

doi: 10.7690/bgzd.2019.02.015

基于云模型的装备研制阶段技术风险评估模型

王生玉, 王 正, 蔡绪涛

(海军航空大学青岛校区航空装备保障指挥系, 山东 青岛 266041)

摘要: 针对装备研制阶段技术风险评估, 基于云模型理论建立一种装备研制阶段技术风险评估模型。归纳评估指标与技术风险之间的定性知识规则, 根据知识规则集对关键技术风险指标进行映射器设计, 得到了技术风险指标与技术风险之间的非线性映射关系, 建立技术风险概率和影响评估模型, 通过模型对关键技术的风险概率和影响进行评估, 发现同一风险的概率值和影响值之间存在差异, 说明了对风险概率和影响分别讨论和评估的必要性。研究结果表明: 该模型实现了对技术风险概率和影响的量化评估, 对装备研制技术风险防范和处置具有指导意义。

关键词: 装备研制; 技术风险; 云模型; 评估模型; 映射器

中图分类号: E139 **文献标志码:** A

Technical Risk Assessment Model of Equipment Development Based on Cloud Model

Wang Shengyu, Wang Zheng, Cai Xutao

(Department of Aviation Equipment Support Command, Qingdao Branch, Navy Aeronautical University, Qingdao 266041, China)

Abstract: Aiming at the technical risk assessment in the development stage of the equipment, based on the cloud model theory, the qualitative knowledge rules between the induction and evaluation index and the technical risk are summarized, and the mapping agent of the key technology risk index is designed based on the knowledge rule set, got the non-linear mapping relationship between technical risk index and the technical risk, established technical risk probability and influence assessment model. Through the model, the risk probability and influence of the key technology are evaluated, and it is found that there is a difference between the probability value and the influence value of the same risk, and the necessity of discussing and evaluating the risk probability and influence separately is explained. The research results show that the model realizes the quantization evaluation of technical risk probability and influence, and it can guides the equipment development technology risk prevention and treatment.

Keywords: equipment development; technical risk; cloud model; evaluation model; mapping agent

0 引言

装备研制阶段技术风险管理本身即为不确定性问题研究, 要达到风险管理的目的, 需对风险进行量化评估。在风险管理中, 前期的风险识别和指标体系构建为风险评估奠定了基础, 通过对风险评估相关方法进行比较, 云模型理论在处理不确定性问题方面具有较大优势。云模型是基于模糊理论和概率论的不确定性转换模型, 能实现定性概念与定量描述之间的转换, 而且能很好体现概念的模糊性和随机性^[1-3]。

通过对风险特性分析, 传统评估方法没有区别分析风险概率和影响。笔者将对二者进行区别分析和评估, 建立更加符合实际情况的概率和影响关系, 以更加准确地对风险进行综合评估。

1 云模型理论

设 U 为定量论域, C 是 U 上的定性概念, x 为概念 C 上具有确定度 $\mu(x)$ 的随机实现, 有: $\forall x \in U, U \rightarrow [0, 1], x \rightarrow \mu(x)$ 。 x 在 U 上的分布称为云, 单个 x 称为云滴^[4]。如果 $x \sim N(Ex, En^2)$, $En' \sim N(En, He^2)$, $\mu(x) = \exp[-\frac{(x-Ex)^2}{2En^2}]$, 则 x 的分布称为正态云。

云模型通过特征参数期望 Ex (expected value)、熵 En (entropy) 和超熵 He (hyper entropy) 描述定性概念的定量特性^[5-6]。隶属云反映了论域内云滴的整体分布特性, 单个云滴无法反映云滴的分布规律, 但大量云滴的分布就可以反映出概念的整体特性^[7-8]。隶属云能够反映概念的模糊性和随机性, 当

