

基于模糊层次分析法的设备状态系统量化评价新方法

宾光富^{1,2}, 李学军^{1,3}, DHILLON Balbir-S², 楚万文¹

(1. 湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湘潭 411201; 2. Department of Mechanical Engineering, University of Ottawa, Ottawa K1B 6N5; 3. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要 设备因结构形式多样、耦合复杂、功能多元化、运行参数多等因素难以进行系统状态评价, 论文在分析了设备系统功能层次结构特点基础上, 运用模糊综合评价和层次分析法, 提出了一种系统量化评价设备状态的方法. 考虑到设备运行过程中各参数的影响, 研究了设备状态及其评价层次模型, 采用健康值来综合测度设备运行状态; 运用层次分析法结合专家经验, 研究了评价层级结构权重; 采用模糊综合评价理论研究了正负指标的隶属函数构建方法, 探讨了系统评价矩阵和模糊变换算子, 并建立了基于模糊层次分析法的设备状态系统评价模型, 计算出各子系统的健康值, 以量化评价设备系统状态, 从而全面掌握其系统状态. 运用该方法在水泥行业中的回转窑设备进行评价分析, 验证了其有效性.

关键词 模糊层次分析法; 设备状态; 健康值; 量化评价

Quantitative system evaluation method for equipment state using fuzzy and analytic hierarchy process

BIN Guang-fu^{1,2}, LI Xue-jun^{1,3}, DHILLON Balbir-S², CHU Wan-wen¹

(1. Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment of Hunan Province, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Department of Mechanical Engineering, University of Ottawa, Ottawa K1B 6N5, Canada; 3. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract It is very difficult to carry out system evaluation for equipment state due to the structural multiplicity, the coupling complexity, the functional diversification and the excessive operating parameters factors, this article analyzes the structural features of equipment, a quantitative evaluation method of equipment state is developed using fuzzy synthesis evaluation and analytic hierarchy process methodology. Considering the impact of various parameters in the process of equipment running, the equipment state and its evaluation hierarchy model are analyzed. The health value is employed to quantitatively describe the running state degree of equipment. The weight vectors of all evaluation hierarchies are discussed by using the analytic hierarchy process methodology with the experiences of expert. Applied the fuzzy set evaluation theory, a type of subjection function of positive and negative indicators is developed, and the evaluation matrix is discussed as well as fuzzy transformation algorithm operators. The valuation model for equipment's health state based on fuzzy and analytic hierarchy process is built. Therefore, the health value of subsystems can be gotten to quantify the evaluation of equipment's system state, that is also the state of equipment is clear, which provides us with theoretical guide for seeking further optimization maintenance strategy. Finally, an application of the method in rotary kiln used in cement industry verifies its effectiveness.

Keywords fuzzy and analytic hierarchy process; equipment state; health state; quantitative evaluation

收稿日期: 2008-12-21

资助项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划)(2007AA04Z415); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-08-0677); 湖南省教育厅项目 (09C408)

作者简介: 宾光富 (1981-), 男, 湖南衡山人, 讲师; 李学军 (1969-), 男, 湖南湘潭人, 博士, 教授; DHILLON Balbir-S (1947-), 男, 加拿大人, 教授, 博士生导师; 楚万文 (1982-), 男, 浙江人, 硕士研究生.

