

基于 DEMATEL/ISM 的组合机床故障相关性分析

张英芝, 吴茂坤, 申桂香, 孙曙光, 宋 琪

(吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 结合某汽车缸体加工自动线国产组合机床故障数据, 采用基于决策实验室分析(DEMATEL) 和解释结构模型法(ISM) 对其进行故障相关性分析。通过 DEMATEL 法计算故障相关子系统的相关度, 明确相关故障的因果传递方向以及存在的影响关系, 确定相关子系统的相关性排序; 利用 ISM 构建递阶结构模型, 明确故障相关子系统的相互影响及依存的逻辑结构, 实现相关故障子系统的结构化和层次化, 为故障诊断与故障定位提供依据。

关键词: 组合机床; DEMATEL/ISM 方法; 相关故障分析

中图分类号: TG659 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7375(2014)03-0092-05

An Analysis of Failure Correlation of Assemble Machine Tool Based on DEMATEL/ISM

Zhang Ying-zhi, Wu Mao-kun, Shen Gui-xiang, Sun Shu-guang, Song Qi

(College of Material Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: On the basis of the failure data of assemble machine tools made in China from one type of automobile cylinder processing line, a failure correlation analysis is conducted based on decision-making laboratory analysis (DEMATEL) and interpretive structure model (ISM). First, degree of association by DEMATEL is calculated, and correlation and all relationships of correlative fault and determined correlation sort of related fault subsystems are analyzed. Next, a hierarchical structure model is constructed based on ISM, which can confirm the interrelationship of related fault subsystems and logical structure. By realizing the structured and hierarchical structure of fault systems, the basis for fault diagnosis and fault location are provided.

Key words: modular machine tool; DEMATEL/ISM; related failure analysis

组合机床从 1911 年在美国制成以来, 因其效率高、成本低、设计好以及制造周期短等优点在大批量生产中得到较为广泛的应用。国内的组合机床发展已近 30 年历史, 其科研和生产都有着较强的基础, 其应用也已逐渐深入到很多行业。在当前国内的中、小批量生产中, 尤其在汽车等大型工业生产中, 组合机床尤其显现了巨大作用^[1-2]。组合机床功能的先进性和结构的复杂性导致其故障存在相关性, 一个单元或子系统出现故障, 可能致使系统其他部分发生故障, 引起多米诺效应。因此, 寻求分析故障传播

对系统影响的有效方法以阻止多米诺效应发生或减轻其影响十分必要。

当前对故障相关的研究主要从单向相关与双向相关 2 个角度进行研究^[3-5]。文献 [6] 采用自相关矩阵表达各因素间的直接关系, 但这一方法并未考虑多层次故障传递中的要素间的间接相关关系。所以本文结合故障相关数据, 考虑子系统间故障的直接与间接相关关系, 基于决策实验室分析找出子系统的相关性排序, 并应用解释结构模型法构建故障子系统递阶关系模型, 实现相关故障子系统的结构化,

收稿日期: 2013-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175222); 吉林省科技发展计划资助项目(20125008)

作者简介: 张英芝(1970-), 女, 辽宁省人, 副教授, 博士, 主要研究方向为数控机床可靠性技术。

为故障诊断以及故障定位等可靠性研究奠定基础。

1 DEMATEL/ISM 原理与方法

决策实验室分析法 (decision making trial and evaluation laboratory ,DEMATEL) 是一种系统分析方法 ,它借助图论知识和矩阵工具 ,将系统间的复杂影响关系转化成可视化的结构模型 ,从而对复杂系统内元素间的相依关系做出定量分析 ,进而明确关键因素^[7-12]。本文利用该方法进行故障有向图的绘制 ,并建立影响矩阵 ,通过 4 项相关度值即影响度、被影响度、中心度与原因度的计算来分析故障相关关系 ,从而明晰子系统间的具体故障传递过程 ,并找出影响传递过程的主因及程度。

解释结构模型 (interpretive structural modeling , ISM) 作为一种系统分析模型 ,是为分析复杂社会经济系统有关问题而开发的。该方法思想是把复杂系统分为若干子系统 ,画出关系有向图 ,借助要素间邻接矩阵反映系统要素间的直接关系 ,然后通过把邻接矩阵转化成可达矩阵 ,再对可达矩阵进行分解 ,最后将复杂的系统构成转化为一个清晰的多级递阶层次结构模型^[13-15] ,进而由专业人员对该模型进行解释说明并建成解释结构模型。

