DOI: 10.3901/JME.2020.10.001

在役大型游乐设施健康评价方法研究*

沈功田 刘 渊 张君娇 胡 斌
(中国特种设备检测研究院 北京 100029)

摘要: 大型游乐设施是人们追求美好生活的重要工具和弘扬传统文化的有力平台,其安全性、可靠性和经济性受到了社会的广泛关注。实施健康管理是保障大型游乐设施在服役期间能安全、可靠、经济运行的一种先进手段。围绕大型游乐设施健康管理中健康评价这一核心环节,第一,从健康状态的本质出发,建立健康状态的数学模型;第二,通过分析在役大型游乐设施的损伤发展和功能退化规律以及游乐园的实际需求,提出了大型游乐设施健康状态分级的概念,并划分为“健康”、“亚健康”、“微病态”和“病态”4个等级;第三,针对国内外大型游乐设施的技术现状,提出一种综合利用对设备的定期检验、日常维护保养和设备实时状态监测三方面信息的定量健康评价方法;最后,通过典型大型游乐设施进行综合应用及分析,验证了该方法的有效性和实用性,实现由静态的安全评价向动态的健康评价转变和升级,为今后进行更加深入的大型机电设备健康管理研究提供可以借鉴的思路。

关键词: 大型游乐设施;健康管理;健康评价;多元信息

中图分类号: E07; TH17

Research on Health Evaluation Method for In-service Large-scale Amusement Rides

SHEN Gongtian LIU Yuan ZHANG Junjiao HU Bin
(China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029)

Abstract: Large-scale amusement rides are an important tool for people to pursue a better life and a powerful platform for promoting traditional culture. Their safety, reliability and economy have attracted widespread attention from the society. Implementing health management is an advanced means to ensure that they can operate safely, reliably, and economically during operating. Revolving around the core link of health evaluation in the health management of large-scale amusement rides, first of all, starting from the nature of health status, a mathematical model of health status is established. Second, by analyzing the damage development and functional degradation laws of large-scale amusement rides in service and the actual needs of amusement parks, the concept of grading the health status of large-scale amusement rides is proposed and classified as “healthy”, “sub-healthy”, “slightly morbid” and “morbid” 4 levels. Third, in view of the technical status of large-scale amusement rides at home and abroad, a quantitative health evaluation method is proposed by that comprehensively utilizes the three aspects of information from equipment periodic inspection, daily maintenance and real-time condition monitoring. Finally, the comprehensive application and analysis through typical large-scale amusement rides verify the effectiveness and practicability of the method, and realize the transformation and upgrade from static safety assessment to dynamic health assessment. It can provide reference for further in-depth research on large-scale mechanical and electrical equipment health management.

Key words: large-scale amusement rides; health management; health evaluation; multivariate information

0 前言

大型游乐设施是青少年追求刺激放飞自我的重要载体,是家庭追求幸福生活的重要场所,是国家

文化软实力的重要组成部分,具有分布区域敏感、地标效应显著、参与人数众多且以青少年为主等特点。当前我国大型游乐设施行业处于高速发展阶段,拥有大型游乐设施(运行速度不小于2 m/s或运行高度不低于2 m的游乐设施,如过山车、摩天轮、旋转木马等)2.51万台套,每年入园体验的人数超7亿人次,乘坐人数约33亿人次,已经成为全球最大的

* “十三五”国家重点研发计划资助项目(2017YFC0805701)。20200209收到初稿,20200413收到修改稿

消费市场之一, 迪士尼、环球影城等世界主题乐园纷纷落户我国。同时大型游乐设施还具有设备高、速度快、运动形式多样、危险系数大等特点。进入 21 世纪以来, 科技水平越来越先进, 大型游乐设施越来越复杂, 媒体和社会的关注度越来越高, 信息传播速度越来越迅捷, 一旦发生事故造成群死群伤的可能性越来越大, 人们心理反差极大。

为了消除安全隐患, 预防突发事件的发生, 保障大型游乐设施的安全运行, 21 世纪初, 国家将其纳入特种设备进行安全监管。同时, 从“十一五”到“十三五”在科研方面持续给予支持, 尤其是“十三五”期间, 设立了重点研发计划专项项目“游乐园和景区载人设备全生命周期检测监测与完整性评价技术研究”, 支持力度可谓空前, 体现了国家对大型游乐设施安全的高度重视^[1]。广大科技工作者也投入了大量精力, 在大型游乐设施事故分析、风险评估、安全评价、检验检测等方面, 开展了相应的研究, 尤其是检验检测方面取得了显著的成果^[2-7]。相对而言, 在风险评估或安全评价方面的研究成果较少, 中国特种设备检测研究院开展了一些探索性工作, 尚未形成体系, 具有代表性的有: 林伟明^[8]以大摆锤这一典型大型游乐设施为对象, 在分析其常见失效模式的基础上, 开发了一套面向大摆锤设计阶段的失效分析、失效知识库的风险评价系统。XIAO 等^[9]采用统计理论和结构风险最小化原则, 提出了基于径向基函数支持向量机的小样本数据定量风险评价方法, 实现了在用设备的分级管理。王银兰等^[10]在分析游乐设施结构特点和现有通用风险评估方法的基础上, 凝练了游乐设施设计阶段的风险评估流程, 建立了一套适用于游乐设施设计阶段的风险评价方法。文献[11]针对游乐设施现有风险评价方法存在的不足, 提出了一种适用于犹豫模糊环境的 FMEA 分析方法, 克服了在评估专家中存在多个意见的难题, 解决了在役大型游乐设施的重要维修项目的失效鉴定问题。此外, 其他单位或个人也开展了少量零星的研究工作。中国矿业大学王雪颖等^[12]探讨了专家评判法和安全检查表法在大型游乐设施安全评价中的可行性。庄春吉等^[13-14]针对主观评价的模糊性和不确定性这一客观实际, 提出了基于灰色模糊理论和基于神经网络的安全评价方法。

上述关于大型游乐设施风险评估或安全评价方面的研究成果, 在一定程度上保障了大型游乐设施的安全运行。但是大多数仅局限于方法本身的研究, 以失效分析为基础, 利用现有的安全评价方法, 如

层次分析法^[15]、模糊数学综合评价法^[16]、人工神经网络评价法^[17-18]等来进行风险评估或者安全评价。这些研究是现有方法的应用拓展, 评价过程中的数据多源于专家打分, 具有一定的主观成分, 容易受专家的经验 and 专业背景所影响。另外, 所提出的方法针对的是某些典型的设备或子系统(单元), 应用的广度和深度有限; 单就方法本身而言, 大多是割裂和零散的, 相互之间缺乏融合, 各自为阵, 不成体系; 方法所采用的数据也是一次性的, 固化的, 而且数据来源较少, 应用也较少, 没有生命力。因此, 现存的方法在理论上只能实现静态的安全评价, 没有将大型游乐设施作为一个系统性的整体来对待, 进行不断的跟踪, 实施动态的评价, 以获取动态的健康状态。

