

基于ISM模型的可控飞行撞地诱因关系分析

魏燕明¹, 甘旭升², 游雯雯², 蒋铭乐²

(1. 西京学院, 西安 710123; 2. 空军工程大学空管领航学院, 西安 710051)

摘要:为科学揭示可控飞行撞地(CFIT)诱因的内在规律,以有效预防CFIT事故,提出了采用解释结构模型(ISM)分析CFIT的诱因关系。该模型利用人们对CFIT的认识将其诱因联系起来,并借助于矩阵计算和图形分析技术,将复杂无序的CFIT诱发因素分析整理成易于理解的多级递阶结构模型。在实例中,通过对CFIT事故的分析,归纳出导致CFIT的主要诱因,并采用ISM构建了诱因关系分析模型。结果表明:该模型实现步骤简单,逻辑关系明确,过程科学合理,层次结构客观实际,为CFIT诱因关系分析提供了一种有效手段。

关键词:可控飞行撞地,解释结构模型,诱因,邻接矩阵,可达矩阵

中图分类号:V217

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1002-0640.2018.02.036

Inducement Relationship Analysis of Controlled Flight into Terrain Based on ISM Model

WEI Yan-ming¹, GAN Xu-sheng², YOU Wen-wen², JIANG Ming-le²

(1. Xijing College, Xi'an 710123, China;

2. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract:To scientifically reveal the inherent law of Controlled Flight Into Terrain (CFIT) inducement for preventing CFIT accident, the Interpretative Structural Model (ISM) is introduced to analyze the relationship of CFIT inducement. In the model, first the inducement of CFIT are linked according to the people's understanding, and then with the aid of matrix calculation and graphic analysis technology, the complicate and unordered CFIT inducement factors are analyzed and organized as the hierarchical structure model that is easy to understand. In the example, by analyzing the CFIT accidents, the main inducements of CFIT can be summarized, and based on it ISM is used to establish the inducement relationship analysis model. The result shows that the proposed model has the advantages such as simple steps, clear logic relations, scientific and reasonable process, objective hierarchical structure and so on, which provides an effective method for CFIT inducement relationship analysis.

Key words: controlled flight into terrain, interpretative structural model, inducement, adjacency matrix, reachability matrix

0 引言

可控飞行撞地 (Controlled Flight Into Terrain, CFIT)是指能够正常运行的航空器在飞行员控制之下由于飞行员的疏忽而与障碍物、地面或者水面相撞的事故,而飞行员对将要发生的相撞通常事先没

有觉察。CFIT是一种重要的航空事故类型,通常其导致的后果是机毁人亡,更深层次的是造成不利的社会影响和政治影响。因此,研究CFIT诱因分析技术,不仅能够为安全管理决策提供支撑,对改善航空安全管理水平也具有实际意义^[1]。

为提高CFIT事故的防范水平,学者们进行了有

收稿日期:2017-02-11

修回日期:2017-04-25

作者简介:魏燕明(1965-),男,江苏淮安人,硕士,副教授。研究方向:非线性建模,计算机应用。

针对性的研究^[2-4]。从文献资料分析来看,这些研究大多针对个别 CFIT 事故,未结合大量实例进行成因分析,且其成因标准都是直接给出,更没有给出诱因关系的层次结构。基于以上分析,本文提出了用于分析 CFIT 诱因关系的解释结构模型(Interpretative Structural Modeling, ISM)^[5],实例验证了其有效性。

1 解释结构模型

ISM 的基本思想是:在有向图和矩阵原理基础上,结合人们的认知将系统要素联系起来,通过矩阵和图形的描述,并借助于计算机完成相应数学运算,从而整理推导出所研究系统的结构特点。

1.1 构成要素

ISM 主要由有向图、邻接矩阵和可达矩阵三要素构成^[7]。

1.1.1 有向图

建立 ISM 需要先确定一个研究目标,这个研究目标中包含诸多要素,而各要素之间的关系通过有向图来描述。由有向图可直观地表达诸多要素的两两交互关系。每个节点代表一个要素,采用圆内加编号字母形式来描述。要描述要素 C_i 对要素 C_j 施加了影响,有向图中可表示为: $C_i \rightarrow C_j$ 。通过这种表达方式就构成了有向图。

