设备性能急剧下降, 勉强能使用;

5) 关键元件完全失效, 故障导致设备完全无法使用。

设备不同的状态对应着不同的输出性能, 可依照图 2 中的关联关系逐层得出子系统与集装箱码头装卸系统总体的多种状态与各状态概率。

若得出的集装箱码头装卸系统有 R 种工作状态, 认为存在某一状态 $i(i=1, \dots, R)$ 作为系统可靠性的评判界限, 如若满足装卸任务需求的最低状态, 当系统处于或优于 i 状态时为可靠的, 否则为失效的, 且不同的性能水平使得系统处于不同的安全裕度, 得到性能累积分布函数来定义可靠性参数, 从而表征系统在不同工作状态下完成规定功能的概率。

2 集装箱码头装卸系统多状态可靠性理论模型

2.1 系统的多状态模型

建立集装箱码头装卸系统的多状态模型, 从组成系统的机械设备着手。设系统中某机械设备 e_j 具有 m_j 个不同状态, 分别对应着 m_j 个不同的性能值, 该设备处于状态 $i(i=1, \dots, m_j)$ 时的工作性能值可用 g_{ji} 进行表示, 则其性能值集合为 $g_j = \{g_{j1}, g_{j2}, \dots, g_{jm_j}\}$ 。在任意时刻 $t(t \geq 0)$, 设设备 e_j 的性能值为 $G_j(t)$, 是一个随机变量, 且有 $G_j(t) \in g_j$ 。所以, 在任意工作时段 $[0, T]$ 内, 设备 e_j 的性能值可描述为一个随机过程。

在任意时刻 $t(t \geq 0)$, 设备 e_j 处于状态 $i(i=1, \dots, m_j)$ 的概率为 p_{ji} , 则其处于不同状态的概率集合为

$$p_j = \{p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{jm_j}\} \quad (1)$$

其中

$$p_{ji} = \Pr\{G_j(t) = g_{ji} \mid i = 1, \dots, m_j\} \quad (2)$$

且有

$$\sum_{i=1}^{m_j} p_{ji}(t) = 1 (0 \leq t \leq T) \quad (3)$$

由式 (1) 及式 (2) 可知, 由集合 $g_j(t)$ 和 $p_j(t)$ 能够确定时刻 $t(t \geq 0)$ 时设备 e_j 的性能值 $G_j(t)$ 。

对于由多个多状态单元组成的多状态系统, 在某一时刻, 系统的组成单元都各自处于某种状态, 这些单元状态的组合确定了系统在该时刻所处的工作状态, 说明多状态系统的性能分布情况可通过其组成单元的性能分布情况来确定。

设集装箱码头装卸系统中某子系统 $E_i(i=1, 2, 3)$ 具有 M 种不同的工作状态, 分别对应着 M 种不同的状态性能值 $g_i(i=1, \dots, M)$, 则 E_i 在 t 时刻的工作性能值 $G(t)$ 也是一个随机变量, 且有 $G(t) \in g (g = \{g_1, \dots, g_M\})$ 。

设构成该子系统 E_i 的各机械设备状态的组合空间为

$$L^n = \{g_{11}, \dots, g_{1m_1}\} \times \{g_{21}, \dots, g_{2m_2}\} \times \dots \times \{g_{n1}, \dots, g_{nm_n}\}$$

可构造性能结构函数 Φ 来描述机械设备性能空间与功能子系统性能空间之间的关系为

$$\Phi(g_1, \dots, g_n): L^n \rightarrow g \quad (4)$$

式中: $g = \{g_1, \dots, g_M\}$ 为子系统 E_i 的状态性能值集合; $g_j(t) = (g_{j1}, \dots, g_{jm_j})$ 为机械设备 e_j 的状态性能值集合, $j = 1, \dots, n$; n 为该子系统中包含机械设备的个数。

由式 (4) 可知, 性能结构函数 Φ 可确定子系统 E_i 的状态性能与组成它的机械设备的状态性能之间的关系, 有

$$G(t) = \Phi(G_1(t), \dots, G_n(t)) \quad (5)$$

式中: $G(t)$ 为 E_i 在 t 时刻的状态性能值, $G_j(t) (j=1, 2, \dots, n)$ 为设备 e_j 在 t 时刻的状态性能值。

对于不同的多状态系统, 因各组成单元之间的组织结构关系的不同而具有不同的性能结构函数。若组成单元为串联关系, 则其性能结构函数可表示为

$$\Phi(G_1(t), \dots, G_n(t)) = \min_{1 \leq j \leq n} G_j(t) \quad (6)$$

若组成单元为并联关系, 则其性能结构函数可表示为

$$\Phi(G_1(t), \dots, G_n(t)) = \sum_{1 \leq j \leq n} G_j(t) \quad (7)$$

综上所述, 由于组成集装箱码头装卸系统某一子系统 $E_i(i=1, 2, 3)$ 的 n 台装卸设备功能相同且相互独立, 可看作并联关系, 则该子系统的状态性能输出函数为

$$G_i(t) = \sum_{1 \leq j \leq n} G_j(t) = \sum_{1 \leq j \leq n} f(p_j(t), g_j(t)) \quad (8)$$