为了实现大型游乐设施安全、可靠、经济的协调统一, 中国特种设备检测研究院以沈功田研究员为核心的科研团队, 在长期从事特种设备检验检测、失效模式识别、失效机理研究和安全评价等工作的基础上, 提出了包括健康指标、健康监测、健康评价和健康恢复环节的大型机械系统健康管理理论^[19-21], 并以大型过山车 and 大型储罐为对象, 开展了该理论的应用研究^[22-23]。鉴于健康评价是该理论的核心环节之一, 为了进一步完善和深化该理论, 本文立足于工程实际, 综合利用大型游乐设施定期检验(包括验收检验)、日常维护保养和状态监测等动态信息, 在建立健康状态数学模型的基础上, 研究基于多元信息的健康评价方法, 实现由静态的安全评价向动态的健康评价的跨越。

1 健康状态数学模型和评价分级研究

1.1 健康状态的本质描述

人的健康状态除了有健康不健康之外, 介于二者中间还存在一个“亚健康”状态, 并且这一人群的数量还十分庞大, 据《中国人健康大数据》调查, 超 70% 的人处于亚健康状态。在工程实际中, 广大的工程技术人员也认识到了同样的问题, 在机械设备的“正常”和“失效”之间也存在一个中间过度状态, 其在全寿命周期内的状态变化多半零部件呈渐进连续式退化, 但也有一些诸如电器控制、液压、转动等部件往往存在不确定性, 状态变化表现为随机性和模糊性。显然, 传统的二态假设或有限状态假设, 难以准确地描述机械设备的健康状态。

1.1.1 随机数学描述法

针对上述的中间过渡状态问题, 目前常用随机

数学和模糊模型来描述,并结合可靠性理论来解决。随机数学将这一从“正常”退化到“故障”的过程当成多态失效问题来处理,多个状态具有随机性,且状态之间具有偶然性,常用概率分布方法、马尔科夫链、贝叶斯理论等方法来建立数学模型。常见系统及其组件的状态转变过程如图 1 所示^[24]。

图 1 系统及其组件状态变化图

1.1.2 模糊数学描述法

实际上,系统的“正常”、“亚健康”和“故障”状态之间往往存在大量的模糊现象,难以用“非此即彼”的经典数学来处理。例如机械设备发生事故一般会经历损伤的产生与发展,故障的出现,最后到达失效,这也是客观规律的一个发展过程。但是很多时候,损伤过程的发展阶段和故障从功能上是难以严格区分的。比如损伤的早期,既可以看成是“正常”也可以认为是“亚健康”,因为这个阶段能完全实现设备所要求的功能。随着损伤的进一步发展,劣化更严重,此时虽然不能完全满足所需求的功能,但是还是可以基本实现功能,因此可以认为是“亚健康”,也可以认为是“故障”。总体而言,各状态之间的界限是模糊的,难以严格区分。当然,对于“亚健康”状态需要高度重视,采取相应的对策,避免事故的发生。对于这种模糊问题,工程上常常利用模糊数学理论来处理,将传统经典数学和随机数学的“非此即彼”的精确现象领域拓展到了“亦此亦彼”的模糊现象领域。自从美国学者 ZADEH^[25]于 1965 年提出模糊集理论以来,得到了快速发展,成了处理模糊等不确定信息的重要工具,应用十分广泛。

一般地,用模糊数学来表征系统的健康状态时,将经典集合的特征函数的值域 $\{0, 1\}$ 推广到区间 $[0, 1]$ 上。这样一来,经典集中的特征函数就扩展为模糊集的隶属函数了。显然,隶属函数的基本思想恰当的体现了模糊性的过度过程,适合用于描述健康状态的模糊问题。

1.2 健康状态数学模型的建立

毋庸置疑,大型游乐设施的健康状态会随着服役时间的增加而逐渐劣化。也就是说,大型游乐设施的健康状态是一个关于时间的函数。通常情况下,

工程应用上是通过状态参数来表征其状态的。这种方法对于某些零部件或者子系统的表征非常精确,但是对于整机来说,所涵盖的信息毕竟有限,能力稍显不足,容易导致对整机状态的误判。为了能更全面地描述大型游乐设施的健康状态,本文采用向量、集合和模糊数学工具来对其进行数学建模。

定义 1: 健康指标矩阵。设整机的评价项目(指标)有 m 个,且都是时间 t 的函数,则可以表示如下的矩阵形式

$$\mathbf{p}(t) = (p_1(t), p_2(t), \dots, p_m(t))^T \quad (1)$$

$$p_i(t) = p_{\delta_i}(t) \circ p_{\Delta_i}(t) \cdot p_i^*(t) \quad i = 1, 2, \dots, m, m \in N \quad (2)$$

式中,“ $\circ$ ”为模糊合成算子 $M(\otimes | \oplus | \wedge | \vee)$ (表示有界乘法、和、取大或者取小运算); t 表示时间变量; $p_i(t) (i = 1, 2, \dots, m, m \in N)$ 表示指标的健康状态值, $p_{\Delta_i}(t)$ 表示实际测试值或计算值, $p_{\delta_i}(t)$ 表示主观评估值, $p_i^*(t)$ 表示重要项,且满足

$$\begin{cases} p_{\Delta_i}(t) = R \in [0, +\infty) \\ p_{\delta_i}(t) = R' \in [0, 1] \\ p_i^*(t) = \{0, 1\} \end{cases} \quad (3)$$

考虑到大型游乐设施的健康状态与乘客的人身安全紧密相关这一特殊性,被称为是“特种设备中的特种设备”。因此,国家颁布的《游乐设施监督检验规程(试行)》(后文简称《检规》)中明确规定了某些项目(指标)为重要项目,并严格规定只有在重要项目皆“合格”的前提下,才能进一步去评判整机的合格与否。通俗的说,在整机的健康项目(指标)中,设置了部分项目为“一票否决项”。所以,当项目(指标) i 为重要项时,式(3)中存在 $p_i^*(t) = \{0, 1\}$; 当 $p_i^*(t) = 1$ 时,表示该关键项合格;当 $p_i^*(t) = 0$ 时,表示该关键项不合格。

定义 2: 健康状态函数。设 $\mathbf{p}(t)$ 为大型游乐设施的评价指标矩阵,对应的权重向量为 $\mathbf{W} = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$,健康状态函数为 $H_S(t)$,则有如下关系式

$$H_S(t) = f(\mathbf{W}, h(\cdot)(\mathbf{p}(t))) \rightarrow \begin{cases} H_S = R \in [0, 1] & p_i^* = 1 \\ H_S = 0 & \exists p_i^* = 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中, $h(\cdot)$ 表示健康状态指标变换算子,用于对 $\mathbf{p}(t)$ 进行无量纲化,具体形式视情况而定。

