

高端装备单元化制造系统时间序列重要度分析

李海豹^{1,2}, 张帅^{1,2}, 赵江滨³

(1.西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072;
2.西北工业大学 工业工程与智能制造工信部重点实验室, 陕西 西安 710072;
3.西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要:针对高端装备单元化制造系统薄弱环节难以识别的问题,提出一种基于时间序列的重要度分析方法。该方法将特定时刻的传统重要度计算方法扩展到特定时间段内设备重要度,挖掘了设备可靠性、加工单元可靠性与系统可靠性的时间序列关系,利用线性拟合斜率评估设备的重要程度,提高了单元化制造系统制造过程关键设备的识别能力。通过设备退化相关参数灵敏度分析,总结了设备退化相关参数发生改变时设备的重要度变化规律,验证了时间序列重要度在识别关键设备和关键加工单元过程中的有效性。

关 键 词:单元化制造系统;设备;可靠性;时间序列;重要度模型;灵敏度分析

中图分类号:N945.17

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2023)05-0969-09

针对高端装备单元化制造系统,鉴于模型特殊性,传统重要度模型无法衡量系统中不同设备之间重要度差异,同时考虑到单元化制造系统加工零件过程是一个时间序列加工过程,本文将时间序列引入重要度模型,提出基于时间序列重要度。

重要度是指系统中一个或多个组件的状态变化对整个系统可靠性的影响,重要度可以通过识别系统的薄弱环节来合理分配资源,并为系统的可靠性提升和优化设计提供理论支撑。1969 年, Birnbaum 第一次提出二态系统的重要度分析方法,同时,其将重要度分成了 3 类:第一类为结构重要度;第二类为可靠性重要度;第三类为寿命重要度。

2011 年,司书宾等^[1]针对二态系统提出一种组(部)件综合重要度计算方法,通过定理证明了二态系统组(部)件综合重要度的物理意义。2016 年,兑红炎等^[2]探讨了重要度计算方法对装备可靠性鉴定试验优化的作用机理,提出了一种基于重要度理论的改进型装备可靠性鉴定试验优化方法。2017 年,任超等^[3]引入交叉熵方法计算全局重要性测度,解决传统重要抽样法存在重要抽样函数难以确

定的困难。2020 年, Mi 等^[4]提出了一种新的方法来量化系统中存在混合不确定性时常见原因故障的重要度。他用贝叶斯网络对概率共因故障进行建模,引入概率盒(边界分析法)对混合不确定性进行建模,并量化不确定性对系统可靠性的影响,最后通过数值算例验证了该方法的有效性。2021 年 Fu 等^[5]提出了一种在 T&D&C 网络相互依赖的背景下的组件重要性评估方法。其独特性在区域传输、分配和通信(T&D&C)系统中得到了验证。2022 年, Li 等^[6]提出了 7 个组件弹性重要性度量,并提出了一种基于蒙特卡罗的方法来分析上述弹性重要性度量,并以一个交通网络为例验证了该方法的有效性。同年, Barabadi 等^[7]考虑到由 1 台铲车和 6 辆卡车组成的采矿车队的操作环境的可用性重要度,使用 Cox 回归模型分析了考虑所有影响因素(协变量)的机器的可靠性和维修性特征。2022 年,白光晗等^[8]分别建立无人机集群在一维、二维空间的 Birnbaum 重要度和综合重要度分析模型,确定集群中的薄弱环节和关键无人机,并验证了其正确性和有效性。同年王子欣等^[9]结合基于复杂系统理论的电力通

收稿日期:2022-11-12 **基金项目:**国家自然科学基金重点项目(72231008)与陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JM-433)资助

作者简介:李海豹(1997—),西北工业大学硕士研究生,主要从事系统可靠性建模、重要度分析以及系统优化研究。

通信作者:张帅(1980—),西北工业大学教授,主要从事制造系统可靠性建模分析研究。e-mail:zhangshuai5000@nwpu.edu.cn

信网节点重要度评估指标集,提出基于正态云组合权重法与变权重系数的节点重要度评估机制,实现电力通信网节点重要度评估。

1 单元化制造系统可靠性建模

单元化制造系统中每个单元是一个典型的多阶段任务系统(phased-mission systems),即制造单元中每个设备的加工过程属于制造单元生产任务的一个阶段。多阶段任务系统是针对多个、连续和非重叠任务执行过程的系统描述。本文针对的系统由多个单元组成,每个单元内部有多台设备,单元内部设备串联连接。一套装备所有零件需要经过至少一个单元中的若干个设备的加工。

本文通过失效率分析系统中设备的退化过程,设备失效率是指设备在某一时刻处于正常状态,而在该时刻后单位时间内出现故障的概率,设备失效率能够描述设备寿命分布概率,描述设备加工性能状态,而且使用失效率作为设备退化过程的指标能够降低运算复杂度、提高计算效率。

