

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180710005

机械设备零部件再制造评价点阵图模型及应用

任仲贺¹, 武美萍¹, 唐又红², 缪小进¹, 匡逸强³

(1. 江南大学 机械工程学院, 无锡 214122; 2. 苏州出入境检验检疫局, 苏州 215021; 3. 无锡透平叶片有限公司, 无锡 214174)

摘要: 再制造评价作为绿色再制造工程的设计基础, 是开展再制造的前提。为了判断机械设备零部件是否适合进行再制造, 在分析机械产品再制造过程的基础上, 建立了涵盖技术、经济和环境方面共12个指标的再制造评价指标体系; 基于层次分析法, 构建了以再制造评价综合指数为目标层的再制造评价层次结构模型。结合专家评分法, 创造性地提出了再制造评价点阵图模型, 对专家打分结果进行数据可视化处理, 然后量化评价指标, 计算指标权重和影响系数, 从而得到再制造评价综合指数。以汽轮机长叶片为工程案例, 利用再制造评价点阵图模型进行再制造评价, 得到再制造评价综合指数为0.83, 表明该叶片具有良好的可再制造性。结果表明, 再制造评价点阵图模型具有指标全面、结果直观和流程规范的特点, 可为再制造生产提供重要的信息支撑和决策依据。

关键词: 再制造工程; 再制造评价; 层次分析法; 点阵图模型; 汽轮机长叶片

中图分类号: TH17

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)06-0143-10

Dot Matrix Model of Remanufacturing Evaluation for Mechanical Equipment Parts and Its Application

REN Zhonghe¹, WU Meiping¹, TANG Youhong², MIAO Xiaojin¹, KUANG Yiqiang³

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Suzhou Entry-exit Inspection and Quarantine Bureau, Suzhou 215021, China; 3. Wuxi Turbine Blade Co., Ltd., Wuxi 214174, China)

Abstract: As the design basis of green remanufacturing engineering, remanufacturing evaluation is the prerequisite for remanufacturing. In order to determine whether the mechanical equipment parts are suitable for remanufacturing, a remanufacturing evaluation index system was established by analyzing the process of mechanical products remanufacturing. The index system contained 12 indicators in technology, economy and environment. Based on the analytic hierarchy process, a remanufacturing evaluation hierarchy structural model was established. In particular, a remanufacturing evaluation dot matrix model was established combined with experts grading method. In the model, the results of experts grading were visualized, and then each evaluation index was quantified. The weight and influence coefficient of the index were calculated, and the remanufacturing evaluation composite index was obtained. Taking a long steam turbine blade as an example, the remanufacturing evaluation composite index was calculated to be 0.83, indicating that the blade has good remanufacturability. The result demonstrates that the method is accurate, comprehensive, and intuitionistic, which can provide important information support and decision basis for the remanufacturing engineering.

Keywords: remanufacturing engineering; remanufacturing evaluation; analytic hierarchy process; dot matrix model; long steam turbine blades

收稿日期: 2018-07-10; 修回日期: 2018-09-18

网络出版日期: 2018-11-30 11:01; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20181130.1101.010.html>

通信作者: 武美萍 (1970—), 女 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 高端复杂装备智能制造、数字化设计与制造; E-mail: wmp169@jiangnan.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (51575237); 江苏出入境检验检疫局科技计划项目 (2018KJ04)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51575237) and Jiangsu Entry and Exit Inspection and Quarantine Bureau Science and Technology Project (2018KJ04)

引用格式: 任仲贺, 武美萍, 唐又红, 等. 机械设备零部件再制造评价点阵图模型及应用[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 143-152.

REN Z G, WU M P, TANG Y H, et al. Dot matrix model of remanufacturing evaluation for mechanical equipment parts and its application [J]. China Surface Engineering, 2018, 31(6): 143-152.

0 引言

在建设资源节约型、环境友好型社会的时代背景下,发展再制造技术将带来巨大的经济和社会效益^[1]。再制造是指以装备全寿命周期理论为指导,以实现废旧装备性能提升为目标,以优质、高效、节能、节材、环保为准则,以先进技术和产业化生产为手段,进行修复、改造废旧装备的一系列技术措施或工程活动的总称^[2-3]。

再制造评价作为绿色再制造工程的设计基础,是开展再制造的前提和再制造研究中的首要问题^[4]。机械设备零部件再制造评价是指通过建立再制造评价模型、量化评价指标,对其是否适合再制造进行判断,从而为再制造生产提供重要信息支撑和决策依据^[5]。

Kannan Govindan 等^[6]以印度为例,研究了模糊分析网络法在汽车零部件再制造安全生产中的应用,结果表明成本高和缺乏顾客接受是汽车零部件再制造的主要障碍。C Liu 等^[7]在分析再制造加工可持续性的基础上,将质量损失函数、时间损失函数和制造成本函数转换为能值,提出一种基于能值的再制造可持续性评价模型,以研究再制造的可持续性。卢超等^[8]通过建立重型机床基础件可再制造性的二级评价指标体系,研究了计算指标数值的模糊综合评价方法和数学公式方法。汪超台等^[9]结合专家打分法,依据多级模糊综合评价数学模型,对数控机床再制造绿色度进行了综合评价,建立了数控机床再制造绿色度评价体系。从现有文献可以看出,针对产品的可再制造性大小,有许多类型的评价方法,但大多数都基于复杂的数学算法,指标覆盖不够全面,结果缺乏直观性。