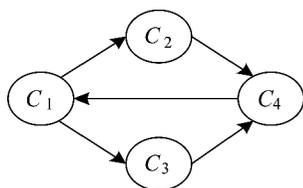


图 1 有向连接图

1.1.2 邻接矩阵

邻接矩阵是对关系网络图的数学表达方法,而关系网络图是对各元素之间关系的逻辑分析,邻接矩阵是对这些元素的数学分析,主要描述要素 C_i 与 C_j 的初始交互关系,邻接矩阵 A 内的元素

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & C_i \text{对} C_j \text{有影响} \\ 0 & C_i \text{对} C_j \text{无影响} \end{cases}$$

邻接矩阵可翻译为有向图,有向图也可转化成邻接矩阵,二者是一一对应的,而与元素顺序无关。

1.1.3 可达矩阵

获得邻接矩阵 A 后,将其与单位矩阵 I 相加可得出

$$A+I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

矩阵 $A+I$ 即为可达矩阵,它的每个元素表示通过点与点间不大于 1 的路径的可达性。同样不难理解, $(A+I)^2$ 中元素表示通过点与点间不大于 2 的路径的可达性。这里涉及的正加法与乘法运算均为布尔运算,则可以得到 $(A+I)^{i-2} \neq (A+I)^{i-1} \neq (A+I)^i = (A+I)^{i+1} = M, i \leq n-1$, 矩阵 M 即为可达矩阵,用于刻画点与点间不大于 $n-1$ 的路径的可达性。对于点数为 n 的图,最长路径不能超过 $n-1$ 。此外, $M^2=M$ 。对于上例则有

$$(A+I)^2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(A+I)^3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = (A+I)^4$$

所以,可达矩阵为 $M=(A+I)^3$ 。

1.2 ISM 诱因分析流程

ISM 诱因关系分析流程如图 2 所示。

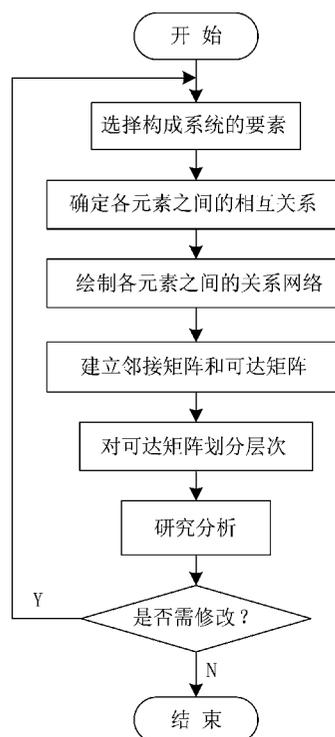


图 2 ISM 诱因关系分析流程

2 实例分析

本文在商用航空安全小组(CAST)的航空安全策略研究基础上,并综合考虑了空中管制因素^[8],总结整理 CFIT 事故的主要诱因如下页表 1 所示。

表 1 航空器 CFIT 事故主要诱因

符号	诱 因
S ₁	不掌握天气特点
S ₂	不掌握地形特点和最低飞行安全高度
S ₃	飞行员不遵守规章制度
S ₄	飞行员擅自更改航线
S ₅	飞行员盲目操纵飞机下降高度
S ₆	飞行准备不充分
S ₇	飞行员的安全意识不强
S ₈	飞行员的培训教育不充分
S ₉	机组漏听、错听、误听高度指令,又未能得到机组内部或管制员及时有效纠正
S ₁₀	管制员失去对航空器高度、位置的掌握
S ₁₁	管制员未遵守程序指挥
S ₁₂	管理不严格

表 2 CFIT 诱因间的两两交互关系

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂
S ₁						V	V					
S ₂						V	V					
S ₃				A	A		V	V				V
S ₄			V				V					
S ₅							V		V			
S ₆	A	A					V	V				V
S ₇	A	A	A	A	A	A		V				V
S ₈			A			A	A					V
S ₉					A					V	V	
S ₁₀									A		V	
S ₁₁									A	A		V
S ₁₂			A			A	A	A				A

2.1 绘制有向图

在 ISM 模型中, 定义各元素之间的关系为: 如果 S₁ 受到 S₂ 的制约或影响, 则称 S₁ 到 S₂ 存在“关系”, 表示为“S₁→S₂”, 例如不掌握天气特点 S₁ 受到飞行准备不充分 S₆ 的影响, 则记为“S₁→S₆”, 由此, 可得 S₁~S₁₂ 之间的关系网络如图 3 所示。