基础退化过程是指在某阶段设备不参与加工零件的任务,即没有加工零件时设备处于正常的退化过程。加工退化过程是指在某阶段设备参与零件加工任务,设备受到不同被加工零件冲击的影响而处于动态的退化过程。

Weibull 分布能够灵活地描述递增、递减和稳定等不同的失效率形式,在基础退化与加工退化过程中,均采用 Weibull 分布作为机器连续递增失效率的分布函数。在加工退化过程中,设备在 t 时刻加工完成第 $N(t)$ 个零件,当前设备失效率增量可以表现为在该时刻之前设备完成加工的所有零件产生的失效率增量的累积,在时刻 t 加工完成第 $N(t)$ 件零件的设备可靠性为

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha_a}\right)^{\beta_a}} \prod_{i=1}^{N(t)} e^{-\frac{1}{\varepsilon_i} \left(\frac{t_i}{\alpha_b}\right)^{\beta_b}} \quad (1)$$

式中: t_i 表示设备加工完成零件 i 所花费的时间; $N(t)$ 表示到 t 时设备加工完成的零件数量。参数 α_a, β_a 分别为设备基础退化连续递增失效率的 Weibull 分布的尺度参数和形状参数,满足 $\beta_a > 1$, α_b, β_b 分别为设备加工退化失效率增量的 Weibull 分布的尺度参数和形状参数,满足 $\beta_b > 1$; ε_i 为不同零件对设备退化的影响系数, ε_i 取大于 0 的数。

鉴于单元内部设备为串联连接,在 t 时刻完成

所有加工任务的制造单元的可靠性是其内部所有设备的可靠性乘积,即为

$$P_{n,1}(t) = \prod_{i=1}^{N_n} R_i(t) \quad (2)$$

式中, N_n 表示单元中设备的数量。

任意时刻系统的可靠性由此时刻之前所有参与加工零件的设备不发生故障的概率表示。

根据问题描述做以下假设:

1) 高端装备的零件集已知,由多种零件组成,单元化制造系统由多个单元组成,每个单元有多台设备;

2) 整套装备在系统中加工工艺路径已知,在设备加工完成零件的时刻确定时,基础退化不变,本文不考虑基础退化部分参数变化;

3) 加工退化部分有 3 类可变参数,本文为简化计算过程,假设不同零件对同一设备造成退化影响的参数均相同;

4) 零件在系统加工过程中,其在设备上的加工时间是固定的,在单元中的加工时间也是固定的,其在单元中加工时间等于在此单元中所有参与加工的设备上加工时间之和;

5) 单元化制造系统只有一种状态,即整个系统中所有零件全部加工完成。

2 加工设备时间序列重要度分析方法

考虑实际情况,设备在加工零件前的状态是确定的,故基础退化部分与加工零件过程无关,仅与加工完工时刻有关。基础退化部分在工艺路径确定后,其值大小保持不变。任意时刻,设备累计加工退化失效率是可求的,所以设备以及整个单元化制造系统任意时刻的可靠性可求。

单元化制造系统加工过程中,单元中的设备可能加工 0 个、1 个或多个零件。如果设备不参与任何零件的加工,此设备重要度为 0;如果设备参与加工 1 个或者多个零件,那么此设备的可靠性变化对整个系统的可靠性有影响。对一个设备,假设其 t_1 时刻的可靠性为 x_{t_1} ,此时系统可靠性为 y_{t_1} , t_2 时刻的可靠性为 x_{t_2} ,此时系统的可靠性为 y_{t_2} , t_3 时刻的可靠性为 x_{t_3} ,此时系统的可靠性为 y_{t_3} , ..., 且整个系统全部零件加工完成需要的时间为 t_n ,那么在整个系统加工过程可求出 t_n 组设备和系统的可靠性组合,

记为: $(x_{t_1}, y_{t_1}), (x_{t_2}, y_{t_2}), (x_{t_3}, y_{t_3}), \dots$, 为了简化计算过程, 在计算设备的重要度过程中做以下假设:

- 1) 所取的时间点是离散的, 且时间点必须为所有单元中某单元加工完工时间。
- 2) 在取得的时间点上, 如果某单元仍在加工零件, 这时不考虑此单元中所有设备加工零件对设备以及系统的可靠性变化影响。

根据模型可知, 任意时刻设备的可靠性由基础退化和加工退化共同决定, 且单元中所有设备为串联连接, 故单元可靠性为所有设备的可靠性的乘积, 系统的可靠性为所有单元的可靠性乘积。任意时刻设备的可靠性不小于单元的可靠性, 单元的可靠性不小于系统的可靠性。

