DOI: 10.3901/JME.2019.18.206

工程系统服役质量指数和性能评价指标体系：文献综述^{*}

蒋仁言

(长沙理工大学汽车与机械工程学院 长沙 410114)

摘要：为了对工程系统的运行和维修实施有效的管理，需要对系统关键性能指标进行定量评价和监控。通常，系统全局性能由一个多层次结构的指标体系所描述。层级结构的底层是一列可直接观测的参数或变量，中间层是合成的指标，顶层是服役质量指数或类似的术语(如健康指数)。为明确服役质量指数和性能评价指标体系的含义和用途，完成一个关于质量指数和指标体系的文献综述，并讨论与之相关的研究课题。研究发现，质量指数是一个或多个用于描述系统健康状态的全局的、综合的性能指标，导出质量指数的方法是多准则分析；指标体系和质量指数的主要用途包括性能评估、监控或监管、问题追踪和运维决策。不同于在线监控和故障诊断，基于质量指数的性能监测与追踪通常是周期地完成的，适合于复杂工程系统的整体性能监控和中长期管理。文中所述评的方法和典型案例对复杂工程系统的监管和运维管理具有借鉴作用和参考价值。

关键词：工程系统；性能评价；服役质量；指标体系；文献综述

中图分类号：TH17

In-service Quality Indices and Performance Evaluation Indicator System of Engineered Systems: Literature Review

JIANG Renyan

(Faculty of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114)

Abstract: To effectively manage operations and maintenance of engineered systems, the key performance indicators of the systems should be quantitatively evaluated and monitored. The systems' performances are usually described by a multi-level indicator framework. A set of directly measureable parameters or variables are located at its bottom, the aggregated indicators are in the middle-levels and the overall in-service quality indices or the like (e.g., health index) are at the top. To clarify the meaning and uses of quality indices and indicator framework, a literature review on them is carried out and relevant issues are discussed. It is found that the overall and comprehensive performance of a system is described by one or more quality indices, and the method to derive the quality indices is multi-criteria analysis. The main applications of the performance evaluation framework and quality indices include health evaluation, monitoring or regulation, issue tracking as well as operation and maintenance decisions. Different from condition monitoring and fault diagnosis, the quality-indices-based performance monitoring and tracking is usually conducted periodically and applicable for monitoring and controlling of overall performances of complex engineered systems as well as mid-long term management of the systems. The reviewed methods and typical case studies have reference meaning to the supervising, operation and maintenance management of complex engineered systems.

Key words: engineered systems; performance evaluation; in-service quality indices; indicator system; literature review

0 前言

国家重点研发计划项目“重大复杂机电系统服役质量检测监测及维护质量控制技术研究”的一个

研究任务是针对所选择的研究对象构建评价其服役质量的指标体系，并由此导出相应的服役质量指数或Q指数。这需要弄清楚服役质量指数的含义及它的用途。为此，有必要完成一个关于工程系统服役质量指数和性能评价指标体系的文献综述。

首先以短语“Q index”(或“Q indices”)和“Quality index”(或“Quality indices”)作为主要关

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2016YFF0203400)。20180920 收到初稿，20190330 收到修改稿

关键词, 在“ScienceDirect”, “IEL 全文数据库”, “Springer LINK 数据库”和“EI”数据库查找与“机电系统”或“工程系统”相关的文献。然后, 通过一个反复的阅读和文献追踪过程, 扩大搜索范围(包括中文文献), 并由此获得更多相关的文献。最后对文献按图1所示加以分类。

图1 文献分类

一些与“工程系统”和“服役”无关的文献被排除。例如, 与“工程系统”无关的质量指数包括水质质量指数^[1], 空气质量指数^[2]以及土壤质量指数^[3]; 与“服役”无关的质量指数包括与系统安全性设计有关的生活质量指数^[4], 与成组加工有关的机床-零件矩阵的质量指数^[5], 与车辆供热通风空调系统设计有关的声质量指数^[6], 与汽车雨刮器设计有关的运行质量指数^[7]。