为简化明确系统要素之间关系并简化 ISM 建模中大量复杂的矩阵运算 ,本文将引用集成 DEMATEL/ISM 法对组合机床进行故障相关关系分析。首先 ,根据子系统故障相关数据建立子系统故障相关关系网络;其次 ,由 DEMATEL 计算得到系统影响因素间的综合影响矩阵 T ,据此得出组合机床每个子系统的影响度、被影响度、中心度与原因度 ,从而获得故障子系统相关度排序 ,并找出关键相关子系统;然后 ,确定系统整体影响矩阵 H , $H = T + I$,并根据整体影响矩阵 H 与可达矩阵 M 之间的映射关系得到可达矩阵 M ;最后 ,结合 ISM 方法对系统进行等级划分和区域分解 ,获得故障子系统间的层次结构关系。两种方法集成 ,既可明确子系统故障影响大小 ,也可明确故障传递机理。

2 基于 DEMATEL/ISM 组合机床故障相关性分析

2.1 基于 DEMATEL 的组合机床故障传递分析

结合某国产组合机床关联故障统计信息 ,进行故障模式以及故障原因的分析 ,从而获得 8 个相互影响的因素 ,在此对其进行故障有向图的构建 ,如图 1 所示。图中 S 为主轴系统 ,V 为电气系统 ,X 为进

给系统 ,H 为装夹系统 ,D 为液压系统 ,M 为刀库 ,R 为其他部位 ,F 为伺服单元。

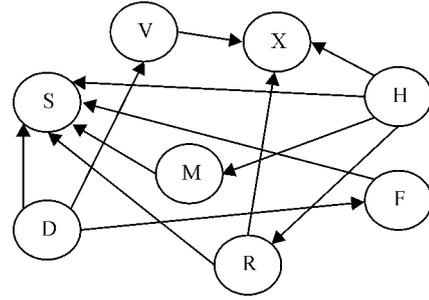


图 1 组合机床子系统关系有向图

Fig. 1 Directed relationship digraph of assemble machine subsystem

依据子系统间发生关联故障的影响关系 ,可将有向图转化为直接影响关系矩阵 Y 。

$$Y = \begin{bmatrix} S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ V & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ D & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ M & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

其中 y_{ij} 为因素 i 影响因素 j 的影响次数; $i = j$ 时 $y_{ii} = 0$ 。

Y 的标准化矩阵为

$$X = \frac{Y}{\max_{1 < i < n} \sum_{j=1}^n y_{ij}}。 \tag{1}$$

据此可以得到因素间直接和间接关系组成的综合影响矩阵

$$T = \lim_{k \rightarrow \infty} (X + X^2 + \dots + X^k) = X(I - X)^{-1}。 \tag{2}$$

式中 I 是单位矩阵。

T_{ij} 为子系统 i 对子系统 j 的综合影响度 ,包括直接与间接影响度。 $T_{ij} \neq 0$,表示两子系统间存在相关关系 ,反之 ,则无关。

$$T = \begin{bmatrix} S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ V & 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H & 0.56 & 0 & 0.24 & 0 & 0 & 0.2 & 0.2 \\ D & 0.44 & 0.4 & 0.08 & 0 & 0 & 0 & 0.2 \\ M & 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R & 0.2 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

令组合机床综合影响矩阵 T 的行和为向量 Q 、列和为向量 D ,即影响度为 Q ,被影响度为 D 。则中心度为 $Q + D$,原因为 $Q - D$ 。以上相关度值可利用式(3) ~ 式(5) 进行计算得到。

$$T = [t_{ij}]_{n \times n}, i, j = 1, 2, \dots, n; \quad (3)$$

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

$$D_j = \sum_{i=1}^n t_{ij}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

通过计算 ,得出组合机床每个子系统的影响度、被影响度及中心度与原因度 ,如表 1。

表 1 影响度、被影响度、中心度、原因度表

Tab.1 The influence degree ,the being influenced degree ,the centrality degree ,the reason degree table

