

DOI: 10.3901/JME.2017.06.001

大型机械系统的健康管理理论研究及应用设想^{*}

沈功田¹ 刘 渊²

(1. 中国特种设备检测研究院 北京 100029;
2. 武汉理工大学物流工程学院 武汉 430063)

摘要: 采用系统论的观点, 在分析人的健康管理的基础上, 提出大型机械系统健康管理的理论, 并给出该理论的适用对象、目的、操作程序和要素、内容以及主要的方法和技术手段; 指出开展机械系统的健康管理, 其关键是建立科学的系统健康指标、制定切实可行的健康管理方案并加以实施; 此外, 对应用该理论所需的各项技术进行介绍; 针对大型承压类特种设备和大型机电类特种设备, 提出健康管理理论指导下的应用设想。该理论的建立和实施对保障大型机械系统的高效、安全、可靠运行具有重要的指导意义。

关键词: 健康管理; 机械系统; 承压设备; 机电设备; 特种设备
中图分类号: E07; TH17

Research and Application Assumptions of Health Management Theory of Large Mechanical System

SHEN Gongtian¹ LIU Yuan²

(1. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029;
2. School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063)

Abstract: It puts forward the health management theory of mechanical system based on human health management according to system theory. The suitable objects, purpose, main processes and contents, main methods and means of health management of mechanical system (HMMS) are given. It is indicated that the key performing HMMS is to establish the scientific health indicators, develop a practical health management program and perform it. Besides, it also statements some techniques which be used in the theory. The application ideas for large mechanical and electrical special equipment and large pressure special equipment were put forward under the guidance of the health management theory of mechanical system. The establishment and implementation of this theory has very important significance for insuring efficient, safe and reliable operation of large mechanical system.

Key words: health management; mechanical system; pressure equipment; mechanical and electrical equipment; special equipment

0 前言

大型机械系统是指由机构和机器组成的, 将机械技术、电子技术、控制技术融为一体的, 具有特定功能的、相互间具有有机联系的一个整体, 其特点是体积庞大、结构复杂、功能强大, 比如大到一条铁路系统、一条管道系统、一个大型成套装置(发电站、石化装置、化工装置)、一个大型石油储备库, 小到一列火车、一架飞机、一艘舰船、一台

锅炉、一台大型游乐设施、一条客运索道、一台大型起重机械、一个大型石油储罐等。例如: 铁路与火车系统, 具有建设周期长、工程量大、结构复杂、涉及的技术领域广、投资大等特点, 但是其功能强大, 能承载大批运量、实现长距离运输, 被誉为“国民经济大动脉”。

为了保证这些大型机械系统的安全运行, 人们对其设计、制造、安装和使用各个环节进行控制, 包括设计风险分析, 制造与安装质量控制, 使用过程的维护保养、定期检验检测、状态监测和故障诊断、结构健康监测、维修等, 但是大型机械系统在使用过程中不可避免会有一些损伤逐步产生。像人

^{*} 国家“十三五”重点研发计划(2016YFF0203100)和国家“万人计划”特支经费资助项目。20161212 收到初稿, 20170118 收到修改稿

的身体一样,虽然可能有慢性病,无法治愈,但只要做定期体检,进行健康管理,仍然可以健康生活。因此,对于大型机械系统,只要在系统健康管理理念的指导下,对其定期实施检查、检测和健康评价,并对一些不健康的因素通过维修保养进行排除或管控,仍然可以使其安全、可靠运行。但是,目前,对于大型机械系统的管理还比较粗放,存在“头疼医头,脚疼医脚”的现象,容易造成管理不足,滋生安全事故,或者管理过度,导致资源浪费等现象。

本文在作者长期从事锅炉、压力容器、压力管道、电梯、起重机械、大型游乐设施、客运索道和厂(场)内机动车辆等八大类特种设备检验检测、安全评价和剩余寿命评估研究工作的基础上,提出大型机械系统健康管理理念,并研究各种技术、方法和手段在机械系统全生命周期所处的位置和发挥的作用,保障大型机械系统的高效、安全、可靠和经济的运行,既避免维修不足导致非计划停机事故的发生,又避免过度维修导致全生命周期的费用升高,造成资源浪费。

1 大型机械系统健康管理的概念和含义

1.1 系统和大型机械系统的含义

简明牛津词典把系统定义为:复杂整体,有联系的事物或者部分,组成有形或者无形事物的合体。Random House College 词典定义为:“形成简单或复杂事物的局部或分支的集合或组合体”。Le Petit Robert 定义为:“由有机体构成的集合”。我国著名学者钱学森认为:系统是由相互作用相互依赖的若干组成部分结合而成的,具有特定功能的有机整体,而且这个有机整体又是它从属的更大系统的组成部分。由这些定义,我们可获取系统的基本意思是:一组元素连接成整体。一般按照人类对系统是否施加影响进行分类,可分为自然系统、人工系统和复合系统三类。

大型机械系统是一类典型的人工系统,指由机构和机器组成的,将机械技术、电子技术、控制技术 etc 融为一体的,具有特定功能的、相互间具有有机联系的一个整体,其特点是体积庞大、结构复杂、功能强大。机械系统可分为动力系统、执行系统、传动系统、操纵系统和控制系统,具有整体性、相关性、目的性、环境适应性和优化原则等特性。典型的机械系统有一台数控机床、一个工业机器人、一架飞机、一列火车、一套发电机组、一套核电站、一个海上钻油平台等。