1.3 健康状态的评价分级方法研究

大型游乐设施随着服役时间的增加,其工作性能必然会逐渐下降。大量的检测、维修和保养经验表明,与通用机械一样,大部分机械零部件由于损

伤累积,性能呈逐渐劣化趋势,电器元器件一般呈突发性失效。在工程实际中,目前的检查维保一方面是在设备(零部件)严重故障或性能下降至要求水平以下时进行修理,即事后维修。这种方式适用于失效后果不严重,且维修工作对生产影响很小的设备,但是对于失效后果严重的设备或设备的重要零部件则不完全适用。其优点是能最大限度的利用了设备的寿命,缺点是存在发生重大事故的风险,危及人们的生命和财产安全。另一方面是根据厂家给出的设计寿命进行报废处理,这种方式过于简单,遵循保守的原则,往往在设备还没有真正“寿终正寝”时就提前报废了,不利于充分发挥设备的使用价值,容易造成资源浪费。为了解决在用大型游乐设施使用过程中的上述工程技术难题,通过深入分析在役大型游乐设施的损伤发展和功能退化规律以及游乐园对大型游乐设施使用与维护保养的实际需求和做法,本研究团队提出了将其健康状态从以前的“良好”和“故障”两种状态化分为“健康”、“亚健康”、“微病态”、“病态”四个健康等级,从而实现对设备进行分级和精准管理。表1给出了这四种健康状态的级别、 H_s 的取值范围、定性描述和对应的使用与维护保养的策略。

表1 大型游乐设施健康评价分级及对应维护保养策略

级别	H_s 取值范围	健康等级	健康状况定性描述	使用与维护保养策略
I	$a < H_s \leq 1$	健康	设备运行状况非常好	允许使用, 正常维保
II	$b < H_s \leq a$	亚健康	设备运行状况较好	允许使用, 缩短检查检验周期
III	$c < H_s \leq b$	微病态	设备出现轻微异常征兆	允许使用, 需增加状态监测措施, 且尽早安排大修
IV	$0 \leq H_s \leq c$	病态	设备出现严重异常征兆	停止使用, 需要安排修理以恢复健康

根据第1.2节的定义,约定大型游乐设施的健康状态值 H_s 的取值范围为[0, 1]。当 $H_s=1$ 时,设备处于完全健康状态;当 $H_s=0$ 时,设备处于完全病态;当 $0 < H_s < 1$ 时,通过设置不同的等级的边界值 a, b, c 来划分相应的健康等级,并给出各等级的使用与维护保养策略。其中,等级的边界值 a, b, c 可基于风险主观赋值,幅值大小因设备的类型、级别、运动形式和工作地点不同而不同,具体数值视情况而定。本文第3节中所涉及的应用对象,为高参数、高刺激、高速度的典型A级大型设备,潜在风险值相对较高,根据我们对多台设备的研究计算,发现 a, b, c 分别取值为0.8、0.6和0.4较适宜。

2 健康评价方法研究

2.1 健康评价方法概述

按照我国对大型游乐设施的安全管理模式,对在役大型游乐设施能够获取检验检测数据的方式有三种,一是政府授权第三方检验机构每年进行一次监督检验。二是游乐设施运营单位按产品使用说明书和自身管理要求进行的日常检查,每周、每月和每年的检查维保。三是在大型游乐设施上安装的状态监测系统。目前,第三方监督检验和运营单位的自检已得到全面实行,状态监测系统仅在部分主题乐园的重要设备上得到安装应用。健康评价原理图如图2所示。

图2 健康评价原理图

图2中,在对大型游乐设施实施健康评价的过程中,首先根据检查项目所对应的指标及其评价内容,从第三方检验机构的定期检验记录、游乐园的日常检查维护保养记录和状态监测记录数据中分别获取数据信息;然后,对所获取的数据进行处理及合成;最后,结合指标权重,通过所建立的健康状态模型给出设备的健康等级。对大型游乐设施的健康评价,可以单独基于第三方检验机构每年一次定期检验记录每年进行一次健康评价,也可以基于游乐园每天进行的日常检查维护保养记录每天进行一次健康评价,也可以在上述两类数据的基础上加上状态监测系统实时采集上传的数据进行实时健康评价。

在数据处理中,考虑到指标所对应的评价内容的复杂性,鉴于信息来源既包含了定性信息也有定量信息,因此需要将数据分为主观和客观两类来对待。主观数据主要依靠专家主观打分来获得,客观数据可以通过现场测试或者数学计算来获得。方法中健康状态数学模型是内核,数据是基础;主要包括健康指标和评价内容的建立,数据处理以及指标权重的确定三个环节;下面对这三个环节分别阐述。

2.2 评价指标体系的构建

建立科学合理的大型游乐设施评价指标体系是实现健康评价结果准确的前提条件。在《检规》的基础上,按照科学性、全面性和可操作性等原则^[26]并参考文献[22],构建大型过山车这一典型大型游乐设施的健康评价指标体系及评价内容如表 2 所示。

表 2 大型过山车健康评价指标及评价内容

1 级评价指标	2 级评价指标	评价内容
钢结构 B ₁	轨道及立柱 C ₁₁	强度、变形、开裂、破损、磨损、腐蚀、移位、运行过程异响等状态
	结构连接 C ₁₂	焊缝缺陷、开裂,连接松动、腐蚀等状态
列车 B ₂	车体 C ₂₁	表面状况、开裂,紧固件和预埋件松弛、脱落等状态
	车轮轴 C ₂₂	开裂、磨损,支撑架、盖子、环圈紧固件紧固等状态
	轮系及约束 C ₂₃	磨损、开裂、损坏,紧固件紧固状态、开口销安装状态、轮毂帽油位状态等
	连接铰 C ₂₄	磨损、损坏,盖板紧固状态、安全拉索断裂情况等
	安全带、安全压杆 C ₂₅	安全带固定、老化、破损状态,锁扣装置完好状态;安全压杆启闭状态、开裂、锈蚀、异物划伤等状态
制动装置 B ₃	底盘 C ₂₆	焊缝开裂、易磨损几何尺寸等状态
	气动制动装置 C ₃₁	制动蹄片表面磨损、开裂、紧固件紧固状态,剪切块焊缝开裂、锈迹状态等
	涡流制动装置 C ₃₂	表面清洁、开裂、紧固件紧固状态,导板、导电刷完好状态等
提升机构 B ₄	卷扬机 C ₄₁	运行状态及异响情况、紧固件紧固状态、钢丝绳完好状态等
	钢索滑轮 C ₄₂	钢索滑轮及支撑架开裂、运行异响情况,心轴锁紧板、支撑架、防护夹子紧固件紧固状态等
	升降机驱动装置 C ₄₃	运行异响情况、紧固件紧固状态、驱动装置与轴承座运行状态等
	链条及张紧 C ₄₄	开裂、运行状态及异响情况等
气动、液压系统 B ₅	空压机 C ₅₁	安装牢固状态、皮带的松紧程度、曲轴箱内油位状态,运转中异响、振动、温度升高及密封状态等
	油泵及马达 C ₅₂	安装牢固状态,运行中异响、油密封、温度升高状态等
	气压、液压回路 C ₅₃	压力、密封、堵塞、开裂、破损及老化状态,安全阀动作灵活状态等
电气装置 B ₆	操作台 C ₆₁	功能、按键、表盘、指示灯等工作状态,污损、破裂状态等
	信号装置 C ₆₂	检测、限位及行程开关动作状态,锈蚀、污损等情况
	照明、监控、广播设备 C ₆₃	部件固定、完好情况,照明状态,监控设备画面清晰与工作状态,广播音量、音质状态等
安全防护装置 B ₇	站台、安全通道、栅栏 C ₇₁	畅通与障碍物情况,安装紧固状态,安全栏杆锈蚀、破损状态等
	应急救援 C ₇₂	应急救援装置完好状态,功能是否有效
安全管理措施 B ₈	安全管理 C ₈₁	安全规章制度和操作规程建立情况,安全教育和安全检查实施情况
	人员素质 C ₈₂	特种设备操作人员培训、持证、能力素质等情况
	安全保障 C ₈₃	人身保险、安全措施、安全投资、安全文化等情况