文中基于机械产品再制造过程分析,建立再制造评价指标体系,提出再制造评价点阵图模型,计算再制造评价综合指数,并以汽轮机长叶片的再制造评价作为案例对模型进行了应用分析。

1 机械产品再制造过程

机械产品的再制造是指以拥有再制造价值的退役机械产品为原料,采用先进的技术和装备,经过专业化、规模化的清洗与检测,进行高科技修复,进而获得在性能方面可以接近甚至超过新产品水平的再制造产品^[10]。通常情况下,机械产

品再制造流程^[11]主要有:

- (1) 产品的回收:在市场上以一定价格回收退役的机械产品。
- (2) 产品的拆解:将回收的退役机械产品进行拆解,得到关键零部件。
- (3) 清洗与检测:对拆解所得零部件进行清洗与检测,并判断是否进行修复。
- (4) 再制造修复:对于有再制造价值的零部件,采用合适的加工方法进行再制造修复。
- (5) 装配和涂装:将再制造修复之后的零部件按规定的技术要求进行装配和涂装,得到入库待用或投放市场的合格产品。

以工程机械发动机再制造为例,其主要流程如图1所示。

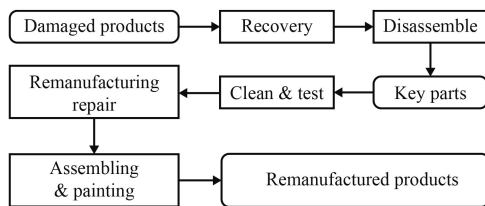


图1 工程机械发动机的再制造流程

Fig.1 Remanufacturing process of the engine for construction machinery

2 再制造评价指标

影响机械设备零部件可再制造性大小的因素错综复杂^[12]。根据再制造的流程和工艺,可将评价指标分为技术(Technology)、经济(Economics)和环境(Environment)3个主要方面^[13-14]。

2.1 技术指标

技术指标主要从机械设备零部件的失效情况、工序难度和修复工艺等方面进行考虑,是评价再制造可行性的最关键因素^[15]。根据机械设备零部件的再制造过程^[11,13],分为5个评价指标。

- (1) 损伤失效指标 μ_1 。机械设备零部件经过较长时间的运转,表面容易发生损伤,主要有磨损、腐蚀、疲劳等失效形式^[16-17],是再制造修复重点解决的问题。此外,在腐蚀载荷、热载荷、机械载荷以及综合载荷等多种复杂因素的共同作用下,机械设备零部件有可能发生过大的残余变形、结构整体断裂等不同程度的失效而无法达到产品零部件合格检测标准。该指标用于评价零部件的表面损伤和结构失效情况。

(2) 拆解清洗指标 μ_2 。拆解是把设备等拆开并卸下零部件的过程; 清洗指采用擦、吹和洗等方式除掉零部件上的油污、尘土和锈迹等残留物的过程^[18]。该指标用于评价零部件拆解和清洗的难易程度。

(3) 性能检测指标 μ_3 。清洗之后, 需要通过检测来评估废旧零部件的各项性能^[19]。目前, 国内外常用的无损检测技术主要有超声、磁粉、渗透、射线和涡流检测等^[20]。该指标用于评价零部件检测耗时情况、是否便于测得准确数据等方面。

(4) 修复工艺指标 μ_4 。修复是再制造过程中最重要的环节。再制造修复方法除了通常的机械加工方法, 比如常规的车、铣、刨、磨、镗等之外, 还有激光熔覆、喷涂、电刷镀、焊修和粘修等表面工程技术, 用以保证废旧零部件恢复或接近新品的性能与质量^[21]。该指标用于评价基于加工生产技术水平、废旧零部件损伤程度和材料材质状况的修复工艺可行性程度。

(5) 装配涂装指标 μ_5 。再制造修复后的零部件, 需根据规定的技术要求进行装配和涂装。该指标用于从技术层面评价装配和涂装的可行性程度。

2.2 经济指标

经济指数是对再制造经济效益的最直接反映。从材料、能源、设备和管理等方面对再制造相关费用进行分类考虑^[11, 13], 将经济评价分为如下 5 个指标。

(1) 材料费用指标 μ_6 。一般情况下, 全新制造需要购买原材料, 而再制造需要以一定的价格回收废旧产品, 二者的费用具有一定的差异。该指标用于从材料购买方面评价再制造的费用情况。

(2) 能源费用指标 μ_7 。相对于全新制造, 再制造具有不同的制造流程, 并且往往采用不同的加工方法, 导致能源耗费的情况有所不同。该指标用于从能源消耗方面评价再制造的费用情况。

(3) 设备费用指标 μ_8 。由于制造流程和加工方法的差异, 再制造使用的设备往往不同于全新制造, 某些情况下还会用到一些特殊的设备。该指标用于评价再制造修复所需设备的费用情况。

