

# 基于 DEMATEL-ISM 的复杂制造系统故障致因分析

夏建华, 王红军

(北京信息科技大学 机电工程学院 北京 100192)

**摘 要:** 针对复杂制造系统故障机理错综复杂, 具有层次性、潜伏性、因果性、脆性的现状, 提出了一种基于决策实验室分析法和解释结构模型( DEMATEL-ISM) 的车间故障关键致因因素定量分析方法。该方法从人员、设备、环境、物料、管理等 5 个方面选取故障致因因素进行分析, 计算出各致因因素的中心度和原因度, 确定各因素的重要度, 利用 ISM 构建五层次的生产线故障致因因素多级递阶模型, 并与 DEMATEL 方法得出的结论进行对比。结合成飞某集团生产现状, 验证 DEMATEL-ISM 方法在复杂系统中的适用性, 并取得良好效果。

**关键词:** 决策实验室分析法和解释结构模型; 系统; 致因因素; 多级递阶模型

中图分类号: TH 186 文献标志码: A

## Fault cause analysis of complex manufacturing system based on DEMATEL-ISM

XIA Jianhua, WANG Hongjun

(Mechanical Electrical Engineering School, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In view of the complex fault mechanism of complex manufacturing system, which is hierarchical, latent, causal and fragile, a quantitative analysis method on critical fault factors of processing workshop based on DEMATEL-ISM is put forward. The fault factors of processing workshop are identified from five dimensions including human, equipment, environment, material and management. The centrality and cause of each fault factors are analyzed, and the importance level is determined. In the method, a multi-level hierarchical model of fault cause factors in five levels is built and the conclusion is compared with DEMATEL. Combined with example analysis, the applicability of integrated DEMATEL-ISM in complex system is verified, and good results are obtained.

**Keywords:** DEMATEL-ISM; system; cause factor; multi-level hierarchical model

## 0 引言

随着现代制造业朝着大型化、柔性化、智能化发展, 故障原因更加错综复杂。为了了解导致故障发生的机理, 本文以复杂制造系统为载体, 引入 DEMATEL-ISM 方法分析系统的安全性、系统的整体涌现性的关系、各子系统的可靠性与各子系统之间的非功能性交互作用、内外界各因素相互干扰和冲击的结果对故障的影响。

在复杂制造系统的故障分析方面, 目前常用的技术有故障树分析<sup>[1-2]</sup>、事件树<sup>[3]</sup>分析、HAZOP 方法<sup>[4]</sup>、FMECA<sup>[5-6]</sup>等。尉玉峰等<sup>[7]</sup>提出了一种融合 Petri 网与故障树的系统故障建模方法, 对系统故障进行定性定量的分析, 提高了故障诊断的正确率; 郝庆波等<sup>[8]</sup>提出了一种引入区间层次分析的数控机床可靠性预计方法, 实现了整机确定性信息和模糊信息的互补; 柳剑等<sup>[9]</sup>将脆性理论与多状态制造系统相结合对复杂制造系统的工作性能状态与实际稳态可靠度等方面进行了分析; 林雯雯<sup>[10]</sup>等针对生产

收稿日期: 2017-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575055); “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项资助项目(2015ZX04001002)

作者简介: 夏建华, 女, 硕士研究生; 通讯作者: 王红军, 女, 博士, 教授。

线的设备选型选用了基于模糊隶属度和灰度的可靠性分配方法。这些研究为故障事故的预防与控制奠定了良好的理论基础。但这些方法主要针对单台设备的机械性故障,对于复杂系统的故障原因多样化、潜伏性、因果性、脆性的状况研究较少。

针对以上问题,本文提出一种结合决策实验室分析法<sup>[11]</sup>和解释结构模型<sup>[12]</sup>的方法进行分析。利用决策实验室分析法建立故障关键致因因素体系,采用中心度和层次分析相结合的方法,研究故障因素间的相互作用,确定关键致因因素;利用解释结构模型对故障致因因素进行递阶层次划分,确定引起故障发生的根本致因因素。通过成飞某集团生产线实例验证该方法的有效性。