子系统代码	影响度 Q	被影响度 D	中心度 $(Q + D)$	原因度 $(Q - D)$
S	0	2	2	-2
V	0.2	0.4	0.6	-0.2
X	0	0.72	0.72	-0.72
H	1.2	0	1.2	1.2
D	1.12	0	1.12	1.12
M	0.6	0.2	0.8	0.4
R	0.4	0.2	0.6	0.2
F	0.2	0.2	0.4	0

中心度值为各子系统间的相关度值 ,它包括 2 个方面 ,一方面是源自其他子系统对某子系统的相关影响 ,即被影响度;另一方面是源自该子系统对其他子系统的相关影响 ,即影响度。依据表 1 ,观察中心度值的大小 ,可知组合机床各子系统相关度由高到低依次是主轴系统、装夹系统、液压系统、刀库和进给系统等。主轴系统的影响度为 0 ,被影响度为 2 ,居第 1 位 ,表明在全部相关故障子系统中主轴系统是最容易受影响的子系统 ,且说明该子系统只受其他子系统影响 ,而不影响其他任何子系统。装夹系统的影响度为 1.2 ,被影响度为 0 ,说明该子系统只影响其他子系统 ,不受其他子系统影响。中心度值第 3 的是液压系统 ,影响度为 1.12 ,被影响度为 0 ,同样说明该子系统只影响其他子系统 ,其本身并不被其他子系统影响。排名第 4 的是刀库 ,其影响度为 0.6 ,被影响度为 0.2 ,说明该子系统主要影响其他子系统 ,本身受其他子系统影响较小。另外 ,借

助观察直接影响关系矩阵 ,可知液压系统、装夹系统和刀库为主轴系统的故障源 ,其中刀库对主轴系统有着较大的影响。8 个相关故障子系统的中心度和原因度曲线如图 2 所示。

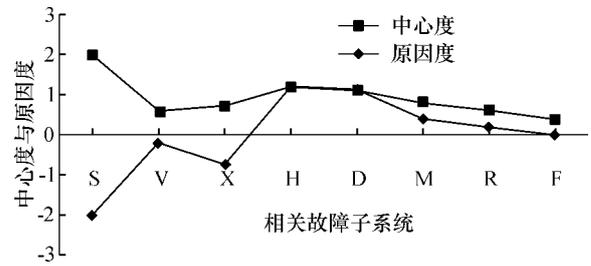


图 2 相关故障子系统的中心度和原因度曲线

Fig.2 The centrality and reason curves of related fault subsystem

由图 2 可知 ,液压系统和装夹系统的中心度和原因度重合 ,表明二者的被影响度等于 0 ,称为故障“根原因”;另外 ,主轴系统和进给系统为图中沿横轴对称的点 ,说明二者的影响度为 0 ,一定为由其他故障原因引起的表象子系统。

根据上述分析可知 ,1) 装夹系统与液压系统同其他表象子系统发生相关故障时 ,均是故障源;2) 通过观察中心度大小可明确相关故障中较为活跃的关键子系统为主轴系统、装夹系统、液压系统和刀库。

2.2 基于 ISM 组合机床模型构建

1) 计算可达矩阵 M 。

系统整体影响矩阵

$$H = T + I =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.56 & 0 & 0.24 & 1 & 0 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.44 & 0.4 & 0.08 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0.2 \\ 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

可按照下式确定可达矩阵中元素取值

$$m_{ij} = \begin{cases} 1, & h_{ij} > \lambda; \\ 0, & h_{ij} \leq \lambda. \end{cases}$$

$$i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n.$$

其中 , λ 为给定阈值 ,用于系统简化。对于 n 值较小的系统 ,通常无需简化 ,可设置 $\lambda = 0$ 。

本文按 $\lambda = 0$ 计算 ,可得

$$M = \begin{matrix} S \\ V \\ X \\ H \\ D \\ M \\ R \\ F \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

2) 区域划分与级位划分。

(1) 区域划分。

定义因素的可达集、先行集、共同集、起始集与终止集。为后续运算简便,用 S_1 代表 S , S_2 代表 V , S_3 代表 X , S_4 代表 H , S_5 代表 D , S_6 代表 M , S_7 代表 R , S_8 代表 F 。

