

控制与决策

Control and Decision

两阶段设备维护策略选择的灰靶决策模型

李强, 刘思峰

引用本文:

李强,刘思峰. 两阶段设备维护策略选择的灰靶决策模型[J]. *控制与决策*, 2023, 38(6): 1712–1720.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.2038>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑生产任务的制造设备关键部件的机会维修优化

Opportunistic maintenance optimization for key components of manufacturing equipment considering production tasks

控制与决策. 2023, 38(3): 715–720 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1254>

双种群混合遗传算法求解具有预防性维护的分布式柔性作业车间调度问题

Two–population hybrid genetic algorithm for distributed flexible job–shop scheduling problem with preventive maintenance

控制与决策. 2023, 38(2): 475–482 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1152>

基于云平台的共享制造模式定价策略

Pricing strategies for sharing manufacturing model based on cloud platform

控制与决策. 2022, 37(4): 1056–1066 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1464>

基于公共特有子空间提取的工业设备多模式运行过程故障检测方法

Multimode process monitoring for industrial equipments utilizing common–specific information extraction strategy

控制与决策. 2022, 37(6): 1469–1478 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0947>

区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化

Collaborative optimization of interval number reentrant hybrid flow shop scheduling and preventive maintenance

控制与决策. 2021, 36(11): 2599–2608 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0973>

两阶段设备维护策略选择的灰靶决策模型

李 强¹, 刘思峰^{1,2†}

(1. 南京航空航天大学 经济管理学院, 南京 211106; 2. 南京航空航天大学 灰色系统研究所, 南京 211106)

摘要: 针对设备的最佳维护策略选择问题, 首先提出 6 种设备运维目标, 同时给出两阶段设备运维策略选择的加权智能灰靶决策模型的架构图以及建模算法流程; 然后采用德尔菲调查法与层次分析法相结合确定不同目标的权重. 结合某半导体面板制造企业的设备运行现场实际数据, 对于成本型目标和适中型目标, 分别采用相应的效果测度函数计算出设备在不同运行状态下的一致效果测度矩阵以及综合效果测度矩阵. 通过运用两阶段设备维护的灰靶决策模型, 最终得到设备不同状态下的最佳维护策略. 所提出方法对正确选择半导体面板设备维护策略、提高设备运维效率、降低维护成本具有实际指导意义.

关键词: 设备维护; 策略选择; 运维目标; 层次分析法; 效果测度函数; 加权智能灰靶决策模型

中图分类号: TP23

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.2038

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 李强, 刘思峰. 两阶段设备维护策略选择的灰靶决策模型[J]. 控制与决策, 2023, 38(6): 1712-1720.

Grey target decision model for two-stage equipment maintenance strategy selection

LI Qiang¹, LIU Si-feng^{1,2†}

(1. College of Economic and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. Institute for Grey System Studies, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Aiming at the problem of selection the best maintenance strategy of equipment, firstly, the paper puts forward six equipment operation and maintenance objectives, and the architecture diagram and modeling algorithm flow chart of the intelligent weighted gray target decision model for the selection of two-stage equipment operation and maintenance strategy are proposed. Then Delphi survey method and analytic hierarchy process (AHP) are used to determine the weight of different objectives. Combined with the actual data of equipment operation in a semiconductor panel manufacturing enterprise, the corresponding effect measurement functions are used to calculate the consistent effect measurement matrix and comprehensive effect measurement matrix under different states for benefit objectives, cost objectives and moderate objectives. Using the multi-objective weighted intelligent grey target decision-making model, the optimal maintenance strategy under the production state of the equipment is obtained. The proposed method has practical guiding significance for correctly selecting the maintenance strategy of semiconductor panel equipment, improving the equipment operation and maintenance efficiency and reducing the maintenance cost.

Keywords: equipment maintenance; strategy selection; operation and maintenanc attribute; AHP; effect measurement function; weighted intelligent grey target decision-making model

0 引 言

近些年,我国正在努力发展以高度自动化设备为主的先进制造业. 一个效率高、稳定性强、故障率低的设备无疑会给先进制造企业创造更多的效益. 如何根据设备生产运行的实际状况,合理规划并制定、筛选出最佳的设备维护策略具有十分重要的意义.

目前,针对设备维护策略的选择研究主要包含依

据设备役龄更换的策略^[1]、设备故障限制的策略^[2]、维护成本限制策略^[3]、维护时间限制策略^[4]、维护次数限制的策略^[5]以及视情维护的策略^[6]等. 梅嘉健等^[7]通过利用设备服役年龄递减以及设备宕机概率率递增表明设备的退化过程,之后构建基于多目标的设备维护决策模型,弥补了单一决策目标对设备维护策略选择的影响. Love 等^[8]通过 Weibull 分布的失效

收稿日期: 2021-11-22; 录用日期: 2022-02-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72071111, 71671091).

责任编委: 李登峰.

†通讯作者. E-mail: sliu@nuaa.edu.cn.

率函数,建立了故障限制的设备维护决策模型,提出当设备故障率超出预先设定的阈值时对设备进行维护. Yun等^[9]在设备发生失效时首先评估设备的维修成本,若维护成本低于预先设定的成本限制则对设备采取维护作业. Hu等^[10]利用设备维护成本作为目标函数,构建了设备维护决策模型,解决了设备维护策略的选择问题. Dohi等^[11]以利润率作为决策目标建立了基于设备维护时间限制的优化模型. de Toledo等^[12]对于设备在维护周期内发生失效时采取事后维护的策略进行了研究. Dedopoulos等^[13]将失效率作为递增函数建立设备维护的优化模型,最终得到了最佳的维护次数限制的策略. 视情维护也称为预防性维护. 王瑞琦等^[14]构建了基于全寿命周期的预防性维护策略优化模型,并通过实际案例分析验证了模型的适用性和有效性.