鉴于模型特殊性, 整个加工过程是一个时间序列, 狭义求偏导的重要度模型不能够很好描述本文中设备重要度。考虑到任意时刻系统可靠性小于设备可靠性, 系统可靠性很大程度上由所有设备中可靠性最小的设备决定, 即所有设备中可靠性最接近于系统可靠性的设备, 故基于设备可靠性和系统可靠性之间的距离给出设备重要度模型。根据分析, 对于某一个设备, 其基于时间序列重要度计算流程如下:

- 1) 获取单元化制造系统工艺路径、零件在设备上加工时间和基础退化与加工退化分布函数的参数值;
- 2) 根据工艺路径寻找设备所在的单元加工完零件的时间点 $t_1, t_2, t_3 \dots$ (设备在单元中参与零件的加工);
- 3) 计算 t_1 时刻设备的可靠性 x_{t_1} , 系统的可靠性 y_{t_1} , 并记录为 (x_{t_1}, y_{t_1}) ;
- 4) 判断设备是否还需要加工零件;
- 5) 若还需要加工零件, 那么选择下一个时间点并返回步骤 3);
- 6) 若不需要加工零件, 利用公式(3)计算重要度, 或使用计算机进行一元线性拟合;
- 7) 通过公式(3)求得的结果或将曲线斜率记录为此设备在整个系统加工过程中基于时间序列设备的重要度值。

根据设备的可靠性和系统可靠性关系可知, 当设备重要度值大于 1 时, 设备重要度值越小, 设备的可靠性越接近于系统的可靠性, 单位设备的可靠性变化会导致系统的可靠性变化更大, 系统的可靠性受设备的可靠性影响越大, 即设备越重要。当设备

重要度小于 1 时, 即重要度为 0, 此时设备不参与整套装备的加工过程。

$$I = \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x}) \cdot (y_t - \bar{y})}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \tag{3}$$

式中: x_t 表示不同时间点设备的可靠性; y_t 表示对应时间点系统的可靠性; n 表示时间点总数; $\bar{x}, \bar{y}$ 分别表示多个时刻设备的可靠性均值和系统的可靠性均值; I 表示基于时间序列重要度值。

考虑到实际生产过程中系统中的设备过多, 如果逐个设备计算重要度会导致计算过程过于繁琐, 故为简化计算过程, 对于整个系统所有设备, 其基于时间序列重要度计算流程如下:

- 1) 获取单元化制造系统工艺路径、零件在设备上加工时间和基础退化与加工退化分布函数的参数值;
- 2) 根据工艺路径相对均匀选择若干个时间点;
- 3) 计算每一个时间点上所有设备的可靠性和系统的可靠性值, 并记录;
- 4) 对每个设备所有记录数据进行筛选, 筛选准则为: 以设备的可靠性数据为筛选依据, 当某个时间点设备的可靠性值与上一个时间点设备的可靠性值相同时, 说明上一个时间点到此时间点之间的这段时间中设备没有加工零件, 删除此时间点对应的设备的可靠性值和系统的可靠性值, 在最终筛选后的数据中, 不同时间设备的可靠性值均不同;
- 5) 利用公式(3)计算所有设备的重要度, 或使用计算机进行一元线性拟合;
- 6) 通过公式求得的值或将曲线斜率记录为此设备在整个系统加工过程中基于时间序列设备重要度。

基于前文所述求整个系统所有设备的重要度流程图如图 1 所示。

本节以 1 个 10 个单元的加工系统为例, 其中每个单元中有 4 台设备, 加工 1 套装备, 计算所有设备的重要度, 具体计算过程如下:

- 1) 获取装备加工工艺路径、零件在设备上加工时间(见表 1)和零件对设备退化影响系数。

基础退化部分服从 Weibull 分布, 参数为 $\alpha_a = 1.8 \times 10^3, \beta_a = 3.00$, 加工退化过程服从 Weibull 分布, 且有 3 类参数, 分别为 $\alpha_b, \beta_b, \varepsilon$, 对于每个单元每个设备来说, 这 3 类参数大小各不相同, 本节为简化

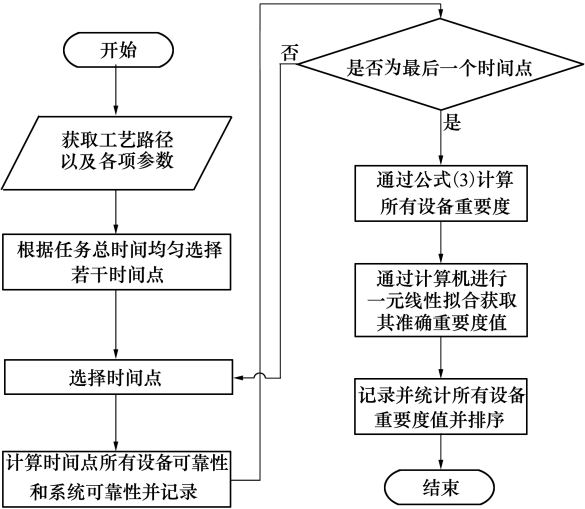


图 1 设备重要度求解流程图

计算过程,考虑其参数对所有设备均相同,分别为 $\alpha_b = 2.3 \times 10^3, \beta_b = 2.17, \varepsilon = 1.25$ 。