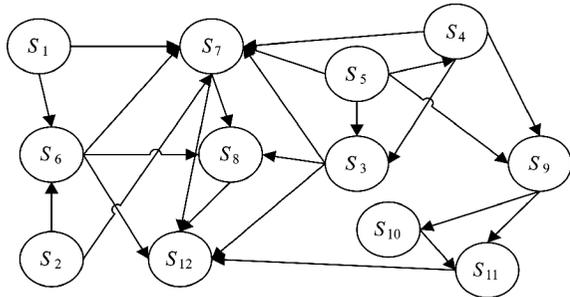


图 3 CFIT 诱因关系网络

该关系网络图并非唯一, 其中构建逻辑关系是关键。不同的人根据自己对专业的认识程度, 将会得到不同的关系网络图, 所以, 在构建关系网络图时, 需要结合航空管制专业相关知识。

根据图 3 所示诱因关系网络, 可建立如表 2 的关系, 其中, A 表示 S_i 受 S_j 的影响; V 表示 S_i 对 S_j 的影响。

2.2 构建邻接矩阵

将图 3 的诱因关系网络作数学化处理, 这样, 定性分析问题就转化为定量分析问题。如果 S₁ 到 S₂ 有关系 S₁→S₂, 则记为 1, 没有关系计为 0。用横向量 a₁=(0,0,0,⋯,0) 来描述 S₁ 与 S₂~S₁₂ 的关系, 同理, 可依次计算出 S₂~S₁₂ 的横向量 a₂~a₁₂, 令 A=(a₁, a₂, a₃, ⋯, a₁₂)^T, 可给出邻接矩阵

$$A_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

2.3 对邻接矩阵进行计算求得可达矩阵

根据前述步骤, 计算可达矩阵可由 Matlab 软件编程完成。

$$M = (A+I)^2 = A+I$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

2.4 找出各要素的级别分配

将 M=(A+I)² 中的要素划分成 3 个集合, 分别为可达集 R(S_i)、先行集 A(S_i)、R(S_i) 与 A(S_i) 的交集。可达集中的元素, 表示可达矩阵中要素 S_i 可以到达的要素; 先行集中的元素, 表示可达矩阵中能够到达 S_i 的要素。通过计算, 当可达集 R(S_i) 与

$R(S_i) \cap A(S_i)$ 包含的因素相同时,得出它的最高级要素集 L_1 ,然后将它们暂时去掉,同理,整理出次一级的最高级要素集 L_2 ,由此类推,对各要素的级别进行分配。

表 3 可达集、先行集及其交集

S_i	$P(S_i)$	$A(S_i)$	$P(S_i) \cap A(S_i)$
1	1	1, 6, 7	1
2	2	2, 6, 7	2
3	3, 4, 5	3, 7, 8, 12	3
4	4	3, 4, 7	4
5	5	3, 5, 7, 9	5
6	1, 2, 6	6, 7, 8, 12	6
7	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	7, 8, 12	7
8	3, 6, 7, 8	8, 12	8
9	5, 9	9, 10, 11	9
10	9, 10	10, 11	10
11	9, 10, 11	11, 12	11
12	3, 6, 7, 8, 11, 12	12	12

其中,当 $i=1,2,4,5$ 时, $P(S_i)$ 与 $P(S_i) \cap A(S_i)$ 相等,即 $L_1=\{1,2,4,5\}$,将最高级要素 L_1 暂时去除,则有

表 4 去除最高级要素 L_1 后的集合

S_i	$P(S_i)$	$A(S_i)$	$P(S_i) \cap A(S_i)$
3	3	3, 7, 8, 12	3
6	6	6, 7, 8, 12	6
7	3, 6, 7	7, 8, 12	7
8	3, 6, 7, 8	8, 12	8
9	9	9, 10, 11	9
10	9, 10	10, 11	10
11	9, 10, 11	11, 12	11
12	3, 6, 7, 8, 11, 12	12	12

其中,当 $i=3,6,9$ 时, $P(S_i)$ 与 $P(S_i) \cap A(S_i)$ 相等,即 $L_2=\{3,6,9\}$,将最高级要素 L_2 暂时去除,可有

表 5 去除最高级要素 L_2 后的集合

S_i	$P(S_i)$	$A(S_i)$	$P(S_i) \cap A(S_i)$
7	7	7, 8, 12	7
8	7, 8	8, 12	8
10	10	10, 11	10
11	10, 11	11, 12	11
12	7, 11, 12	12	12