经过筛选保留下来的文献被进一步分为两类: 含有“质量指数”这一术语的文献和未明确使用“质量指数”但使用类似术语(如“key performance indicator”, “health index”^[8])的文献。

虽然与“综合性能评价”有关的中文文献不少^[9], 但涉及“工程系统”的中文文献不多^[10-11], 与“服役质量”有关的中文文献则少之又少。有两篇与“服役质量”略微相关的文献。一篇涉及矿井安全性综合评价^[12], 另一篇涉及进口旧工程机械性能的综合评价^[13]。涉及综合性能评价的中文文献的共同特点是: 多采用偏于主观的方法(如层次分析法, 模糊综合评价与灰色系统理论), 与之相联系的指标归一化方法是基于样本数据的线性变换, 相关的合成模型是具有强补偿性的加权和模型(或加权平均模型)。因此, 以下文献综述将以英文文献为主。

第1节从“质量指数”这一角度述评第一类文献; 第2节从“指标体系”这一角度述评第二类文献。由于本文的重点是在指标体系和质量指数的含义和用途, 故对同一领域的类似文献不作重复介绍, 仅引用其中有代表性的文献。第3节讨论综合性能评价技术与“多状态可靠性”和“健康监测”等相

关技术的异同。最后, 第4节总结全文, 并讨论一些密切相关的研究课题。

1 工程系统质量指数

根据其用途, 与工程系统质量指数相关的文献可进一步细分为两类: 服务质量评价取向的文献和技术性能评价取向的文献。在服务取向的文献中的质量指数可能含有主观成分(如服务态度); 而在技术性能取向的文献中的质量指数一般不含这样的主观成分。

1.1 服务质量评价取向的质量指数

基于性能的监管(Performance-based regulation, PBR)已被广泛地应用在公共服务行业。为了增加利润, 运营商可能减少运维费用, 由此导致服务质量的下降^[14]。为了避免此类事情发生, 有必要把对服务质量的要求结合到PBR中。这就需要开发一个具有行业特色的服务质量指数(Service quality index, SQI)。本节介绍两个这样的服务质量指数。一个涉及公共汽车, 另一个涉及公共电力。

1.1.1 公共汽车服务质量指数

公共汽车服务质量指数(Bus service quality index, BSQI)是在公共汽车服务外包的背景下提出来的^[15-16], 主要供监管机关用于评价和监测服务合同的性能。BSQI是一个由多准则决策分析导出的全局性能指标, 主要的准则包括服务频率, 服务可靠性(如准时性、安全性等), 司乘人员间的信息沟通, 舒适和清洁。与每个准则相联系的是一列具体的定性或定量指标。

1.1.2 公共电力服务质量指数

对于公共电力行业, 服务质量的监控包括以下四个部分^[14]。

(1) 构建服务质量的指标体系。一般该体系包括顾客服务、服务可靠性和顾客满意三个方面。顾客服务包括对于顾客抱怨的响应时间等三项指标; 服务可靠性包括系统平均停电频率、用户平均断电持续时间等五项指标; 顾客满意包括服务态度、服务的及时性和专业性等四项指标。

(2) 基于历史数据, 确立有关指标的基线性能标准。

(3) 定期统计和服务性能跟踪, 一般采用月度和年度报告的形式。

(4) 根据实际服务性能实施奖惩。通常采用这样一种策略: 在某一方面差的性能不能被在另一方面好的性能所补偿。这需要对每项指标与对应的标准进行比较。换言之, 奖惩政策不是针对一个全局

质量指数来设计的。

1.2 技术性能评价取向的质量指数

在这一节我们介绍四个不同的工程系统的技术性能评价有关的质量指数。这些工程系统分别是铁路轨道系统、工厂、电网和道路。

1.2.1 轨道质量指数

意大利铁路运输行业使用轨道质量指数(Rail quality index, RQI)来描述轨道的全局舒适性,并用它作为基于状态的轨道维修的关键指标^[17]。针对路段定义的 RQI 为轨道几何质量指数,它是每 200 m 路段内所测得的楔形指数的平均值;针对车站定义的轨道几何质量指数为每 200 m 路段内所测得的纵向缺陷指数的平均值。