1.2 机械系统健康管理的理论内涵

参照人体健康的定义,大型机械系统的健康是指系统自身素质强健、防御自愈机能完善、工作和管理科学,在整个运行过程中虽有损伤、磨损、损耗等产生,但不影响其实现设计功能的能力。其中,自身素质强健是指,具有良好的机件材料的耐用性、系统配合的平衡性、持久运用的稳定性、高强度高频率运用的可靠性;防御自愈机能完善是指,系统具有全面持久的自养护、自修复、自补偿、自适应的仿生机能;工作和管理科学是指,实施健康管理和动态养护维修,使设备的可靠性、维修性、测试性、保障性和安全性在全生命周期中始终保持设计质量。

在长期特种设备检验检测、安全评价和剩余寿命评估研究和应用实践中,我们认识到,要想使得大型机械系统在全生命周期中能可靠、安全、高效的运行,就必须对其实施健康管理,形成一个“从生到死”的系统管理方案。我们认为,大型机械系统的健康管理具有以下主要含义。

(1) 健康管理的对象是具有一定功能且对人类、社会具有积极意义的大型机械系统,此类系统具有体积庞大、功能多样、结构复杂等特点。

(2) 健康管理的目的是保障和提高大型机械系统运行的稳定性、可靠性和安全性,使其功能、结构以及各种状态运行参数在健康指标范围内运行,降低其全生命周期内的使用、维护、保养和维修费用。

(3) 健康管理的主要过程和内容是对大型机械系统全生命周期各阶段的管理和健康维护,主要包括对系统健康指标的建立、检查检测、健康评价和健康恢复等。

(4) 开展大型机械系统健康管理的主要方法和手段包括各种检查检测、状态监测、故障诊断、健康评估、剩余寿命预测等技术方法,以及维护、保养、修理和改造等手段。

2 大型机械系统健康管理的程序和要素

2.1 大型机械系统健康管理的程序

图1为我们提出的大型机械系统健康管理的流程图。首先应根据机械系统的失效模式和导致失效的损伤和故障模式等,研究制定大型机械系统的健康管理指标;然后,依据确定的健康指标,设置合理的检查检测项目,并选择合适的检查检测技术方法;第三,将检查检测结果对照健康管理指标对机

械系统进行健康评价,对于发现超出健康指标范围的项目,需要进一步分析产生不健康的原因;第四,对于发现的不健康因素,通过采用有针对性的维护保养或修理改造进行排除,使系统运行参数恢复到健康指标范围内,如此循环往复,实现设备健康状态的全程管理。

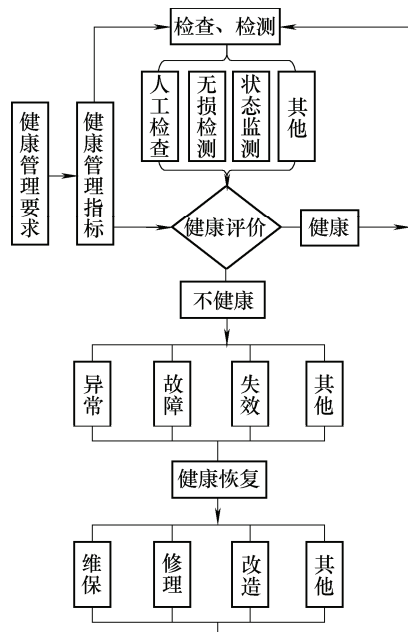


图1 健康管理流程图

2.2 健康管理指标的制定

在对人进行健康管理时,不是对每个人都进行众多的、繁琐的健康指标检查,而是根据不同的人群、不同的要求进行某些指标的检查。与此相似,在对机械系统进行健康管理时,也应该根据不同对象、不同阶段、导致失效的各因素和要求制定相应的健康管理指标。

建立科学的可操作的健康管理指标是对机械系统进行健康管理的先决条件,也是整个健康管理过程的关键,为后续的健康管理工作提供依据。其过程是首先对机械系统进行危险源识别、损伤和故障模式识别、失效模式分析和失效机理研究,找出导致失效的原因和影响因素,并区分主要因素和次要因素;然后,在此基础上,找到表征这些损伤或故障状态的一组特征参量作为系统的健康指标参量,并给出其健康范围。比如,选取承压设备壳体的剩余壁厚可以表征腐蚀损伤引起承压设备的健康状态。

2.3 检查、检测

检查、检测是顺利开展健康管理的基础。在已经制定健康管理指标的基础上,确定检查、检测项目,所采用的技术方法和时间间隔,以获取机械系统运行的各项参数。适用于机械系统的检查、检测

方法通常包括人工感官检查法、无损检测法、状态监测法;机械系统的检查、检测时间一般有周期和非周期、在线和离线等方式。

2.4 健康评价

准确的健康评价是健康管理高效实施的保障。将机械系统的检查、检测结果与健康指标进行比对,结合历史经验数据,判别出健康和 unhealthy 状态。对于健康状态则实施检查、检测-健康评价-检查、检测的循环过程,对于 unhealthy 状态则需要进行 unhealthy 原因的分析,找出真正导致 unhealthy 的损伤或故障模式。一般而言,机械系统的 unhealthy 状态表现形式为:异常、损伤、故障、失效等。