1 引言

设备的状态直接关系到设备的正常运行和企业的经济效益. 近年来, 随着企业设备维护与管理需求的不断提高和系统评价理论的深入研究, 设备状态系统评价受到了工程界和学术界的高度关注, 尤其是基于状态检测分析的设备评价理论和方法开始成为企业设备维护与管理工作的主要内容. 目前, 众多学者致力于设备状态评价方法研究, 且多集中在电力、航空、船舶和交通等领域. 李秀云等^[1]对火力发电厂的冷端系统的运行经济性进行了指标设计和定量评价; 吴立增^[2]提出了基于贝叶斯网络的变压器状态综合评估方法, 建立了贝叶斯网络状态评估模型, 设计了一个基于数据挖掘技术的变压器状态评估系统; 张金萍^[3]运用模糊数学理论, 结合专家系统, 针对在线监测数据、预防性试验数据和历史运行状况数据, 提出了一种电力设备健康状态评估的新算法; 王吉星^[4]开发了民用航空发动机状态评估与诊断系统的主要运算程序, 建立了发动机健康状态评估模型; 张晓东等^[5]提出用设备劣化度和可用性两种评价指标作为船舶机电设备性能的度量和预测, 并构建了相应的计算模型; 赵涛等^[6]从评估设备综合效能的角度出发, 在系统分析了影响设备效能的六大损失基础上, 提出了采用设备综合效能作为考核指标来评价和测度企业设备综合效能新方法; 刘坚等^[7]利用平衡计分法和层次分析法, 结合相关性分析为基础的指标筛选方法, 建立了企业设备维护与管理的评估指标体系和目标函数; Chang 等^[8]介绍了一种新的采用两两对比的综合程度模糊分析法来确定综合评价中的权值, 有效避免了人的主观因素; Cheng^[9]提出基于重要程度判断计算权值的评价方法, 并应用在直升机的模糊决策系统中; Felix 等^[10-11]采用模糊层次分析法从成本、质量、服务和风险等不同标准体系探讨解决全球物流、供应优化选择性问题, 均取得了较好的应用效果.

不难看出, 上述研究涉及的评价体系或方法大多局限于针对某一行业领域的设备状态或特征值进行分析和讨论, 由于设备系统内部以及零部件之间结构形式多样化、内在耦合性强、运行环境复杂、影响参数众多, 往往难以形成通用的设备系统评价指标、相关设备性能指标和各因素对影响设备特定性能目标的诊断理论及量化评价方法. 因此, 很有必要研究一种新型设备状态系统评价模型和方法, 综合反映设备维护的全局和局部信息, 以实现设备状态系统化评价, 以满足企业决策层对设备维护与管理评估的应用期望.

2 设备健康状态与功能层次评价模型

2.1 设备健康状态定义

世界卫生组织 (WHO) 给予人的健康定义是: “健康是指人的生理、心理及社会适应性三方面全部都良好的一种状况, 而不仅仅是指身体无病或体质健壮.” 在设备工程中, 设备所能实现的技术规格、结构特性、生产能力等特定性能对应为人的生理、心理及社会适应性三方面性能, 因此, 设备的健康可表征为设备或系统能够实现其预期功能的一种状态程度或者能力大小. 据 RCM 理论所知, 设备的状态应该与其在现行使用环境下保持其特定性能的能力相对应^[12]. 故可以将设备的健康进一步表述为综合实现设备在现行使用环境下保持特定性能的能力程度, 将这些设备的特定性能规定为影响设备状况的健康指标, 用 x_1, x_2, \dots, x_n 表示. 那么可以采用健康值 (Health value, 简称为 HV) 来定量描述设备或零部件的状态, 其定义表达式为:

$$HV = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

式 (1) 中, HV 为设备或零部件的健康值, 取值范围为 (0-1). 并规定当 $HV = 0$ 时, 设备或零部件处于严重故障状态, 当 $HV = 1$ 时, 设备或零部件处于完全健康状态.

文献 [13-15] 综合论述了设备或零部件健康状态的六个主要参数, 即: 可靠性、维修性、技术性能、经济性、监测性和安全性. 这六个方面的主要参数基本能够客观确定地反映出设备的全部特征和属性, 根据指标体系构建的基本原则, 选取最能反映设备状态优劣的指标, 剔除一些次要指标因素, 故可将这六个参数作为指标来综合反映设备的特定性能. 因此, 设备状态评价综合测度健康值又可写为:

$$HV = f(\text{可靠性, 维修性, 技术性能, 经济性, 监测性, 安全性}) \quad (2)$$

上述方法定义的设备健康值 HV 取值范围在 (0-1) 之间, 但在工程实际中常常用定性的方法将设备的健康状况划分为若干等级, 如: 健康、亚健康、不健康、病态、严重病态. 参照相关振动评价标准和专家经验, 可将设备的健康状况划分为 5 个等级, 构建了健康值定量指标与设备健康状况定性评价等级之间的映射关系, 如表 1 所示.