其中,当 $i=7,10$ 时, $P(S_i)$ 与 $P(S_i) \cap A(S_i)$ 相等,即

$L_3=\{7,10\}$,将最高要素 L_3 暂时去除,可有

表 6 去除最高级要素 L_3 后的集合

S_i	$P(S_i)$	$A(S_i)$	$P(S_i) \cap A(S_i)$
8	8	8, 12	8
11	11	11, 12	11
12	11, 12	12	12

其中,当 $i=8,11$ 时, $P(S_i)$ 与 $P(S_i) \cap A(S_i)$ 相等,即 $L_4=\{8,11\}$,将最高要素 L_4 暂时去除,可有

表 7 去除最高级要素 L_4 后的集合

S_i	$P(S_i)$	$A(S_i)$	$P(S_i) \cap A(S_i)$
12	12	12	12

其中,当 $i=12$ 时, $P(S_i)$ 与 $P(S_i) \cap A(S_i)$ 相等,即 $L_5=\{12\}$ 。

由以上过程,可得出航空 CFIT 的诱因的优先级顺序为: $\{1,2,4,5\},\{3,6,9\},\{7,10\},\{8,11\},\{12\}$,也就是将 CFIT 诱因划分为 L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 5 个层次,据此,重新排列的可达矩阵为

$$\begin{matrix}
 & S_1 & S_2 & S_4 & S_5 & S_3 & S_6 & S_9 & S_7 & S_{10} & S_8 & S_{11} & S_{12} \\
 \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_3 \\ S_6 \\ S_9 \\ S_7 \\ S_{10} \\ S_8 \\ S_{11} \\ S_{12} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}
 \end{matrix}$$

2.5 根据重新排列可达矩阵建立可得 ISM

根据层级分配,将 L_1 的诱因置于模型的最上层,依次将 L_2, L_3, L_4, L_5 置于各层位置。根据各层次中的逻辑关系,将有关联的各诱因连接起来,形成航空器可控飞行撞地的 ISM 诱因关系结构模型,如下页图 4 所示。并据此可将 CFIT 诱因划分为管理层面、飞行员层面和管制员层面。

从以上分析可知,诱发 CFIT 事故的影响因素形成了 5 个链条:

- $S_{12} \rightarrow S_8 \rightarrow S_7 \rightarrow S_6 \rightarrow S_1$
- $S_{12} \rightarrow S_8 \rightarrow S_7 \rightarrow S_6 \rightarrow S_2$
- $S_{12} \rightarrow S_8 \rightarrow S_7 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4$
- $S_{12} \rightarrow S_8 \rightarrow S_7 \rightarrow S_3 \rightarrow S_5$
- $S_{12} \rightarrow S_{11} \rightarrow S_{10} \rightarrow S_9 \rightarrow S_5$