根据 RQI 值,将轨道划分为三个质量等级。第一级为卓越级,属于这一等级的轨道不需要维修。第二级为轻度缺陷级,属于这一等级的轨道需要评价或预测其缺陷随时间的演变,并相应地计划维修工作。第三级为严重缺陷级,属于这一等级的轨道需要立即维修。

周期地收集 RQI 信息。运营商直接根据 RQI 值作出维修决策,监管机关对 RQI 设定了限值。

1.2.2 评价工厂性能的质量指数

HÖLTTÄ 等^[18]提出了一个工业生产厂(如造纸厂)的性能评价质量指数。一个四层指标体系被开发并用于监控工厂性能。指标体系的底层由性能输出变量(如温度、压力)构成。这些变量在一段时间内的观测值被变换为哈里斯指数,它是输出变量观测值的方差与理论最小方差的函数。使用 logistic 函数作为值函数,哈里斯指数被进一步变换为一个性能分。这些性能分被集成为低层级的性能指标(即子系统性能指标);低层级性能指标又被进一步合成为高层级性能指标(即系统级性能指标)。最后,系统级性能指标被合成为工厂级质量指数。通过监测工厂级质量指数和系统级性能指标,可以获得工厂性能的全景。当全局性能劣化时,通过逐级审查低层级性能指标和各变量的哈里斯指数以寻找问题的根源,从而发现薄弱环节。以这样一种方式,运营商能实现工厂性能的连续监测和追踪(即问题溯源)。显然,这里的“追踪”有点类似于“诊断”,但其颗粒度较粗。

1.2.3 电力质量指数

有许多研究涉及电力质量指数(Power quality indices, PQI)^[19]。IEEE 标准 1459-2000^[20]给出一系列电力质量指数的定义。运营商可以使用各种电力监测仪表连续记录电力扰动波形,并由此导出那些电力质量指数。对于每一个质量指数,可确定其可

接受的限值,并定义其质量等级。利用这些质量指数,各种故障状态可以被探测。RAPTIS 等^[21]提议用神经网络模型组合多个电力质量指数成为全局电力质量指数。

LEZHNYUK 等^[22]涉及含有更新能源的分布式电网的运行质量指数。更新能源影响电力供需的平衡可靠性和电压质量。他们定义了一个电力平衡系数 $k_p(t)$ 和电压质量系数 $k_u(t)$ 。分布式电网运行质量指数被定义为 $k_p(t)k_u(t)$ 的年平均值。他们然后研究了更新能源所占比例对运行质量指数的影响,并用它解决分布式电网的某些设计问题。

1.2.4 道路质量指数

LI 等^[23]涉及道路质量指数。研究对象是一条城际公路,主要利益相关方是负责当地交通网络的政府机构。一个路面信息管理系统被开发,用于记录路面状况信息。这些信息每年更新一次。基于该系统的信息,可计算以下路面质量指标:路面损坏分、路面状态分、路面打滑分、乘坐舒适分、国际粗糙度指数分。

上述每一项指标是一个或多个变量的函数。例如,路面状态分依赖于路面损坏等级、乘坐质量指标、日平均交通量以及车速限值。交通管理部门使用这些指标监控道路性能。

1.3 小结

质量指数是由多个直接可测量的(或可感知的)变量或参数通过层层合成所获得的一个或多个综合性能指标。它(们)本身不可直接观测。表 1 从几个方面总结了本节所述质量指数。从中可以看出以下几点。

(1) 就系统特征而言,质量指数定义的对象涉及各行各业,且多为大型复杂工程系统。

(2) 大多数质量指数被开发供政府有关部门(代表公众利益)用于监管的目的。部分质量指数用于运营商对系统实施运行监控、追踪和维修决策的目的。

(3) 除监管和运维决策的用途外,有些质量指数可以有“诊断”的功能。这里的诊断意味着寻找导致全局性能劣化的原因。更具体地讲,寻找主要是由系统的哪一部分引起的全局性能退化。一旦某一部分被确定是问题的根源,更进一步的检测和分析被需求去探寻更加具体的原因。因此,它有别于通常的“在线故障诊断”,仅提供用于进一步分析的线索。