(4) 管理费用指标 μ_9 。再制造主要包括拆解、清洗、检测、修复加工、装配和涂装等流程, 这些工序会产生对应的管理费用。该指标用于评价再制造修复所需的管理费用情况。

(5) 销量促进指标 μ_{10} 。制造厂商提供产品再制造服务, 可有效提升客户对制造厂商的信任程度, 提高制造厂商的品牌知名度, 使产品销量的增长, 进而带来一定的经济效益。该指标用于评价因再制造服务促进销量所带来的经济效益情况。

2.3 环境指标

随着资源的日益匮乏, 社会愈来愈关注环境效益。再制造工程的理念是重新利用大量的废旧零部件, 让废旧资源重新焕发生机、充分发挥价值, 以减少污染物排放和节约原生资源。

再制造避免了原材料开采、材料制备等环节, 减少了铸造、锻压、焊接和热处理等工艺, 消耗能源远远少于全新制造, 具有非常显著的节能减排效果。环境评价包括如下 2 个指标。

(1) 节能节材指标 μ_{11} 。该指标用于评价再制造相较于全新制造所节约能源和原材料的情况。

(2) 减排指标 μ_{12} 。该指标用于评价再制造相较于全新制造对减少大气污染、水污染、固体污染以及噪声污染排放量的贡献情况。

2.4 再制造评价层次结构模型

层次分析法^[22-23](Analytic hierarchy process, AHP) 是美国运筹学家 T. L. Saaty 教授于 20 世纪 70 年代提出的一种定性定量相结合的用于多层次、多目标、多要素、多准则的非结构化的复杂战略决策问题的决策分析方法, 具有十分广泛的应用。基于层次分析法, 根据 12 个评价指标构成的指标体系, 构建如图 2 所示的再制造评价层次结构模型。

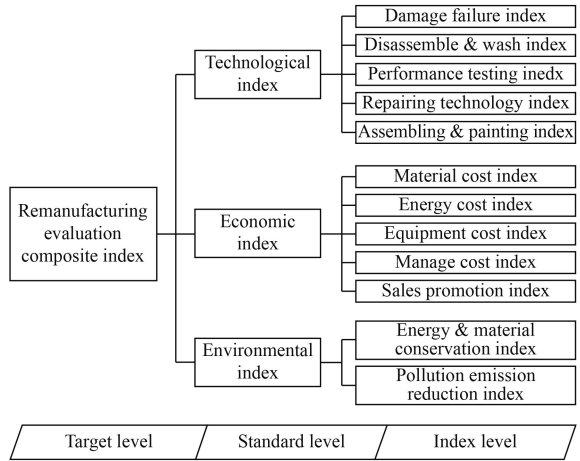


图 2 再制造评价层次结构模型

Fig.2 Hierarchy structure model of remanufacturing evaluation

在再制造评价层次结构模型中，再制造评价综合指数为目标层，技术指标、经济指标和环境指标为准则层，准则层下面的 12 个具体指标是指标层。

3 再制造评价点阵图模型

3.1 指标的评价方法分析

对于技术指标，机械设备零部件服役一定时间之后，往往存在着磨损、腐蚀、变形和断裂等多种失效形态，不同的设备具有不同的拆解清洗和性能检测要求，不同的失效形态对应不同的修复工艺，服役工况的复杂性、失效形态的多样性以及损伤程度的随意性等因素导致很难通过具体函数或指标值对多因素耦合的技术指标进行量化。

对于经济指标，由于再制造评价发生在实施再制造之前，很多费用项目缺乏财务数据，特别是因再制造服务促进销量所带来的经济效益，更需要再制造服务开展一定时间之后才能有反馈。

对于环境指标，通过再制造修复某零部件较之于全新制造所能节约的能源或者节约的原材料，以及对大气污染、水污染、固体污染和噪声污染等排放量的减少情况，缺乏足够的统计数据。

综上所述，对于评价指标，需要在缺乏足够统计数据和原始资料的情况下，运用恰当的数理统计方法，实现从定性评价到定量分析。

3.2 再制造评价点阵图

专家评分法^[24]是一种在定性分析和定量计算基础上以专家打分等方式做出定量估计的数理统计方法。在经济学领域，美国联邦储备系统 (The Federal Reserve System) 定期公布的利率预期“点阵图”可直观展示各联储银行行长对联邦基金利率的预期情况，被认为是美联储政策工具的重要组成部分^[25]。面向机械零部件的再制造评价，利用根据层次分析法得到的指标体系，结合专家评分法和利率预期“点阵图”，创造性地提出一种再制造评价点阵图，如图 3 所示。