目前,针对设备维护决策的研究方法主要以概率论、随机过程理论以及灰色系统理论为主. 基于概率论为主的维护决策模型^[15],主要利用设备役龄、可靠度、失效概率、设备衰退水平等参数对设备展开描述,通过采取不同的维护策略,将设备与维护之间建立联系,从而达到和实现对设备进行维护决策的目的;Wang等^[16]构建了设备比例失效模型,对电站失效效率的影响情况展开了分析研究;史凯龙等^[17]构建基于设备产能失效率的预防维护决策模型,实现了设

备产能最大化的目的. 刘学娟^[18]利用随机过程理论建立随机系数的回归模型,对设备的退化过程展开研究,获得了最优的维护策略.

灰色决策分析方法也是现代决策科学方法中非常重要的组成部分,跟随决策理论逐步发展起来. 邓聚龙^[19]在1985年陆续提出了一系列灰色决策模型,其中灰靶决策模型是灰色决策方法中研究最热的一个分支. 刘思峰等^[20-22]对多目标灰靶决策模型进行较为深入的研究,取得了丰硕的研究成果,并得到广泛的推广和应用,成功地解决了工业生产制造、日常生活和科学研究中的大量现实问题. 蔡佳佳等^[23]在改进调节变量主成分权重的基础上建立广义灰靶决策模型,获得了较好的决策效果. 钱丽丽等^[24]提出基于后悔理论和区间灰数的群体偏离靶心度的决策分析方法,对决策方案展开排序研究,最终实现了多指标的群决策. 刘中侠等^[25]针对不确定因素的决策问题构建广义灰靶决策模型,解决了不确定性因素的排序问题,最终获得了最优的选择决策. 张文杰等^[26]针对能源公司的供应商选择问题,构建多目标加权灰靶决策模型,实现了最佳供应商的选择,通过对能源公司进行了解,该决策方法与最终的选择决策基本吻合,验证了模型的有效性. 王大澳等^[27]针对方案集的排序问题,提出一种基于Choquet积分的多属性灰靶群决策模型,并运用仿真方法验证了该模

表1 设备运维目标与维护策略说明

类别	目标维护	目标名称	目标与方案内容说明
运 维 目 标	目标A	部件役龄时间	设备零部件投入生产期间所服役的时间
	目标B	故障宕机时间	设备处于故障状态时设备维保人员在处理设备宕机让设备恢复正常运行所需时间
	目标C	缺料等待时间	因加工材料不足导致设备出现停机待料的时间
	目标D	品质停机时间	设备出现品质变异需停机调查或排除异常所需的时间
	目标E	设备维护时间	设备维保人员正对设备进行维护作业所需时间
	目标F	设备维护费用	设备维保人员正对设备进行维护作业所需的费用成本,包括人力成本等
维 护 策 略	一阶方案 φ_1	被动型维护	基于设备出现故障宕机时进行维护
	一阶方案 φ_2	预防型维护	基于时间的维修,取决于时间间隔的把握,按照特定的时间间隔进行检查和维护
	一阶方案 φ_3	监测型维护	对设备日常的工作状态以及重点工艺参数重点监控和检测及检修
	二阶方案 φ_{11}	事后维修	基于设备故障时进行维护. 对设备故障以及宕机采取立即处理的措施,以第一时间修复设备,让设备恢复正常生产为原则,维护效率较高,停机时间较短
	二阶方案 φ_{12}	更换性维修	对易损件以及达到剩余寿命末期的部件进行停机更换部件的维护作业
	二阶方案 φ_{21}	周度周期性维护	每周定期对曝光设备的核心部件进行例行性的检查、工艺参数点检确认以及清洁等以满足设备的高洁净度等要求,防止设备出现品质异常导致产品的良率损失. 按照周度计划执行过程中,前后允许在3天之内,即可以根据生产任务的实际情况灵活调整设备维护周期
	二阶方案 φ_{22}	顺序性维护	针对多台设备按照一定次序对设备进行维护
	二阶方案 φ_{21}	状态检测维修	基于状态的维修,通过频繁的服务和检查,当设备状态出现显著变化及产品质量出现潜在品质风险时及时采取维护
	二阶方案 φ_{22}	参数检测维修	对设备各单元以及有较高精度要求的部件,有针对性地对设备生产工艺参数进行监控,当设备工艺参数出现显著波动现象时采取检修作业

型的有效性. 黎振宇等^[28]构建灰靶决策模型并运用到工业电力系统的应急能力的评估中, 最终实现了多指标的数据信息处理和排序. 刘中侠等^[29]为了解决企业投资选择决策的问题建立灰靶决策模型, 获得了较为满意的决策结果. 张壮等^[30]将灰靶决策模型成功运用到能源效率的评估中, 并验证了模型的有效性. 毕娟等^[31]针对煤矿安全现状的问题展开研究, 构建了基于博弈论的灰靶决策模型. 王丽萍等^[32]针对水库汛期水位抬升策略的选择问题, 构建新型灰靶决策优化模型, 结果表明优化后的模型综合考量了数据之间的关联程度. 季孟忠等^[33]等构建了灰靶决策模型并运用到医疗系统中, 解决了病人就诊需求的调度决策问题.

综上所述, 针对设备维护策略的选择研究目前主要围绕单一目标或指标展开, 由于实际生产过程中影响设备运行状况的因素较多, 在众多影响因子中既有确定性因素又有不确定性因素, 即具有“灰色”因素, 需要结合不同运维目标及设备运行状态选择有效的维护策略, 最大化提升设备的稳定性. 常用的维护决策的研究方法均属于不确定性系统理论, 其中概率论与随机过程理论主要研究对象为“随机不确定”, 研究的基础集合为康托尔集, 研究的方法依据是映射, 研究的途径和手段主要以频率统计为主, 研究目标针对的是历史统计的规律, 优点为所构建的模型精度较高, 缺点为要求大样本大数据且计算较为复杂, 同时对数据的要求也高, 需满足典型的分布规律. 灰色理论研究对象主要为“贫信息不确定”, 研究的基础集合为灰数集, 研究的方法依据是信息覆盖, 研究的途径和手段主要为灰序列算子, 研究目标是探寻现实的规律. 优点为对数据量需求较少, 同时对数据要求较低.