式中: $f(p_j(t), g_j(t))$ 为 $p_{ji} = Pr\{G_j(t) = g_{ji}\}$ 的解算。

同理, 由式 (8) 可得到集装箱码头装卸系统各子系统的状态性能输出函数, 各子系统可看作串联关系, 得到系统的状态性能输出函数

$$G(t) = \min_{1 \leq i \leq 3} G_i(t) = \min_{1 \leq i \leq 3} \left\{ \sum_{1 \leq j \leq n} f(p_j(t), g_j(t)) \right\} \quad (9)$$

由上述推理可知, $G(t)$ 也是一个随机变量, 即集装箱码头装卸系统状态性能输出是一个随机过程。

2.2 系统可靠性模型

设集装箱码头装卸系统在规定时间内承担工作任务所需的状态性能值分布为随机变量 $W(t)$, 定义函数 $F(G(t), W(t))$ 为系统工作状态性能值 $G(t)$ 与工作任务需求性能值 $W(t)$ 的差值, 用来表征系统工作状态是否满足需求, 即

$$F(t) = G(t) - W(t) \quad (10)$$

将系统工作状态性能集分为可工作状态子集和失效状态子集: 当 $F(t) \geq 0$ 时, 系统处于可工作状态子集; 当 $F(t) < 0$ 时, 系统处于失效状态子集。

集装箱码头装卸系统是一个可修的多状态系统, 即该系统的状态不是只由好向坏转移, 也可由失效状态向可工作状态转移。因此系统的状态性能值分布函数 $G(t)$ 不是单调递减的, 而是有起伏波动的函数, 如图 3 所示。

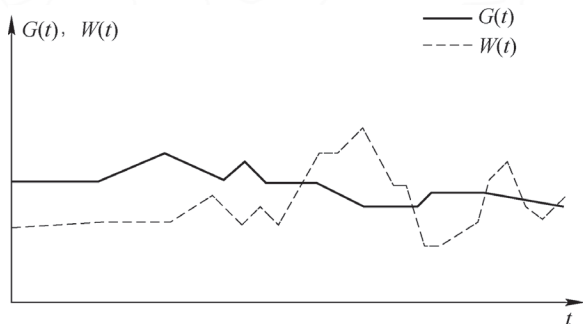


图 3 随机过程 $G(t)$ 与 $W(t)$ 关系示意图

定义可靠性指标可靠度 为规定时间内集装箱码头装卸系统输出性能不低于装卸任务需求的概率, 可表示为

$$R(\omega) = Pr\{G(t) \geq \omega\} = E\{I(G(t) \geq \omega)\} \quad (11)$$

式中: $E\{\cdot\}$ 表示函数 $I(F(t) \geq 0)$ 的数学期望, ω 为时刻 t 时系统的装卸任务需求性能值。

3 算例分析

运用所建模型进行实例研究。选取一类典型装卸设备配置的集装箱码头单泊位装卸系统, 研究该系统在一个任务周期内的可靠性。设该泊位为 5 万吨级泊位, 平均单船装卸集装箱量取 1 250 TEU, 任务期限为 20 h。采用典型的“船—岸边集装箱起重机—集卡—轨道式门式起重机—堆场”装卸工艺, 设备配比为 3 台岸边集装箱起重机 + 15 辆集装箱卡车 + 6 台轨道式门式起重机, 码头一般都配备了充足作为流动机械的集卡, 故障后能快速调度进行补充, 轨道式门式起重机在本模型中仅考虑其负责从船上卸载或即将装载到船上的集装箱, 故其装卸效率减为原来的 1/2。该系统的组织结构如图 4 所示。

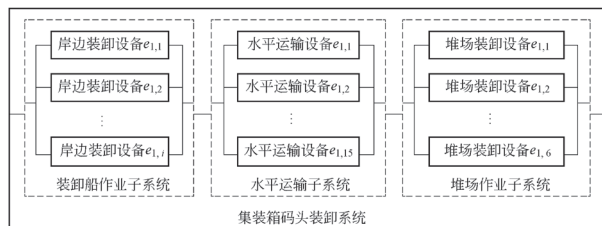


图 4 某典型集装箱码头单泊位装卸系统组织结构

根据码头工程建设相关资料、海港集装箱码头设计规范 (JTS 165-4—2011) 以及某集装箱码头 2014 年设备故障汇总得到该系统中装卸设备的状态性能值和概率, 如表 1 所示。根据所建模型可计算得到各个子系统状态性能输出值及概率如表 2 所示。