(4) 大多数质量指数涉及多个方面或准则。因此,多采用多准则决策分析方法合成高层级指标。依赖于具体对象和问题,有的应用针对综合指标设置限值和划分其质量等级的边界,有的应用则针对单项指标设置限值和等级划分边界。

表 1 各种质量指数的总结

指标名	系统特征	利益相关者	主要用途	指标全面性	合成方法
公汽 SQI	公汽公司	监管机构 与运营商	服务外包 质量管理	多准则	加权和模型
公共电力 SQI	电力公司	监管机构 与运营商	电价政策制定	多准则	设置单项 QI 最低标准
轨道 QI	轨道系统	监管机构 与运营商	维修决策	轨道几何 特征	加权和模型
生产过程 QI	生产厂	运营商	监测和跟踪	各部分运行 特征	加权和模型
电压、电流 QI	电网	运营商, 设计单位	监测和 状态维修	电压、电流 有关的运行 特征	加权乘积模 型和神经网络 模型
道路 QI	公路路面	监管机构	监管和 维修	各种路面 特征	合成指标和 单项指标并 用

2 典型机电系统性能评价指标体系

一般工程系统的综合性能评价涉及两大部分：评价体系 and 评价模型。评价体系是全局性能通过一个由上而下的分解过程所形成的多层级指标体系，层级的数目依赖于问题的复杂性。评价模型是一个自下而上的指标计算过程，并涉及两个重要的模型：值函数模型和合成模型。值函数的作用是将一个测量或观察值归一化到(0, 1)区间，合成模型将多个值函数的值合成为一个单一的值。

本节着重介绍几个典型的机电系统全局的或某一方面的性能评价指标体系，以便识别指标体系构建的一般方法，同时也为从事相关研究工作的人员提供参考。这些系统分别是铁路、风电场、核电、造纸厂、车辆和变压器。

2.1 城市轨道交通系统能耗评价指标体系

城市轨道交通系统包括三个相互依存的子系统：机车、基础设施和运行系统。运营商的主要目标是在确保服务质量的同时降低能耗。通过分析实际的能耗性能，运营商可以制定并实施行之有效的节能策略。然后，通过监控有关的能耗性能，评价节能措施的效果。这就需要开发系统能耗性能指标体系。GONZALEZ-GIL 等^[24]报告这样一个体系。该指标体系用 12 个一般指标描述子系统各单元的性能；用 10 个由一般指标导出的关键性能指标(Key performance indicators, KPIs)评价子系统和系统的综合性能。

对于每辆机车或每个站场，一般评价指标如下：变压站效率、配电线路效率、牵引能耗、牵引能耗效率、制动能回收、制动能回收效率、车库能耗、

停放车辆的能耗、车站能耗、车站照明及信息系统能耗、车站人员流动所需能耗和隧道通风系统能耗。

从一般指标导出的关键性能指标是能耗引起的每人千米二氧化碳等效排放量，此处“人”指乘客；每人千米能耗，更新能源所占份额，废热利用，牵引供电系统效率，牵引能耗，辅机能耗，制动能回收，车库能耗，车站和基础设施的能耗。这些 KPIs 给出各子系统及系统能耗性能的完整描述，并有助于识别可供改进的领域。

2.2 风电场运维的性能指标体系

风电场利益相关方包括投资商，运营商、维修承包商、保险公司、电力公司、政府监管部门和终端用户。风电场关键性能指标提供各利益相关方评价机组运行状态的有价值的信息，从而允许有关各方掌握机组的运行状态并作出有根据的(informed)决策。这样，关键的问题是指标体系的开发。

GONZALEZ 等^[25]将风电场运维 KPIs 分为五大类别。它们是机电性能(如风能利用指数)、可靠性(如平均故障间隔时间)、维修(如平均恢复时间)、经济性(如运行费用)和安全性(包括系统安全和员工健康与安全)。每类指标又包括若干个分指标。理想的指标体系能以最少可能的指标数给出风场整体性能相对完整的描述。为便于执行，一个技术标准应该被开发。该标准给出每个指标的定义，它们的测量方法，计算方法以及可接受的限值。