2.5 健康恢复

健康恢复是大型机械系统健康管理的最终目的。诊断为 unhealthy 的大型机械系统,在查找到原因的基础上,要实施人工干预活动,使之恢复到健康状态,其手段一般为维修(维保、修理和改造)。目前,学术界对维修的关注度最高也最活跃,维修可以分为事后维修和预防性维修;事后维修包括修理、增补和更换;预防性维修分为基于时间的维修、基于状态的维修。具体的健康恢复方式,应该根据具体原因和造成的后果选用适当的方法。

3 机械系统健康管理需要采用的关键技术

3.1 风险分析和安全评价技术

风险分析是制定健康管理指标的重要技术方法,也是确定重点检查、检测项目的有效方法。风险指某危害性事件发生的概率与其引起的伤害严重程度的乘积,其中危险的对立面是安全,它们相伴存在。安全是健康管理的目标之一。它能分析出可能发生故障部位、概率和后果,并进行风险管理,提出科学、合理、可行的对策建议。风险分析通常包括危险辨识、风险估计和风险评价^[1]。

目前,针对大型机械系统的成熟且常用的风险分析方法有:① 安全检查表法(Safety checklist analysis, SCA);② 专家评议法;③ 预先危险分析法(Preliminary hazard analysis, PHA);④ 失效模式及其影响分析(Failure modes and effects analysis, FMEA);⑤ 故障树分析法(Fault tree analysis, FTA);⑥ 基于风险检验(Risk based inspection, RBI)的风险评价方法等^[2]。随着社会对安全问题的广泛关注,在世界范围内的安全评价方法达百种之多。每一种方法都有其适用范围,并且存在一定的不足,在实际操作中,应根据具体的系统选择合适的风险评价方法。

例如, FMEA 即失效模式及其影响分析, 是一种前瞻性的可靠性分析和安全评价方法^[3]。该方法通过分析系统中的所有潜在故障模式, 确定其对系统所产生的影响, 从而识别系统的薄弱环节和关键项目, 为制定改进措施提供依据, 是一种“事前预防”而非“事后纠正”的技术方法。该方法常用于产品、质量、过程管理中^[4]。在健康管理的实施中, FMEA 是制定健康管理指标的最合适的技术之一。

一般对于涉及公共安全的, 容易造成群死群伤的大型机械系统, 如核电、铁路、长输管道、大型游乐设施等, 其工艺流程繁杂、控制方案复杂, 对安全要求高。对于这些系统在风险评价的基础上, 还应该设置安全相关系统, 以弥补设计缺陷, 保障系统的安全可靠运转。通过第三方采用安全完整性评价(Safety integrity level, SIL)方法, 对整个系统进行分析。从设计、危险源控制、系统检测, 到综合人可能出现的所有行为, 机械出现的各种故障, 确定设置相应的安全保护装置(安全相关系统)^[5-6]。

3.2 检查、检测技术

各种检查、检测技术是准确获取评价指标的重要手段。目前, 常用于大型机械的检查检测方法有多种, 主要包括人工检查法、振动信号检测、油液残留物分析、温度检测和无损检测等。其中人工检查法最简便直接, 基于振动信号的检测技术应用最为广泛, 无损检测方法最活跃, 各种新技术层出不穷。

人工检查法是最古老的方法, 现场实施时主要依靠工作人员的经验, 凭眼看、手摸、耳听来监视设备的运行状态正常与否, 技术人员凭值班记录分析设备运行的规律, 适合于较简单的机械设备和简单的失效模式。基于振动信号的检测方法, 是利用传感器对所研究对象的振动进行测量, 并对测得的信号进行分析, 以获取设备工作状态下的机械振动特性, 从而判断设备的振动特性是否符合要求。无损检测方法是利用材料内部结构的异常或缺陷的存在所引起的对热、声、光、电、磁等特性的变化, 评价结构异常、缺陷存在及其危害程度的技术。限于篇幅, 以上各种检测方法不展开论述, 有兴趣的读者可以参阅相应的文献。

状态监测和故障诊断是利用传感器通过监视和测量设备或部件运行的状态信息和特征参数(如振动、温度、压力等), 并以此来判断其状态是否正常。为了进一步得到故障的部位及大小, 往往还需要利用各种信号处理技术, 对监测数据在时域、频域、幅值域等方面进行全面分析, 以便从特征信号

中提取各种故障征兆, 对监测对象进行综合判断。

对于复杂情况, 或对异常进行跟踪, 预测其劣化趋势及磨损程度等。状态监测的内容是识别有无故障, 明确故障严重程度并做出故障趋势分析; 任务主要是信号拾取、信号处理和监测决策; 目的是通过对重大关键设备的连续监测判断其当前运行状态和预测设备剩余寿命。

此外, 检查、检测策略也是保障机械系统健康管理的重要技术。基于风险的检验是一种追求系统安全性与经济性统一的理念与方法, 它是在对系统中固有的或潜在的危险发生的可能性与后果进行科学分析的基础上, 给出风险排序找出薄弱环节, 以确保本质安全和减少运行费用为目标, 优化检查、检验方案的一种健康管理方式^[7]。目前 RBI 技术已经在核电、航空航天、工程机械、石化行业等得到了广泛的应用。