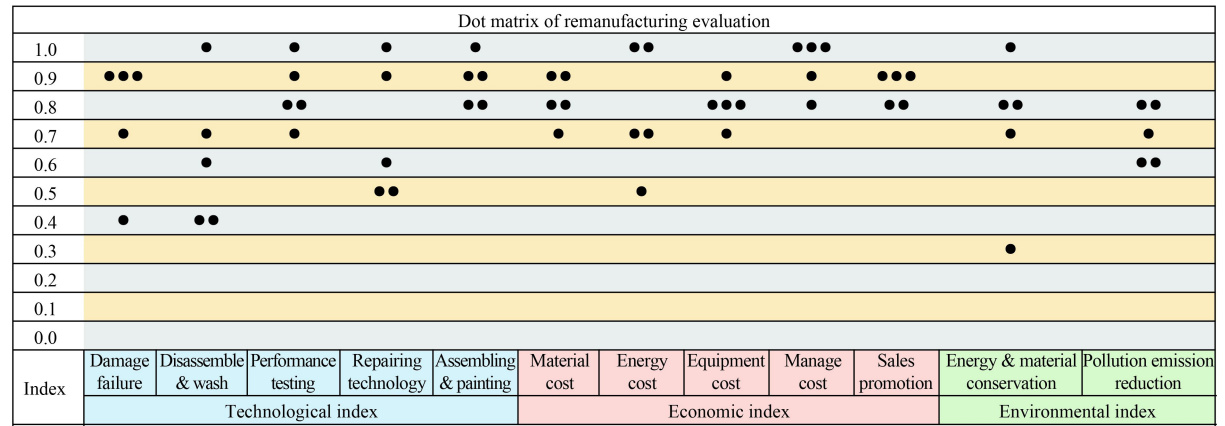


图 3 再制造评价点阵图

Fig.3 Dot matrix of remanufacturing evaluation

再制造评价点阵图的横坐标为指标层，指标体系中的 12 个评价指标按照准则层分类之后由左到右依次排列；纵坐标为评价指标的评价值，评价值设为 10 个等级，自坐标原点向上依次为：0.1, 0.2, 0.3, ……，1.0。

专家打分的评价规则为：根据评价指标的具体属性，结合专业知识和实践经验，对每个评价指标给出一个评价值，评价值越大，则该零部件在评价指标所表示的属性方面越有利于再制造。

再制造评价点阵图主要具有以下几个特征：

(1) 每个评价指标对应一个数据列，数据列的

每一行对应一个评价值。

(2) 图中的每一个圆点，表示参与评分的每一位专家针对其中一个评价指标的一次评价，圆点所在的数据列，表示该圆点对应的评价指标，圆点所在数据行的纵坐标，表示该圆点所对应的评价值。

(3) 每个数据列中所包含的圆点数目，表示参与该项评价指标打分的专家人数。

(4) 通过每个评价指标中圆点分布的集中或离散情况，可以直观地看出评价人员的观点差异，若差异较小，则后面的决策更为明朗。若差异过

大,可通过计算该评价指标的离散系数,并结合实际情况设定一个阈值,如果离散程度超出阈值,则需对该指标进行重新评价或组织专家进行专题讨论。

通过再制造评价点阵图,将专家打分结果进行有效的可视化处理,可以非常直观地展现每个评价指标所对应的专家评分情况,有助于在决策过程中充分理解和分析数据。

3.3 评价指标的量化处理

根据再制造评价点阵图,计算每个评价指标的评价值,对指标层进行量化处理。单个评价指标的评价值计算公式如下:

$$\mu_x = \sum_{y=0.1}^1 yn_{xy} / \sum_{y=0.1}^1 n_{xy} \tag{1}$$

式中, μ_x 表示第 x 个评价指标的评价值, $x = 1, 2, 3, \dots, 12$; n_{xy} 表示第 x 个评价指标中纵坐标 y 值对应数据行的评价点的数目。

3.4 评价指标的权重计算

层次分析法采用两个因素重要性程度之比的形式来表示这两个因素的相对重要性等级,例如 u_{ij} 表示因素 i 与因素 j 的重要性等级比较结果^[26]。Thomas L. Saaty 给出的优先级判断尺度表包含了 9 个等级,见表 1 所示。

表 1 优先级判断尺度表	
Table 1 Priority scale table	
Importance	Quantized value
Equally	1
A little more	3
More	5
Strongly	7
Extremely	9
Adjacent judgement intermediate value	2, 4, 6, 8

基于层次分析法,对于技术指标,通过确定损伤失效、拆解清洗、性能检测、修复工艺和装配涂装这 5 个指标的权重,以得到技术指标评价值的计算公式。

专家对技术指标所包含的 12 个评价指标进行两两相互比较,建立判断矩阵:

$$U_{ij} = \begin{bmatrix} u_{11}u_{12} & u_{13}u_{14} & u_{15} \\ u_{21}u_{22} & u_{23}u_{24} & u_{25} \\ u_{31}u_{32} & u_{33}u_{34} & u_{35} \\ u_{41}u_{42} & u_{43}u_{44} & u_{45} \\ u_{51}u_{52} & u_{53}u_{54} & u_{55} \end{bmatrix} \tag{2}$$

判断矩阵需要满足如下性质:

$$u_{ij} = \frac{1}{u_{ji}} \tag{3}$$

每个指标的相对重要性权重计算公式为:

$$\omega_{Tec-i} = \overline{W}_i / \sum_{i=1}^5 \overline{W}_i (i = 1, 2, \dots, 5) \tag{4}$$