设备的运行目标通常有很多种, 不同的制造业考虑运行目标会有一些的差异, 但最终都是围绕满足客户需求为首要指标, 其次是希望能够最大化地提升设备的利用率. 具体灰靶决策模型中的设备运行目标、维护目标与维护策略内容如表1所示.

1 两阶段设备运维目标的加权智能灰靶决策模型架构

本文首先以设备维护策略选择作为第1阶段事件集, 以3种维护方案作为第1阶段对策集, 其次依据设备运行过程中的3种不同状态作为第2阶段事件集, 以第1阶段3种对策集细项分类的6种维护策略作为第2阶段对策集, 分别构建多目标加权智能灰靶决策模型, 具体架构如图1所示.

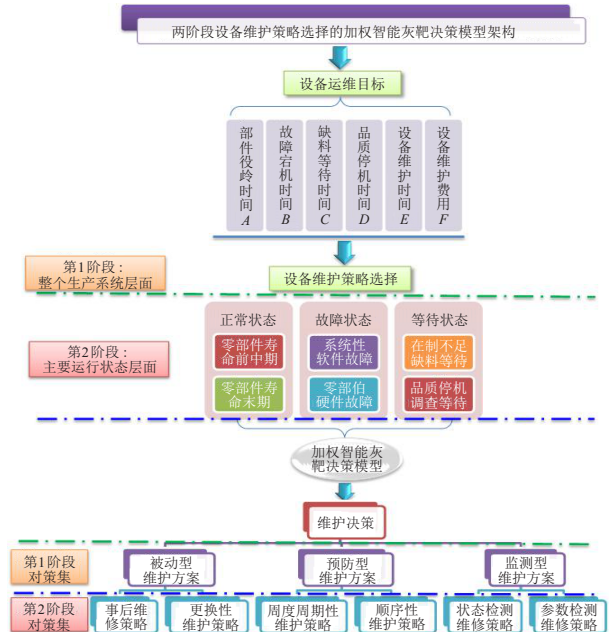


图1 两阶段设备维护策略选择的多目标加权智能灰靶决策模型

2 多目标加权智能灰靶决策模型

2.1 灰色决策模型

定义1 事件、对策、目标、效果称为灰色决策四要素.

定义2 设 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 为研究范围内事件的全体, 称为该研究范围内的事件集, $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为第 i 个事件, 所有可能对策全体称为对策集, 记作 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$, $b_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 为第 j 种对策.

定义3 事件集 A 与对策集 B 的乘积: $A \times B = \{(a_i, b_j) | a_i \in A, b_j \in B\}$ 称为决策方案集, 记作 $S = A \times B$. 对于任意 $a_i \in A, b_j \in B$, 称 (a_i, b_j) 为一个决策方案, 记作 $s_{ij} = (a_i, b_j)$.

定义4 设

$$U^{(k)} = (u_{ij}^{(k)}) = \begin{bmatrix} u_{11}^{(k)} & \dots & u_{1m}^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{1n}^{(k)} & \dots & u_{nm}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

为决策方案集 S 在目标下的效果样本矩阵.

1) 设 k 为效益型目标, 希望目标效果的样本值越大越优. k 目标下的灰靶为

$$u_{ij}^{(k)} \in [u_{i_0j_0}^{(k)}, \max_i \max_j \{u_{ij}^{(k)}\}], \quad (2)$$

即 $u_{i_0j_0}^{(k)}$ 为 k 目标的效果临界值, 称

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{u_{ij}^{(k)} - u_{i_0j_0}^{(k)}}{\max_i \max_j \{u_{ij}^{(k)}\} - u_{i_0j_0}^{(k)}} \quad (3)$$

为效益型目标效果测度函数.

2) 设 k 为成本型目标, 希望目标效果的样本值越

小越优. 设 k 目标下的灰靶为

$$u_{ij}^{(k)} \in [\min_i \min_j \{u_{ij}^{(k)}\}, u_{i_0j_0}^{(k)}], \quad (4)$$

即 $u_{i_0j_0}^{(k)}$ 为 k 目标的效果临界值, 称

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{u_{i_0j_0}^{(k)} - u_{ij}^{(k)}}{u_{i_0j_0}^{(k)} - \min_i \min_j \{u_{ij}^{(k)}\}} \quad (5)$$

为成本型目标效果测度函数.

3) 设 k 为适中型目标, 希望目标效果的样本值越接近一个适中值 A 越优. 设 k 目标下的灰靶为

$$u_{ij}^{(k)} \in [A - u_{i_0j_0}^{(k)}, A + u_{i_0j_0}^{(k)}], \quad (6)$$

即 $A - u_{i_0j_0}^{(k)}, A + u_{i_0j_0}^{(k)}$, 分别为 k 目标下的下限效果临界值和上限效果临界值.

① 当 $u_{ij}^{(k)} \in [A - u_{i_0j_0}^{(k)}, A]$ 时, 称

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{u_{ij}^{(k)} - A + u_{i_0j_0}^{(k)}}{u_{i_0j_0}^{(k)}} \quad (7)$$

为适中型目标下限效果测度函数;

② 当 $u_{ij}^{(k)} \in [A, A + u_{i_0j_0}^{(k)}]$ 时, 称

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{A + u_{i_0j_0}^{(k)} - u_{ij}^{(k)}}{u_{i_0j_0}^{(k)}} \quad (8)$$

为适中型目标上限效果测度函数.

定义5 当 k 目标效果值 $r_{ij}^{(k)} \in [0, 1]$ 时, 称 k 目标中靶, k 目标为加分因素; 当 k 目标效果值 $r_{ij}^{(k)} \in [-1, 0]$ 时, 称 k 目标脱靶, k 目标为减分因素.