示。一级评价指标为设备的子系统,如钢结构、列车等;二级评价指标为子系统的零部件,连接及机械传动等;评价内容是指能反应二级指标性能的特征参数或者物理现象,可以包括主观和客观两方面的评价信息。指标体系的构建可以在前一次健康评价结果的基础上进行动态的调整和优化,比如减少或者增加指标量,或者通过指标权重值来调整其偏好和侧重程度。

在上述健康评价指标体系及评价内容的基础上,抽取出定性和定量评价分量,定性分量用模糊性语言 $\tilde{\delta}$ 表示,定量分量用 Δ 表示。若某些指标不能量化,即不能抽取定量分量,则该类指标完全采用定性分量来标度。抽象化大型游乐设施整机的健康评价指标体系的层次结构如图 3 所示。即,对应表 2 将整台设备分为目标层,一级、二级和三级指标四个层级;其中三级指标层通过定性和定量两种方式描述相应的评价内容。

图 3 大型游乐设施健康评价指标体系层次结构

2.3 数据的归一化和无量纲化处理

考虑到指标所对应评价内容的复杂性,既包含了定性信息也有定量信息,因此需要将数据分为主观和客观两类来对待。定性信息主要是由专家依据经验主观直接给出,通常采用“优”、“良”、“中”、“差”等含有模糊性的语言来描述,对应的等级和取值范围如表 3 所示。表中取值范围设定为 $[0, 1]$,不同的评价结果对应不同的取值范围,如“优”对应的取值范围为 $(0.8, 1]$ 。

定量信息可以通过现场测试或者数学计算来获得,主要来自检测、监测、试验和计算等。定量信息中由于计量单位的差异性,因此需要对其进行无量纲化和归一化处理。大型游乐设施零部件可量化的评价指标有强度、刚度、裂纹、变形、锈蚀、磨损等数据,其无量纲化处理方法如表 4 所示^[27]。如强度指标用应力来表征,无量纲化值为实际测试值与许用应力值的比值。

表 3 定性指标评价等级对照表

序号	取值范围	等级
I	(0.8, 1]	优
II	(0.6, 0.8]	良
III	(0.4, 0.6]	中
IV	(0, 0.4]	差

表 4 常见定量评价参数无量纲化处理对照表

评价指标	表征参数	量纲	无量纲化
强度指标	应力	MPa	$\Delta_y = 1 - \sigma_{test} / [\sigma]$
刚度指标	挠度	mm	$\Delta_r = 1 - f_{test} / [f]$
裂纹指标	长度	mm	$\Delta_l = 1 - T_{l,test} / [T_l]$
	深度	mm	$\Delta_d = 1 - T_{d,test} / [T_d]$
变形指标	波浪度	mm	$\Delta_h = 1 - h / 10$
腐蚀指标	腐蚀深度	mm	$\Delta_x = 1 - d_{test} / [d]$
磨损指标	磨损量	mm	$\Delta_w = 1 - w_{test} / [w]$

表 4 中 $[\cdot]$ 为相应的许用值; σ_{test} 、 $T_{l,test}$ 、 $T_{d,test}$ 、 f_{test} 等为实际测试值, 是关于时间变量 t 的函数, 是健康状态数学模型的输入量之一, 体现了健康评价中数据来源的动态特性, 是实现动态的健康评价的基础; Δ 为相应的无量纲化处理值。

2.4 权重系数的确定

在健康评价指标体系中, 各层次间的指标相对重要度是不尽相同的, 为了体现这一特征, 采用设置权重系数的方式来实现。权重系数设置的是否足够合理、客观, 将直接影响评价结果的准确性。在工程实际中, 得到广泛应用并且较为成熟的方法有客观赋权法和主观赋权法。前者是通过分析指标间的关联关系或变换系数来获取权重值, 如主成分分析法、灰色关联度法、TOPSIS(Technique for order preference by similarity to an ideal solution)法等^[28]; 后者多为定性方法, 一般由专家根据自身经验通过主观打分的方式得到权重值, 如层次分析法^[15]、模糊综合评判法^[29]等。

考虑到层次分析法使用的广泛性和成熟性, 针对本文所建立的指标体系, 一级和二级指标的权重将采用层次分析法来确定, 详细步骤可参照文献^[30]。由于每一个二级指标所对应的三级指标只细分为定量和定性两个指标, 有的还只有其中的一项, 因此采用第 1 节中的健康状态数学模型中的模糊合成算子直接得出评价值。

3 健康评价方法应用研究

大型游乐设施种类繁多、结构形式多样、运动

形式复杂, 按主要运动形式可以简要的分为滑行、旋转和升降三类, 不同种类的游乐设施其评价内容有很多相同或相似之处。其中, 大型过山车是速度和美的结合体, 常被认为是滑行类游乐设施的典型代表^[22]。因此, 本节主要以大型过山车为对象进行健康评价方法的工程应用研究, 以其他两类设备为辅进行方法快速应用的普遍适用性研究。