表 1 某典型集装箱码头装卸系统装卸机械状态性能值及概率

装卸机械设备	工作状态	状态性能值 / (TEU·h ⁻¹)	状态概率 / %
集装箱岸边起重机	完好	30	99.77
	失效	0	0.23
集装箱卡车	完好	12	100
	失效	0	0.00
轨道式门式起重机	完好	30	99.74
	失效	0	0.26

表2 某典型集装箱码头装卸系统各子系统状态性能输出值及概率

子系统	工作状态	状态性能值 / (TEU·h ⁻¹)	状态概率 / %
装卸船作业子系统	设备全部完好 Z _{1,1}	90	99.31
	一台设备失效 Z _{1,2}	60	0.69
	两台设备失效 Z _{1,3}	30	0.00
	设备全部失效 Z _{1,4}	0	0.00
水平运输子系统	设备全部完好 Z _{2,1}	180	100
	其他 Z _{2,2}	0	0.00
堆场作业子系统	设备全部完好 Z _{3,1}	180	98.45
	一台设备失效 Z _{3,2}	150	1.54
	两台设备失效 Z _{3,3}	120	0.01
	三台设备失效 Z _{3,4}	90	0.00
	四台设备失效 Z _{3,5}	60	0.00
	五台设备失效 Z _{3,6}	30	0.00
	设备全部失效 Z _{3,7}	0	0.00

根据表2可知系统可能出现的工作状态组合有(Z_{1,1}, Z_{2,1}, Z_{3,1}) (Z_{1,1}, Z_{2,1}, Z_{3,2}) (Z_{1,1}, Z_{2,1}, Z_{3,3}) (Z_{1,2}, Z_{2,1}, Z_{3,1}) (Z_{1,2}, Z_{2,1}, Z_{3,2}) (Z_{1,2}, Z_{2,1}, Z_{3,3}) 六种。由式(9)可计算得出该典型集装箱码头装卸系统的状态性能输出值及概率如表3所示。

可将上述六种状态聚合成两种状态:完好工作状态和劣化工作状态,对应状态性能值分别为90 TEU/h和60 TEU/h,状态概率分别为99.31%和0.69%。

又由于任务需要在20 h内完成1 250 TEU的装卸箱量,计算得出任务需求性能值

$$\omega = \frac{1\,250\text{ TEU}}{20\text{ h}} = 62.5\text{ TEU/h} \quad (12)$$

则有

$$Pr\{G(t) \geq \omega\} = 99.31\% \quad (13)$$

$$Pr\{G(t) < \omega\} = 0.69\% \quad (14)$$

表3 某典型集装箱码头装卸系统状态性能输出值及概率

工作状态	状态性能值 / (TEU·h ⁻¹)	状态概率 / %
(Z _{1,1} , Z _{2,1} , Z _{3,1})	90	97.77
(Z _{1,1} , Z _{2,1} , Z _{3,2})	90	1.53
(Z _{1,1} , Z _{2,1} , Z _{3,3})	90	0.01
(Z _{1,2} , Z _{2,1} , Z _{3,1})	60	0.68
(Z _{1,2} , Z _{2,1} , Z _{3,2})	60	0.01
(Z _{1,2} , Z _{2,1} , Z _{3,3})	60	0.00

由式(11)、式(13)和式(14)进行系统可靠度计算

$$\begin{aligned} R &= Pr\{G(t) \geq \omega\} = E\{1(G(t) \geq \omega)\} \\ &= 1 \times Pr\{G(t) \geq \omega\} + 0 \times Pr\{G(t) < \omega\} \\ &= 99.31\% \end{aligned}$$

计算得出这一集装箱码头装卸系统在一个任务周期内的可靠度为99.31%。

综上所述,通过运用所建立的集装箱码头装卸系统多状态可靠性模型,计算得出系统在某一工作任务需求水平时,设备配置为3台岸边集装箱起重机+15辆集装箱卡车+6台轨道式龙门起重机的情况下的可靠度为99.31%,说明这一种设备配置方案可靠度很高。结合表2和表3可以看出,制约系统总体输出性能值的是装卸船作业子系统,即说明是岸边集装箱起重机的作业效率制约了装卸系统总体效率,符合码头效率制约因素的实际情况。