定义6 设 $\eta_k (k = 1, 2, \dots, s)$ 为目标 k 的决策权, $\sum_{k=1}^s \eta_k = 1$, 称

$$R^{(k)} = (r_{ij}^{(k)}) = \begin{bmatrix} r_{11}^{(k)} & \dots & r_{1m}^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1n}^{(k)} & \dots & r_{nm}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

为决策方案集 S 在 k 目标下的一致效果测度矩阵. 对于 $s_{ij} \in S$, 称

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^s \eta_k r_{ij}^{(k)} \quad (10)$$

为决策方案的综合效果测度函数, 同时也称

$$R = (r_{ij}) = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1n} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

为综合效果测度矩阵.

定义7 若

$$\max_{1 \leq j \leq m} \{r_{ij}\} = r_{i_0j_0}, \quad (12)$$

则称 b_{j_0} 为事件 a_i 的最优对策; 若

$$\max_{1 \leq i \leq n} \{r_{ij}\} = r_{i_0j_0}, \quad (13)$$

则称 a_{i_0} 为对策 b_j 相应的最优事件; 若

$$\max_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq j \leq m} \{r_{ij}\} = r_{i_0j_0}, \quad (14)$$

则 $s_{i_0j_0}$ 称为最优局势即方案.

2.2 多目标加权智能灰靶决策模型的建模流程

详细的多目标加权智能灰靶决策模型的建模算法流程如图2所示.

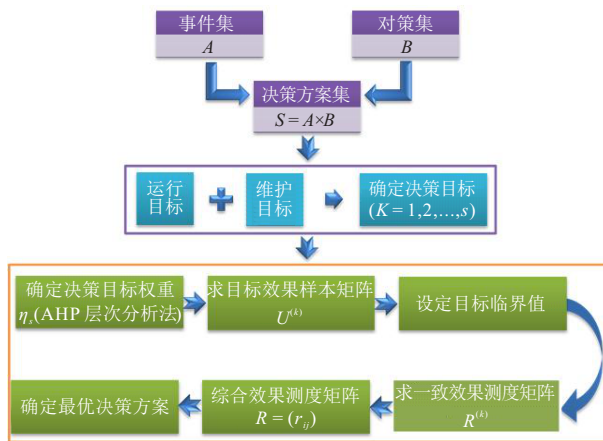


图2 设备运维目标加权智能灰靶决策的建模算法流程

3 企业案例分析

本节给出在半导体显示制造业曝光设备中的应用案例. 设备出现故障或者品质异常停机等会给生产带来严重的影响, 同时因为设备精度高、机构单元复杂, 再次使设备复机流片需要花费数小时的时间来确认产品特性, 包含多种工艺参数条件等, 以确保产品无品质异常, 设备的复机流程非常繁琐, 急需根据设备实际运行状态采取最优的维护措施以提升曝光设备的稳定性. 半导体制造业的曝光设备如图3所示.



图3 半导体制造业液晶面板曝光设备

3.1 第1阶段设备运维策略选择决策

半导体制造业曝光设备的运维策略选择建模步骤如下.

step 1: 建立事件集、对策集以及决策方案集. 设 $A = \{a_1\}$, a_1 为设备维护策略选择的事件集; 相应的所有可能对策的全体称为对策集 $B, B = \{b_1, b_2, b_3\}$, 其中 b_1 为监测型维护, b_2 为预防型维护, b_3 为被动型维护. 由事件集 A 和对策集 B 构造决策方案集

$$s_{11} = (a_1, b_1) = (\text{维护策略选择, 监测型维护}),$$

$$s_{12} = (a_1, b_2) = (\text{维护策略选择, 预防型维护}),$$

$$s_{13} = (a_1, b_3) = (\text{维护策略选择, 被动型维护}).$$

step 2: 确定决策目标. 最终选取部件役龄时间、故障宕机时间、缺料等待时间、品质停机时间、设备维护时间、设备维护费用、设备维护次数作为设备

的维护目标, 具体各指标类型分析如表 2 所示. 由表 2 可知, 部件役龄的最佳时间为 2 kh, 所允许容忍限度为 0.3 kh, 即 $u_{i_0j_0}^{(1)} = 0.3$.

表 2 设备运维目标的类型分析

项目	运维目标	目标类型	类型分析
1	部件役龄时间	适中型指标	半导体显示曝光设备的核心零部件之一为曝光灯, 通常服役年龄的最佳时间在 2 kh, 超出最佳服役时间 0.3 kh 会造成设备故障率上升而且同步会影响到产品的质量; 相反, 经企业财务成本核算, 若部件服役提前 0.3 kh 更换则同样造成设备维护成本上升, 出现零部件浪费等情况
2	故障宕机时间	成本型指标	设备故障时间越少越好, 便于提升设备的稼动率
3	缺料等待时间	成本型指标	因料况不足导致的设备停机待料的时间, 越短越好
4	品质停机时间	成本型指标	设备因品质异常导致的停机排查所需的时间, 越短越好
5	设备维护时间	成本型指标	维护时间越短越好, 可加快设备复机速度
6	设备维护费用	成本型指标	维护费用越少越好, 可降低设备维护成本

step 3: 确定各目标的决策权重 $\eta_k (k = 1, 2, \dots, 6)$. 目前, 确定权重的方法主要有德尔菲法、专家排序法、主成分分析法、层次分析法、相关系数法等. 通过比较分析, 首先, 选择德尔菲专家调查法, 可以客观、准确地确定各个指标对设备运维决策影响的重要程度; 然后, 将调查后的结果再结合相对简便、科学、客观的层次分析法对设备维护目标进行科学公正的分析, 最终实现定性分析与定量分析相结合. 本文从半导体显示制造业的实际需求出发, 以生产及维修费用最低、产品质量及设备运行风险最小的角度, 选取以成本型为主的设备运维决策目标.