3.3 剩余寿命预测技术

为了保证系统的安全性和可靠性, 还需要进行系统和关键零部件的剩余寿命预测, 它为预防维修的实施, 为检查、监测周期的确定提供了理论依据, 在机械系统的健康恢复中发挥着重要的作用, 是保障健康管理有效实施的又一重要技术手段。剩余寿命预测技术的主要方法可以归纳为: 基于物理模型的预测方法、基于知识的预测方法和数据驱动的预测方法^[8]。

基于物理模型的剩余寿命预测方法一般是利用已知的机械理论知识建立数学模型, 利用大量的历史运行数据和故障维护数据来确定模型参数, 以达到评估部件剩余寿命的目的。如基于应力的物理模型、裂纹扩展模型和基于疲劳累积损伤理论模型等都是常用的寿命预测模型。这种方法的优点是立足于系统的本质和机理研究, 对于某些特定的系统能够较精确地预测其剩余寿命。这种方法所建立的模型一般都是简化模型, 想建立完备物理和数学模型往往十分复杂, 需要扎实的专业理论知识, 对于越来越复杂的大型机械系统, 建立模型的难度非常大, 甚至是不可能实现的。

基于知识的剩余寿命预测方法是根据已知的先验知识建立基于知识库方法的预测模型进行剩余寿命预测。包括专家系统(Expert system, ES)和模糊逻辑(Fuzzy logic, FL)。专家系统是采集领域内专家的知识并以一定的规则表达出来, 但是专家知识通常难以获取, 且存在主观性, 并且将知识转化为特定的规则也存在较大困难; 模糊模型是一种非线性映射模型, 不包含时间参数, 不适用于基于状态监测系统的剩余寿命预测。

基于数据驱动的剩余寿命预测,主要是基于统计学和人工智能理论进行剩余寿命预测建模,包括状态空间模型、随机滤波模型(Stochastic filtering, SF)、自回归滑动平均模型(Auto-regressive moving-average, ARMA)、主成分分析法、支持向量机(Support vector machine, SVM)、人工神经网络及其衍生模型和灰色模型等剩余寿命预测方法^[8]。由于要建立大型机械系统的较精确的数学和物理模型困难非常大,过于简化的模型则偏差太大,是不能接受的,同时要想获取完备的专家知识也不太现实,因此基于测试数据驱动的寿命预测模型为科技工作者所重视,并获得了快速发展。

3.4 维修技术

不健康机械系统的健康恢复,主要技术手段就是维修。维修是保持或恢复机械系统完好工作状态所进行的活动,一般而言,维修包括维保、修理和改造。其目的就是以最少的费用来保持或恢复机械系统的规定功能^[9-10]。如果机械系统在使用过程中出现损伤等异常情况,但未及时实施维修,就有可能产生故障,最后导致失效,这将会造成巨大的损失。

维修技术从二战后迅速被国内外所重视,产生了形式多样的维修方式。在美国,经历了生产维修、视情维修和预测维修阶段;在日本,经历了事后维修、预防维修、生产维修和全员生产维修四个阶段。

总体而言,目前在设备的健康管理中常用的维修方式有事后维修(Breakdown maintenance, BM)和预防性维修(Preventive maintenance, PM)两类,PM主要包括基于时间的维护维修(Time based maintenance, TBM)和基于状态的维修^[11](Condition based maintenance, CBM)。事后维修是指设备发生故障或者性能下降至合格水平以下时采取的非计划性维修,或对事先无法预计的突发故障采取的维修方式。事后维修方式适用于具有设备损坏后直接损失、间接损失都不大,维修期间影响生产小等特点的设备。

基于时间的维护维修,也称计划维修,是指根据给定的时间,定期对未失效的系统进行维护维修,以减少系统在使用过程中出现故障的可能性,降低由系统失效造成的损失。对于寿命分布已知的复杂系统,往往采用计划维护维修。但是,这种维修方式也存在不足,容易造成过维修和欠维修。

基于状态的维护维修是根据状态监测信息实施维修的方式,通过状态信息,发现设备有功能故障征兆时,在恰当的时间采取合适的维修方式,对设备进行预防性维修或更换。这种维修方式适合于

重要的机械系统和零部件。然而,CBM均假设系统的退化状态分布函数为已知,在实际当中往往由于缺乏历史运行数据,加上设备的工作环境存在较大差异,因此很难确定设备的退化分布函数,存在一定的不足。

此外,值得一提的是以可靠性为中心的维修(Reliability centered maintenance, RCM)。RCM技术是目前国际上通用的,用以确定资产预防性维修需求、优化维修制定的一种系统工程方法。它的基本思路为:对系统进行功能与故障分析,明确系统内各故障的后果;用规范化的逻辑决断方法,确定出各故障后果的预防性对策;通过现场故障数据统计、专家评估、量化建模等手段在保证安全性和完好性的前提下,以维修停机损失最小为目标优化系统的维修策略^[10]。