2) 根据工艺路径选择设备所在的单元加工完成零件的时间点,由于所要计算的设备在本例中有 40 个,所以不考虑逐个求设备的重要度。根据本例中总时间大小,相对均匀选取 10 个时间点,分别为: 35, 70, 105, 139, 170, 209, 239, 279, 324 和 349。

3) 计算时间点设备的可靠性 x_i , 系统可靠性 y_i , 并记录为 (x_i, y_i) , 如单元 1 中 1 设备在时间点为 35 时设备的可靠性 $x_{35} = 1.000\ 0$, 此时系统的可靠性 $y_{35} = 1.000\ 0$, 记录为 $(1.000\ 0, 1.000\ 0)$; 时间点为 70 时设备的可靠性 $x_{70} = 1.000\ 0$, 此时系统的可靠性 $y_{70} = 0.999\ 9$, 记录为 $(1.000\ 0, 0.999\ 9)$; 时间点为 105 时设备的可靠性 $x_{105} = 0.999\ 8$, 此时系统的可靠性 $y_{105} = 0.998\ 6$, 记录为 $(0.999\ 8, 0.998\ 6)$; 时间点为 139 时设备的可靠性 $x_{139} = 0.999\ 4$, 此时系统的可靠性 $y_{139} = 0.993\ 9$, 记录为 $(0.999\ 4, 0.993\ 9)$ 。当多个时间点对应的设备的可靠性相同时,取最前面一个时间点的数据,其余数据全部舍弃。单元 1 设备 1 在时刻 35 和时刻 70 数据看起来相同,但是实际并不相同,保留小数点后 4 位不能体现其差异,由于实际数据并不相同,所以这里不能舍弃时刻 70 对应的数据。最终求得所有设备的可靠性和系统的可靠性如表 2 所示。

4) 利用所记录的设备的可靠性和系统的可靠性拟合曲线。以 1 单元 1 设备为例,经过筛选后一共有 4 个点,第一个为 $(1.000\ 0, 1.000\ 0)$, 第二个为 $(1.000\ 0, 0.999\ 9)$, 第三个为 $(0.999\ 8, 0.998\ 6)$ 第

四个点为 $(0.999\ 4, 0.993\ 9)$, 故单元 1 设备 1 重要度可通过公式(3)求得

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 11.07$$

表 1 不同设备加工不同零件的加工时间

制造单元	加工零件	设备 1	设备 2	设备 3	设备 4
1	10	14	15	12	0
1	1	14	15	12	0
1	9	15	18	12	0
2	11	10	12	18	7
2	8	10	12	18	7
2	7	10	12	18	7
3	13	14	14	18	0
3	11	8	12	14	0
3	12	14	14	18	0
3	10	8	5	10	0
3	1	8	5	10	0
3	14	14	14	18	0
3	7	8	12	14	0
3	8	8	12	14	0
4	9	14	12	11	0
5	2	11	5	10	9
5	6	11	5	10	9
5	5	11	5	10	9
6	3	13	12	12	0
6	4	13	12	12	0
7	13	16	18	10	0
7	12	16	18	10	0
7	14	16	18	10	0
8	11	11	9	12	0
8	2	13	11	12	0
8	5	13	11	12	0
8	6	13	11	12	0
8	7	11	9	12	0
8	8	11	9	12	0
9	3	12	13	13	13
9	4	12	13	13	13
9	13	7	5	6	7
9	2	10	10	12	13
9	5	10	10	12	13
9	12	7	5	6	7
9	6	10	10	12	13
9	14	7	5	6	7
10	3	9	10	7	0
10	9	14	11	13	0
10	4	9	10	7	0
10	10	15	16	15	0
10	1	15	16	15	0