表 1 设备健康状况的等级划分

序号	HV 取值范围	健康状况等级	健康状况描述
1	$0.8 \leq HV \leq 1.0$	健康	设备健康状况非常好, 新投产的设备应在此范围内
2	$0.6 \leq HV < 0.8$	亚健康	设备健康状况良好, 可以长期运行
3	$0.4 \leq HV < 0.6$	不健康	设备出现异常征兆, 不应长期连续运行, 应采取措
4	$0.2 \leq HV < 0.4$	病态	设备已出现严重异常征兆, 应在短时间内停机检修
5	$0.0 \leq HV < 0.2$	严重病态	不能运行, 应拉闸停机

2.2 设备功能层次评价模型

设备状态评价是实现状态检修的前提条件, 它是根据设备历史运行状况、在线检测数据以及同类设备的统计数据, 利用完善的评价系统对设备的状况进行评价。现代设备是一个实现特定功能的复杂系统, 种类繁多, 结构复杂, 影响其健康状态的因素众多。这些因素之间的关系错综复杂, 绝大多数不能定量地用一个函数关系表达, 因此有必要把设备状态评价这个复杂的问题分解为相对简单且容易操作的多层子系统进行分析和评价。

考虑到系统结构划分原则和简化系统评价程序, 将设备按照一定功能原则进行系统结构划分, 然后逆向从底层结构状态到上层结构状态逐一进行评价, 逐层综合, 计算出各系统状态评价价值, 得到整个设备系统状态。基于系统功能结构划分原则^[13], 一般设备大致可划分为: 机械子系统、电气子系统、液压子系统、气动子系统和光子系统等五大功能系统, 然后再在各子系统层次上继续进行划分, 如右图 1 所示。

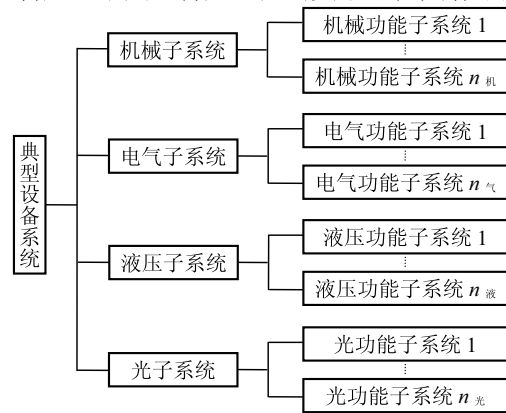


图 1 设备系统的功能层次评价模型

3 基于模糊层次分析的设备状态系统化评价模型

美国自动控制理论家 Zadeh 创立模糊数学以来, 得了迅速的发展^[16]。模糊数学研究事物的模糊现象, 事物本身在概念上没有明确的分界, 正如设备状态本身是渐变的, 其状态健康与否之间存在着一个模糊的分界域。利用模糊数学引入隶属度的概念, 使设备运行状态指标评价的模糊概念定量化, 通过层次分析法确定模糊权值, 构造出模糊评价矩阵进行定量评判, 计算出设备状态评价健康值, 再通过设备状态评价模型, 运用多级综合评价方法, 采取从下而上的方式, 逆向推算进行综合加权评价, 从而得到设备各系统状态的综合测度健康值。这样在设备状态量化评价的过程中, 既保证了分析数据的客观性、有效性和全面性, 又可有效避免非此即彼的二值逻辑分界域问题的不合理性。

3.1 权值的确定

目前工程实际中常采用专家评估法和层次分析法 (AHP) 来确定权值, 其中 AHP 法是由美国运筹学教授 Saaty 在 20 世纪 70 年代提出来的, 在专家知识和主观经验的基础上, 利用具有严密逻辑性的数学方法可尽量剔除主观成分, 并且可根据判断矩阵是否具有满意的一致性来检验权值的合理性, 使权值比专家评估法确定的权系数值更符合客观实际并易于定量表示, 从而提高了模糊综合评判结果的可靠性、准确性和客观公正性。综合考虑到保障评价结果的客观性和真实性, 本文采用 AHP 法来确定权值。

1) 重要度的判断 考察函数 $f(x, y)$, 它表示对总体而言因数 x 与因数 y 的重要性标度。约定 $f(x, y) = 1/f(y, x)$ 。关于 $f(x, y)$, Saaty 建议采用列表的方法, 如下表 2 所示。

表 2 重要程度判断表

重要程度	说明	$f(x, y)$	$f(y, x)$
x 和 y “同等重要”	x, y 对总目标有相同的贡献	1	1
x 比 y “稍微重要”	x 的贡献稍大于 y , 但不明显	3	1/3
x 比 y “明显重要”	x 的贡献明显大于 y , 但不十分明显	5	1/5
x 比 y “强烈重要”	x 贡献十分明显大于 y , 但不特别突出	7	1/7
x 比 y “绝对重要”	x 的贡献以压倒优势大于 y	9	1/9
x 比 y 介于各等级之间	相邻两判断的折中	2,4,6,8	1/2,1/4,1/6,1/8