设备维修,尤其是预防性维修一直是维修领域的研究热点,到目前为止,已经取得了丰富的研究成果,考虑到本文主题,在此不做详细论述。

3.5 大数据与物联网技术

机械系统的健康管理是一个包含健康指标的制定、检查检测、健康评价和健康恢复的过程,每个阶段都涉及大量的数据和信息。随着系统大型化、结构复杂化、自动化程度越来越高,系统的健康管理必须朝着更加现代化的方向发展,近年来兴起的大数据和物联网技术为此提供了可能。因此说,大数据和物联网技术既是大型机械系统健康管理的基础又推动着健康管理技术的发展。

大数据(Big data)这一概念早在20世纪80年代就在美国被提出,随着美国政府斥巨资推出的“大数据研究和发展计划”这一国家战略而受到全世界的广泛关注。大数据技术的战略意义不在于掌握庞大的数据信息,而在于对这些含有意义的数据进行专业化处理^[12]。物联网是各种信息传感设备结合起来所组成的巨大网络,实现了人与物、物与物之间的沟通,其本质是物体的感知化与网络化,即通过物联网实现了物体间、人与物体间点对点的互联互通,实现了人类社会与物质实体间的有机整合^[13-14]。

现代工业,尤其是工业4.0的提出对设备健康管理将产生巨大的影响,设备设计制造单位、使用单位及检验检测单位之间,以及这些单位本身之间,无时无刻不在产生大量的数据,使得机械系统健康管理领域进入了“大数据”时代。在机械系统健康管理中,如何对如此巨大的数据进行专业化处理,实现各种终端、应用软件间的数据信息的互联互通,建立高效的设备管理与维护体系是我们所面临的一大挑战。我们认为,借助大数据和物联网技术,建

立一种以数字化和网络化为基础的,面向智能化,走向智慧化的健康管理方式,是今后大型机械系统实施健康管理的必然发展方向。

4 大型机械系统健康管理技术应用设想

健康管理技术是保障大型机械系统安全、可靠、经济、高效运行的重要手段之一。结合我们所从事的工作领域,下面以承压类和机电类特种设备为例,分别提出健康管理技术在这两类设备上的应用设想。

4.1 大型承压类特种设备健康管理技术应用设想

按照《中华人民共和国特种设备安全法》规定,承压类特种设备包括锅炉、压力容器和压力管道三大类。根据 2015 年的统计,我国拥有纳入政府安全监察的锅炉 58 万台、压力容器 340 万台和压力管道 44 万 km,它们广泛被应用于电力、石油、石化、化工、医药、食品、航空、港口等行业,属于工业生产和人民生活的重要基础设施和设备,涉及国民经济与人民生活的各个领域。由于这些设备大多盛装着高温、高压、易燃、易爆或剧毒介质,一旦发生泄漏,往往并发爆炸、火灾或中毒等灾难性事故,造成人民生命财产的重大损失,并引起严重环境污染,社会影响恶劣。承压设备的安全关系到保障人民生命和财产安全,也关系到国家经济运行安全和社会稳定,因此政府对这些设备的设计、制造、安装、使用、报废等全生命周期都颁布了相应的安全管理规定和要求。但作为承压设备的使用企业,其管理水平参差不齐,泄漏和爆炸事故时有发生,因此采用本文提出的健康管理理论,建立承压类特种设备的健康管理方案并付诸实施,必将帮助企业提高承压设备的安全与可靠运行水平。以下为大型承压类特种设备健康管理技术的应用方案。

4.1.1 健康管理指标的建立

承压设备的失效模式主要为泄漏和爆炸两种;其中导致泄漏的原因主要有本体穿透和法兰、接管、阀门密封失效等,导致爆炸的原因主要有工作介质压力过高或发生剧烈化学反应等内部因素,以及外力撞击与火灾等外部因素。因此,为了保证承压设备系统的安全运行,需要保证承压设备的工作参数、外部环境和设备本体都处于健康状态;其工作参数的健康指标应该在设计规定的范围内,比如压力、温度和介质的化学成分;其外部环境参数的健康指标也应在设计规定的范围内,比如环境温度、环境可燃气体浓度和是否有外力的破坏等。

GB/T30579-2014《承压设备损伤模式识别》国家标准,将承压设备本体的损伤模式划分为腐蚀减薄、环境开裂、材质裂化和机械损伤四大类;腐蚀减薄主要由酸性介质腐蚀、碱性介质腐蚀、高温氧腐蚀、大气腐蚀、土壤腐蚀和微生物腐蚀等引起;环境开裂主要包括酸、碱、盐介质引起的应力腐蚀开裂和氢脆等;材质裂化主要包括晶粒长大、球化、石墨化、渗氮、渗碳、脱碳、粉化、辐照脆化、各种高温脆化和在热裂纹等;机械损伤主要包括疲劳、磨损、冲刷、气蚀、过载、热冲击、蠕变和应变时效等。其实无论承压设备的损伤方式有多少,从材料损伤的结果来看,这些损伤模式最终导致材料发生变形、损失、开裂或者是微观组织变化等四种表现形式。因此,我们认为承压设备壳体采用宏观形变、剩余壁厚、表面裂纹、焊缝内部裂纹和微观组织等五个参数即可表征其健康状态,如表 1 所示。