可达集 $R(S_i)$: 系统要素 S_i 的可达集是在可达矩阵或有向图中由 S_i 可达到的诸要素所构成的集合。

$$R(S_i) = \{S_j | S_j \in S, m_{ji} = 1, j = 1, 2, \dots, n\}。$$

先行集 $A(S_i)$: 系统要素 S_i 的先行集是在可达矩阵或有向图中可到达 S_i 的诸要素所构成的集合。

$$A(S_i) = \{S_j | S_j \in S, m_{ji} = 1, j = 1, 2, \dots, n\}。$$

共同集 $C(S_i)$: 系统要素 S_i 的共同集是 S_i 的可达集和先行集的共同部分。

$$C(S_i) = \{S_j | S_j \in S, m_{ji} = 1, m_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n\}。$$

起始集 $B(S)$ 与终止集 $E(S)$: 集合 S 的起始集是在 S 中只影响(到达)其他要素而不受其他要素影响(不被其他要素到达)的要素所构成的集合。 $B(S)$ 中的要素在有向图中只有箭线流出,而无箭线流入,是系统的输入要素。如果与以上情况相反,则为终止集,记为 $E(S)$ 。定义式分别为

$$B(S) = \{S_i | S_i \in S, C(S_i) = A(S_i), i = 1, 2, \dots, n\},$$

$$E(S) = \{S_i | S_i \in S, C(S_i) = R(S_i), i = 1, 2, \dots, n\}。$$

区域划分的结果可记为 $\Pi(S) = P_1, P_2, \dots, P_k, \dots, P_m; P_k$ 为第 k 个相对独立区域的要素集合。

以上诸集合具体的区域划分结果如表 2 所示。

因为 $B(S) = \{S_4, S_5\}$, 且有 $R\{S_4\} \cap \{S_5\} = \{S_1, S_3, S_4, S_6, S_7\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_5, S_8\} \neq \emptyset$, 因此,无法划分为两个或两个以上相互独立的区域,或者说整个集合为同一区域。

(2) 级位划分。

对于同一区域而言,依次获得满足 $R(S_i) \cap A(S_i) = R(S_i)$ 的要素,找出并定义最高层次的集合,第 2 层次的集合, \dots ,直到划分完毕。具体级位划分

过程见表 3。

表 2 可达集、先行集、共同集和起始集
Tab. 2 Reachable set, first set, the common set, initial set

S_i	$R(S_i)$	$A(S_i)$	$C(S_i)$	$B(S)$
1	1	1 4 5 6 7 8	1	
2	2 3	2 5	2	
3	3	2 3 4 5 7	3	
4	1 3 4 6 7	4	4	4
5	1 2 3 5 8	5	5	5
6	1 6	4 6	6	
7	1 3 7	4 7	7	
8	1 8	5 8	8	

由表 3 可知,整个系统可以分为 3 级 $L_1 = \{S_1, S_3\}$, $L_2 = \{S_2, S_6, S_7, S_8\}$, $L_3 = \{S_4, S_5\}$ 。

此时的可达矩阵化为

$$M(L) = \begin{matrix} 1 \\ 3 \\ 2 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

根据可达矩阵即可建立系统要素的递阶结构模型,如图 3 所示。

通过图 3 可以清晰地看出各子系统的层级结构,该模型为 3 级的多级递阶层次结构模型,由第 3 级要素开始通过递阶影响关系影响到第 2 级、第 1 级要素,最终向影响机床可靠性的发展推进。其中,第 3 级要素液压系统和装夹系统是最深层要素;第 2 级要素电气系统、刀库、伺服单元、其他部位是浅层要素;第 1 级要素主轴系统和进给系统是表层要素。因此,在设计和制造相关元器件与零部件时应尽量保证液压系统和装夹系统可靠性。

通过上述分析发现 2 种方法得到的故障源和故障表象是一致的;应用 DEMATEL 法能够确定各子系统影响度、被影响度、中心度及原因度的大小,明确故障子系统的直接和间接影响关系,但是无法得到各子系统故障传递机理;而 ISM 法通过建立递阶层次结构图使故障传递关系得以直观表现,恰恰弥补 DEMATEL 法的不足,2 种分析方法互为补充,对于准确进行故障诊断和故障排除具有重要作用。