2) 构造判断矩阵 设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是全部因素的集, 按表 2 所列各项的意义, 对全部因素作两两之间的对比, 构造矩阵 $C = (c_{ij})_{n \times n}$, 其中 $c_{ij} = f(x_i, x_j)$, 并称 C 为判断矩阵, 即为

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (c_{ii} = 1) \quad (3)$$

3) 计算权值 a_i 根据判断矩阵 C , 计算它的最大特征根 λ_{\max} , 并求出矩阵 C 关于 λ_{\max} 的特征向量 $\xi = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, 经过归一化处理后的 x_i 就是各因素的权重, 即

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\} \quad (4)$$

至此, 上述定性的因素就实现了量化, 还可根据权重的大小对各因素的优先级进行排序.

最后, 按照下式进行一致性检验:

$$C_R = C_I / R_I \quad (5)$$

C_R 为判断矩阵的随机一致性比率; C_I 为判断矩阵的一般一致性指标, $C_I = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$; R_I 为判断矩阵的平均随机一致性指标. 当 $C_R < 0.1$ 时, 即认为判断矩阵具有满意的一致性, 说明权数分配合理; 否则需要调整判断矩阵到取得满意的一致性为止.

3.2 模糊综合评价基本原理

模糊综合评价是在考虑多种因素的影响下, 运用模糊数学工具对事物进行综合性的评价. 设 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 为被评价对象的 m 种因素, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为每一因素所处状态的 n 种决断. 这里存在着两种模糊集, 以主观赋权为例, 一类是标志因素集 U 中各因素在人们心目中的重要程度的量, 表现为因素集 U 上的模糊权重向量 $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$; 另一类是 $U \times V$ 上的模糊关系, 表现为 $m \times n$ 模糊矩阵 R , 这两类模糊集都是人们价值观念或偏好结构的反映. 再对这两类集进行某种模糊运算, 便可得到 V 上的一个模糊子集 $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$. 因此, 模糊综合评价就是指寻找模糊权重向量 $A = (a_1, a_2, \dots, a_m) \in F(U)$, 以及一个从 U 到 V 的模糊变换 f , 据此构造模糊矩阵 $R = [r_{ij}]_{m \times n} \in F(U \times V)$, 其中 r_{ij} 表示因素 u_i 具有评语 v_i 的程度. 进而求出模糊综合评价 $B = (b_1, b_2, \dots, b_n) \in F(V)$, 其中 b_i 表示被评价对象具有评语 V_i 的程度, 即 V_i 对模糊集 B 的隶属度^[17].

3.3 基于模糊层次分析法的综合评价模型

根据模糊综合评价的基本原理, 以及前面所述的设备状态参数指标和健康状态等级的划分, 设备的健康水平可以从可靠性、维修性、技术性能、经济性、监测性和安全性等六个特征因素来具体确定, 即设备整体健康状态的因素集为: $U = \{\text{可靠性, 维修性, 技术性能, 经济性, 监测性, 安全性}\}$, 显然, 对于单因素健康指标如可靠性, 它的因素集 U_R 可以为: $U_R = \{\text{可靠度, 平均无故障时间}\}$, 设备系统和反映设备健康状态指标的影响因素不一定相同. 构建设备模糊评价模型就是如何决定模糊权重向量 $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$, 模糊评价矩阵 $R = [r_{ij}]_{m \times n}$, 以及一个从 U 到 V 的模糊变换算子 f , 即

$$B = f(AR) \quad (6)$$

其中 B 为设备模糊评价决策集的一个子集, A 为模糊权重向量, R 为模糊评价矩阵, f 为模糊变换算子.