3.1 应用对象概述

应用对象为某大型游乐园的弹射式过山车, 该设备于 2012 年投入使用, 采用弹射发射方式, 发射高度达 60 m, 轨道长度为 887 m, 最大运行速度为 135 km/h, 可同时运行两列列车, 列车每排四人, 每列车可载 24 人, 如图 4 所示。整个运行过程为: 首先列车由助推电机推送至发射段, 使得发射拖车与列车结合; 然后列车在长度为 55 m 的水平轨道上, 速度迅速由零增加到 135 km/h, 列车驶出水平发射段后向左转, 冲上高为 60 m 的爬升段; 接着在势能的作用下迅速向下滑行, 穿越水平面下的隧道。整个过程经历三段起伏和回旋轨道, 最终在刹车段由刹车系统进行二次减速, 之后由助推器缓缓送回到站台。

图 4 弹射式过山车

3.2 基础数据的获取和处理

本应用对象的评价指标和内容按照表 2 来确定, 将获取的数据分为主观和客观两类来处理。

3.2.1 主观评价数据及处理

目前在工程上对大型游乐设施的某些指标的评价内容只能采用定性评价的方式, 如“优”、“良”、“中”、“差”等含有模糊性的语言来评价。本例中, 组织 10 名评价人员进行健康状态评价, 并对评价结果进行统计。如对钢结构 B_1 中的 C_{11} 进行评价, 有 8 名专家认为是优, 1 名专家认为是良, 1 名专家认为是中, 无一人认为是差; 对 C_{12} 进行评

价,有 6 名专家认为是优,2 名专家认为是良,1 名专家认为是中,1 名专家认为是差。将评价结果进行归一化和去模糊处理^[31],得

$$\begin{cases} \tilde{\delta}_{11}=(0.8 & 0.1 & 0.1 & 0) \rightarrow \delta_{11}=0.84 \\ \tilde{\delta}_{12}=(0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1) \rightarrow \delta_{12}=0.75 \end{cases}$$

同样的方法可以得到其他健康指标的定性评价矩阵,本节研究的应用对象是弹射式过山车,因此无提升机构 B_4 ,其他指标的定性评价值分别为:

$$\begin{aligned} \delta_{21}=0.76, \delta_{22}=0.82, \delta_{23}=0.73, \delta_{24}=0.86, \\ \delta_{25}=0.84, \delta_{26}=0.9, \delta_{31}=0.73, \delta_{32}=0.75, \\ \delta_{51}=0.86, \delta_{52}=0.88, \delta_{53}=0.78, \delta_{61}=0.84, \\ \delta_{62}=0.80, \delta_{63}=0.71, \delta_{71}=0.73, \delta_{72}=0.75, \\ \delta_{81}=0.69, \delta_{82}=0.68, \delta_{83}=0.63。 \end{aligned}$$

3.2.2 客观评价数据及处理

分析表 2 可知,大型过山车的定量评价信息可以通过壁厚、应力应变、裂纹长度(活性缺陷)、振动、温升、外观几何尺寸等来表征磨损、腐蚀、强度、开裂、异常声响、过热、变形等损伤或故障模式。采取的检测手段或方式主要有:光纤光栅应力测试、声发射、电磁超声、涡流、磁粉、红外、游标卡尺等。通过对 2019 年期间开展的定检、日常维保、状态监测数据的收集和整理,并根据表 4 原则进行无量纲化处理,结果如表 5 所示。如,根据表 2 的评价内容,采用疲劳、裂纹、壁厚等参数从客观

表 5 大型过山车的定量健康评价数据

1级指标	2级指标	定量健康评价值	检测方法
钢结构 B ₁	轨道及立柱 C ₁₁	疲劳: $\Delta_{f,track}(C_{11})=0.76$	光纤光栅应力测试
		裂纹: $\Delta_{lif-crack,track}(C_{11})=1$	声发射+涡流+直尺
		壁厚: $\Delta_{thickness,column}(C_{11})=1$	电磁超声测厚
		轨距: $\Delta_{dis,train}(C_{11})=1$	直尺测轨距
	结构连接 C ₁₂	磨损: $\Delta_{wear,train}(C_{11})=1$	电磁超声测厚
		裂纹: $\Delta_{connect,crack}(C_{12})=1$	涡流检测表面裂纹
列车 B ₂	车体 C ₂₁	裂纹: $\Delta_{chair,crack}(C_{21})=1$	表面磁粉探伤
	车轮轴 C ₂₂	裂纹: $\Delta_{axis,crack}(C_{22})=1$	表面磁粉探伤
		磨损: $\Delta_{wear,axis}(C_{22})=1$	游标卡尺检测磨损量
	轮系及约束 C ₂₃	温升: $\Delta_{wheel,tem}(C_{23})=1$	红外热成像温升检测
		磨损: $\Delta_{wear,wheel}(C_{23})=0.67$	游标卡尺检测磨损量
	连接轴 C ₂₄	裂纹: $\Delta_{conjugate,crack}(C_{24})=1$	表面磁粉探伤
安全带 C ₂₅	裂纹: $\Delta_{bar,crack}(C_{25})=1$	表面磁粉探伤	
制动装置 B ₃	制动装置 C ₃₁	刹车磨损: $\Delta_{wear,gasket}(C_{31})=1$	游标卡尺检测磨损量
气动系统 B ₅	空压机 C ₅₁	空压机温升: $\Delta_{air-com}(C_{51})=1$	红外热成像温升检测

的角度反映了二级指标轨道及立柱的健康情况。其中值 $\Delta_{f,track}(C_{11})=0.76$, 是通过测试应力, 根据线性累积损伤理论, 并进行无量纲化处理, 得出的疲劳程度, 用以表征轨道和立柱的强度情况。值 $\Delta_{wear,wheel}(C_{23})=0.67$ 是通过游标卡尺测量并经无量纲化处理所得, 从客观的角度表征了轮系的磨损情况。

3.3 健康状态评价

3.3.1 指标权重的计算

采用层次分析法对各层健康指标进行权重计算, 计算步骤参考文献[18]。参照表 2 的指标体系, 依据表 3 的评分规则, 对本研究对象的健康指标参数建立模糊一致性判断矩阵 R , 并计算各层指标的权重值, 一级指标和前两项二级指标的权重值 W 分别见表 6 和表 7。

表 6 模糊一致性判断矩阵 $R(A-B)$

	B_1	B_2	B_3	B_5	B_6	B_7	B_8	W
B_1	0.50	0.75	0.40	0.55	0.75	0.68	0.60	0.18
B_2	0.25	0.50	0.15	0.30	0.50	0.43	0.35	0.16
B_3	0.60	0.85	0.50	0.65	0.85	0.78	0.70	0.21
B_5	0.45	0.70	0.35	0.50	0.70	0.63	0.55	0.16
B_6	0.25	0.50	0.15	0.30	0.50	0.43	0.35	0.09
B_7	0.32	0.57	0.22	0.37	0.57	0.50	0.42	0.10
B_8	0.40	0.65	0.30	0.45	0.65	0.58	0.50	0.10