收稿日期: 2018-11-15; 修回日期: 2018-12-08

作者简介: 王生玉(1991—), 男, 甘肃人, 硕士, 助教, 从事装备研制风险管理研究。

特征参数变化时，隶属云也发生相应变化^[9-11]。图 1—4 显示了熵和超熵变化时，隶属云的不同情况。

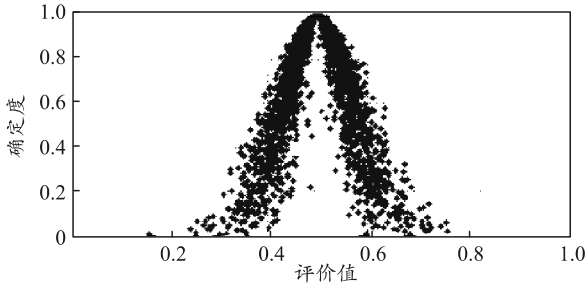


图 1 特征参数(0.5,0.067,0.018)对应隶属云

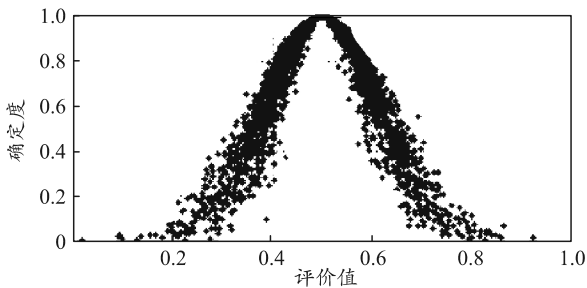


图 2 特征参数(0.5,0.11,0.018)对应隶属云

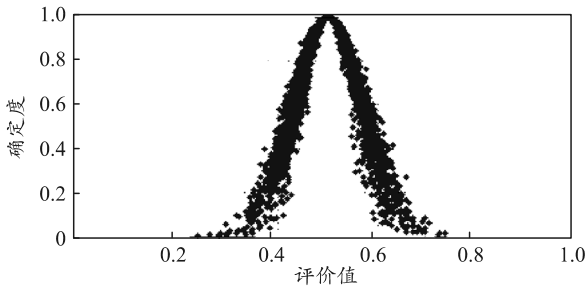


图 3 特征参数(0.5,0.067,0.01)对应隶属云

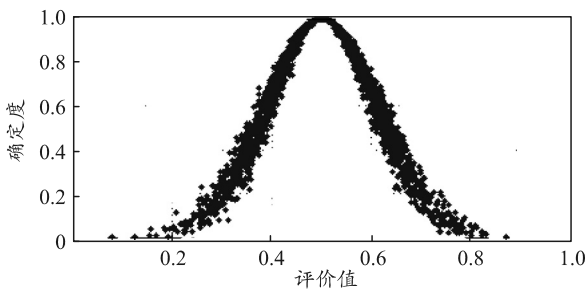


图 4 特征参数(0.5,0.11,0.01)对应隶属云

2 基于云模型的技术风险评估模型

2.1 技术风险指标映射器设计

云模型映射器将定量数据嵌入定性概念进行推理分析，将变量关系转换为非线性映射规律，最终完成定量输出^[12-13]。映射器的实现是不确定性推理过程，也是概念的非线性映射过程^[14-15]。

建立指标与风险映射关系之前，需将参数进行云化处理^[16]，云化方法因参数类型不同而异^[17-18]。当对变量进行云化处理时，如果变量具有既定范围，

如 $C \in [C_{\min}, C_{\max}]$ ，需进行参数计算：

$$\left. \begin{aligned} Ex &= (C_{\min} + C_{\max})/2 \\ En &= (C_{\max} - C_{\min})/6 \\ He &= k \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

如果变量只受到单侧条件约束，如 $C \geq C_{\min}$ 或 $C \leq C_{\max}$ ，则需根据具体情况确定另一侧边界，然后进行参数计算。

通常利用专家评估赋值实现变量的参数云化。对于具体定性变量，专家根据各自知识经验进行理解判断， n 个专家往往会有 n 种评估模型 (Ex_i, En_i, He_i) ， $i=1, 2, \dots, n$ ，对 n 种评估模型进行综合：

$$\left. \begin{aligned} Ex &= \frac{Ex_1 \times En_1 + Ex_2 \times En_2 + \dots + Ex_n \times En_n}{En_1 + En_2 + \dots + En_n} \\ En &= En_1 + En_2 + \dots + En_n \\ He &= \frac{He_1 \times En_1 + He_2 \times En_2 + \dots + He_n \times En_n}{En_1 + En_2 + \dots + En_n} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

通过风险特征分析及专家咨询，将评估评语分为 7 个等级，并确定评语的云模型参数^[19]如表 1。

表 1 风险评估评语云模型参数

评语	期望 Ex	熵 En	超熵 He
很小 C_1	0	0.03	0.01
小 C_2	0.17	0.03	0.01
较小 C_3	0.34	0.06	0.01
一般 C_4	0.50	0.06	0.01
较大 C_5	0.67	0.06	0.01
大 C_6	0.84	0.03	0.01
很大 C_7	1.00	0.03	0.01