在设备状态评价过程中, 由于参数较多, 评价标准不一, 采用评价矩阵可用来反映设备评价过程所应遵循的统一标准. 因此, 模糊评价矩阵 R 是构建设备状态综合量化评价模型的关键, 直接影响最终的评价结果. 目前, 隶属度函数大多数都是通过大量的统计数据和专家经验进行分析归纳得出. 根据设备的指标参数, 对每一个评价指标 $u_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 分别构造出它隶属于 v_1 (优), v_2 (良), v_3 (中), v_4 (差), v_5 (很差) 的隶属函数 $v_{1i}, v_{2i}, v_{3i}, v_{4i}, v_{5i}$. 限于篇幅原因, 仅给出一种正负指标的隶属函数构造法. 对健康指标来说, 它们可以分为两类, 一类是正指标, 即指标值越大越好, 如: 可靠度、维修度、监测性; 另一类是逆指标, 即指标值越小越好, 如: 故障率、维护成本、环境危害性等.

设 c_i 为指标样本集中指标 u_i 的最小值, d_i 为指标 u_i 的最大值. 当指标值 $a_i \geq d_i$ 时, 对指标 u_i 评价为优的隶属度绝对为 1, 当指标值 $a_i \leq c_i$ 时, 对指标 u_i 评价为很差的隶属度绝对为 1, 下面确定评价为良、中、差的隶属度绝对为 1 的指标值, 为此可将健康指标 u_i 的观测值从小到大平均分成三类 L_1, L_2, L_3 , 分

别记为:

$$L_1 = \{z_{11}, z_{12}, \dots, z_{1i_1}\}, \quad L_2 = \{z_{21}, z_{22}, \dots, z_{2i_2}\}, \quad L_3 = \{z_{31}, z_{32}, \dots, z_{3i_3}\},$$

并分别求出三个类 L_1 、 L_2 、 L_3 的平均值:

$$\xi_1 = \frac{1}{i_1} \sum_{j=1}^{i_1} z_{1j}, \quad \xi_2 = \frac{1}{i_2} \sum_{j=1}^{i_2} z_{2j}, \quad \xi_3 = \frac{1}{i_3} \sum_{j=1}^{i_3} z_{3j}.$$

令 $x_{1i} = c_i, x_{2i} = \xi_1, x_{3i} = \xi_2, x_{4i} = \xi_3, x_{5i} = d_i$, 以下限值 x_{1i} 和上限值 x_{5i} 作为边界, 凡是指标值 $u \leq x_{1i}$ 者完全属于 v_5 (很差), $u \geq x_{5i}$ 者则完全属于 v_1 (优), 把 $[x_{1i}, x_{5i}]$ 区间划分为五个等级, 以最能表示某级特性的点(平均值点)的隶属度为 1, 而边界交点概念最模糊, 隶属度为 0.5, 构造正指标 i 的五个等级隶属函数. 通过分析指标值和平均值之间的关系, 利用区域数值的上下限, 即可构造出正负指标的隶属函数.

模糊评价矩阵 R 确定后, 再分析模糊变换算子 f . 当前 f 主要有四种模型: 主因素决定型、主因素突出 I 型、主因素突出 II 型和加权平均型. 其中加权平均型的结果比较精确, 它特别适用于兼顾考虑整体和各因素之间关系的综合评价, 而其它三种模型相对比较粗糙, 它们适用于重点考虑主要因素(如安全性、生产连续性、经济性、环境保护等)的综合评价^[18]. 在进行实际问题的模糊综合评价时, 可以根据实际评价目标需要进行选用模糊变换算子. 最后, 根据式(6)对设备各功能单元和系统健康状况进行全面、客观的评价.

4 应用示例分析

以湖南省韶峰水泥集团有限公司某大型湿法回转窑设备作为应用示例分析. 首先, 按照功能相关的原则, 可将回转窑分成如图 2 所示的评价层次结构体系(限于篇幅, 本文只对设备的机械功能部分进行分析, 且各功能结构认为是串联).