2.3 核电安全与运行性能指标体系

KADAK 等^[26]介绍了美国核电运维协会(Institute of nuclear power operations, INPO)的核电运行性能指标体系以及美国核能管制委员会(Nuclear regulatory commission, NRC)的全局安全性能指标体系。

2.3.1 INPO 性能指标体系

INPO 的性能指标包括以下 12 项。

- (1) 机组能力因子。
- (2) 强制(停堆)损失率。
- (3) 7 000 h 非计划紧急停堆数。
- (4) 安全性能指标。
- (5) 压水堆高压安注系统性能。
- (6) 压水堆辅助给水系统性能。
- (7) 沸水堆高压注入系统性能。
- (8) 沸水堆余热排除系统性能。
- (9) 应急交流电力系统性能。
- (10) 燃料可靠性。
- (11) 集合辐射剂量。
- (12) 化学性能指标。

使用加权和模型可以获得每个机组的综合性能指标。这些机组的综合性能指标又可进一步合成为

一个核电厂级的全局性能指标。使用机组级和电厂级综合性能指标可以监测它们的运行性能,并与最近五年的指标均值作对比。将最近十年的指标值作线性回归,得到回归直线方程。该直线方程的斜率可用于评价指标的演变趋势。

2.3.2 NRC 事故预兆指数

堆芯冷却不足以及严重堆芯损伤等事故被称为核电厂事故前兆。NRC 系统地评价了美国核电站运行经历,以便识别、建档和排序可能导致事故前兆的运行事件。定义年度事故序列前兆(Accident sequence precursors, ASP)指数为发生在某一年度所有电厂事故前兆事件的总堆芯损伤条件概率与核电厂总数之比。ASP 指数越小越好。通过追踪 ASP 指数随时间的演变,可以完成一个定量的对比分析。

核电厂全寿命管理需要制定和执行一个周期性在役检查计划(In-service inspections, ISI)以确保所有重要的结构、系统和元件(Structures, systems & components, SSCs)具有要求的安全裕量。这要求编制一个实施手册。该手册详细说明各项 ISI 要求(这些要求必需满足现有规范和标准的要求),检查方法和可接受的准则。

2.4 制浆造纸企业设备关键性能指标体系

设备关键性能指标体系综合地描述设备的服役质量。通过对比和分析这些指标的实际值和期望值,可以评价设备的状态,并识别可能的性能改进措施。针对制浆造纸企业,AMMARA 等^[27-28]识别了 19 个 KPIs。利用这些指标,他们识别了低效设备,分析了低效原因,提出了改进活动。为维持过程要求的性能,这些指标以及它们的合成指标应该被密切地监测。

2.5 评价轻型汽车环保性的指标体系

为制定征税政策的目的,需要开发一个定量方法用于评价各种类型传动系统的轻型汽车(如汽油车、柴油车、新能源车)的环保性。DOMINGUES 等^[29]开发了这样一个指标体系。该体系由两大类指标构成:全生命周期环评指标和车辆运行指标(假定使用寿命为 20 万 km)。全生命周期环评指标包括 6 个子指标:非生物资源消耗量、酸化、富营养化、温室气体、臭氧层消耗以及光化学氧化。车辆运行指标包括 4 个子指标:燃油消耗、NO_x、CO 和可吸入颗粒物(如 PM₁₀)。使用多准则决策分析方法将各项指标合成为一个全局环境影响指数。根据这个指数的值,某种类型的传动系统的轻型汽车可以被划分到某一性能等级。

2.6 电力变压器的指标体系及其健康指数

HAEMA 等^[30]报告了一个评价电力变压器健康

状态的指标体系。该体系包括 21 个指标,它们来自三种类型的试验和检查:电试验(或功率因子试验),绝缘油试验和视检。电试验探测绝缘完善性,并产生一个称为功率因子的性能参数。绝缘油试验包括溶解气体分析、呋喃分析和油质分析,共产生 7 个性能参数。视检每周或每月进行一次,共产生 13 个性能参数。