表 2 所有设备及系统不同时刻可靠性表

单元	设备	时刻									
		35	70	105	139	170	209	239	279	324	329
1	1	1.000 0	1.000 0	0.999 8	0.999 4	0.999 4	0.999 4	0.999 4	0.999 4	0.999 4	0.999 4
	2	1.000 0	0.999 9	0.999 8	0.999 4	0.999 4	0.999 4	0.999 4	0.999 4	0.999 4	0.999 4
	3	1.000 0	1.000 0	0.999 8	0.999 5	0.999 5	0.999 5	0.999 5	0.999 5	0.999 5	0.999 5
	4	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2	1	1.000 0	1.000 0	0.999 8	0.999 8	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3
	2	1.000 0	1.000 0	0.999 8	0.999 8	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3
	3	1.000 0	0.999 9	0.999 7	0.999 7	0.999 2	0.999 2	0.999 2	0.999 2	0.999 2	0.999 2
	4	1.000 0	1.000 0	0.999 8	0.999 8	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3
3	1	1.000 0	1.000 0	0.999 8	0.999 5	0.998 6	0.997 4	0.995 7	0.992 6	0.988 1	0.982 1
	2	1.000 0	1.000 0	0.999 8	0.999 5	0.998 6	0.997 4	0.995 6	0.992 5	0.988 1	0.982 0
	3	1.000 0	1.000 0	0.999 8	0.999 5	0.998 6	0.997 3	0.995 6	0.992 4	0.988 0	0.981 9
	4	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
4	1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	2	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	3	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	4	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
5	1	1.000 0	0.999 9	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7
	2	1.000 0	0.999 9	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7
	3	1.000 0	0.999 9	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7
	4	1.000 0	0.999 9	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 7
6	1	1.000 0	1.000 0	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9
	2	1.000 0	1.000 0	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9
	3	1.000 0	1.000 0	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9
	4	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
7	1	1.000 0	0.999 9	0.999 8	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3
	2	1.000 0	0.999 9	0.999 7	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 3
	3	1.000 0	1.000 0	0.999 8	0.999 4	0.999 4	0.999 4	0.999 4	0.999 4	0.999 4	0.999 4
	4	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
8	1	1.000 0	1.000 0	0.999 9	0.999 6	0.999 0	0.997 8	0.996 0	0.993 3	0.993 3	0.993 3
	2	1.000 0	1.000 0	0.999 9	0.999 6	0.999 0	0.997 9	0.996 1	0.993 3	0.993 3	0.993 3
	3	1.000 0	1.000 0	0.999 9	0.999 6	0.999 0	0.997 8	0.996 0	0.993 3	0.993 3	0.993 3
	4	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
9	1	1.000 0	1.000 0	0.999 9	0.999 4	0.998 6	0.997 0	0.997 0	0.990 5	0.984 7	0.977 6
	2	1.000 0	1.000 0	0.999 9	0.999 4	0.998 6	0.997 0	0.997 0	0.990 5	0.984 7	0.977 6
	3	1.000 0	1.000 0	0.999 9	0.999 4	0.998 6	0.997 0	0.997 0	0.990 5	0.984 7	0.977 5
	4	1.000 0	1.000 0	0.999 9	0.999 4	0.998 6	0.997 0	0.997 0	0.990 5	0.984 7	0.977 5
10	1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.999 7	0.998 9	0.997 7	0.995 3	0.995 3	0.991 4	0.991 4
	2	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.999 7	0.998 9	0.997 7	0.995 3	0.995 3	0.991 4	0.991 4
	3	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.999 7	0.998 9	0.997 7	0.995 4	0.995 4	0.991 4	0.991 4
	4	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
系统		1.000 0	0.999 9	0.998 6	0.993 9	0.984 1	0.967 4	0.950 3	0.909 5	0.866 1	0.825 7

由于加工退化对设备的可靠性影响很小,短时间设备的可靠性值变化会很小,计算过程中小数保留过少会影响计算精度,保留过多会增加计算量,同时为了更形象地展现基于时间序列设备重要度,使用计算机对其重要度进行一元线性拟合,如图 2 所示。

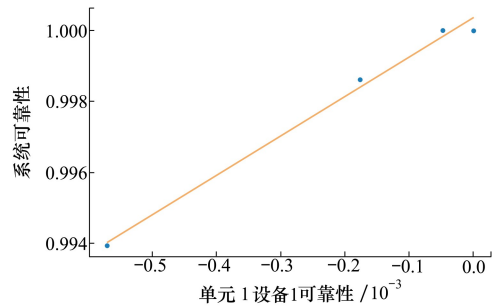


图2 单元1中设备1的重要度拟合图

根据表2中所有设备和系统不同时间点的可靠性值可求系统中所有设备基于时间序列设备重要度值,其结果如表3所示。

表3 设备的重要度值

单元	设备	重要度	单元	设备	重要度
1	1	11.07	6	1	10.89
	2	10.54		2	11.64
	3	11.73		3	11.64
	4	0		4	0
2	1	23.84	7	1	9.49
	2	23.08		2	9.00
	3	20.32		3	10.79
	4	24.71		4	0
3	1	10.13	8	1	13.21
	2	10.11		2	13.30
	3	10.05		3	13.22
	4	0		4	0
4	1	24.6	9	1	8.00
	2	0		2	8.00
	3	36.08		3	7.99
	4	0		4	7.98
5	1	5.05	10	1	14.71
	2	5.68		2	14.70
	3	5.18		3	14.74
	4	5.29		4	0