在运用德尔菲专家调查法的专家选择上, 从该半导体面板制造企业中挑选设备管理专家 3 名 (具有 15 年以上设备管理经验) 以及设备资深维保技术专家 7 名 (具有 10 年以上设备维保经验) 组成调查小组, 通过问卷调查的形式分别构建每个专家的判断矩阵. 将 10 份专家调查问卷结果导入到 Yaahp 软件中构建各层次的判断矩阵, 从而获得每个指标的权重值. 具体设备维护方案决策的各目标准则层对目标层的判断矩阵以及相对权重的计算过程结果如表 3 所示.

表 3 各目标的指标权重

设备维护方案决策	部件役龄时间	故障宕机时间	缺料等待时间	品质停机时间	设备维护时间	设备维护费用	w_i
部件役龄时间	1.1	2.00	1.0	0.5	0.33	0.50	0.1267
故障宕机时间	0.51	1.02	0.98	2.1	0.50	2.00	0.1787
缺料等待时间	1.0	1.00	1.0	1.1	0.98	0.52	0.1370
品质停机时间	2.0	0.5	1.0	1.0	1.01	0.51	0.1427
设备维护时间	3.02	1.99	1.02	1.02	0.98	1.00	0.2111
设备维护费用	1.98	0.52	2.0	2.0	1.00	1.00	0.2038

结合某半导体制造企业的设备日常运维实际特点, 因设备管控精度高, 在日常满负荷生产过程中, 经常会出现故障宕机以及工艺参数波动等情形, 设备需立即停机调查以避免出现大批量的不良发生, 调查时间的长短、维护次数的多少等均是导致目前半导体面板制造业设备运维成本上升的主要因素.

设备维护方案决策的判断矩阵一致性比例为: $CR = 0.0998 < 0.1$ 满足一致性检验要求, 对总目标的权重为 1.0000, λ_{max} 为 6.6287. 借助 Yaahp 辅助软件计算得出具体权值如图 4 所示.

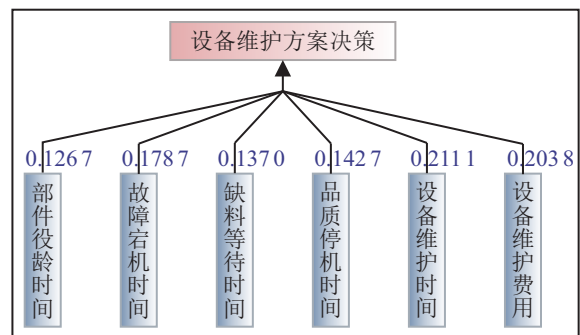


图 4 各目标权重数值

step 4: 确定权重后求各目标的效果样本矩阵以

及设定目标效果临界值. 针对各目标, 收集近半年时间内设备每月的品质停机时间、缺料等待时间、故障宕机时间以及制造企业内部财务系统对每次维护所产生的费用成本进行核算的数据作为依据, 并通过设备端安装的智能传感器收集设备的维护时间、维护次数作为基准. 因故障宕机时间、缺料等待时间、品质停机时间、维护时间以及维护费用均属于成本型指标, 故临界值设定为: $u_{i_0j_0}^{(2)} = 4, u_{i_0j_0}^{(3)} = 3, u_{i_0j_0}^{(4)} = 5, u_{i_0j_0}^{(5)} = 8, u_{i_0j_0}^{(6)} = 1.5$. 具体目标效果样本矩阵、临界值、各指标权重以及测度类型整理如表4所示.

表4 各目标的效果样本矩阵、临界值及指标权重

目标	φ_1	φ_2	φ_3	临界值	权重	测度类型
A	19.8	20.1	20	19.7, 20.3	0.1267	moderate
B	3.5	3.8	2.5	4	0.1787	min
C	1.5	2.2	3	3	0.1370	min
D	3	5	2	5	0.1427	min
E	8	6	7.5	8	0.2111	min
F	1.24	1.08	0.85	1.5	0.2038	min

step 5: 得到效果样本矩阵后计算设备运维目标的一致效果测度矩阵

$$R^{(1)} = (r_{ij}^{(1)}) = \begin{bmatrix} 0.34 & 0.67 & 1.00 \\ 0.33 & 0.13 & 1.00 \\ 1.00 & 0.53 & 0.00 \\ 0.67 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.25 \\ 0.40 & 0.65 & 1.00 \end{bmatrix}$$

step 6: 得到一致效果测度矩阵后, 通过 $r_{ij} = \sum_{k=1}^s \eta_k r_{ij}^{(k)}$ 计算综合效果测度矩阵为

$$R_1 = [0.415 \quad 0.524 \quad 0.705].$$

step 7: 确定设备最优维护决策方案的选择. 由综合测度矩阵可知, 最终的结果为 $r_{ij} \in [0, 1]$, 表明3种维护决策方案均中靶, 属于合理范畴, 均符合设备自身的日常维护策略需求. 由表1可知, 3种不同的维护策略中, 最终选择第3种最优的维护策略, 即采取监测型维护方案.

3.2 第2阶段依据设备状态的运维策略选择决策

针对不同的设备运行状态, 选择不同运维目标参与智能灰靶决策模型建模, 设备各状态下的智能加权灰靶决策模型的运维目标如图5所示.

同理, 半导体制造业曝光设备不同运行状态的维护决策, 计算过程如下. 建立事件集、对策集以及决策方案集. 由图1的两阶段灰靶决策模型的架构可知, 本文将设备运行状态作为事件集 $A^2, A^2 = \{a_1^2, a_2^2, a_3^2\}$. 其中: a_1^2 为正常状态, a_2^2 为故障状态, a_3^2 为等