使用加权和模型,这 21 个参数值被合成为一个全局健康指数。根据该健康指数的值,五个健康等级定义为很好、好、中、差和很差。如果变压器的健康等级属于前面两个,则只需对它完成正常维护工作;如果健康等级是中,则需要增加诊断试验;如果健康等级是差,则需要计划更换或恢复性维修;如果健康等级是很差,则需要立即评估使用风险。全局健康指数亦可用于退化趋势分析。

2.7 小结

表 2 从五个方面总结了以上六个指标体系。第一个方面涉及系统的复杂性。上述六个系统具有不同的复杂性水平,从单个设备到由站场、线路、机车所构成的复杂系统。第二个方面是主要利益相关者或指标体系的开发者。如表可见,他们分别是运营商和监管机关。第三个方面涉及这些指标体系的主要用途。基本的用途是性能评价,进一步的用途包括追踪、改进、维修决策和其他。第四个方面涉及指标体系的全面性。多数情况涉及一个或多个方面的性能,其中运行性能与健康水平是重点。最后,多数指标体系采用了多准则分析方法合成综合性能指标。

表 2 指标体系总结

案例	系统复杂性	利益相关者	主要用途	体系全面性	是否有合成指标
1	大型复杂系统	运营商	识别问题和评价改进措施	能源消耗	是
2	多机组系统	运营商	监控	综合评价	否
3	多机组系统	监管机构	监控	运行和安全性能	是
4	多设备系统	运营商	监控,追踪与改进	运行性能	是
5	单个设备	监管机构	制定税收政策	环保性	是
6	单个设备	运营商	评价和维修决策	健康评价	是

3 与其他相关技术的对比

有两类技术与综合性能评价技术类似。第一类技术有多个不同的名称,但大同小异,包括“状况监测与故障诊断”,“健康监测”,“故障预测与健康

管理”^[8, 31-32]。第二类技术是“多态系统可靠性”^[33]，或“性能可靠性”^[34]。本节从以下六个方面对比这些技术：目的和用途，适用的对象和时间范围，指标体系构建方法，输入信息的特征，评估模型的特征，分析结果的特征。

3.1 综合性能评价技术

综合性能评价主要用于监管(判定监管对象是否合标，重点关注职业安全与健康)；企业高层管理人员对系统运行状况的宏观把控；企业技术管理部门基于退化或健康评估对系统作出运维决策(如确定技术等级，决定是否需要系统级维修或退役)。适用于对各种工程系统(尤其是复杂机电系统)的整体退化性能的评价以及系统级的、宏观层面的中长期管理。

一般地，有三种构建指标体系的方式。第一种方式依据系统的功能结构来构建体系(如前述城轨系统的情况)，第二种方式依据各个方面的“性能”来构建体系(如前述风电场的情况)，第三种方式是上述两种方式的混合(如前述变压器的情况)。

安置在指标体系底层的输入参数一般为可测量的、能直接反映退化状态的、周期地获取的连续变量。采用的评估模型为多准则分析模型(即各种平均运算模型)。但在三个方面值得注意。首先，由于评估模型与用于评估的技术标准紧密相连，数据归一化方法应该依赖于标准，而不是依赖于数据样本。这使得采用非线性值函数(如前述 Logistic 函数)成为必要。其次，合成模型选择需要考虑被合成要素之间是否允许补偿性。如果补偿性不被允许，加权和模型不宜使用。最后，指标权的确定应尽量减小主观性。实际上，很多标准可能不同程度地指明了指标的重要性。例如，JT/T 198-2016《道路运输车辆技术等级划分和评定要求》^[35]将检测项目分为关键项、分级项、一般项和非评定项。这种定性信息可用于确定各层指标的相对权重，并大大地减小主观性。

分析的主要输出是服役质量指数。通过定义各技术等级边界所对应的服役质量指数，可以相应地确定系统的技术等级和作出恰当的维修决策。输出结果是确定的、唯一的。

3.2 健康监测技术

状况监测技术用于获得某一元件(或它的关键失效模式)的退化状态信息，状态指标反映元件健康状况，它广泛用于故障探测与状态维修^[32]。状况监测与故障诊断技术主要用于探测异常，聚焦在关键元件及其主要失效模式。故障预测与健康管理的广泛用于对电子产品(系统、子系统或元件)的连续在线