式中, $\overline{W}_i = \sqrt[5]{M_i}$, $M_i = \prod_{j=1}^5 u_{ij} (i = 1, 2, \dots, 5)$ 。

判断矩阵 U 的最大特征根为:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(U\overline{W})_i}{n\overline{W}_i} = \sum_{i=1}^n \frac{(UW)_i}{nW_i} \tag{5}$$

建立判断矩阵 U 的一致性指标:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{6}$$

计算判断矩阵的一致性比例 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{7}$$

式中, RI 表示随机一致性指标,通过查表可得具体数值,这里取 $RI = 0.90$ 。

对判断矩阵 U 进行一致性检验:若 $CR < 0.1$,则可认为 U 具有满意一致性,接受上述权重方案;否则,须重新建立 U ,直到实现 U 具有满意一致性。

技术指标评价值的计算公式:

$$\mu_{Tec} = \omega_{Tec-1}\mu_1 + \omega_{Tec-2}\mu_2 + \dots + \omega_{Tec-5}\mu_5 \tag{8}$$

同理,可求经济指标评价值的计算公式:

$$\mu_{Eco} = \omega_{Eco-1}\mu_6 + \omega_{Eco-2}\mu_7 + \dots + \omega_{Eco-5}\mu_{10} \tag{9}$$

环境指标评价值的计算公式:

$$\mu_{Env} = \omega_{Env-1}\mu_{11} + \omega_{Env-2}\mu_{12} \tag{10}$$

3.5 评价准则影响系数分析

为了实现从多个角度全面评价机械零部件的可再制造性,同时弥补专家评分法主要基于定性分析的局限性,下面分别针对技术指标、经济指标和环境指标提出 3 个影响系数。

(1) 服役时间系数。机械设备从投入使用直到因物理磨损而报废所经历的全部时间是自然寿命,主要由有形磨损决定。通过定期维修和保养可延长设备的自然寿命,但不能从根本上避免磨损。若设备的服役时间已经接近甚至超过其预期的设计寿命,即使设备能够正常运转,但长时间

服役过程中零部件在热-疲劳耦合条件下受到的多种复杂累积损伤,其综合性能也会受到很大影响,导致设备中所包含零部件的再制造价值降低。

因此,在再制造评价方面,应该充分考虑机械设备的剩余寿命问题。然而,对废旧零部件进行剩余寿命评估是一项复杂的工程,需要专业的检测设备和大量的理论分析。提出机械设备零部件再制造评价的服役时间系数,从而使得在再制造评价过程中,并不需要评估废旧零部件具体的剩余寿命,只需了解该零部件的服役时间和预期设计寿命。根据文献[27]中曲轴服役时间对剩余安全系数影响的研究,将其服役时间系数计算公式定义为:

$$l = \begin{cases} 1.5 - \frac{t_1}{t_0}, 0 \geq t_1 < 1.5t_0 \\ 0, t_1 \leq 1.5t_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, t_1 表示设备服役时间, t_0 表示设备预期寿命。需要指出,这里只是以曲轴为例对其服役时间系数进行的初步探索,1.5的取值是基于服役时间对剩余安全系数的影响规律,而针对不同类型的零部件可能会有不同的计算公式,还有待进一步研究得出。

对于技术指标,通过在计算时乘以服役时间系数,以弥补专家评分法主要针对具体零部件的目前状态而未能充分考虑整机设备服役历史的不足。于是,得到修正后的技术指标:

$$\mu'_{\text{Tec}} = \begin{cases} l\mu_{\text{Tec}}, l\mu_{\text{Tec}} \leq 1 \\ 1, l\mu_{\text{Tec}} > 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中, μ_{Tec} 为原始的技术指标, l 为服役时间系数 ($l \geq 0$), μ'_{Tec} 为修正后的技术指标,其最大值为1时表示该指标已达最优。

(2) 生产规模系数。生产需要成本,包括固定成本和可变成本,为了实现一定的经济效益,必须使得收益大于成本,而固定成本基本不变,所以生产规模越大,分摊到每一个零部件中的固定成本就越少,经济效益也就越好,即生产规模达到一定水平之后,由于各生产要素的有机结合,产生了 $1+1>2$ 的效应。基于规模效应,提出生产规模系数 p 。于是,得到修正后的经济指标:

$$\mu'_{\text{Eco}} = \begin{cases} p\mu_{\text{Eco}}, p\mu_{\text{Eco}} \leq 1 \\ 1, p\mu_{\text{Eco}} > 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中, μ_{Eco} 为原始的经济指标; p 为生产规模

系数 ($p \geq 0$), p 取最小值0时,表示生产规模过小,导致成本过高,不具有经济效益,而 p 值越大,则表明再制造的生产规模效应越好; μ'_{Eco} 为修正后的经济指标,其最大值为1时表示该指标已达最优。若不考虑生产规模的影响,则 $p=1$ 。