通过正向云发生器生成每个风险评语的云模型，构成风险评估的云标尺如图 5。

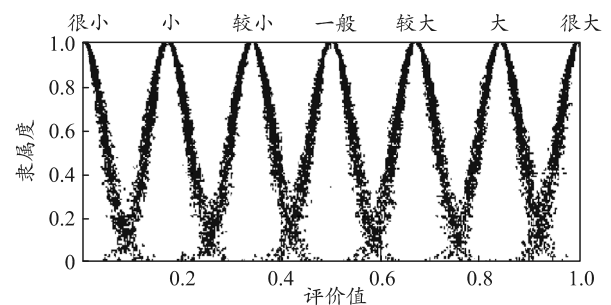


图 5 风险等级云标尺

以技术成熟度、技术复杂度和技术载荷/应力为例，对技术风险指标进行映射器设计：

1) 技术成熟度。

对于装备技术而言，一般情况下，技术成熟度越低，对应的技术风险越高^[20]。通过对传统技术成熟度等级定义进行分析，针对技术风险管理的技术特征，对技术成熟度的风险定义如表 2、表 3。

表 2 技术成熟度等级划分

R-TRL	定义
1	形成了该技术有关的基本概念和原理
2	进行了技术的应用设想和论证
3	通过分析和试验的手段进行关键性功能验证
4	在实验室环境中进行了技术验证
5	在相应的模拟环境中进行了技术模型验证
6	在相应的使用环境中进行了技术原型演示
7	实际技术模块完成, 并通过试验获得了使用资格

表 3 TRL 特征

R-TRL	1	2	3	4	5	6	7
技术	概念和原理	功能	原理	演示	原型	实际	产品
状态	论证	验证	样机	样机	样机	分系	系统
集成度			部件级			统级	级
验证环境		实验室环境		模拟环境		使用环境	

基于以上的分析, 结合专家的经验知识, 得到技术成熟度评估的规则集为:

- “如果技术成熟度 $M=7$, 则技术风险很小”;
- “如果技术成熟度 $M=6$, 则技术风险小”;
- “如果技术成熟度 $M=5$, 则技术风险较小”;
- “如果技术成熟度 $M=4$, 则技术风险一般”;
- “如果技术成熟度 $M=3$, 则技术风险较大”;
- “如果技术成熟度 $M=2$, 则技术风险大”;
- “如果技术成熟度 $M=1$, 则技术风险很大”。

用 M 表示技术风险的成熟度, 取论域为 $U_M=[0,7]$ 。用 C 表示设定的技术风险评估评语值, 论域为 $V=[0,1]$ 。取 $N=7$, N 表示规则个数。则以上规则集可以表示为,

$$\begin{cases} R_1 : \text{IF } M = M_1, \text{ THEN } C = C_1 \\ \vdots \\ R_6 : \text{IF } M = M_6, \text{ THEN } C = C_6 \\ R_7 : \text{IF } M = M_7, \text{ THEN } C = C_7 \end{cases}$$

其中: $M_1=(0,0.6,0.02)$, $M_2=(1,0.6,0.02)$, $M_3=(3,0.6,0.02)$, $M_4=(4,0.6,0.02)$, $M_5=(5,0.6,0.02)$, $M_6=(6,0.6,0.02)$, $M_7=(7,0.6,0.02)$ 。基于 Matlab 编程仿真, 得到技术成熟度与技术风险之间的非线性映射关系如图 6 所示。

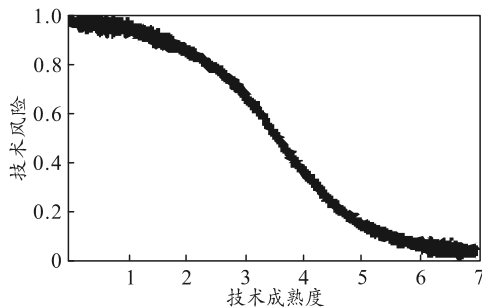


图 6 技术成熟度-风险映射关系

2) 技术复杂度。

装备研制涉及技术种类丰富, 技术难度差异较大, 而技术难度的要素之一就是技术复杂度。关于技术复杂度, 综合考虑的因素较多, 简单分析定级如表 4 所示。

表 4 技术复杂度等级划分

技术复杂度	定义
1	技术涉及专业单一, 属于局部技术
2	技术涉及专业很少, 属于局部关键技术
3	技术涉及专业较少, 属于模块技术
4	技术涉及专业多, 属于模块主要技术
5	技术涉及专业很多, 属于分系统技术
6	技术涉及专业较多, 属于分系统关键技术
7	技术涉及专业复杂, 属于系统主要技术