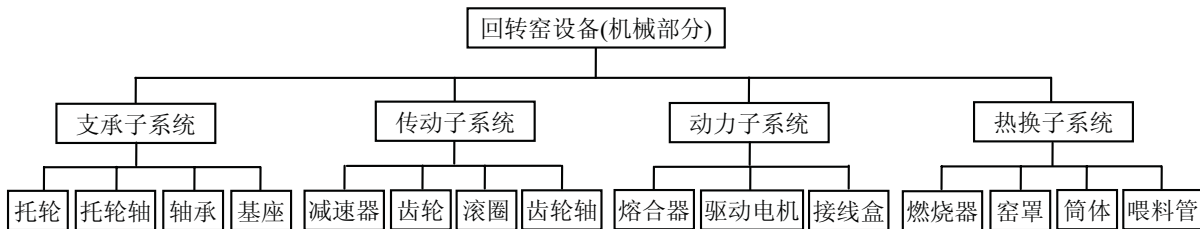


图 2 回转窑设备机械部分状态系统评价层次模型结构图

其次, 确定各系统的健康指标. 如支承子系统中的托轮轴, 由于其主要是起支承筒体作用, 且是不可修复部件, 故主要考虑其可靠性、监测性和经济性, 即健康指标为: 可靠度、监测性和经济性. 按照隶属函数的确定方法, 可得出隶属度向量分别为: $r_1 = [0.4, 0.6, 0, 0, 0]$; $r_2 = [0.5, 0.5, 0, 0, 0]$; $r_3 = [0, 0, 0.4, 0.5, 0.1]$, 构造出托轮轴的模糊评价矩阵 $R = [r_1, r_2, r_3]^T$. 再根据 AHP 法确定权重比, 经专家分析认为可靠度比监测性稍微重要, 监测性与经济性同等重要, 则可构造矩阵 C , 计算它的最大特征根 λ_{\max} , 并求出矩阵 C 关于 λ_{\max} 的特征向量, 取 x_i 作为因素 u_i 的重要程度系数并进一步归一化得 $A = [0.6, 0.2, 0.2]$.

根据式(6)可知 $C_R = 0 < 0.1$, 可见该判断矩阵具有满意的一致性, 说明权数分配比较合理.

最后, 选用加权平均变换模糊算子进行运算, 可得出

$$B = AR = [0.6 \quad 0.2 \quad 0.2] \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.5 & 0.1 \end{bmatrix} = [0.34 \quad 0.46 \quad 0.08 \quad 0.10 \quad 0.02].$$

由此可知托轮轴在这个时刻, 健康状态属于优、良、中、差、很差的隶属度分别为 0.34、0.46、0.08、0.10、0.02. 按照隶属度最大原则, 该托轮轴的状态属于“良”. 下面采取在(0-1)范围内打分的办法, 令“优”为 0.9, “良”为 0.7, “中”为 0.5, “差”为 0.3, “很差”为 0.1, 利用加权算法即可得出 HV_{tlz} :

$$HV_{tlz} = 0.9b_1 + 0.7b_2 + 0.5b_3 + 0.3b_4 + 0.1b_5 \approx 0.64.$$

对照表 1 则可知该托轮轴属于亚健康状态. 同理可得出托轮、轴承、基座的健康值, 根据权值, 进一步利用加权算法得出支承等其它子系统的健康值, 最后可求出回转窑的健康值为

$$HV_{hzy} = 0.81 \times 0.30 + 0.70 \times 0.25 + 0.80 \times 0.20 + 0.68 \times 0.25 \approx 0.75.$$

由此,可判断回转窑此时处于亚健康状态,尤其是托轮轴、托轮、轴承和滚圈部分健康值偏低,应在日常实际维护与管理过程中引起注意.从理论计算与实际情况来看,该量化评价结果与此时回转窑的实际运行情况基本一致.

5 结论

论文针对设备因结构形式多样、耦合性复杂、功能多元化、运行参数多等因素难以进行系统状态评价难题,从设备系统功能层次结构特点出发,利用层次分析法和模糊数学综合评价理论,构建出基于模糊层次分析法的设备状态模糊综合评价矩阵,给出了一种量化评价设备状态方法.以水泥行业中的重要设备回转窑作为分析实例,得出如下结论:

1) 设备的健康状态可定义为综合实现设备在现行使用环境下保持特定性能的能力程度,其中反映设备特定性能的参数可作为设备健康指标.故利用这些量化的健康指标,可通过综合测度健康值来量化评估设备系统状态.

2) 构建了基于模糊层次分析法的设备状态系统化评价模型,进行模糊评价计算出健康值,通过逆向逐级综合加权计算出各子系统健康值,以量化评价设备或单元状态,从而可全面分析整个设备系统的实际运行状态.

3) 通过以水泥行业回转窑的机械设备进行示例分析,该评价方法有效可行,可为设备优化维护策略提供理论参考,并为企业设备维护与管理提供技术参考,有利于企业实现其经营目标的需要.