(3) 政策影响系数。再制造是循环经济的高级形式,在推进低碳经济、实施节能减排方面具有重要作用,逐渐成为政府相关部门的重点支持产业;此外,需要注意的是,有些废旧零部件中包含有毒有害成份,政策规定不能进行再制造。考虑政策影响情况,提出机械设备零部件再制造评价的政策影响系数 s 。修正后的环境指标:

$$\mu'_{\text{Env}} = \begin{cases} \mu_{\text{Env}}, s\mu_{\text{Env}} \leq 1 \\ 1, s\mu_{\text{Env}} > 1 \end{cases} \quad (14)$$

式中, μ_{Env} 为原始的环境指标; s 为政策影响系数 ($s \geq 0$), s 取最小值0时,表示对于某些类型的零部件,政策不允许再制造,而 s 值越大,则表示政策支持力度越大; μ'_{Env} 为修正后的环境指标,其最大值为1时表示该指标已达最优。若不考虑政策的影响,则 $s=1$ 。

p 和 s 的取值,应以1为基准,依据实际情况,进行 ± 0.1 、 ± 0.2 、 ± 0.3 ……计算,并通过专家讨论和多次反复求解对比,得到能较好反映真实情况的取值;也可根据实际情况不考虑某个系数的影响,选择默认值1。

3.6 再制造评价综合指数

根据技术指标评价值的计算过程,同理可得再制造评价综合指数的计算公式:

$$\mu_R = \omega_1 \mu'_{\text{Tec}} + \omega_2 \mu'_{\text{Eco}} + \omega_3 \mu'_{\text{Env}} \quad (15)$$

式中, ω_1 , ω_2 , ω_3 分别为技术、经济和环境3个指标的权重。

再制造评价综合指数的取值范围为 $0 < \mu_R \leq 1$ 。根据 μ_R 的大小,对可再制造性进行分级,见表2所示。

在可再制造性等级划分参考表中,划分各等级的阈值 $\mu_{R1}, \mu_{R2}, \mu_{R3}, \mu_{R4}$ 可依据实际条件和评价对象并结合工程经验进行确定。等级A表示具有很好的可再制造性,等级B表示可再制造性良好,等级C表示可再制造性一般,等级D表示可再制造性较差,等级E表示可再制造性很差。一般情况下,认为满足A、B两个等级的机械设备

表 2 可再制造性等级划分参考表

Range of value	Remanufacturability
$\mu_{R1} \leq \mu_R < 1.00$	A
$\mu_{R2} \leq \mu_R < \mu_{R1}$	B
$\mu_{R3} \leq \mu_R < \mu_{R2}$	C
$\mu_{R4} \leq \mu_R < \mu_{R3}$	D
$0 < \mu_R < \mu_{R4}$	E

零部件具有一定的再制造价值。

考虑设计要求、加工难度和原料获取等方面的差异,不同的机械设备零部件具有不同的制造需求和评价体系,再制造评价点阵图模型主要适用于一些自身价值高、制造难度大和生产周期长的关键零部件。此外,针对具体的个性化产品,应根据失效情况、生产条件等充分考虑其再制造评价的个体性,并根据实际情况建立合适的指标评价细则。

4 应用案例

在国家制造强国建设战略咨询委员会发布的《中国制造 2025》重点领域技术路线图中,电力装备被列为十大重点突破的优势和战略产业。其中,叶片被誉为电站汽轮机的“动力之芯”,其质量直接影响电力装备的效率、承载性能、寿命和可靠性,制造难度大、周期长、成本高,并且工况恶劣,极易发生损伤^[28]。因此,面向汽轮机叶片进行再制造研究具有重要意义。

4.1 汽轮机长叶片的常见失效形式

汽轮机长叶片的结构形状复杂、加工难度大、可靠性要求高。图 4 为汽轮机所采用的末级长叶片。水蚀是汽轮机长叶片的常见失效形式^[29]。汽轮机末级长叶片在工作时,承受离心力、蒸汽作用力、激振力和湿蒸汽所携带水滴冲刷力等的共同作用,非常容易受到水蚀,并且所产生的锯齿状毛刺会引起应力集中和叶根横截面积减小,这严重影响了叶片的振动特性,叶片的强度大大降低、空气动力学性能恶化,在严重的情况下还



图 4 汽轮机末级长叶片

Fig.4 Last long blade of steam turbine

会导致叶片破裂等严重事故。

4.2 汽轮机长叶片的再制造评价

以发生水蚀破坏现象的某型号汽轮机长叶片为例(如图 5 所示),应用再制造评价点阵图模型,计算再制造评价综合指数,从而分析其可再制造性,评价过程分为 4 个步骤。



图 5 汽轮机长叶片的水蚀现象

Fig.5 Water erosion of the long blade for steam turbine

第一步,建立再制造评价点阵图。

根据层次分析法,可得该汽轮机长叶片的再制造评价层次结构模型,如图 2 所示。组织技术人员和课题组专家根据该汽轮机长叶片的失效状态和结构特点,结合无锡透平叶片有限公司的生产条件和技术现状,进行评判打分。汇总打分结果,得到再制造评价点阵图,如图 6 所示。

根据再制造评价点阵图,可得如下信息:

(1) 参与评分的技术人员和课题组专家共 10 人,每人均对指标体系中每个评价指标进行了有效评分。

(2) 在技术指标方面,评价点位置的重心相对于经济指标和环境指标偏低,表明在技术层面,考虑该汽轮机长叶片的失效情况,进行再制造修复会有一定的难度,其中,“损伤失效指标”是最低的,可见叶片发生了比较严重的水蚀问题。

(3) 在离散程度方面,“损伤失效指标”和“节能节材指标”的离散程度稍大,表明评分人员对这 2 个指标的意见有较大的分歧,后续可有针对性地对这两个指标继续进行深入分析与探讨。

(4) 对于“能源费用指标”,评价点集中分布在点阵图的顶部位置,表明评分人员对再制造修复能源耗费的情况普遍持乐观态度。

第二步,对评价指标进行量化处理。

利用式 (1) 计算得到指标层每个评价指标的量化值;在不同的准则层里面,分别求得指标层每

由表4可知,该汽轮机长叶片的再制造评价综合指数为0.83,表明该汽轮机长叶片的可再制造性良好,具有较高的再制造价值,实施再制造的条件比较成熟,而且可以获取较好的经济效益

和环境效益。经过与无锡透平叶片有限公司的实际生产情况进行对比分析,评价结果与实际情况基本相符,为再制造决策提供了重要的理论基础和信息支撑。

表4 汽轮机长叶片再制造评价综合指数计算

Table 4 Quantitative calculation of the remanufacturing evaluation composite index for the long blade of steam turbine			
	Influence coefficient	Correction of standard level quantized value	Weight coefficient
Technological index	Active time coefficient $l = 1.1$	$\mu'_{Tec} = l \times \mu_{Tec} = 1.1 \times 0.70 = 0.77$	$\omega_1 = 0.475$
Economic index	Production capacity coefficient $p = 1$	$\mu'_{Eco} = p \times \mu_{Eco} = 1 \times 0.80 = 0.80$	$\omega_2 = 0.258$
Environmental index	Policy influence coefficient $s = 1.2$	$\mu'_{Env} = s \times \mu_{Env} = 1.2 \times 0.81 = 0.98$	$\omega_3 = 0.267$
Remanufacturing evaluation composite index:		$\mu_R = \omega_1 \mu'_{Tec} + \omega_2 \mu'_{Eco} + \omega_3 \mu'_{Env} = 0.77 \times 0.475 + 0.80 \times 0.258 + 0.98 \times 0.267 = 0.83$	

5 结 论

(1) 基于层次分析法,从技术、经济和环境3个方面提出了包含12个评级指标的指标体系,得到了再制造评价层次结构模型;结合专家评分法,创造性地提出了再制造评价点阵图模型,对专家打分结果进行数据可视化处理,然后量化评价指标,计算指标权重和影响系数,从而得到再制造评价综合指数。

(2) 以汽轮机长叶片为工程案例,对所提出的模型进行验证分析,经过计算,其再制造评价综合指数为0.83,具有良好的可再制造性。

(3) 再制造评价涉及因素多,定量数据少,且评价细则需结合具体评估对象和生产加工条件等进行确定,灵活性较大。再制造评价点阵图模型作为一种全新的评价方法,具有指标全面、结果直观和流程规范的特点,但部分具体的评价细则和更准确的影响系数还有待根据生产加工经验进一步完善。此外,可考虑通过建立再制造评价数据库,基于评价模型开发配套软件,以实现再制造评价的流程化处理。

参考文献

[1] 徐滨士. 中国再制造工程及其进展[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 1-6.
XU B S. Remanufacture engineering and its development in China[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(2): 1-6 (in Chinese).
[2] WEI S, CHENG D, SUNDIN E, et al. Motives and barriers of the remanufacturing industry in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 94: 340-351.
[3] 徐滨士, 李恩重, 郑汉东, 等. 我国再制造产业及其发展战

略[J]. 中国工程科学, 2017, 19(3): 61-65.
XU B S, LI E Z, ZHENG H D, et al. The remanufacturing industry and its development strategy in China[J]. Engineering Science, 2017, 19(3): 61-65 (in Chinese).
[4] SPENGLER T, STOLTING W. Life cycle costing for strategic evaluation of remanufacturing systems[J]. Progress in Industrial Ecology, 2008, 5(1/2): 65-81.
[5] LU C, PAN S F, PENG Y B. Evaluation model for heavy machine tool remanufacturing scheme based on ANP[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 635-637: 1836-1840.
[6] GOVINDAN K, SHANKAR K M, KANNAN D. Application of fuzzy analytic network process for barrier evaluation in automotive parts remanufacturing towards cleaner production-a study in an Indian scenario[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 114: 199-213.
[7] LIU C, CAI W, DINOLOV O, et al. Emergy based sustainability evaluation of remanufacturing machining systems[J]. Energy, 2018, 150: 670-680.
[8] 卢超, 潘尚峰, 孙江宏. 重型机床基础件再制造评价指标体系的建立及指标值求解方法[J]. 制造技术与机床, 2018(1): 60-63.
LU C, PAN S F, SUN J H. Establishment of evaluation index system and index value solving method for remanufacturing of heavy machine tool base parts[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(1): 60-63 (in Chinese).
[9] 汪超台, 吴斌方, 李自成. 数控机床再制造绿色度评价体系的研究与应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018(4): 94-99.
WANG C T, WU B F, LI Z C. Research and application of green degree evaluation system for NC machine tools' refurbication[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2018(4): 94-99 (in Chinese).
[10] 宿彪, 黄向明, 任莹晖, 等. 基于蚁群算法的工程机械再制造优化选配方法研究[J]. 机械工程学报, 2017(5): 60-68.
SU B, HUANG X M, REN Y H, et al. Research on selective