表 7 模糊一致性判断矩阵 $R_1(B_1-C)$

	C_{11}	C_{12}	W_1
C_{11}	0.50	0.58	0.58
C_{12}	0.42	0.50	0.42

照此方法, 可求得其他指标的权重, 分别为: $W_2(B_2-C)=(0.07 \ 0.20 \ 0.22 \ 0.15 \ 0.24 \ 0.12)$, $W_3(B_3-C)=(0.50 \ 0.50)$, $W_4(B_4-C)=(0 \ 0)$ (本例中无此项), $W_5(B_5-C)=(0.45 \ 0.20 \ 0.35)$, $W_6(B_6-C)=(0.35 \ 0.45 \ 0.20)$, $W_7(B_7-C)=(0.65 \ 0.35)$, $W_8(B_8-C)=(0.35 \ 0.45 \ 0.20)$ 。

3.3.2 整机模糊综合评价

在上述基础上, 采用所建立的健康状态模型对整机进行健康状态评价。

3.3.2.1 客观数据合成

参考表 2 并利用表达式(2), 将反应评价内容的客观值进行模糊合成, 即为相应二级指标的健康状态值, 合成结果如表 8 所示。如表中第二行的二级指标轨道和立柱 $\Delta(C_{11})$, 是由该项对应评价内容的客观信息(疲劳、裂纹、壁厚、轨距、磨损等)合成

而来, 结果为 0.76。

表 8 客观健康指标数据合成值

原始值	模糊合成算子	合成值
$\Delta_{f,track}(C_{11})=0.76$		
$\Delta_{lif-crack,track}(C_{11})=1$		
$\Delta_{thickness,column}(C_{11})=1$	$\xrightarrow{M(v)}$	$\Delta(C_{11})=0.76$
$\Delta_{dis,train}(C_{11})=1$		
$\Delta_{wear,train}(C_{11})=1$		
$\Delta_{connect,crack}(C_{12})=1$	$\xrightarrow{M(v)}$	$\Delta(C_{12})=1$
$\Delta_{chair,crack}(C_{21})=1$		$\Delta(C_{21})=1$
$\Delta_{axis,crack}(C_{22})=1$	$\xrightarrow{M(v)}$	$\Delta(C_{22})=1$
$\Delta_{wear,axis}(C_{22})=1$		
$\Delta_{wheel,tem}(C_{23})=1$	$\xrightarrow{M(v)}$	$\Delta(C_{23})=0.67$
$\Delta_{wear,wheel}(C_{23})=0.67$		
$\Delta_{conjugate,crack}(C_{24})=1$		$\Delta(C_{24})=1$
$\Delta_{bar,crack}(C_{25})=1$		$\Delta(C_{25})=1$
$\Delta_{chassis,crack}(C_{26})=1$	$\xrightarrow{M(v)}$	$\Delta(C_{26})=1$
$\Delta_{wear,gasket}(C_{31})=1$		$\Delta(C_{31})=1$
$\Delta_{air-com,tem}(C_{51})=1$		$\Delta(C_{51})=1$

3.3.2.2 主观和客观数据合成

利用表达式(2)对第3.2.1节中的主观数据和表8中的客观数据进行模糊合成, 结果如下。

$$\begin{aligned}
 p_{11} &= \delta_{11} \circ \Delta_{11} = 0.76 \times 0.84 = 0.64, \\
 p_{12} &= \delta_{12} \circ \Delta_{12} = 0.76, \quad p_{21} = \delta_{21} \circ \Delta_{21} = 0.76, \\
 p_{22} &= \delta_{22} \circ \Delta_{22} = 0.82, \quad p_{23} = \delta_{23} \circ \Delta_{23} = 0.49, \\
 p_{24} &= \delta_{24} \circ \Delta_{24} = 0.86, \quad p_{25} = \delta_{25} \circ \Delta_{25} = 0.84, \\
 p_{26} &= \delta_{26} \circ \Delta_{26} = 0.9, \quad p_{31} = \delta_{31} \circ \Delta_{31} = 0.73, \\
 p_{32} &= \delta_{32} \circ \Delta_{32} = 0.75, \quad p_{51} = \delta_{51} \circ \Delta_{51} = 0.86, \\
 p_{52} &= \delta_{52} \circ \Delta_{52} = 0.88, \quad p_{53} = \delta_{53} \circ \Delta_{53} = 0.78, \\
 p_{61} &= \delta_{61} \circ \Delta_{61} = 0.84, \quad p_{62} = \delta_{62} \circ \Delta_{62} = 0.80, \\
 p_{63} &= \delta_{63} \circ \Delta_{63} = 0.71, \quad p_{71} = \delta_{71} \circ \Delta_{71} = 0.73, \\
 p_{72} &= \delta_{72} \circ \Delta_{72} = 0.75, \quad p_{81} = \delta_{81} \circ \Delta_{81} = 0.69, \\
 p_{82} &= \delta_{82} \circ \Delta_{82} = 0.68, \quad p_{83} = \delta_{83} \circ \Delta_{83} = 0.63.
 \end{aligned}$$

3.3.2.3 健康状态评价

在上述健康指标权重和评价值的基础上, 利用表达式(4)计算整机的健康状态等级, 分两个步骤。

(1) 一级指标健康状态计算与评价。评价矩阵如下

$$\begin{aligned}
 H_1 &= f(W_1, h_1(\cdot)(p_1(t))) = W_1 \cdot P_1 = (w_{11} \quad w_{12}) \cdot \begin{pmatrix} p_{11} \\ p_{12} \end{pmatrix} = \\
 &= (0.58 \quad 0.42) \cdot \begin{pmatrix} 0.64 \\ 0.76 \end{pmatrix} = 0.69,
 \end{aligned}$$

$$H_2 = 0.76, \quad H_3 = 0.74, \quad H_5 = 0.84, \quad H_6 = 0.80,$$

$$H_7 = 0.74, \quad H_8 = 0.67.$$

(2) 整机健康状态计算与评价。通过表2、3和图3所反应的大型游乐设施健康评价指标体系层次结构以及表达式(4), 易知步骤(1)中的计算结果 $H_1 \sim H_3$, $H_5 \sim H_8$ 即为本过程中的 P ($P_1 \sim P_3$, $P_5 \sim P_8$)。

整机健康状态值

$$\begin{aligned}
 H_s &= f(W, h(\cdot)(p(t))) = W \cdot P = \\
 &= (0.18 \quad 0.16 \quad 0.21 \quad 0.16 \quad 0.09 \quad 0.10 \quad 0.10) \cdot \\
 &= (0.69 \quad 0.76 \quad 0.74 \quad 0.84 \quad 0.80 \quad 0.74 \quad 0.67)^T = \\
 &= 0.75
 \end{aligned}$$