基于以上的分析, 结合专家的经验知识, 得到技术复杂度评估的规则集为:

- “如果技术复杂度 $F=1$, 则技术风险很小”;
- “如果技术复杂度 $F=2$, 则技术风险小”;
- “如果技术复杂度 $F=3$, 则技术风险较小”;
- “如果技术复杂度 $F=4$, 则技术风险一般”;
- “如果技术复杂度 $F=5$, 则技术风险较大”;
- “如果技术复杂度 $F=6$, 则技术风险大”;
- “如果技术复杂度 $F=7$, 则技术风险很大”。

用 F 表示技术风险的复杂度, 取论域为 $U_F=[0, 7]$ 。用 C 表示设定的技术风险评估评语值, 论域为 $V=[0, 1]$ 。取 $N=7$, N 表示规则个数。以上规则集可以表示为:

$$\begin{cases} R_1 : \text{IF } F = F_1, \text{ THEN } C = C_1 \\ \vdots \\ R_6 : \text{IF } F = F_6, \text{ THEN } C = C_6 \\ R_7 : \text{IF } F = F_7, \text{ THEN } C = C_7 \end{cases}$$

其中: $F_1=(0,1.67,0.03)$, $F_2=(1,1.67,0.03)$, $F_3=(2,1.67,0.03)$, $F_4=(3,1.67,0.03)$, $F_5=(4,1.67,0.03)$, $F_6=(5,1.67,0.03)$, $F_7=(6,1.67,0.03)$, $F_8=(7,1.67,0.03)$ 。

基于 Matlab 编程仿真, 得到技术复杂度与技术风险之间的非线性映射关系, 如图 7 所示。

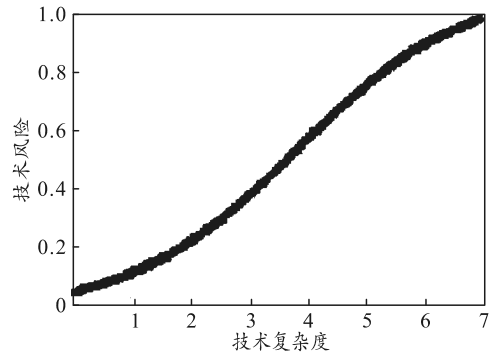


图 7 技术复杂度-风险映射关系

3) 技术载荷/应力。

单说技术是一个相对抽象的概念，而硬件及软件的实现则是技术的具体体现。对硬件而言，硬件应力一定程度决定了硬件技术的可靠性，而对软件而言，软件载荷则是评估软件技术的重要指标之一。

通过对技术载荷/应力的程度分析，将技术载荷/应力的层级划分如表 5 所示。

表 5 技术载荷/应力等级划分

技术载荷/应力	定义
1	技术可简单维持装备正常运行，时有故障发生，影响装备作战效能
2	技术可维持装备正常运行，偶有故障发生
3	技术可保证装备正常运行，少有故障发生
4	技术可保障装备正常负荷运转
5	技术可承载装备短期低负荷运转
6	技术可承载装备较低负荷运转
7	技术可承载装备超负荷作战任务

基于以上的分析，结合专家的经验知识，得到技术载荷/应力评估的规则集为：

- “如果技术载荷/应力 $L=7$ ，则技术风险很小”；
- “如果技术载荷/应力 $L=6$ ，则技术风险小”；
- “如果技术载荷/应力 $L=5$ ，则技术风险较小”；
- “如果技术载荷/应力 $L=4$ ，则技术风险一般”；
- “如果技术载荷/应力 $L=3$ ，则技术风险较大”；
- “如果技术载荷/应力 $L=2$ ，则技术风险大”；
- “如果技术载荷/应力 $L=1$ ，则技术风险很大”。