由表3设备的重要度值可知,当设备在整个任务加工过程中不参与任何零件的加工时,其重要度值为0;对于其他在整个系统加工过程中至少参与1次零件加工的设备,在拟合图上至少有2个点,其重要度不为0;同一单元内部的设备的重要度非常接近,原因在于同一单元内部的设备为串联连接,且零件进入单元内部大多数都要经过相同的设备加工,同一单元内部设备基础退化相同,同时为了简化计算,统一影响加工退化部分的3类参数,故同一单元内部的设备的可靠性仅受加工时间的影响,故同一单元内部设备的重要度值差别不大。不同单元之间由于加工时间点不同,不同单元之间的设备的重要度差异较大。

3 设备时间序列重要度灵敏度分析

本小节以第2节案例分析加工退化部分参数变化时设备的重要度变化规律,由于本例中设备数量很多(40台),故从每个单元中选取1台设备。为了保证选取设备尽量均匀,故10台设备分别选取1单元1设备、2单元4设备、3单元2设备、4单元2设备、5单元4设备、6单元3设备、7单元2设备、8单元3设备、9单元4设备和10单元1设备,分别标记为1.1,2.4,3.2,4.2,5.4,6.3,7.2,8.3,9.4和10.1。由于不考虑基础退化部分参数变化,故本节将 $\varepsilon, \alpha_i, \beta_i$ 简写为 $\varepsilon, \alpha, \beta$ 。

1) ε 变化时设备的重要度变化规律

ε 初始值为1.25,以最小值1,最大值10均匀设置10个值分析零件对设备退化影响系数 ε 变化时,设备的重要度变化规律,10个单元中10台设备的重要度变化规律如表4和图3所示。

表4 不同 ε 设备的重要度值

设备	ε									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.1	11.424	9.888	8.513	7.612	7.059	6.713	6.489	6.336	6.228	6.149
2.4	24.505	25.647	27.283	29.047	30.653	31.968	32.972	33.705	34.219	34.563
3.2	10.123	10.144	10.178	10.220	10.266	10.307	10.338	10.352	10.344	10.312
4.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.4	5.051	6.236	7.509	8.514	9.223	9.711	10.053	10.302	10.490	10.639
6.3	12.561	9.500	7.905	7.156	6.774	6.562	6.436	6.360	6.313	6.285
7.2	9.501	7.423	5.901	5.041	4.558	4.271	4.091	3.972	3.889	3.830
8.3	13.243	13.107	12.888	12.610	12.301	11.985	11.676	11.383	11.107	10.847
9.4	7.977	8.007	8.056	8.122	8.199	8.280	8.358	8.426	8.479	8.511
10.1	14.744	14.581	14.319	13.985	13.609	13.216	12.824	12.444	12.080	11.733

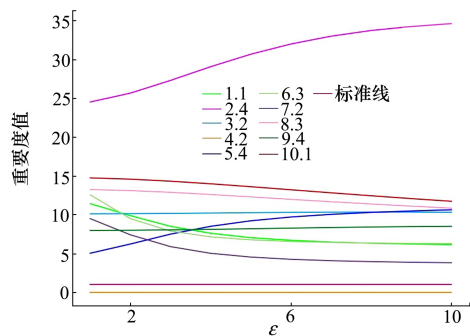


图 3 设备重要度变化规律

设备基础退化参数和加工退化参数 α, β 不变

表 5 不同 α 设备重要度值

设备	α									
	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	7 000	8 000	9 000	10 000
1.1	8.659	10.790	11.477	11.744	11.872	11.941	11.983	12.009	12.028	12.041
2.4	7.495	10.134	11.127	11.537	11.737	11.847	11.914	11.957	11.987	12.008
3.2	10.584	11.628	11.887	11.979	12.022	12.044	12.058	12.067	12.073	12.077
4.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.4	22.631	23.736	23.955	24.031	24.065	24.083	24.094	24.101	24.105	24.109
6.3	19.677	22.761	23.511	23.783	23.908	23.976	24.016	24.042	24.059	24.072
7.2	12.493	19.301	21.776	22.779	23.264	23.530	23.691	23.795	23.866	23.916
8.3	27.064	24.922	24.473	24.316	24.244	24.205	24.182	24.168	24.158	24.151
9.4	10.173	10.130	10.122	10.120	10.118	10.118	10.117	10.117	10.117	10.117
10.1	10.106	10.114	10.115	10.116	10.116	10.116	10.116	10.116	10.116	10.116