即, 整机健康状态值 H_s 为 0.75, 根据表1定义的健康等级, 可以判定该大型弹射式过山车的健康状态为 II 级(亚健康)。其健康状态下降的原因主要是轨道和立柱的疲劳累计以及列车车轮的磨损。表示该设备运行状况较好, 允许使用, 但应缩短检查检验周期, 评价结果与实际运行状况基本相符。

这一结果反映了设备运行到 2019 年的健康状态。如前所述, 该方法是建立在评价数据的动态特性和健康指标可调整性之上的。因此, 在工程上, 可以利用这一动态特性, 获得设备任意年度的健康状态, 既可以追溯设备的历史健康状态, 也可以及时掌握当前的健康状态。以追溯该设备 2015 年的健康状态为例: 查验该年度设备的定期检验报告、维保记录及监测数据。其中, 对监测数据进行处理, 有: $\Delta(C_{11})=0.92$, $\Delta(C_{23})=0.86$; 按照上例中的方法, 可以获得其他评价数据, 经处理和计算后得: $H_s(t)=0.90$ 。说明该设备在 2015 年度的健康状态为 I 级(健康), 运行状况非常好, 允许使用, 正常维保。这一结论与政府授权的第三方检验机构, 在该年度所出具的检验结论相吻合。

3.4 其他应用案例

如前所述, 本方法也可以在单独定期检验的基础上实现快速的健康评价, 判定出设备的健康等级, 这样有利于游乐园管理者和政府监管者快速实时动态的掌握设备的运行状态, 也有利于本方法的推广应用。下面通过两个案例来验证和说明该方法应用的便捷性。

案例一: 某游乐园的大摆锤为一典型的旋转类大型游乐设施, 设备运行高度为 19.8 m, 回转直径为 6.2 m, 承载人数为 30 人, 转速为 12.5 r/min, 单侧摆角为 110°, 采用固定模式运营。设备于 2018 年 4 月投入使用, 按照我国对特种设备的监管要求, 于 2019 年 4 月进行了第一次定期检验, 根据定期检验报告(报告编号: 19Y0980-YD01)发现设备本体的齿轮传动系统中的上摆动齿轮存在不符合标准要求的磨损

现象, 控制系统功能不能完全满足设备的工况要求, 操作室存在视角盲区, 安全防护中的余气起升平台功能失效等不合格项, 其中“安全防护”为关键项。

对上述定检报告信息进行处理, 得: $\Delta_{wear} = 0.6$, $\delta_{con} = 0.72$, $\delta_{room} = 0.64$, $p_{safe}^* = 0$ 。将处理后的主观和客观数据合成并代入表达式(4), 得

$$H_s(t) = f(W, h(\cdot)(p(t))) \rightarrow H_s = 0。$$

由此, 可以判定该大摆锤的健康状态为 IV 级(病态)。表明该设备出现严重异常征兆, 应停止使用, 需要安排修理以恢复健康。

案例二: 某游乐园的高空飞翔设备为一典型的升降类大型游乐设施, 设备高度为 55.8 m, 运行高度为 36.8 m, 回转直径为 15 m, 转速为 8 r/min, 承载人数为 36 人, 采用固定模式运营。设备于 2019 年 9 月安装, 同月进行了监督检验, 根据监督检验报告(报告编号: 19Y0670-YY01)发现设备本体存在集电器、操作室和安全栅栏尺寸不符合标准要求。其中, 外露的集电器未设有防护雨罩, 操作室内存在视角盲区, 安全栅栏底距为 160 mm, 超出了标准要求。

对上述监督检验报告给出的主观和客观评价信息, 进行归一化、无量纲化和去模糊化处理: $\delta_{col} = 0.43$, $\delta_{room} = 0.64$, $\Delta_{dis} = 0.6$ 。将数据合成并代入表达式(4)中得: $H_s = 0.56$ 。据此, 可以判定该高空飞翔的健康状态为 III 级(微病态)。表示设备出现轻微异常征兆, 允许使用, 需增加状态监测措施, 且尽早安排大修。

4 结论

(1) 从健康状态的本质分析出发, 建立了大型游乐设施的健康状态数学模型, 为后续的健康评价奠定了基础。

(2) 通过分析在役大型游乐设施的损伤发展和功能退化规律以及游乐园对大型游乐设施使用与维护保养的实际需求和做法, 提出了大型游乐设施健康状态分级概念, 并划分为“健康”、“亚健康”、“微病态”和“病态”4 个等级。

(3) 针对国内外大型游乐设施的运行、维护保养和检验检测监测技术的现状, 提出一种综合利用新制造设备的监督检验及在用设备的定期检验、游乐园日常维护保养和设备实时状态监测三方面信息的定量健康评价方法。

(4) 立足于工程实际, 以某在役典型大型游乐设施为例, 对所提出的模型和方法进行综合应用及分析, 实现了设备更客观、更本质的健康评价。为

游乐园采用有限的资源提高游乐设施安全运营水平和政府利用有限资源提高游乐设施安全监察水平具有重要指导意义, 也为今后进行更加深入的开展其他重要机电类大型设备健康管理研究提供可以借鉴的思路。

参 考 文 献

- [1] 沈功田, 张勇, 刘然. 游乐园和景区载人设备全生命周期检测监测与完整性评价技术研究[J]. 中国特种设备安全, 2016, 32(10): 5-9.
SHEN Gongtian, ZHANG Yong, LIU Ran. Research on full-life cycle detection, monitoring and integrity evaluation technology of manned equipment in amusement parks and scenic spots[J]. China Special Equipment Safety, 2016, 32(10): 5-9.
- [2] 沈功田, 姚泽华, 吴彦. 游乐设施的无损检测技术[J]. 无损检测, 2006, 28(12): 652-655.
SHEN Gongtian, YAO Zehua, WU Yan. Nondestructive testing technology of amusement facilities[J]. Nondestructive Testing, 2006, 28(12): 652-655.
- [3] 沈功田. 中国特种设备无损检测的进展及国际交流与合作[J]. 无损检测, 2008, 30(3): 133-141.
SHEN Gongtian. Nondestructive testing of special equipment in China and international exchange and cooperation[J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(3): 133-141.
- [4] 袁俊, 沈功田, 吴占稳, 等. 轴承故障诊断中的声发射检测技术[J]. 无损检测, 2011, 33(4): 5-10.
YUAN Jun, SHEN Gongtian, WU Zhanwen, et al. Acoustic emission detection technology in bearing fault diagnosis[J]. Nondestructive Testing, 2011, 33(4): 5-10.
- [5] 吴占稳, 沈功田, 袁俊. 声发射技术在大型观览车主轴检测中的应用[J]. 无损检测, 2011, 33(5): 39-42.
WU Zhanwen, SHEN Gongtian, YUAN Jun. Application of acoustic emission technology in spindle detection of large observation vehicle[J]. Nondestructive Testing, 2011, 33(5): 39-42.
- [6] 叶超, 沈功田, 张万岭. 游乐设施红外热像特征[J]. 无损检测, 2012, 34(3): 12-14.
YE Chao, SHEN Gongtian, ZHANG Wanling. Infrared thermal imaging characteristics of amusement facilities[J]. Nondestructive Testing, 2012, 34(3): 12-14.
- [7] 苑一琳, 沈功田, 李小亭, 等. 超低速滚动轴承振动信号与声发射信号特征对比[J]. 无损检测, 2013, 35(5): 55-58.
YUAN Yilin, SHEN Gongtian, LI Xiaoting, et al.