用 L 表示技术风险的载荷/应力，取论域为 $U_L=[0, 7]$ 。用 C 表示设定的技术风险评估评语值，论域为 $V=[0, 1]$ 。取 $N=7$ ， N 表示规则个数。则以上规则集可以表示为：

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 : \text{IF } L = L_1, \text{ THEN } C = C_1 \\ \vdots \\ R_6 : \text{IF } L = L_6, \text{ THEN } C = C_6 \\ R_7 : \text{IF } L = L_7, \text{ THEN } C = C_7 \end{array} \right.$$

其中： $L_1=(0,0.6,0.02)$ ， $L_2=(1,0.6,0.02)$ ， $L_3=$

$(3,0.6,0.02)$ ， $L_4=(4,0.6,0.02)$ ， $L_5=(5,0.6,0.02)$ ， $L_6=(6,0.6,0.02)$ ， $L_7=(7,0.6,0.02)$ 。

基于 Matlab 编程仿真，得到技术载荷/应力与技术风险之间的非线性映射关系如图 8 所示。

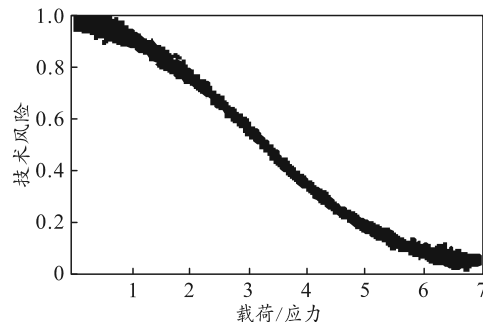


图 8 载荷/应力-风险映射关系

2.2 概率和影响综合

技术风险指标通过对应的映射器后，生成相应的指标风险概率值和影响值，通过对指标风险概率和影响值进行加权求和，即可得到技术风险的概率值和影响值：

$$P_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} w_{j-p}; \tag{3}$$

$$C_i = \sum_{j=1}^m y_{ij} w_{j-c} \tag{4}$$

其中： x_{ij} 为第 i 个技术风险的第 j 个指标对应的风险概率； w_{j-p} 为第 j 个指标的概率权； y_{ij} 为第 i 个技术风险的第 j 个指标对应的风险影响； w_{j-c} 为第 j 个指标的影响权。

3 技术风险概率和影响数据计算

根据技术风险识别结果，从某型装备武器控制系统选定 10 个关键技术风险，将技术风险对应的各指标参数输入映射器，得到各指标对应的概率值和影响值如表 6 和表 7 所示。

表 6 技术指标的风险概率值

技术指标	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}
技术成熟度	0.513 8	0.758 3	0.969 2	0.554 5	0.757 7	0.167 2	0.758 9	0.964 2	0.408 5	0.706 9
技术复杂性	0.026 0	0.852 1	0.704 3	0.081 7	0.100 7	0.524 9	0.479 0	0.736 0	0.390 0	0.463 9
技术可靠度	0.509 2	0.373 0	0.644 4	0.608 8	0.492 9	0.879 9	0.772 7	0.320 9	0.862 6	0.995 6
技术先进度	0.500 4	0.246 6	0.936 7	0.507 7	0.408 6	0.652 8	0.470 6	0.882 3	0.354 8	0.194 4
技术适用性	0.260 2	0.439 9	0.989 3	0.780 3	0.184 6	0.093 4	0.913 9	0.356 6	0.280 3	0.371 0
技术兼容性	0.718 1	0.890 9	0.210 4	0.898 8	0.485 6	0.595 5	0.113 9	0.151 9	0.375 2	0.442 2
技术标准化	0.091 6	0.851 4	0.986 8	0.691 4	0.745 6	0.192 8	0.964 9	0.368 3	0.857 1	0.383 5
载荷/应力	0.152 1	0.362 1	0.229 5	0.879 3	0.557 0	0.898 2	0.230 9	0.577 6	0.395 6	0.722 8
研发水平	0.382 9	0.318 0	0.547 7	0.826 7	0.134 8	0.435 7	0.614 5	0.197 9	0.515 0	0.941 9