## 1 系统建模

### 1.1 决策实验室分析法

#### 1.1.1 确定直接影响矩阵

复杂制造系统发生故障的致因因素分为人员、设备、环境、物料、管理五大类,细分为 12 项,分别标记为  $a_1, a_2, \dots, a_{12}$ 。由专家经验获得复杂制造系统致因因素间的直接影响矩阵  $B = [\beta_{ij}]_{n \times n}$ :

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \beta_{12} & \dots & \beta_{1n} \\ \beta_{21} & 0 & \dots & \beta_{2n} \\ \vdots & \vdots & 0 & \vdots \\ \beta_{n1} & \beta_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\beta_{ij}$  为致因因素  $a_i$  对  $a_j$  的直接影响程度(根据较强、强、一般、弱、无等分为 5 个等级,分别赋值 4、3、2、1、0 来表示),其中  $a_{ij} \neq a_{ji}$ ,当  $i = j$  时,  $a_{ij} = 0$ 。

#### 1.1.2 计算综合影响矩阵 $T$

对直接影响矩阵进行规范化处理,得到规范化直接影响矩阵  $C (C = [c_{ij}])$

$$C = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n \beta_{ij}} B \quad (2)$$

直接影响矩阵  $C$  只表示故障因素间的直接影响结果。而实际问题中还要考虑到致因因素间的间接影响关系。综合影响矩阵  $T$  表示致因因素间直接影响结果和间接影响结果的累计,即

$$T = C + C^2 + \dots + C^m \approx C(I - C)^{-1} \quad (3)$$

#### 1.1.3 计算致因因素的影响度 $f_i$ 和被影响度 $e_i$

由式(3)得到综合影响矩阵,将矩阵  $T$  中的元素按行相加得到相应的影响度  $f_i$ ,按列相加得到相应的被影响度  $e_i$ ,即

$$f_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$e_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

影响度  $f_i$  表示因素  $a_i$  对其他所有因素的综合影响结果,被影响度  $e_i$  表示其他所有因素对  $a_i$  的综合影响结果。

#### 1.1.4 计算中心度 $M_i$ 和原因度 $N_i$

$$M_i = f_i + e_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$N_i = f_i - e_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

中心度  $M_i$  为综合矩阵中第  $i$  行和第  $i$  列之和,表示故障致因因素  $a_i$  对所有致因因素的影响和受其他故障致因因素影响作用的综合结果;中心度  $M_i$  代表故障致因因素的重要程度,中心度越大,致因因素越重要。原因度  $N_i$  为综合矩阵中第  $i$  行和第  $i$  列之差,表示故障致因因素  $a_i$  对其它致因因素的净影响。原因度  $N_i$  若为正,表示致因因素对其他因素的影响大,为原因因素;若为负,表示致因因素受其他因素的影响大,为结果因素。

### 1.2 解释结构模型

#### 1.2.1 计算可达矩阵 $K (K = [k_{ij}]_{n \times n})$

致因因素的综合影响矩阵加上因素对自身的影响作用,可以算出整体影响矩阵  $H (H = [h_{ij}]_{n \times n})$

$$H = I + T \quad (8)$$

其中  $I$  为单位矩阵。

对整体影响矩阵进行如下处理:选取合适阈值  $\lambda$ ,计算可达矩阵  $K (K = [k_{ij}]_{n \times n})$

$$k_{ij} = 1, \text{ if } h_{ij} \geq \lambda (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

$$k_{ij} = 0, \text{ if } h_{ij} < \lambda (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

#### 1.2.2 确定故障致因因素节点度

故障致因因素的节点度可以用于分析故障因素的重要程度。在可达矩阵中致因因素  $a_i$  节点度是指与  $a_i$  相关联的因素,即为  $a_i$  所在行与列中为 1 的个数。

#### 1.2.3 对可达矩阵进行级间划分

若可达矩阵中第  $i$  行中所有为 1 的元素集合为  $R_i$ ,在第  $i$  列中所有为 1 的元素集合为  $S_i$ ,且有  $R_i = R_i \cap S_i$  成立,则定义致因因素  $a_i$  是位于高层级的致因因素,然后划除第  $i$  行和第  $i$  列。各层次的致因因素的层次划分按此依次划分,直到划除所有因素。