参考文献

- [1] 李秀云,严俊杰,林万超.火电厂冷端系统评价指标及诊断方法的研究[J].中国电机工程学报,2001,21(9):23-27.
Li X Y, Yan J J, Lin W C. Study on thermo-economics diagnosis method and index evaluation system for the cold-end system in steam power unit[J]. Chinese Society for Electrical Engineering, 2001, 21(09): 23-27.
- [2] 吴立增.变压器状态评估方法的研究[D].华北电力大学博士学位论文,2005.
Wu L Z. Assessing approach of transformer condition[D]. North China Electric Power University, 2005.
- [3] 张金萍,刘国贤,袁泉,等.变电设备健康状态评估系统的设计与实现[J].现代电力,2004,21(4):45-49.
Zhang J P, Liu G X, Yuan Q, et al. Design and realization of evaluation of health condition system for transformation equipment[J]. Modern Electric Power, 2004, 21(4): 45-49.
- [4] 王吉星.基于人工神经网络和遗传算法的民航发动机状态评估与故障诊断方法[D].中国民用航空学院硕士学位论文,2004.
Wang J X. State evaluation and fault diagnosis method for the aviation engines based on artificial neural networks and genetic algorithms[D]. Civil Aviation University of China, 2004.
- [5] 张晓东,胡明,张振中.船舶机电设备评估指标研究[J].船舶工程,2005,27(2):45-48.
Zhang X D, Hu M, Zhang Z Z. Research on the evaluation index of marine mechanical & electrical equipment[J]. Ship Engineering, 2005, 27(2): 45-48.
- [6] 赵涛,戈猛,赵息.设备维护与管理中设备效能的评估与测度[J].中国机械工程,2001,12(12):1436-1439.
Zhao T, Ge M, Zhao X. Evaluation and measurement of equipment effectiveness for plant maintenance and management[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(12): 1436-1439.
- [7] 刘坚,于德介,李德刚,等.一种设备维护与管理的量化评估新方法[J].系统工程理论与实践,2004,24(5):72-77.
Liu J, Yu D J, Li D G, et al. A study of quantitative evaluation for plant maintenance[J]. System Engineering — Theory & Practice, 2004, 24(5): 72-77.
- [8] Chang D Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 95: 649-655.
- [9] Cheng C H, Yang K L, Hwang C L. Evaluating attack helicopters by AHP based on linguistic variable weight[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 116(2): 423-443.
- [10] Felix T S, Chan N, Kumar M K, et al. Global supplier selection: A fuzzy-AHP approach[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(14): 3825-3857.
- [11] 韩世莲,李旭宏,刘新旺,等.多人多准则模糊层次分析法的物流中心综合评价优选模型[J].系统工程理论与实践,2004,24(7):128-134.
Hang S L, Li X H, Liu X W, et al. Multiperson and multicriteria evaluation and selection of logistic centers with fuzzy analytic hierarchical process method[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2004, 24(7): 128-134.
- [12] Sun Q, Chen P, Zhang D, et al. Pattern recognition for automatic machinery fault diagnosis[J]. Transactions of the ASME, J Vib Acoust, 2004, 126(2): 307-316.
- [13] Li X J, Bin G F, Dhillon B S. An evaluation method of mechanical equipment health state on the basis of fuzzy synthetic evaluation[J]. Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2007, 3:

518-522.

- [14] 宾光富, 李学军, 李萍. 一种构建机械设备健康状态评价指标体系的方法研究 [J]. 机床与液压, 2007, 35(12): 177-179.
Bin G F, Li X J, Li P. A new method to establish index system of mechanical equipment healthy state evaluation[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007, 35(12): 177-179.
- [15] 李录平, 邹新元, 晋风华, 等. 基于融合信息熵的大型旋转机械振动状态的评价方法 [J]. 动力工程, 2004, 24(2): 153-154.
Li L P, Zou X Y, Jin F H, et al. The method based on fusion information entropy for quantitative assessing vibration state in large capacity rotary machinery[J]. Power Engineering, 2004, 24(2): 153-154.
- [16] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information Control, 1965, 8: 338-353.
- [17] 秦寿康. 综合评价原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
Qin S K. The Principle and Application of Comprehensive Evaluation[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2003.
- [18] 宋晓秋. 模糊数学原理与方法 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1999.
Song X Q. The Principle and Method of Fuzzy Mathematics[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1999.