续表 6 技术指标的风险概率值

技术指标	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}
研发周期	0.726 2	0.853 3	0.658 1	0.724 5	0.112 6	0.923 7	0.979 8	0.437 8	0.461 0	0.624 6
研发成本	0.262 5	0.520 8	0.301 2	0.567 6	0.348 0	0.085 6	0.569 8	0.231 4	0.114 5	0.272 7
工艺水平	0.332 5	0.879 8	0.338 0	0.927 5	0.607 3	0.580 3	0.391 3	0.946 8	0.875 6	0.020 6
器材	0.093 6	0.851 6	0.973 1	0.709 7	0.792 7	0.970 5	0.323 4	0.579 2	0.713 0	0.570 0
技术设施	0.181 8	0.236 6	0.377 8	0.829 8	0.914 9	0.405 2	0.171 4	0.190 7	0.948 2	0.181 9
技术设备	0.944 6	0.156 9	0.545 4	0.732 1	0.854 1	0.741 8	0.598 9	0.166 4	0.081 4	0.533 4
组织机构	0.621 7	0.358 9	0.265 4	0.163 3	0.649 4	0.012 3	0.563 7	0.894 5	0.509 4	0.662 4
管理措施	0.647 3	0.946 7	0.757 6	0.703 4	0.070 1	0.121 0	0.198 7	0.192 1	0.854 3	0.849 3

表 7 技术指标的风险影响值

技术指标	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}
技术成熟度	0.357 3	0.962 7	0.643 1	0.098 4	0.036 4	0.176 2	0.367 7	0.273 1	0.990 2	0.284 1
技术复杂性	0.757 5	0.140 5	0.069 2	0.178 5	0.090 3	0.492 3	0.960 2	0.631 3	0.702 1	0.660 8
技术可靠度	0.805 7	0.880 3	0.787 1	0.080 3	0.041 4	0.233 3	0.113 6	0.211 4	0.178 5	0.952 2
技术先进度	0.941 6	0.059 6	0.669 6	0.096 6	0.721 8	0.019 9	0.561 1	0.819 1	0.695 1	0.260 7
技术适用性	0.764 3	0.203 7	0.682 6	0.746 5	0.837 7	0.614 2	0.055 1	0.846 8	0.062 3	0.858 9
技术兼容性	0.712 4	0.739 7	0.933 1	0.387 6	0.795 0	0.484 5	0.072 3	0.468 6	0.932 4	0.790 3
技术标准化	0.897 2	0.402 7	0.526 6	0.326 0	0.305 6	0.442 9	0.200 7	0.364 5	0.392 5	0.138 8
载荷/应力	0.304 8	0.695 3	0.985 1	0.667 4	0.977 6	0.102 0	0.302 0	0.759 1	0.808 9	0.085 5
研发水平	0.384 2	0.119 3	0.390 1	0.094 3	0.580 6	0.212 1	0.585 3	0.330 8	0.837 3	0.453 3
研发周期	0.212 9	0.038 4	0.860 7	0.620 4	0.493 8	0.880 9	0.182 6	0.754 7	0.407 8	0.953 2
研发成本	0.739 9	0.016 6	0.861 7	0.024 4	0.066 3	0.163 0	0.630 2	0.610 6	0.591 6	0.130 6
工艺水平	0.373 0	0.968 3	0.412 6	0.695 8	0.516 0	0.191 2	0.849 3	0.878 9	0.828 1	0.277 6
器材	0.664 8	0.448 4	0.784 1	0.203 2	0.345 3	0.141 7	0.565 0	0.944 6	0.668 2	0.099 9
技术设施	0.018 6	0.737 2	0.534 2	0.632 0	0.957 3	0.721 5	0.386 7	0.772 0	0.627 9	0.840 4
技术设备	0.290 0	0.225 8	0.603 4	0.852 8	0.562 7	0.390 9	0.772 7	0.191 2	0.547 8	0.202 5
组织机构	0.670 2	0.640 3	0.522 1	0.714 0	0.648 4	0.335 9	0.446 6	0.321 7	0.189 0	0.257 8
管理措施	0.524 1	0.620 4	0.604 1	0.713 7	0.986 3	0.163 9	0.711 4	0.492 4	0.693 6	0.050 4

对所得值进行综合，由 $P_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} w_{j-p}$ ， $C_i =$

$\sum_{j=1}^m y_{ij} w_{j-c}$ 可得技术风险概率和影响估值如表 8 所示。

通过映射器对上述风险各指标作用程度进行仿真，较好地处理了风险的随机性和模糊性。通过上

述计算结果，可得 10 个技术风险的概率和影响值。由排序结果可以看出：同一风险的概率值和影响值之间的差异，在选定的 10 个技术风险中，PRL4 技术风险最有可能发生，PRL9 技术风险影响最严重。概率与影响值的差异说明了对风险概率和影响分别讨论和评估的必要性。