- assembly method optimization for construction machinery remanufacturing based on ant colony algorithm[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017(5): 60-68 (in Chinese).
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 机械产品再制造 通用技术要求: GB/T 28618-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 4-7. Standardization Administration of the People's Republic of China. Remanufacturing-General technical requirements for mechanical products: GB/T 28618-2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012: 4-7 (in Chinese).
- [12] GOODALL P, ROSAMOND E, HARDING J. A review of the state of the art in tools and techniques used to evaluate remanufacturing feasibility[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 81(7): 1-15.
- [13] 中国国家标准化管理委员会. 机械产品再制造性评价技术规范: GB/T 32811-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 3-8. Standardization Administration of the People's Republic of China. Assessment technical specifications of remanufacturability for mechanical products: GB/T 32811-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 3-8 (in Chinese).
- [14] 邓乾旺, 罗井知, 王长文, 等. 退役工程机械产品再制造绿色性评价[J]. *中国表面工程*, 2014, 27(3): 101-107. DENG Q W, LUO J Z, WANG C W, et al. Green evaluation of retired construction machinery products remanufacturing[J]. *China Surface Engineering*, 2014, 27(3): 101-107 (in Chinese).
- [15] XU B S. Green remanufacturing engineering and its development strategy in China[J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2016, 3(2): 102-106.
- [16] 封慧, 李剑峰, 孙杰. 曲轴轴颈损伤表面的激光熔覆再制造修复[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 80-85. FENG H, LI J F, SUN J. Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 80-85 (in Chinese).
- [17] 孙瑄, 张建国, 王丕东, 等. 基于广义退化的机械结构模糊时变可靠性分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(8): 1731-1738. SUN X, ZHANG J G, WANG P D, et al. Fuzzy time-variant reliability analysis of mechanical structure based on generalized degradation[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(8): 1731-1738 (in Chinese).
- [18] JIANG Z, ZHOU T, ZHANG H, et al. Reliability and cost optimization for remanufacturing process planning[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135(4): 1602-1610.
- [19] HE Y, PAN M, LUO F, et al. Pulsed eddy current imaging and frequency spectrum analysis for hidden defect nondestructive testing and evaluation[J]. *Ndt & E International*, 2011, 44(4): 344-352.
- [20] 张元良, 张洪潮, 赵嘉旭, 等. 高端机械装备再制造无损检测综述[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(7): 80-90. ZHANG Y L, ZHANG H C, ZHAO J X, et al. Review of non-destructive testing for remanufacturing of high-end equipment[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(7): 80-90 (in Chinese).
- [21] 朱胜, 姚巨坤. 装备再制造设计及其内容体系[J]. *中国表面工程*, 2011, 24(4): 1-6. ZHU S, YAO J K. Equipment remanufacturing design and its content system[J]. *China Surface Engineering*, 2011, 24(4): 1-6 (in Chinese).
- [22] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(7): 93-100. DENG X, LI J M, ZENG H J, et al. Research on computation methods of AHP Wight vector and its applications[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(7): 93-100 (in Chinese).
- [23] TAM M C Y, TUMMALA V M R. An application of the AHP in vendor selection of a telecommunications system[J]. *Omega*, 2009, 29(2): 171-182.
- [24] MITKUS S. Complex evaluation of contracts for construction[J]. *Journal of Civil Engineering & Management*, 2010, 16(2): 287-297.
- [25] HUTERSKA A. Selected aspects of quasi-fiscal activities of the Federal Reserve System of the United States[J]. *Research Papers of Wroclaw University of Economics*, 2012 (245): 120-128.
- [26] SAATY T L. How to make a decision: the analytic hierarchy process[J]. *Interfaces*, 1994, 24(6): 19-43.
- [27] 王翔. 48MnV 退役曲轴剩余疲劳寿命测评技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 36-41. WANG X. Investigation on the residual fatigue life evaluation of 48MnV crankshaft core[D]. Shanghai: Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011: 36-41 (in Chinese).
- [28] 乔鹏, 唐委校, 郭冰. 核电汽轮机长叶片与轴振动耦合特性研究[J]. *自动化仪表*, 2017, 38(1): 53-56. QIAO P, TANG W X, GUO B. Vibration coupling between long blades and shaft in nuclear steam turbines[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2017, 38(1): 53-56 (in Chinese).
- [29] GAO D W. Influence of water marbles on efficiency, blade fracture and water erosion of steam turbines[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2012, 32(10): 779-785.