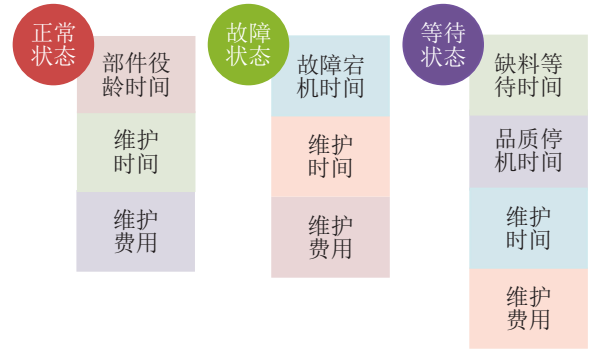


图5 设备各状态的运维目标

待状态. 6种维护策略对策集为 $B^2 = \{b_1^2, b_2^2, b_3^2, b_4^2, b_5^2, b_6^2\}$. 由事件集 A^2 和对策集 B^2 构造决策方案集

$$\begin{aligned} s_{11}^2 &= (a_1^2, b_1^2), s_{12}^2 = (a_1^2, b_2^2), s_{13}^2 = (a_1^2, b_3^2), \\ s_{14}^2 &= (a_1^2, b_4^2), s_{15}^2 = (a_1^2, b_5^2), s_{16}^2 = (a_1^2, b_6^2), \\ s_{21}^2 &= (a_2^2, b_1^2), s_{22}^2 = (a_2^2, b_2^2), s_{23}^2 = (a_2^2, b_3^2), \\ s_{24}^2 &= (a_2^2, b_4^2), s_{25}^2 = (a_2^2, b_5^2), s_{26}^2 = (a_2^2, b_6^2), \\ s_{31}^2 &= (a_3^2, b_1^2), s_{32}^2 = (a_3^2, b_2^2), s_{33}^2 = (a_3^2, b_3^2), \\ s_{34}^2 &= (a_3^2, b_4^2), s_{35}^2 = (a_3^2, b_5^2), s_{36}^2 = (a_3^2, b_6^2). \end{aligned}$$

给出各设备状态下的目标效果样本矩阵、临界值、各指标权重以及测度类型整理如表5所示.

表5 各状态的目标的效果样本矩阵、临界值及指标权重

目标	φ_{11}	φ_{12}	φ_{21}	φ_{22}	φ_{31}	φ_{32}	临界值	权重	测度类型
A	19.8	20.2	20	20.1	19.5	19.7	19.7, 20.3	0.1267	moderate
B	2.1	1.8	3.5	2.7	3.2	3.4	4	0.1787	min
C	0.8	1.2	2.3	2.5	1.8	1.5	3	0.1370	min
D	1.7	1.5	4	2.1	2.7	1.9	4	0.1427	min
E	6.3	7	5.5	3	4.5	3.4	7	0.2111	min
F	1.21	1.36	0.95	1.24	0.75	1.43	1.5	0.2038	min

计算设备各状态运维目标的一致效果测度矩阵如下:

1) 设备正常状态下的一致效果测度矩阵为

$$R^{(2)} = \begin{bmatrix} 0.33 & 0.33 & 1.00 & 0.67 & -0.67 & 0.00 \\ 0.18 & 0.00 & 0.38 & 1.00 & 0.63 & 0.90 \\ 0.39 & 0.19 & 0.73 & 0.35 & 1.00 & 0.09 \end{bmatrix};$$

2) 设备故障状态下的一致效果测度矩阵为

$$R^{(3)} = \begin{bmatrix} 0.86 & 1.00 & 0.23 & 0.59 & 0.36 & 0.27 \\ 0.18 & 0.00 & 0.38 & 1.00 & 0.63 & 0.90 \\ 0.39 & 0.19 & 0.73 & 0.35 & 1.00 & 0.09 \end{bmatrix};$$

3) 设备等待状态下的一致效果测度矩阵为

$$R^{(4)} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.82 & 0.32 & 0.23 & 0.55 & 0.68 \\ 0.92 & 1.00 & 0.00 & 0.76 & 0.52 & 0.84 \\ 0.18 & 0.00 & 0.38 & 1.00 & 0.63 & 0.90 \\ 0.39 & 0.19 & 0.73 & 0.35 & 1.00 & 0.09 \end{bmatrix}.$$

同理, 设备各状态的综合效果测度矩阵为

$$R_2 = [0.158 \ 0.080 \ 0.355 \ 0.366 \ 0.252 \ 0.209],$$

$$R_3 = [0.270 \ 0.217 \ 0.269 \ 0.387 \ 0.404 \ 0.258],$$

$$R_4 = [0.384 \ 0.293 \ 0.272 \ 0.421 \ 0.485 \ 0.422].$$

3种状态的综合效果测度矩阵排序为:

正常状态: $r_{24} > r_{23} > r_{25} > r_{26} > r_{21} > r_{22}$;

故障状态: $r_{35} > r_{34} > r_{31} > r_{33} > r_{36} > r_{32}$;

等待状态: $r_{45} > r_{46} > r_{44} > r_{41} > r_{42} > r_{43}$.

最后分别确定不同设备状态下最优维护决策方案的选择. 由设备各状态下的综合测度矩阵可知, 最终的结果 $r_{ij} \in [0, 1]$, 表明第2阶段的6种维护决策方案均中靶, 属于合理范畴, 均符合设备自身的日常维护策略需求. 由表1可知, 6种不同的维护策略对应3种不同设备状态的最优维护决策如下:

- 1) 设备正常状态 $\max_{1 \leq j \leq 6} \{r_{2j}\} = r_{24} = 0.366$;
- 2) 设备故障状态 $\max_{1 \leq j \leq 6} \{r_{3j}\} = r_{35} = 0.404$;

3) 设备等待状态 $\max_{1 \leq j \leq 6} \{r_{4j}\} = r_{45} = 0.485$.

通过第2阶段设备运维目标的加权智能灰靶决策模型的结果分析可见, 在依据设备运行状态下, 当设备处于正常状态时主要采取预防型维护方案下的顺序性维护策略; 当设备处于故障宕机状态以及出现缺料和品质异常停机等待状态时, 均选择第5种维护方案, 即状态检测维护策略.

3.3 实验设备维护数据对比分析

收集近一个月时间内半导体面板曝光设备的维护日期、维护时间以及制造企业内部财务系统对每次维护所产生的维护费用成本等数据, 针对设备维护事由采取相应的维护方案. 一个月的维护时间内, 共实施维护次数4次, 平均设备维护周期为7.25天, 月总维护时间为51.8h, 月维护成本为4.2万元. 具体维护数据如表6和表7所示.