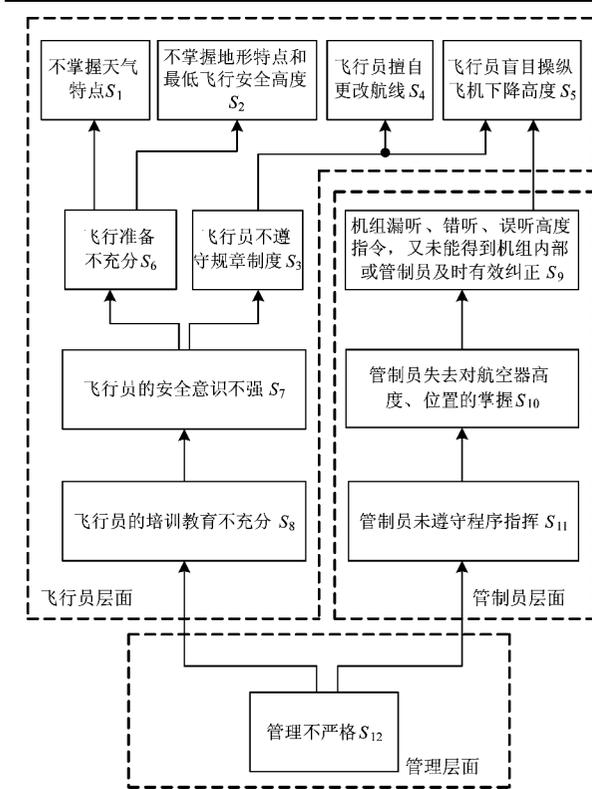


图4 CFIT的ISM诱因关系结构模型

在这5个链条中,每个链条就是一条导致CFIT的事故链。对安全管理与决策来说,要有效减少CFIT事故的发生风险,除了应关注这几个链条外,还需注意各链条上诱发因素的变化和交互情况,当链条上的各个诱发因素都被触发,有可能导致CFIT事故时,应该尽可能加强链条上的薄弱环节,以截断整条事故链,不过,要从根本上降低CFIT事故的发生风险,必须从管理层面上查问题、找漏洞和下功夫。

3 结论

CFIT事故的诱发因素众多,且彼此关系复杂,

对这些诱因关系进行分析,识别出诱因的递阶结构模型,是预防CFIT事故的重要条件,也是亟待解决的问题。为此,在CFIT分析中引入ISM方法,即基于对CFIT的系统分析,将诱发CFIT的影响因素关联起来,并通过矩阵和图形等形式对数据进行量化处理,推导出CFIT诱因关系的多级递阶结构模型。实例分析表明:采用ISM分析CFIT诱因关系,过程简便,易于理解,注重条理,逻辑性强,层次结构科学合理。从而也证明了ISM用于CFIT分析的可行性和有效性。

参考文献:

[1] 达里尔 R. 史密斯. 可控飞行撞地 [M]. 王亮,译. 北京:中国民航出版社,2003.

[2] ICAO Procedures for Air Navigation Services Air Traffic Management (Doc 4444 ATM/501), November 2001.

[3] 杜红兵,王雪莉. 基于贝叶斯网络的可控飞行撞地事故原因分析方法 [J]. 安全与环境学报,2009,9(5):136-139.

[4] 张晓全,吴贵锋. 功能共振事故模型在可控飞行撞地事故分析中的应用 [J]. 中国安全生产科学技术,2011,7(4):66-70.

[5] 张静,赵玲. 基于解释结构模型的微博用户群体行为影响因素分析 [J]. 情报科学,2016,34(8):29-35.

[6] 崔浩林. 防相撞理论与应用 [M]. 北京:科学出版社,2014.

[7] 汪邦军,李润岐,戴伟,等. 产品制造过程质量波动源解释结构模型与应用 [J]. 工业工程,2016,19(5):146-152.

[8] 祁元福. 世界航空安全与事故分析 [M]. 北京:中国民航出版社,1998.

[9] 刘杰,甘旭升,戴喆,等. 改进人工鱼群算法的小波神经网络模型 [J]. 火力与指挥控制,2015,40(12):115-118.

(上接第 171 页)

[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2013,11(5):797-801.

[4] 付莹,黄晓晴,缪永生. 通用测试软件开发平台的设计方法及应用 [J]. 计算机测量与控制,2014,22(12):4190-4193.

[5] 谢化勇,肖明清,陈伟明,等. 某型导发架通用测试系统软件复用性设计 [J]. 火力与指挥控制,2010,35(1):156-159.

[6] 叶海明,周绍磊,王昆平. 通用测试系统软件平台设计 [J]. 国外电子测量技术,2010(2):54-57.

[7] 刘阳,李玺. 某型导弹测试系统模块化设计 [J]. 火力与指挥控制,2015,40(7):168-169.

[8] 黄威,聂藩,丁建完. 关键字驱动测试自动化框架模型

与系统实现 [J]. 计算机技术与发展,2012,22(4):57-60.

[9] 祁琳莹,洪玫,冯丽云,等. 一种针对单元测试框架的测试脚本重用方法 [J]. 计算机应用研究,2013,30(6):1764-1768.

[10] 王军,孟凡鹏. 基于关键字驱动的自动化测试研究与实现 [J]. 计算机工程与设计,2012,33(9):3652-3656.

[11] 陈效儒,何宇化. 关键字驱动的嵌入式实时软件自动化测试框架研究 [J]. 工业控制计算机,2014(2):46-47.

[12] 李海龙,刘文文. 基于 VC++ 6.0 的 SCPI 解释器设计 [J]. 电子设计工程,2012,20(4):94-96.

[13] 程专. 数字示波器 SCPI 命令系统及程控软件的设计与实现 [D]. 成都:电子科技大学,2014.