表 1 承压设备壳体主要健康指标项目和检查检测方法

损伤模式	健康指标项目	检查检测方法
过载、过烧	宏观形变	目视检测
腐蚀、磨损、冲蚀	剩余壁厚	超声波测厚
		电磁超声检测
		漏磁检测
		脉冲涡流检测
环境或疲劳开裂	表面裂纹	磁粉检测
		渗透检测
		涡流检测
		声发射监测
疲劳开裂	焊缝内部裂纹	超声检测
		射线检测
		声发射监测
材质裂化	微观组织	硬度测试
		金相观测
		电磁参数检测

4.1.2 检查、检测方法的选择和周期的确定

为了保证承压设备处于健康状态,必须按照已建立的健康管理指标参数来进行检查、检测和监测。承压设备工作参数和外部环境参数一般通过安装压力表、温度计、可燃气体报警器等对内部的压力、内外部的温度、外部的可燃气体浓度等进行连续监测记录,或靠人工每小时、几个小时或每天巡检进行记录。

表 1 给出了承压设备壳体主要健康指标项目对应的检查、检测方法。对于过载或过烧导致的形变,靠人工每天巡视进行目视检测。对于其他项目的检测,一般每年或每 3~6 年进行一次。剩余壁厚的检测,如能去除防腐层,一般采用压电陶瓷探头的超声波测厚方法;在带防腐层的条件下,可以采用电

磁超声或漏磁检测的方法；在不拆除保温层的情况下，可采用脉冲涡流检测的方法。对于表面裂纹的检测，可打磨去除防腐层的情况下，采用磁粉或渗透检测；带防腐层的条件下，可采用涡流检测或基于复平面的涡流检测方法；在可加载的情况下，也可采用声发射监测的方法；对于焊缝内部的裂纹，大多采用超声检测方法；在停机开罐的情况下，也可采用射线检测方法；在可加载的情况下，也可采用声发射监测的方法。对于材料微观组织的检测，大多采用硬度测试或现场金相检测方法；也可通过测量材料的电磁参数来判断微观组织的变化。当前，适用于承压类设备的检查、检测方法发展十分迅速，已有的技术不断更新换代，新的检测技术不断涌现，限于篇幅，此处不再详述，感兴趣的读者可以参阅相关文献^[15]。

4.1.3 健康状态的评价

将检查、检测结果与已建立的机械系统健康参数指标进行比对分析；如这些结果在健康参数指标范围之内，则认为设备是健康的；如这些结果在健康参数指标范围之外，则认为设备是不健康，需要进一步对发现不健康项目的产生原因进行分析，确定其真正的损伤模式，为以后进行不健康因素的排除和健康恢复提供依据。

4.1.4 不健康因素的排除和健康恢复

针对所查找到的不健康项目的产生原因和对应的失效模式，可以根据实际情况采取相应的措施。对于设备工作参数的不健康状态，可以通过调整生产工艺使之恢复正常状态；对于外部环境参数的不健康状态，比如液化石油气储罐的环境温度过高，一般采用浇水喷淋的方式降温，可燃气体浓度超标可以通过查找泄漏源来进行排除等；对于设备壳体上发现的不健康项目，需要采用停机修理的方式来

排除不健康因素，裂纹可以采用打磨去除和补焊的方式，变形、剩余壁厚和微观组织超标的材料一般采取补强或更换的方式进行；也可通过降低使用压力或工作温度的方式使承压设备重新投入使用。

4.2 大型机电类特种设备健康管理技术应用设想

大型机电类特种设备是指涉及生命安全、危险性较大的电梯、起重机械、大型游乐设施、客运索道和厂内机动车辆。截至 2015 年底，我国的大型机电类特种设备数目相当庞大，其中电梯 426 万台、起重机械 226 万台、大型游乐设施 2 万台、客运索道 985 条、厂内机动车辆达 63 万辆。以上五类特种设备，尤其是电梯、客运索道和大型游乐设施，与广大民众的出行和休闲、娱乐紧密相连，一旦发生事故，将造成恶劣的社会影响，引起广泛关注。因此利用本文提出的健康管理技术，制定健康管理方案并实施，必能在一定程度上提高机电类特种设备运行的安全性和可靠性。以下为大型机电类特种设备健康管理技术的实施方案。

4.2.1 健康管理指标的建立

机电类特种设备的失效模式种类繁多、形式多样。对于结构件主要有整体断裂、过大的残余变形、零件的表面破坏和工作条件遭到破坏导致的失效；对于关键零部件(齿轮、轴承、轴等)常见的失效形式主要有疲劳剥落、磨损、断裂、胶合、塑性变形、腐蚀、裂纹和过热等；对于焊接件主要表现为焊缝开裂；对于液压系统，主要表现为泄漏和堵塞；对于电气系统，主要表现为元器件不上电、烧坏、线路老化或遭受无意破坏等。因此，为了保障它们的健康运行，需要保证其相应的参数值处于允许的范围之内。常用的健康指标有载荷、压力、温度、应变、形变量、振动等。表 2 列举了常见的失效模式、失效原因和对应的健康管理指标。