表6 实验设备维护数据

项目	上次维护日期	最近维护日期	维护周期/天	维护时间/h	维护成本/万元	维护方案	维护事由
半导	11月2日	11月8日	6	11	0.86	状态检测维修	设备出现缺料等待, 利用等待时间提前维护
体面	11月8日	11月15日	7	10	0.78	顺序性维护	按照维护顺序, 实施例行维护
板曝	11月15日	11月24日	9	13.5	1.02	周期性维护	产能紧张有紧急出货需求, 延后维护
光	11月24日	11月30日	6	17.3	1.54	状态检测维修	设备故障处理, 更换部件同步实施维护作业
设备		total	28	51.8	4.2		

表7 原先设备维护数据

项目	上次维护日期	最近维护日期	维护周期/天	维护时间/h	维护成本/万元	维护方案	维护事由
半导	10月4日	10月9日	5	8.9	0.67	事后维修	设备故障宕机
体面	10月9日	10月15日	6	9.5	0.75	顺序性维护	设备缺料等待
板曝	10月15日	10月21日	6	16.8	1.54	更换性维护	设备部品损坏
光	10月21日	10月24日	3	22.5	1.77	参数检测维护	品质异常停机
设	10月24日	10月29日	5	16.4	1.68	被动型维护	设备宕机
备	10月29日	11月4日	6	12.8	1.32	停机检查维护	设备机构异响, 有故障风险
		total	31	86.9	7.73		

表8 原始维护与现行设备维护数据结果比对

项目	原始维护数据	现行维护数据	差异(原始-现行)
维护时间/h	86.9	51.8	35.1
维护周期/天	5.17	7.25	-2.08
维护次数/月	6	4	2
维护费用/万元	7.73	4.2	3.53

由表8可知, 通过对比企业之前维护方式与本文的两阶段设备维护策略选择的灰靶决策模型可以发现, 原设备平均维护周期在5.17天, 相比现行平均维护周期7.25天缩短了2.08天, 月维护次数增加了2次; 总的月维护时间由51.8h上升至86.9h, 维护费用由4.2万元上升至7.73万元. 原维护方式所造成的设备

宕机时间和宕机次数明显有上升现象。

4 结论

为了解决依据设备状态采取最佳维护策略的问题,本文针对设备的3种主要运行状态,即正常状态、故障状态、等待状态分别构建设备维护策略选择的灰靶决策模型,得到该半导体制造业的设备日常维护作业方式主要采取监测型维护方案(故障状态和等待状态)与预防型维护方案(正常状态)相结合的策略。该模型含义清晰,计算简单便捷,实现了设备最佳的维护策略选择问题。模型所得到的结论与实际情况基本吻合,所构建的两阶段设备运维策略选择的多目标加权智能灰靶决策模型具有一定的适用性,研究对于半导体制造企业运维管理具有实际指导和借鉴意义。

参考文献(References)

- [1] Huynh K T, Castro I T, Barros A, et al. Modeling age-based maintenance strategies with minimal repairs for systems subject to competing failure modes due to degradation and shocks[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 218(1): 140-151.
- [2] 廖雯竹, 张秀芳. 成组生产方式下生产调度和设备维护的多目标联合决策问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(1): 82-92.
(Liao W Z, Zhang X F. Multi-objective joint decision research of integrated scheduling and maintenance under group production[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(1): 82-92.)
- [3] Shafiee M, Finkelstein M. An optimal age-based group maintenance policy for multi-unit degrading systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 134: 230-238.
- [4] Sheu S H, Chang C C, Chien Y H. Optimal age-replacement time with minimal repair based on cumulative repair-cost limit for a system subject to shocks[J]. *Annals of Operations Research*, 2011, 186(1): 317-329.
- [5] Stadje W, Zuckerman D. A generalized maintenance model for stochastically deteriorating equipment[J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 89(2): 285-301.
- [6] 方玲珍, 史凯龙, 陆彪, 等. 基于维护效率的设备多目标预防维护优化建模[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(6): 1438-1444.
(Fang L Z, Shi K L, Lu B, et al. Multi-objective preventive maintenance modeling for equipment based on maintenance efficiency[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(6): 1438-1444.)
- [7] 梅嘉健, 刘勤明, 叶春明, 等. 基于模糊理论的设备多目标预防性维护策略研究[J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2021, 38(1): 46-54.
(Mei J J, Liu Q M, Ye C M, et al. Research on multi-objective preventive maintenance strategy based on fuzzy theory[J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2021, 38(1): 46-54.)
- [8] Love C E, Guo R. Utilizing weibull failure rates in repair limit analysis for equipment replacement/preventive maintenance decisions[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1996, 47(11): 1366-1376.
- [9] Yun W Y, Bai D S. Cost limit replacement policy under imperfect repair[J]. *Reliability Engineering*, 1987, 19(1): 23-28.
- [10] Hu J W, Jiang Z H, Wang H. Joint optimization of production plan and preventive maintenance schedule by stackelberg game[J]. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 2017, 34(4): 1750012.
- [11] Dohi T, Kaio N, Osaki S. On the optimal ordering policies in maintenance theory—Survey and applications[J]. *Applied Stochastic Models and Data Analysis*, 1998, 14(4): 309-321.
- [12] de Toledo M L G, Freitas M A, Colosimo E A, et al. Optimal periodic maintenance policy under imperfect repair: A case study on the engines of off-road vehicles[J]. *IIE Transactions*, 2016, 48(8): 747-758.
- [13] Dedopoulos I T, Smeers Y. An age reduction approach for finite horizon optimization of preventive maintenance for single units subject to random failures[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1998, 34(3): 643-654.
- [14] 王瑞琦, 陈光宇, 梁娜, 等. 全寿命周期下退化的大规模系统预防性维修策略优化[J]. *控制与决策*, 2021, 37(9): 2360-2368.
(Wang R Q, Chen G Y, Liang N, et al. Preventive maintenance optimization for deteriorating largescale systems in lifecycle perspective[J]. *Control and Decision*, 2021, 37(9): 2360-2368.)
- [15] Lin Z L, Huang Y S, Fang C C. Non-periodic preventive maintenance with reliability thresholds for complex repairable systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 136: 145-156.
- [16] Wang Y F, Li Z Y, Shahidehpour M, et al. Stochastic co-optimization of midterm and short-term maintenance outage scheduling considering covariates in power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(6): 4795-4805.
- [17] 史凯龙, 陆彪, 方玲珍, 等. 产能导向的三设备混联系统预防维护决策[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(11): 2813-2819.
(Shi K L, Lu B, Fang L Z, et al. Preventive maintenance decision for three-unit series-parallel system[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(11): 2813-2819.)
- [18] 刘学娟. 基于随机系数回归模型的退化过程及维修策略[J]. *控制与决策*, 2021, 36(3): 754-760.
(Liu X J. Degradation process and maintenance planning based on random coefficient regression model[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(3): 754-760.)
- [19] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 武汉: 华中工学院出版社,