表3 级位划分过程

Tab.3 Process table about segmentation

要素集合	S_i	$R(S_i)$	$A(S_i)$	$R(S_i) \cap A(S_i)$	$E(S)$	$\Pi(P)$		
$P-L_0$	1	1	1 4 5 6 7 8	1	1	$L_1 = \{S_1, S_3\}$		
	2	2 3	2 5	2	2			
	3	3	2 3 4 5 7	3	3			
	4	1 3 4 6 7	4	4	4			
	5	1 2 3 5 8	5	5	5			
	6	1 6	4 6	6	6			
	7	1 3 7	4 7	7	7			
	8	1 8	5 8	8	8			
$P-L_0-L_1$	2	2	2 5	2	2	$L_2 = \{S_2, S_6, S_7, S_8\}$		
	4	4 6 7	4	4	4			
	5	2 5 8	5	5	5			
	6	6	4 6	6	6			
	7	7	4 7	7	7			
	8	8	5 8	8	8			
	$P-L_0-L_1-L_2$	4	4	4	4		4	$L_3 = \{S_4, S_5\}$
		5	5	5	5		5	

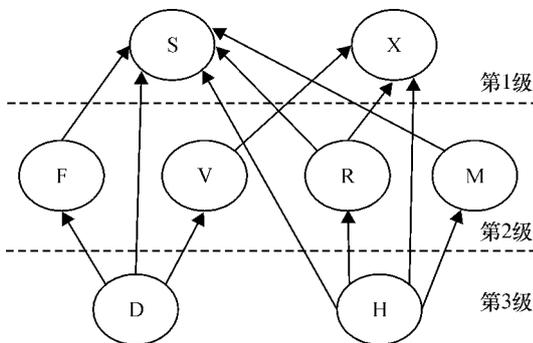


图3 递阶层次结构模型

Fig.3 Recursive hierarchy structure model diagram

3 结论

1) 采用 DEMATEL 法,综合考虑故障子系统的直接和间接影响关系,对相关故障子系统相关度进行计算分析。依据中心度值可以找出故障频繁发生的子系统以及可靠性薄弱环节所在;根据原因度、影响度和被影响度值能确定故障象子系统与表象子系统,以便进行相关故障子系统故障率的精确计算。

2) 结合 ISM 方法构建了故障相关子系统多级递阶结构模型,利用该模型将故障相关子系统要素划分为表层要素、浅层要素、中层要素和深层要素,使故障传递关系得以直观表现,弥补了单独用 DEMATEL 法进行故障相关分析的不足,为故障快速诊断及定位提供了新的思路,并对经济地制定配件决策和优化维修策略有着重要意义。

3) 本文基于 DEMATEL/ISM 法对组合机床进

行故障相关性分析,是一种新方法的理论探索与应用,充实并完善了现有的故障相关性分析理论。

参考文献:

[1]李秀敏. 组合机床行业现状与发展思考[J]. 航空制造技术 2003(4):41-43.
Li Xiu-min. Present situation and development thinking on combination machine tools industry[J]. Aviation Manufacturing Technology 2003(4):41-43.

[2]吴立梅. 组合机床发展及相关特点分析[J]. 科技资讯, 2010(8):86.
Wu Li-mei. The development and related characteristics analysis on combination machine tools[J]. Science & Technology Information 2010(8):86.

[3]Sun Yong, Ma Lin, Mathew J, et al. An analytical model for interactive failures[J]. Reliability Engineering and System Safety 2006 91(5):495-504.

[4]王晓峰,申桂香,张英芝,等. 基于改进危害度和 DEMATEL 方法的 abc 轴进给系统的故障排序[J]. 吉林大学学报:工学版 2012 42(1):123-127.
Wang Xiao-feng, Shen Gui-xiang, Zhang Ying-zhi, et al. Prioritizing failures of abc-axis feeding systems based on improved criticality and DEMATEL method[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(1):123-127.

[5]Wang Wen-dai. Reability importance of components in a complex system[EB/OL]. [2004-07-26]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1285415&tag=1.