4 结语

基于多状态系统可靠性分析方法,对集装箱码头装卸系统完成工作任务的可靠性进行研究,建立集装箱码头装卸系统多状态可靠性模型,选取集装箱码头装卸系统某种常见的设备配置方案作为算例,得到了可靠度作为机械设备配置方案比选的定量依据,验证了多态可靠性分析方法应用在集装箱码头装卸系统中的工程价值。该模型还可应用于通过系统可靠性变化探寻机械设备状态劣化的提前期,将其作为设备更新的依据,这一工程应用可在接下来的研究中完成。另外,集装箱码头装卸系统作为典型的离散事件动态系统,包含大量的不确定因素,其运行可靠性的影响因素非常复杂,本文仅考虑了机械设备故障这一因素,采用数学方法进行解算较为方便,一旦考虑了众多因素共同的影响,模型将变得更加复杂,难以用数学方法得出有效结果,可进一步运用计算机仿真方法加以研究。

参考文献

- [1] 李斌.基于计算物流的集装箱码头集疏运虚拟机体系结构及其仿真分析[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):245-263.
- [2] 张舒,贺铭革.专业散货码头装卸系统可靠性分析方法[J].物流工程与管理,2010,32(4):60-62.

CFRP 修复港口起重机箱形结构疲劳裂纹的数值仿真及实验研究

张 芳 项科忠 徐 升

宁波市特种设备检验研究院 宁波 315000

摘 要：箱形结构是港口起重机的主要结构形式之一。其长期承受疲劳交变载荷，容易诱导裂纹扩展，最终导致疲劳断裂失效，严重威胁人类财产安全 and 经济效益。文中应用碳纤维增强复合材料（CFRP）对箱形结构上的疲劳裂纹进行修复，通过数值仿真计算裂纹尖端应力强度因子，结合 Paris 公式计算裂纹扩展的速率，随后通过疲劳载荷下裂纹扩展实验对仿真结果进行验证。结果表明，CFRP 修复能够显著降低箱形结构上的裂纹扩展速率，延长其使用寿命。

关键词：港口起重机；箱形结构；碳纤维增强复合材料；裂纹扩展速率；疲劳寿命

中图分类号：U653.921 文献标识码：A 文章编号：1001-0785（2019）05-0076-05

Abstract: The chassis structure is one of main structures of port cranes and tend to cause crack growth due to a long time of suffering from fatigue alternating load, which will impose seriously threatens on the safety of human property and economic benefits. In the paper, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is used to repair fatigue cracks on the chassis structure. The stress intensity factor at the crack tip is calculated by numerical simulation, and the crack growth rate is calculated by combining Paris formula. Then the simulation results are verified by crack growth experiments under fatigue load. Results show that the repair with CFRP can reduce the crack growth rate significantly on the chassis structure and extend the service life.

Keywords: port crane; chassis structure; carbon fiber reinforced polymer; crack growth rate; fatigue life

0 引言

港口起重机广泛应用于各大港口、码头、堆场等，其自重和货物载荷长期共同作用，产生疲劳交变载荷，金属结构上的疲劳裂纹将不可避免的扩展，最终导致结

构失效。由于疲劳裂纹扩展引发的灾难时有发生，如起重机主梁、支腿断裂而造成的重大灾难事故^[1]。

由于起重机结构较复杂，当裂纹出现在箱形结构局部时，难以对其单一构件进行更换，故一般对裂纹采取

引用格式 张芳,项科忠,徐升.CFRP 修复港口起重机箱形结构疲劳裂纹的数值仿真及实验研究[J].起重运输机械,2019(5):76-80.

- [3] 杨瑞刚,孟令军,胡立春.桥式起重机主梁结构多源不确定性混合可靠性分析[J].安全与环境学报,2018,18(4):1246-1251.
- [4] 杜习超.桥式起重机结构可靠性优化设计研究[D].郑州:郑州大学,2018.
- [5] 艾弯,熊少飞.筒仓煤炭码头装卸系统可靠性研究[J].港口装卸,2016(2):36-38.
- [6] 艾弯,周强.煤炭码头装卸工艺系统维修性预测[J].起重运输机械,2013(5):87-91.
- [7] 谢里阳,王正,周金宇,等.机械可靠性基本理论与方法[M].北京:科学出版社,2012.

- [8] 李春阳.基于多态系统理论的可靠性分析与优化设计方法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2011.
- [9] 李志强,徐廷学,顾钧元,等.不确定条件下复杂系统可靠性建模与分析综述[J].战术导弹技术.https://doi.org/10.16358/j.issn.1009-1300.2018.6.247.

作者:黄雯娟
电子邮箱:hwj_927@163.com
收稿日期:2018-10-26