- 1985: 165-169.
(Deng J L. Grey control system[M]. Wuhan: Press of Huazhong university of Sciences and Technology, 1985: 165-169.)
- [20] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用 [M]. 第9版. 北京: 科学出版社, 2021: 247-252.
(Liu S F. Grey systems and its applications[M]. The 9 edition. Beijing: Science Press, 2021: 247-252.)
- [21] 党耀国, 刘思峰, 刘斌. 基于区间数的多指标灰靶决策模型的研究[J]. 中国工程科学, 2005, 7(8): 31-35.
(Dang Y G, Liu S F, Liu B. Study on the multi-attribute decision model of grey target based on interval number[J]. Engineering Science, 2005, 7(8): 31-35.)
- [22] 王正新, 党耀国, 杨虎. 改进的多目标灰靶决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 2634-2636.
(Wang Z X, Dang Y G, Yang H. Improvements on decision method of grey target[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(11): 2634-2636.)
- [23] 蔡佳佳, 方志耕, 张秦, 等. 基于改进调节变量主成分权重的广义灰靶决策模型研究[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(11): 2991-2999.
(Cai J J, Fang Z G, Zhang Q, et al. Research on generalized grey target decision model based on principal component weight of improved regulating variables[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2020, 40(11): 2991-2999.)
- [24] 钱丽丽, 刘思峰, 邓桂丰. 考虑后悔规避的灰色群体偏离靶心度决策方法[J]. 中国管理科学, 2020, 28(6): 193-200.
(Qian L L, Liu S F, Deng G F. Grey off-target deviation degree method for group decision-making with regret aversion[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(6): 193-200.)
- [25] 刘中侠, 刘思峰, 蒋诗泉. 基于广义灰数的双向投影灰靶决策模型拓展研究[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(3): 776-782.
(Liu Z X, Liu S F, Jiang S Q. Study on the expansion of bidirectional projective grey target decision-making model based on general grey number[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2019, 39(3): 776-782.)
- [26] 张文杰, 袁红平. 基于多目标加权灰靶决策模型的节能服务公司选择研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(2): 179-186.
(Zhang W J, Yuan H P. A weighted multi-objective gray target decision model for selecting an optimum ESCO[J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(2): 179-186.)
- [27] 王大澳, 菅利荣, 刘思峰, 等. 基于Choquet积分的多属性灰靶群决策方法[J]. 控制与决策, 2017, 32(7): 1286-1292.
(Wang D A, Jian L R, Liu S F, et al. Approach for multi-attribute grey target group decision-making based on Choquet integral[J]. Control and Decision, 2017, 32(7): 1286-1292.)
- [28] 黎振宇, 陈晓国, 宋永超, 等. 二元联系数-投影灰靶决策理论在电网应急能力评估中的应用[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2021, 55(5): 927-934.
(Li Z Y, Chen X G, Song Y C, et al. Application of binary connection number-projection grey target decision theory in power system emergency capability evaluation[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2021, 55(5): 927-934.)
- [29] 刘中侠, 刘思峰, 蒋诗泉. 基于一般灰数的灰靶决策模型拓展与应用[J]. 统计与决策, 2019, 35(7): 72-75.
(Liu Z X, Liu S F, Jiang S Q. Extension and application of grey target decision model based on general graynumber[J]. Statistics & Decision, 2019, 35(7): 72-75.)
- [30] 张壮, 李琳琳, 魏振华, 等. 基于变权-投影灰靶的指控系统动态效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(4): 801-809.
(Zhang Z, Li L L, Wei Z H, et al. Dynamic effectiveness evaluation of command and control system based on variable weight-projection gray target[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(4): 801-809.)
- [31] 毕娟, 李希建. 基于博弈论组合赋权灰靶模型的煤矿安全综合评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(7): 113-118.
(Bi J, Li X J. Comprehensive evaluation of coal mine safety based on grey target model with combination weighting of game theory[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(7): 113-118.)
- [32] 王丽萍, 阎晓冉, 王渤权, 等. 基于多维关联抽样的区间数灰靶决策模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(6): 1610-1622.
(Wang L P, Yan X R, Wang B Q, et al. Interval number grey target decision-making model based on multi-dimensional association sampling and its application[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2019, 39(6): 1610-1622.)
- [33] 季孟忠, 项薇, 彭俊, 等. 基于负荷平衡的柔性预约决策[J]. 控制与决策, 2021, 36(1): 226-233.
(Ji M Z, Xiang W, Peng J, et al. Flexible outpatient appointment decision model with loading balance[J]. Control and Decision, 2021, 36(1): 226-233.)

作者简介

李强(1979—), 男, 工程师, 博士生, 从事生产装备运维管理的研究, E-mail: bluesku120@126.com;

刘思峰(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 从事灰色系统理论、复杂装备研制管理等研究, E-mail: sfliu@nuaa.edu.cn.