表 2 机电类特种设备常见的失效模式及管理指标

危险部位		失效模式	失效原因	健康指标
结构件	机架、立柱、壳体	腐蚀、裂纹	酸/碱/盐环境、表面涂层损坏	表面涂层
		整体断裂	过载、疲劳、强度不够	载荷、裂纹
		过大的变形	过载、刚度不够	载荷、应变
关键零部件	齿轮、轴承、轴	剥落、磨损、点蚀断裂、胶合、塑变腐蚀、裂纹、噪声	疲劳、润滑不良、异物侵入	油液残留物
			过载、温度过高	温度、载荷
			疲劳、表面损伤	振动、声信号
装配部件	转子系统	失稳、不平衡、不对中、松动、碰磨	装配超差、地基不均匀下沉、载荷不均、轴刚度不足	振动、声信号
焊接件	—	焊缝裂纹	疲劳、焊接质量不达标、过载	表面损伤
液压系统	管道回路	压力不足、动作不到位、漏油、卡死	阀门堵塞、管道降解、脆化	压力、液压油残留物
	液压缸		密封圈老化，活塞磨损	
电气部分	限位开关	不工作、不带电	短路、烧坏、线路老化	电压、电流、
	电气控制箱	线路短路、漏电	线路老化、意外损坏	电火花
	控制系统	PLC 损坏	质量不好	运行功能

4.2.2 检查、检测方法的选择和周期的确定

对于不重要或简单机械不健康状态,如轻微异常或简单故障,采用人工感官检查法,如眼观、耳听、触摸、嗅觉等方式直接快速的查找和辨别原因,或者借助一些简单的辅助工具,如小锤、压力表、热电偶温度计等。

对于重要和关键的机械零部件,其故障原因往往十分复杂并难以发现,此时需要借助先进的检测设备和检测技术,如振动检测系统、声发射仪、红外热成像检测仪、超声检测系统、电磁检测等仪器设备,甚至要实施状态监测,以掌握系统运行的实时状态。要从检测的信号中获取有用的故障信息往往也是非常复杂的,这些信号往往具有非线性、非平稳和非高斯分布等特征,因此,除了利用成熟的时域、频域信号处理技术之外,还要用小波分析、经验模态分解、Hiebert 等时频域信号处理方法。

对于难以拆卸的结构、停机检测费用高昂的或人力所不便到达的检测部位,需要借助无损检测和远程检测技术。如利用红外热成像技术和光纤光栅技术检测轴承磨损或齿轮箱的运行情况,利用远程监测技术管理分布在不同港口的起重机械等。

大型机电类特种设备的检查、检测周期差异较大,一般为日检、周检、月检、季检、半年检、年检、三年检和六年检等,检测方式包括在线和离线。比如大型游乐设施要安排日检,每次开机运行前也要开展自检,此外还要依据法规进行法检和监检。

特别指出,旋转类零部件(轴承、电机转子、变速箱)在机电类特种设备中占有相当大的比重,对此类设备进行检测时,有超过 70%采用基于振动的检测^[16],声发射检测是其有力的补充^[17]。对检测的振动信号或声发射信号进行参数和波形分析,获取健康管理的指标值(频谱、峭度值、RMS 等)。另外,检测旋转类机械的早期微弱故障也具有重要的工程意义,由于微弱的故障信息容易被环境噪声所淹没,一般采用声发射检测,因为声发射信号是故障结构本身发出的高频应力波,具有振动检测所不具备的优点^[18-19]。有学者根据旋转机械的转速不同,高速(>600 r/min)、低速(10~600 r/min)和超低速(<10 r/min),综述了不同的检测方法^[20]。

4.2.3 健康状态的评价

将检查、检测数据,结合历史统计数据,与已建立的机械系统健康指标进行比对,通过二者间的偏离程度来进行系统健康评价,对于发现不健康的项目要分析和查找产生不健康的原因。大型机电类特种设备,其不健康状态表现形式可大致分为轻微异常、损伤、故障、失效等。

对于简单的、明显的不健康模式,一般通过简单的常规检查就能判定出不健康的状态并查找出不健康的原因,如目测法可以迅速观察到结构件的过量变形,用手触摸机件可以感觉振动的强弱变化和是否产生冲击,通过观察液体的跑、冒、滴、漏现象可以判断出管道或者阀门是否有裂纹和松动等情况。

对于复杂机械系统或不容易发现的不健康模式,需要进行失效机理分析,建立数学/物理模型,并对检查检测数据进行分析处理,结合历史运行、维修保养数据、可靠性试验数据等,采用故障识别技术,如马尔科夫链、人工智能、专家系统、机器学习等技术来识别故障的产生原因、部位和程度。

4.2.4 健康恢复

被诊断为不健康的机电设备或零部件,应根据具体的健康管理要求开展健康恢复工作。

一般而言,对于不会影响机械系统正常运转的轻微异常,可不开展任何修复,只需要加强日常维护和保养,如清洁、润滑等;对于不会造成严重后果的某些异常,可以采取事后维修,如密封圈老化等;对于会造成严重的安全和环境后果的故障,则应强化日常检查的频度和力度,甚至开展状态监测和故障诊断、剩余寿命预测等研究,采取基于时间或基于状态的预防维修以及预防更换等措施,尽可能地降低事故发生率,减少事故造成的危害和损失;对于超出维修能力之外的重要机械零部件或者子系统则应考虑实施设备改造甚至要提前报废。