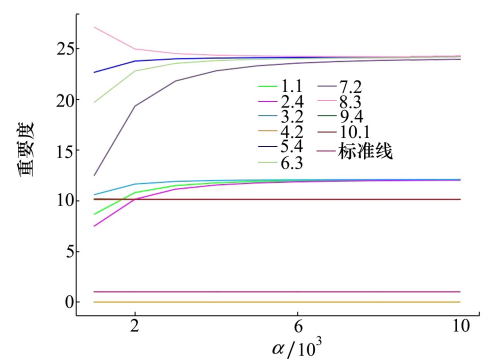


图 4 设备重要度变化规律

当设备基础退化部分各项参数以及加工退化部分参数 ε, β 不变时,随着 α 在 (1 000, 10 000) 之间增大,系统中部分设备的重要度增大,另外一部分的设备重要度减小。根据图 4 可知,不同单元中的设备重要度基本保持单调,但趋势并不相同,同时,部分设备的可靠性曲线基本水平,部分设备可靠性曲线变化较为明显。

时,随着 ε 增大,部分设备的重要度增大,部分设备的重要度减小。曲线越靠近于标准线,其重要度值越大;当系统中设备数量不变时,随着 ε 值增大,其中一个设备重要度增大,总有其他设备重要度要减小以保持均衡。根据图 3 可知,大部分曲线在标准线上,少数曲线在标准线下,据重要度模型知,重要度值大于 1 的设备比重要度值小于 1 的设备更重要。

2) α 变化时设备的重要度变化规律

α 的初始值为 2 300,现在 (1 000, 10 000) 之间均匀设置 10 个值分析参数 α 值变化时设备重要度变化规律,其结果如表 5 和图 4 所示。

3) β 变化时设备的重要度变化规律

β 的初始值为 2.17,现在 (1.2, 3) 之间均匀设置 10 个值分析参数 β 值变化时设备的重要度变化规律,其结果如图 5 及表 6 所示。

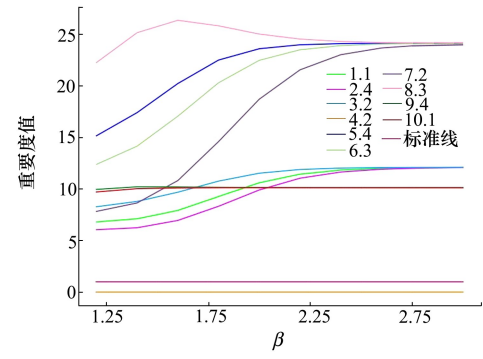


图 5 设备重要度变化规律

当设备基础退化各项参数以及加工退化影响参数 ε, α 不变时,随着 β 在 (1.2, 3) 之间增大,部分设备的重要度增大,部分设备的重要度减小,部分设备

的重要度先增大后减小,无确定规律可循。

表 6 不同 β 设备重要度值

设备	β									
	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
1.1	6.793	7.098	7.909	9.258	10.592	11.425	11.819	11.985	12.051	12.077
2.4	6.042	6.229	6.940	8.313	9.894	11.033	11.633	11.903	12.016	12.062
3.2	8.265	8.784	9.675	10.753	11.520	11.879	12.017	12.067	12.084	12.090
4.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.4	15.145	17.395	20.213	22.489	23.587	23.970	24.084	24.115	24.122	24.123
6.3	12.372	14.142	17.046	20.287	22.464	23.484	23.888	24.038	24.092	24.111
7.2	7.814	8.635	10.804	14.587	18.696	21.540	23.006	23.659	23.934	24.046
8.3	22.244	25.143	26.344	25.809	25.009	24.524	24.293	24.193	24.151	24.134
9.4	9.951	10.200	10.187	10.153	10.132	10.123	10.119	10.117	10.117	10.116
10.1	9.700	10.020	10.092	10.109	10.114	10.115	10.116	10.116	10.116	10.116

4 加工设备时间序列重要度工程意义

单元化制造系统中,所有零件加工工艺路径已知,设备加工零件数量、种类以及加工时间已知,在加工过程中,设备无法被替代,设备发生故障时无法维修。任意设备故障时,系统故障,系统的可靠性为 0,同时由于设备为二态,1 表示设备正常工作,0 表示设备发生故障,故第 i 个设备处于工作状态时,即设备 i 处于 1 状态时系统正常工作的条件概率为 $P_r(S = W|a_i = 1)$,设备 i 发生故障时,即设备 i 处于 0 状态时系统正常工作的条件概率为 $P_r(S = W|a_i = 0)$,根据模型可知,所有设备处于正常工作状态下系统正常工作的条件概率都相同,其值为系统的可靠性;设备发生故障时,系统正常工作的条件概率都为 0,故对本模型,设备重要度均相同,所以传统重要度模型无法衡量设备重要度差异。考虑到整个系统加工过程是一个时间序列加工过程,将时间序列