(下转第127页)

- Transportation Engineering and Information ,2006 ,4(4) : 63-68.
- [11]徐克鹏,左春. 基于 BPM 的仓储物流管理系统的设计与实现[J]. 计算机系统应用 2010(5):1-4.
Xu Ke-peng ,Zuo Chun. Design and implementation of logistics information system based on BPM [J]. Computer Systems and Applications 2010(5):1-4.
- [12]王婷,张戎. 现代物流体系下铁路货场的发展[J]. 铁道运输与经济,2005 27(9):35-37.
Wang Ting ,Zhang Rong. The development of railway yard under the modern logistics system [J]. Railway Transport and Economy ,2005 27(9):35-37.
- [13]黄骅. 基于 CRAFT 法优化铁路物流化货场仓库布局[J]. 铁路采购与物流 2007(1):25-27.
Huang Hua. The layout of railway logistics freight yard warehouse on the basis of CRAFT optimization [J]. Railway Purchase and Logistics 2007(1):25-27.
- [14]唐劲松. 铁路货场门卫信息化实践[J]. 铁道货运,2011(3) 30-34.
Tang Jing-song. The railway freight yard guard information practice [J]. Railway Freight Transport 2011(3) 30-34.
- [15]Hommes B J , Van Reijswoud V. The quality of business process modelling methods [J]. The International Federation for Information Processing ,2000 36: 117-136.
- [16]冯允成,邹志红,周泓. 离散系统仿真[M]. 北京: 机械工业出版社,1998:179-193.
Feng Yun-cheng ,Zou Zhi-hong ,Zhou Hong. Discrete system simulation [M]. Beijing: Machinery Industry Press ,1998:179-193.
- [17]Parlar M ,Sharafali M. Dynamic allocation of airline check-in counters: a queueing optimization approach [J]. Management Science 2008(8):1410-1424.
-
- (上接第96页)
- [6]杜雷 高建民 陈琨. 基于故障相关性分析的可靠性配置[J]. 计算机集成制造系统 2011 ,17(9):1973-1980.
Du Lei ,Gao Jian-min ,Chen Kun. Reliability deployment based on fault correlation analysis [J]. Computer Integrated Manufacturing System 2011 ,17(9):1973-1980.
- [7]Wu W W. Choosing knowledge management strategies by using a combined ANP and DEMATEL approach [J]. Expert Systems and Applications 2008 35(3):828-835.
- [8]万正位. 基于 DEMATEL 的移动电子商务供应链风险评估研究[D]. 武汉: 武汉理工大学 2010.
Wan Zheng-wei. The assessment research of mobile e-business supply chain risk based on DEMATEL [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology ,2010.
- [9]徐国东,郭鹏,于明洁. 基于 DEMATEL 知识联盟中知识转移影响因素识别研究[J]. 科学学与科学技术管理,2011 32(5):60-63.
Xu Guo-dong ,Guo Peng ,Yu Ming-jie. Research on the influential factors recognition of knowledge transfer under DEMATEL in the knowledge alliance [J]. Science of Science and Management of Science & Technology 2011 32(5):60-63.
- [10]Lü Feng ,Yang Xiaoying. Analysis of influence factors of logistics development in Henan Province based on dematel method [EB/OL]. [2010-08-26]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5575853.
- [11]Fontela E ,Gabus A. The DEMATEL observer , DEMATEL 1976 Report [R]. Switzerland , Geneva: Battelle Geneva Research Center ,1976.
- [12]汪应洛. 系统工程理论、方法与应用[M]. 北京: 高等教育出版社,1998:49-81.
- [13]Ma Zhan-fei. ISM-based architecture for network security system [EB/OL]. [2010-09-19]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5607649&tag=1.
- [14]周德群,章玲. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统层次划分研究[J]. 管理科学学报,2008 ,11(2):20-26.
Zhou De-qun ,Zhang Ling. Establishing hierarchy structure in complex systems based on the integration of DEMATEL and ISM [J]. Journal of Management Sciences in China ,2008 ,11(2):20-26.
- [15]杜纯,王瑛,汪送. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统安全事故致因因素分析[J]. 数学的实践与认识,2012 ,42(22):143-149.
Du Chun ,Wang Ying ,Wang Song. Analysis of safety accident influence factors of complex system based on the integration of DEMATEL and ISM [J]. Mathematics in Practice and Theory 2012 42(22):143-149.