状况监测与故障诊断^[8, 31]。由于采用实时监控，关注异常状态的识别，只能对被监测对象(系统的零部件、总成、结构的失效模式)的退化或健康状态作出短期预测。

如果系统的多个元件或失效模式被同时监测，这构成一个系统级的监测系统。状态监测系统的构建属于测试性设计的范畴，关注故障覆盖率，需要完成一个失效模式与影响分析^[8]。

以在线、实时方式获得的测量变量多为间接状态变量(如振动、噪声、油分析的特征量)。评估模型多采用计算复杂的智能算法。分析的主要输出为定性的状态判断(正常或异常)以及具有较大不确定性的元件平均剩余寿命或其分布。

3.3 多状态系统可靠性技术

多状态系统可靠性涉及这样的系统，其系统及其元件表现出多个性能水平或退化状态。作为可靠性模型，多状态系统可靠性常用于系统可靠性设计和优化^[33]，故主要应用于系统的设计阶段。

性能可靠性或功能可靠性是系统处于正常状态的后验概率^[34]，是一种系统级动态、多状态退化评估技术，主要用于系统级状态维修。它关注退化而不是异常，故其决策适用的时间范围比状况监测与故障诊断略长。

多状态系统可靠性与性能可靠性的分析基础是多态系统可靠性框图，即系统功能结构图^[34]。

连续型的退化量常常被离散为很少几个状态(如正常、部分失效、完全失效)。评估模型通常为计算密集的马尔柯夫过程和贝叶斯网络模型。主要的分析结果是某一离散状态(通常是正常工作状态)在稳态状况下的发生概率。计算这个概率需要引入较多的假设(如稳态假设)，其输出具有较大不确定性。

3.4 小结

由以上分析可见，综合性能评价技术与其它相关技术的主要差别在于是否可以用于监管的目的。其它差异包括前者使用更多的离线信息，评价更为宏观和全面，指标计算简单，计算结果唯一，输出值反映退化，时效更长；而后者更多地使用实时信息，评价更为微观和局部，指标计算复杂，结果具有不确定性，输出为概率或是否异常，时效更短。然而，这些技术可以是互补的，相互可以借鉴。