## 2 故障致因因素递阶层次模型应用

某飞机结构件钛合金加工中心柔性生产线是一个集加工设备、物流系统、柔性生产线数字化管理系

统于一体的复杂系统,其布局如图 1 所示。

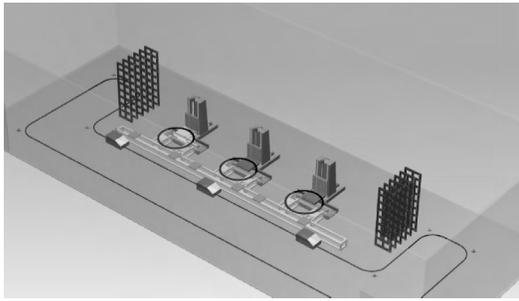


图 1 柔性生产线布局示意图

生产线发生意外故障的原因各式各样,根据该加工中心专家经验,该复杂制造系统故障的致因因素分为人员、设备、环境、物料、管理五大类,细分为 12 类致因因素:专业操作技能  $a_1$ 、安全意识  $a_2$ 、控制装置的有效性  $a_3$ 、设备部件故障  $a_4$ 、预警设备可靠性  $a_5$ 、设备检修保养  $a_6$ 、机床清洁  $a_7$ 、物料存储  $a_8$ 、物料搬运  $a_9$ 、员工培训  $a_{10}$ 、安全监督  $a_{11}$ 、信息交互处理  $a_{12}$ ,如图 2 所示。

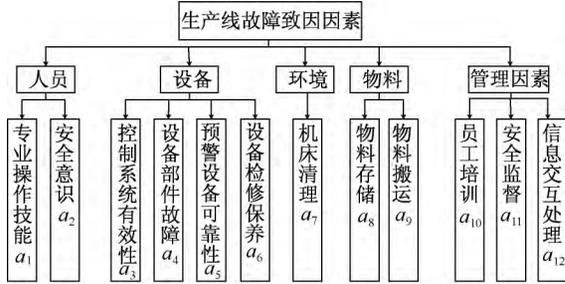


图 2 柔性生产线系统故障致因因素

根据故障致因因素间的相互影响程度,确定直接影响因子,得出如表 1 所示的直接影响矩阵。对直接影响矩阵按照式(2)进行规范化处理,然后根据式(3)求得综合影响矩阵如表 2 所示。

表 1 故障致因因素直接影响矩阵

Table with 12 columns (a1-a12) and 12 rows (a1-a12) showing direct influence matrix values.

按照式(4)、(5)、(6)、(7)求故障致因因素的影响度、被影响度、中心度、原因度。以中心度为横坐标,原因度为纵坐标,绘制如图 3 所示原因结果图。

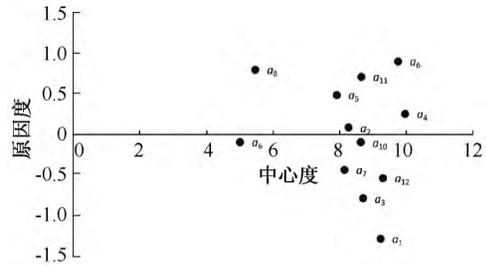


图 3 故障因素原因结果图

由图 3 可以看出所有故障致因因素都是相互影响,紧密相关的。原因度大于 0 的为原因因素,小于 0 的为结果因素,依据中心度的大小可以判断故障致因因素的重要程度。其中中心度最大的为设备部件故障  $a_4$ ,其次依次为设备检修保养  $a_6$ 、信息交互处理  $a_{12}$ 、专业操作技能  $a_1$ ,选取前 4 个因素定为关键致因因素。其中设备部件故障  $a_4$ ,设备检修保养  $a_6$  最易导致其他因素产生安全隐患,为原因因素;

表 2 综合影响矩阵

Table with 12 columns (a1-a12) and 12 rows (a1-a12) showing the integrated influence matrix values.