引入重要度模型,根据分析,基于时间序列重要度模型能够衡量系统中不同设备之间的重要度差异,故基于时间序列重要度模型能够很好地适用于高端装备单元化制造系统。

5 结 论

本文针对单元化制造系统,考虑到传统重要度模型无法衡量单元化制造系统中不同设备之间重要度的差异问题,结合单元化制造系统其生产制造过程是一个时间序列制造过程的特点,提出基于时间序列重要度模型,通过案例分析,验证基于时间序列重要度模型可行性。根据全文分析总结如下:①基于时间序列重要度模型能够很好衡量不同设备之间的重要度差异;②设备重要度值越接近于 1 表示设备越重要,重要度值大于 1 的设备比重要度值小于 1 的设备重要;③同一单元内部的设备重要度值差异较小,不同单元设备之间的重要度差别较大。

参考文献:

[1] 司书宾,杨柳,蔡志强,等. 二态系统组(部)件综合重要度计算方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(6): 939-947
SI Shubin, YANG Liu, CAI Zhiqiang, et al. A new and efficient computation method of IM(integrated importance measures) for components in binary coherent systems[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(6): 939-947 (in Chinese)

[2] 兑红炎,陈立伟,陈刚. 基于重要度的改进型装备可靠性鉴定试验优化方法[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(4): 571-577
DUI Hongyan, CHEN Liwei, CHEN Gang. Optimization method of improved equipment reliability analysis test based on importance measure[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(4): 571-577 (in Chinese)

[3] 任超,李洪双. 基于失效概率的全局重要性测度分析的交叉熵方法[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(3): 536-544
REN Chao, LI Hongshuang. Cross-entropy method for failure probability bsaed global importance mesaure analysis[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017,35(3): 536-544 (in Chinese)

[4] MI J, LI Y F, BEER M, et al. Importance measure of probabilistic common cause failures under system hybrid uncertainty based on Bayesian network[J]. Maintenance and Reliability, 2020, 22(1): 111-120

[5] FU T, WANG D, FAN X, et al. Component importance and interdependence analysis for transmission, distribution and communication systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 8(2): 488-498

[6] LI R, GAO Y. On the component resilience importance measures for infrastructure systems[J]. International Journal on Critical Infrastructure Protection, 2022, 36: 100481

[7] BARABADI A, QARAHASANLOU A N, HAZRATI A, et al. Availability importance measure for various operation condition [C]//International Congress and Workshop on Industrial AI, 2022

[8] 白光哈, 张驰, 兑红炎, 等. 无人机集群任务可靠性建模及重要度分析[J]. 机械工程学报, 2022, 58(10): 361-373
BAI Guanghan, ZHANG Chi, DUI Hongyan, et al. Mission reliability modeling and importance measurement analysis of UAV swarm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(10): 361-373 (in Chinese)

[9] 王子欣, 苗世洪, 郭舒毓, 等. 基于复杂系统理论的电力通信耦合网络模型构建及节点重要度评估方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 84-94
WANG Zixin, MIAO Shihong, GUO Shuyu, et al. Construction of power communication coupling network model and node importance evaluation method based on complex system theory[J]. High Voltage Technology, 2022, 48(1): 84-94 (in Chinese)

Analysis of time series importance measure of high-end equipment cellular manufacturing system

LI Haibao^{1,2}, ZHANG Shuai^{1,2}, ZHAO Jiangbin³

(1.School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.Key Laboratory of Industrial Engineering and Intelligent Manufacturing of MIIT, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3.School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Aiming at the problem to difficultly identify the weak links of the cellular manufacturing system, a method for analyzing the importance measure based on the time series is proposed. The method extends the traditional importance measure calculation method at a specific time to the equipment importance measure in a specific time period, and the time series relationship among the equipment reliability, manufacturing cell reliability and system reliability is mined. It uses the slope of linear fitting to evaluate the importance measure of the equipment, and improves the identification ability of key equipment in the manufacturing process of the cellular manufacturing system. Through the sensitivity analysis of equipment degradation parameters, the change rule of the equipment importance measure when the equipment degradation parameters change is summarized, and the effectiveness of the time series importance measure in the identification of the key equipment and key manufacturing cells is verified.

Keywords: cellular manufacturing system; equipment; reliability; time series; importance measure model; sensitivity analysis

引用格式:李海豹, 张帅, 赵江滨. 高端装备单元化制造系统时间序列重要度分析[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(5): 969-977

LI Haibao, ZHANG Shuai, ZHAO Jiangbin. Analysis of time series importance measure of high-end equipment cellular manufacturing system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(5): 969-977 (in Chinese)