4 总结和进一步的研究课题

本文综述了与工程系统有关的一些质量指数和性能评价指标体系。从中可以看到，质量指数

- 刀盘性能综合评价方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(21): 1-9.
- XIA Yimin, YAN Zhangju, HU Chenghuan, et al. Performance comprehensive evaluation of composite earth pressure balanced shield machine cutter head [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(21): 1-9.
- [12] 曹树刚, 徐阿猛, 刘延保, 等. 基于灰色关联分析的煤矿安全综合评价[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(2): 141-145.
- CAO Shugang, XU Ameng, LIU Yanbao, et al. Comprehensive assessment of security in coal mines based on grey relevance analysis [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(2): 141-145.
- [13] 陈志丹, 龙赛琼, 王小棠, 等. 进口旧工程机械综合评价指标体系的初步构建[J]. 机械工程与自动化, 2011, 6(5): 110-111.
- CHEN Zhidan, LONG Saiqiong, WANG Xiaoyu, et al. Establishment of comprehensive evaluation index system for imported second-hand engineering machinery [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2011, 6(5): 110-111.
- [14] ALEXANDER B R. How to construct a service quality index in performance-based ratemaking [J]. Electricity Journal, 1996, 9(3): 46-53.
- [15] HENSHER D A. A service quality index for area-wide contract performance assessment [J]. Journal of Transport Economics and Policy, 2007, 36(1): 93-113.
- [16] ROHANI M M, WIJESEKERA D C, KARIM A T A. Bus operation, quality service and the role of bus provider and driver[J]. Procedia Engineering, 2013, 53(7): 167-178.
- [17] CORRIERE F, VINCENZO D D. The rail quality index as an indicator of the “global comfort” in optimizing safety, quality and efficiency in railway rails [J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012, 53: 1088-1097.
- [18] HÖLTTÄ V, KOIVO H. Quality index framework for plant-wide performance evaluation [J]. Journal of Process Control, 2009, 19(7): 1143-1148.
- [19] DASH P K, PADHEE M, BARIK S K. Estimation of power quality indices in distributed generation systems during power islanding conditions [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 36(1): 18-30.
- [20] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. IEEE Std. 2000, 1459-2000: Definitions for the measurement of electric quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions [S]. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2010.
- [21] RAPTIS T E, VOKAS G A, LANGOURANIS P A, et al. Total power quality index for electrical networks using neural networks [J]. Energy Procedia, 2015, 74: 1499-1507.
- [22] LEZHNYUK P, KOMAR V, KRAVCHUK S, et al. Mathematical modeling of operation quality of electric grid with renewable sources of electric energy [C]// International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, Nov. 15-17, 2017, Kremenchuk, Ukraine, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017: 324 - 327.
- [23] LI Y, LIU C, DING L. Impact of pavement conditions on crash severity [J]. Accident Analysis & Prevention, 2013, 59(4): 399-406.
- [24] GONZÁLEZ-GIL A, PALACIN R, BATTY P, et al. A systems approach to reduce urban rail energy consumption [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 80: 509-524.
- [25] GONZALEZ E, NANOS E M, SEYR H, et al. Key performance indicators for wind farm operation and maintenance [J]. Energy Procedia, 2017, 137: 559-570.
- [26] KADAK A C, MATSUO T. The nuclear industry's transition to risk-informed regulation and operation in the United States [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(5): 609-618.
- [27] AMMARA R, FRADETTE L, PARIS J. Equipment performance analysis of a Canadian Kraft mill. Part I: Development of new key performance indicators (KPI) [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2016, 115: 160-172.
- [28] AMMARA R, FRADETTE L, PARIS J. Equipment performance analysis of a Canadian Kraft mill. Part II: Diagnostics and identification of improvement projects [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2016, 116: 107-115.
- [29] DOMINGUES A R, MARQUES P, GARCIA R, et al. Applying multi-criteria decision analysis to the life-cycle assessment of vehicles [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 107: 749-759.
- [30] HAEMA J, PHADUNGTHIN R. Development of condition evaluation for power transformer maintenance [C]// Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, May 13-17, 2013, Istanbul, Turkey, IEEE Computer Society, 2013: 620-623.
- [31] VICHARE N, PECHT M. Prognostics and health management of electronics [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 2006, 29(1): 1-8.
- [32] HUYNH K T, GRALL A, BÉRENGUER C. Assessment

- of diagnostic and prognostic condition indices for efficient and robust maintenance decision-making of systems subject to stress corrosion cracking [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2017, 159: 237-254.
- [33] LISNIA NSKI A , LEVITIN G. Multi-state system reliability: assessment, optimization and applications [M]. New Jersey: World Scientific Publishing Company, 2003.
- [34] REBELLO S, YU H, MA L. An integrated approach for system functional reliability assessment using dynamic Bayesian network and hidden Markov model [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2018, 180(12): 124-135.
- [35] 交通运输部公路科学研究院, 全国汽车维修标准化技术委员会. JT/T 198-2016: 道路运输车辆技术等级划分与评定要求[S]. 北京, 中国标准出版社, 2016.
- Research Institute of Highway of Ministry of Transport, National Technical Committee of Auto Standardization, JT/T 198-2016: Dividing and rating requirements for technical classification of road transport vehicles [S]. Beijing, Standards Press of China, 2016.
- [36] BOLAR A A, TEFAMARIAM S, SADIQ R. Framework for prioritizing infrastructure user expectations using quality function deployment (QFD) [J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2017, 6(1): 16-29.
- [37] British Standards Institute. BS EN 15341-2007 : Maintenance Key Performance Indicators [S]. London, BSI, 2007.
-
- 作者简介:** 蒋仁言(通信作者), 男, 1956 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为可靠性工程, 维修理论, 质量工程, 多准则决策分析以及载运工具运用工程。
E-mail: jiang@csust.edu.cn