信息交互处理  $a_{12}$ 、专业操作技能  $a_1$  易受其他因素影响激发安全隐患,为结果因素。

按照式(8)、(9)对综合影响矩阵进行处理,选取不同的阈值  $\lambda$  计算节点度,  $\lambda$  的取值分别为 0.4、0.45、0.5,分别绘制节点度变化曲线,如图 4 所示。

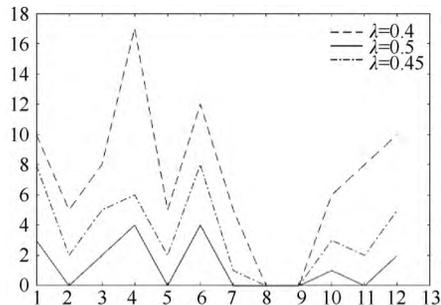


图 4 不同阈值节点度变化图

由图 4 所得结果分析可知,不同阈值对应节点度差别较大,从节点度变化图分析发现,当  $\lambda$  取 0.45 时,所对应的节点度数适中,而且节点度数较大的致因因素和由中心度数求出的关键致因因素重合率较高,其中从大到小依次为专业操作技能  $a_1$ 、设备检修保养  $a_6$ 、设备部件故障  $a_4$ 、控制装置的有效性  $a_3$ 、信息交互处理  $a_{12}$ 。虽然重要程度排序不同,却包含了中心度算出的关键影响因素。由此可以证明所求得的关键致因因素可信度很高。所以取  $\lambda$  为 0.45,当  $\lambda = 0.45$  时的可达矩阵如表 3 所示。

表 3  $\lambda = 0.45$  时可达矩阵

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$
$a_1$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_2$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_3$	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_4$	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1
$a_5$	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
$a_6$	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1
$a_7$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
$a_8$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
$a_9$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$a_{10}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
$a_{11}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$a_{12}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

根据可达矩阵,对故障致因因素进行级间层次划分,得到如图 5 所示的生产线故障致因因素多级递阶层次图。最高层(第一层)包括专业操作技能  $a_1$ 、机床清洁  $a_7$ 、物料储蓄  $a_8$ 、物料搬运  $a_9$ ;第二层包括安全意识  $a_2$ 、信息交互处理  $a_{12}$ ;第三层包括员工培训  $a_{10}$ 、安全监管  $a_{11}$ ;第四层包括控制装置有效性  $a_3$ 、设备部件故障  $a_4$ ;第五层包括预警设备可靠性  $a_5$ 、设备检修保养  $a_6$ 。

图 5 是依据  $\lambda = 0.45$  时可达矩阵得到的柔性生产线系统故障致因因素递阶层次图模型,其中因素所在行为 1 的因素视为该故障因素的出节点方向,故障因素所在列为 1 的因素视为该节点的入节点方向。图中灰色致因因素为中心度和节点度算出的关键致因因素,可以看出设备预警可靠性  $a_5$  和设备检修保养  $a_6$  位于最低层,是最容易被忽视的部分。设备的预警可靠性和定时安排设备检修保养,进行维护是保障系统安全可靠的薄弱环节,同时也是故障的根本致因因素。专业操作技能  $a_1$ 、机床清洁  $a_7$ 、物料储蓄  $a_8$ 、物料搬运  $a_9$  位于最高层次,说明这些在系统运行过程中不容易忽视,提高工作人员的专业操作技能对于系统的安全可靠运行有着至关重要作用。同时可以观察到关键致因因素分布层次较均匀,可见对系统的安全控制不能局限于邻近致因因素,而应该有针对性的对各层次因素进行分析,抓住重点。

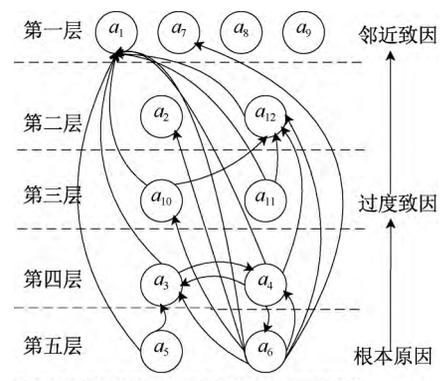


图 5 柔性生产线系统故障致因因素递阶层次图模型

### 3 结束语

本文通过决策实验室分析法对复杂系统故障致因因素的分析,确定关键故障致因因素,并通过设定恰当的阈值生成可达矩阵,计算故障致因因素的节点度数,分析致因因素的重要程度,与由决策实验室方法算出来的关键致因因素进行验证,结论一致,表明该方法有效,确定在此生产线模型中的关键致因因素为专业操作技能  $a_1$ 、设备部件故障  $a_4$ 、设备检修保养  $a_6$ 、信息交互处理  $a_{12}$ 。