5 结 论

(1) 本文采用系统论的观点,提出了大型机械系统的健康管理理论,并给出了该理论的适用对象、目的、主要过程和内容以及主要的方法和手段。

(2) 开展大型机械系统的健康管理,其关键是建立科学的系统健康指标、制定切实可行的健康管理方案并加以实施。

(3) 大型机械系统健康管理方案的内容应至少包括系统的健康指标、检查检测项目与采用的方法及周期、健康评价及采用的方法、不健康项目原因的分析、恢复健康的措施和方法等。

(4) 通过初步研究,给出了大型承压类和机电类系统的健康管理应用设想。

(5) 本文仅就大型机械系统健康管理进行了初步探讨,许多方面还需进一步开展理论研究和应用实践,希望有更多的科技工作者开展不同对象的系统健康管理理论研究和应用。

参 考 文 献

- [1] HAIMES Y Y. Total risk management[J]. Risk Analysis, 2006, 11(2): 169-171.
- [2] 程映雪, 向衍荪, 周长春. 系统安全评价方法分析[J]. 中国安全科学学报, 1995(S2): 42-47.
CHENG Yingxue, XIANG Yansun, ZHOU Changchun. Analysis on safety assessment methods of operating system[J]. China Safety Science Journal, 1995(S2): 42-47.
- [3] DUNJÓ J, FTHENAKIS V, VÍLCHEZ J A, et al. Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1-3): 19-32.
- [4] 杜廷召, 田文德, 任伟. 危险与可操作性分析研究[J]. 现代化工, 2010, 30(7): 90-93.
DU Tingzhao, TIAN Wende, REN Wei. Progress and prospect in hazard and operability analysis[J]. Modern Chemical Industry, 2010, 30(7): 90-93.
- [5] SUMMERS A E. Techniques for assigning a target safety integrity level[J]. Isa Transactions, 1998, 37(2): 95-104.
- [6] 史学玲. 功能安全标准的历史过程与发展趋势[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2006(2): 6-8.
SHI Xueling. History and trend of functional safety standard [J]. Instrument Standardization & Metrology, 2006(2): 6-8.
- [7] 陈学东, 王冰, 杨铁成, 等. 基于风险的检测(RBI)在中国石化企业的实践及若干问题讨论[J]. 压力容器, 2004(8): 39-45.
CHEN Xuedong, WANG Bing, YANG Tiecheng, et al. Practice of RBI in Chinese petrochemical enterprises and discussion about its several questions[J]. Pressure vessel, 2004(8): 39-45.
- [8] 石慧. 机械系统的剩余寿命预测及预防性维修决策研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2015.
SHI Hui. The prediction of remaining useful life and preventive maintenance decision for mechanical system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [9] PENG Y, DONG M, ZUO M J. Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: A review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(1): 297-313.
- [10] 吴波, 丁毓峰, 黎明发. 机械系统可靠性维修及决策模型[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
WU Bo. DING Yufeng, LI Mingfa. Reliability and decision model of mechanical system [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [11] BOUSDEKIS A, MAGOUTAS B, APOSTOLOU D, et al. Review, analysis and synthesis of prognostic-based decision support methods for condition based maintenance[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2015: 1-14.
- [12] 孟小峰, 慈祥. 大数据管理: 概念、技术与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2013(1): 146-169.
MENG Xiaofeng, CI Xiang. Big data mangement: Concepts, techniques and challenges[J]. Journal of Computer Research and Development, 2013(1): 146-169.
- [13] 孙其博, 刘杰, 黎彝, 等. 物联网: 概念、架构与关键技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2010(3): 1-9.
SUN Qibo, LIU Jie, LI Shan, et al. Internet of things: Summarize on concepts, architecture and key technology problem[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010(3): 1-9.
- [14] SARMA A C, GIRÃO J. Identities in the future internet of things[J]. Wireless Pers Commun, 2009, 49: 353-363.
- [15] 沈功田, 胡斌. 大型承压设备不停机电磁无损检测技术及应用[J]. 中国特种设备安全, 2016, 32(1): 6-12.
SHEN Gongtian, HU Bin. The on-line electromagnetic non-destructive testing technology for large pressure equipment and its application[J]. China Special Equipment Safety, 2016, 32(1): 6-12.
- [16] MBA D, RAO R B. Development of acoustic emission technology for condition monitoring and diagnosis of rotating machines: Bearings, pumps, gearboxes, engines and rotating structures[J]. Shock & Vibration Digest, 2006, 38(1): 3-16.
- [17] 郝如江, 卢文秀, 褚福磊. 声发射检测技术用于滚动轴承故障诊断的研究综述[J]. 振动与冲击, 2008(3): 75-79.
HAO Rujiang, LU Wenxiu, CHU Fulei. Review of diagnosis of rolling element bearings defaults by means of acoustic emission technique[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008(3): 75-79.
- [18] 沈功田. 声发射检测技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
SHEN Gongtian. Acoustic emission testing technology and application[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [19] 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(4): 5-11.
YUAN Jun, SHEN Gongtian, WU Zhanwen, et al. Acoustic emission testing technology in diagnosis of bearing failure [J]. Nondestructive Testing, 2011(4): 5-11.
- [20] CAESARENDRA W, KOSASIH B, TIEU A K, et al. Acoustic emission-based condition monitoring methods: Review and application for low speed slew bearing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 72: 134-159.

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。主要研究方向为特种设备安全与无损检测新技术。
E-mail: shengongtian@csei.org.cn