- Comparison of vibration signals and acoustic emission signals of ultra-low speed rolling bearings[J]. *Nondes-structive Testing*, 2013, 35(5): 55-58.
- [8] 林伟明. 典型游乐设施复杂工况下风险评估及故障预防研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- LIN Weiming. Study on risk assessment and fault prevention under complex working conditions of typical amusement facilities[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.
- [9] XIAO Yuan, YE Jianping, CHEN Ruomeng, et al. Study on risk assessment of amusement ride[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 274: 299-302.
- [10] 王银兰, 宋伟科, 林伟明, 等. 大型游乐设施设计风险大型游乐设施设计风险评估方法评估方法[J]. *中国特种设备安全*, 2014, 30(4): 58-62.
- WANG Yinlan, SONG Weike, LIN Weiming, et al. The method of risk assessmet of large amusement rides[J]. *China Special Equipment Safety*, 2014, 30(4): 58-62.
- [11] LIU Y, SHEN G, ZHAO Z, et al. Risk assessment of failure mode and effects analysis (FMEA) under hesitant fuzzy information[J]. *Insight*, 2019, 61(4): 214-221.
- [12] 王雪颖, 房新亮, 郭徽, 等. 大型游乐设施的安全评价[J]. *安全与环境工程*, 2012, 19(5): 102-106.
- WANG Xueying, FANG Xinliang, GUO Hui, et al. Study on the curent safety situation ant evaluation of amusemennt rides[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2012, 19(5): 102-106.
- [13] 庄春吉, 王志荣, 张煜, 等. 基于 AHP-灰色模糊理论的大型游乐设施安全评价[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(2): 42-46.
- ZHUANG Chunji, WANG Zhirong, ZHANG Yu, et al. Safety evaluation model for the large amusement rides based on the AHP-grey fuzzy[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2015(2): 42-46.
- [14] 张新东, 庄春吉, 杨臣剑, 等. 基于 BP 神经网络的大型游乐设施安全评价[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(4): 28-31.
- ZHANG Xindong, ZHUANG Chunji, YANG Chenjian, et al. On the safety evaluation of the large-type circular amusement rides based on the BP neural network[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2016, 16(4): 28-31.
- [15] SAATY T L. Modeling unstructured decision problems: The theory of analytical hierarchies[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1978, 20(3): 147-158.
- [16] 田广东, 张洪浩, 王丹琦. 基于模糊 AHP-灰色关联 TOPSIS 的拆解方案评估研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(5): 34-40.
- TIAN Guangdong, ZHANG Honghao, WANG Danqi. Study on disassembly scheme evaluation based on fuzzy AHP-gray correlation TOPSIS[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(5): 34-40.
- [17] SAIDI A, MIRZAEI M. Application of gold-labeled antibody biosensor in simultaneous determination of total aflatoxins using artificial neural network[J]. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 2014, 11(2): 391-398.
- [18] 金晶, 李宗昊, 朱亮, 等. BP 神经网络在铁路建设风险评估中的应用[J]. *铁道工程学报*, 2019, 36(3): 103-109.
- JIN Jing, LI Zonghao, ZHU Liang, et al. Application of BP neural network in railway construction risk assessment[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2019, 36(3): 103-109.
- [19] 沈功田, 刘渊. 系统健康管理理论研究及应用设想[J]. *中国特种设备安全*, 2017, 33(6): 1-6.
- SHEN Gongtian, LIU Yuan. Theoretical research and application of system health management[J]. *China Special Equipment Safety*, 2017, 33(6): 1-6.
- [20] 沈功田, 刘渊. 大型机械系统的健康管理理论研究及应用设想[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(6): 1-9.
- SHEN Gongtian, LIU Yuan. Research and application assumptions of large mechanical system health management theory[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(6): 1-9.
- [21] SHEN Gongtian, LIU Yuan. A study of the condition monitoring of large mechanical equipment based on a health management theory for mechanical systems[J]. *Insight*, 2019, 61(8): 448-457.
- [22] 刘渊, 沈功田, 赵章焰, 等. 大型过山车健康管理方法的应用研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(24): 85-95.
- LIU Yuan, SHEN Gongtian, ZHAO Zhanyan, et al. Research and application of health management method of large roller coaster[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(24): 85-95.
- [23] 王宝轩, 沈功田, 闫河, 等. 大型石油储罐健康管理方法应用研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(16): 125-133.
- WANG Baoxuan, SHEN Gongtian, YAN He, et al. Research and application of health management method of large oil storage tank[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(16): 125-133.
- [24] 克罗沃克奇, 索辛斯卡-伯德尼. 复杂系统与过程可靠性及安全性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

- KRZYSZTOF K, JOANNA S B. Reliability and safety of complex technical systems and processes[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [25] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353.
- [26] 黄海. 港口起重机金属结构安全性评价方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- HUANG Hai. Research on security evaluation method of port crane metal structure[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [27] 李燕. 基于专家系统的岸桥金属结构安全性评价体系研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- LI Yan. Study on safety evaluation system of quay bridge metal structure based on expert system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [28] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策, 2004(11): 119-121.
- YU Xiaofen, FU Dai. Review of multiple indicators comprehensive evaluation method[J]. Statistics and Decision Making, 2004(11): 119-121.
- [29] HARKER P T, VARGAS L G. The theory of ratio scale estimation: Saaty's analytic hierarchy process[J]. Management Science, 1987, 33(12): 1511-1520.
- [30] 常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007(1): 153-156.
- CHANG Jiane, JIANG Taili. The study of determining weights by analytic hierarchy process[J]. Wuhan University of Technology, 2007(1): 153-156.
- [31] 徐格宁, 李鹏. 基于 3 标度层次分析法的履带起重机起升机构安全工作状态综合评价[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(4): 240-243.
- XU Gening, LI Peng. Comprehensive evaluation of safety working state of crawler crane hoisting mechanism based on 3-scale analytic hierarchy process[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(4): 240-243.
-
- 作者简介: 沈功田(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究特种设备安全与无损检测新技术。
E-mail: shengongtian@csei.org.cn
- 刘渊, 男, 1980 年出生, 博士。主要研究机械设备安全评价、状态监测与健康管理。
E-mail: 251837395@qq.com