在决策实验室分析法的基础上结合解释结构模型对各致因因素建立层次递阶模型,对致因因素进行分层处理,确定故障致因的相互影响关系,导致事故发生的直接原因和根本原因,为该生产线模型的安全可靠性控制提出可靠意见。结果表明设备预警可靠性  $a_5$  和设备检修保养  $a_6$  是故障发生的根本原

因,应加强设备报警系统的可靠性,同时加强设备的维护管理,定期对设备进行保养检修,预防故障于未然。

### 参考文献:

- [1] 丁明,肖遥,张晶晶,等. 基于事故链及动态故障树的电网连锁故障风险评估模型[J]. 中国电机工程学报 2015, 35(4): 821-829.
- [2] Danilo Nicola Dongiovanni, Tomas Iesmantas. Failure Rate modeling using Fault Tree analysis and Bayesian Network: DEMO pulsed operation Turbine study case[J]. Fusion Engineering and Design 2016, 109-111: 613-617.
- [3] 郑荣跃,简小生,俞凯磊,等. 基于事件树分析法的大跨斜拉桥施工事故分析[J]. 工程力学 2008 (S1): 203-208.
- [4] 余涛,杨剑锋. HAZOP 方法在聚乙烯生产装置风险评估中的应用[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(6): 113-118.
- [5] 蔡志强,孙树栋,司书宾,等. 基于 FMECA 的复杂装备故障预测贝叶斯网络建模[J]. 系统工程理论与实践 2013, 33(1): 187-193.
- [6] 周真,马德仲,于晓洋,等. 用于产品可靠性分析的模糊 FMECA 方法[J]. 电机与控制学报 2010, 14(10): 89-93.
- [7] 尉玉峰,阚树林,任漪舟,等. 基于 Petri 网的复杂制造系统故障树分析[J]. 机械设计与制造 2010(7): 192-194.
- [8] 郝庆波,杨兆军,陈传海,等. 基于区间层次分析法的数控机床可靠性预计[J]. 吉林大学学报 2012, 42(4): 845-850.
- [9] 柳剑,张根保,李冬英,等. 基于脆性理论的多状态制造系统可靠性分析[J]. 计算机集成制造系统 2014, 20(1): 155-164.
- [10] 林雯雯,王红军,张怀存. 可靠性分配在生产设备选型中的应用[J]. 北京信息科技大学学报 2015, 30(6): 59-63.
- [11] 汪伟忠,张国宝,卢明银. 多因素耦合的加工车间关键风险因素定量分析[J]. 中国安全生产科学技术 2015, 11(9): 158-164.
- [12] 翁建军,周阳. 水上飞机与船舶碰撞风险因素建模[J]. 中国航海 2013, 36(3): 70-75.
- (上接第 36 页)
- [7] 李伟. 风电机组状态监测与故障诊断系统的设计与实现[D]. 广州: 华南理工大学 2014.
- [8] 李彦涛. 冲击雷达定向辐射天线的研究设计[D]. 成都: 成都电子科技大学 2012.
- [9] 周经纬. 大型风力发电机机舱结构的设计与优化[D]. 内蒙古: 内蒙古科技学院 2012.
- [10] 辛琦. 移动通信天线及短波天线关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学 2013.
- [11] 陈影. 电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 黑龙江造纸 2015(02): 33-35.
- [12] 高雪依. 宽频带缝隙天线的多级反射板优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学 2014.
- [13] 李晓波. 机箱电磁屏蔽性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学 2013.
- [14] 徐洪霞,赵心畅. 风电场环境景观规划设计浅谈[J]. 绿色科技 2016(17): 11-14.