表 8 技术风险概率和影响估值

技术风险	PRL1	PRL2	PRL3	PRL4	PRL5	PRL6	PRL7	PRL8	PRL9	PRL10
P	0.397 8	0.590 1	0.626 5	0.632 8	0.427 6	0.460 2	0.560 6	0.523 6	0.501 2	0.562 3
排序	10	3	2	1	9	8	5	6	7	4
技术风险	PRL1	PRL2	PRL3	PRL4	PRL5	PRL6	PRL7	PRL8	PRL9	PRL10
C	0.553 3	0.464 8	0.620 9	0.370 0	0.480 1	0.318 0	0.462 5	0.558 5	0.633 3	0.449 7
排序	4	6	2	9	5	10	7	3	1	8

4 结束语

笔者主要通过建立风险评估模型对装备研制阶段技术风险进行研究。了解云模型理论，对云模型

的特征参数、云发生器机理等进行分析研究。分析发现：云模型在处理不确定问题方面，同时兼顾了模糊性与随机性，并且云滴分布能够体现概念的核

心要素; 因此, 将其作为风险评估模型的基础理论。笔者以云模型推理映射关系为核心, 基于云模型建立了装备研制阶段技术风险评估模型, 对技术风险的概率和影响进行了量化评估。从评估结果可以看出: 同一技术风险的概率值和影响值之间存在差异, 同时, 概率与影响值的差异也说明了对风险概率和影响分别讨论的必要性。

参考文献:

- [1] 王晓明, 王玲. 电动机的 DSP 控制—TI 公司 DSP 应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 128-141.
- [2] Texas Instruments. TMS320LF/LC240xA DSP Controllers Reference Guide-System and Peripherals[Z]. Literature Number: SPRU357C, 2006.
- [3] 李军. A3000 系统的云模型控制[D]. 南通: 江苏科技大学, 2013.
- [4] 李德毅. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 143-158, 292-293, 344-345.
- [5] WANG Y, LIU S Y, NIU W, et al. Threat assessment method based on intuitionistic fuzzy similarity measurement reasoning with orientation[J]. IEEE Transactions on Communications, China, 2014, 11(6): 119-128.
- [6] YANG B, TIAN Y Q, ZHU Z Y. Generalization-based discovery of spatial association rules with linguistic cloud model[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 15(4): 728-734.
- [7] 傅新平, 胡伶俐. 基于云模型的综合交通系统服务水平评价[C]. 2007 年海峡两岸智能运输系统学术研讨会, 2007.
- [8] HAN X J, YAN Y, CHENG C, et al. Monitoring of oxygen content in the flue gas at a coal-fired power plant using cloud modeling techniques[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(4): 953-963.
- [9] JIN B, WANG Y, LIU Z Y, et al. A trust model based on cloud model and bayesian networks[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11(1): 452-459.
- [10] 张国英, 沙云, 刘旭红. 高维云模型及其在多属性评价中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(12): 1065-1069.
- [11] 刘琪, 刘晓青. 正态云隶属度函数确定的 FSM 方法[J]. 自动化仪表, 2012, 33(2): 16-18.
- [12] LIU X N, PENG Z H, DENG F, et al. A threat assessment method based on cloud model and particle swarm optimization[C]// Proc. of the 2013 IEEE 25th Chinese Conference on Control and Decision. Guiyang, China: IEEE Press, 2013: 3560-3564.
- [13] 杨柳, 吕英华. 基于云模型的网络风险评估技术研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(10): 95-98.
- [14] 吴晓庆. 基于传输时延的网络控制系统中云模型控制器的研究[D]. 南通: 江苏科技大学, 2007.
- [15] YIN G Y, ZHOU S L, ZHANG W G. A threat assessment algorithm based on AHP and principal components analysis[J]. Procedia Engineering, 2011, (15): 4590-4596.
- [16] DU X Y, YIN Q J, HUANG K D, et al. Transformation between qualitative variables and quantity based on cloud models and its application[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(4): 772-776.
- [17] Risk management guide for DoD acquisition[Z]. Defense System Management College Press, 2003.
- [18] TIAN Y Q, LI Z, ZHU Z Y. Building a tax predictive model based on the cloud neural network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 14(3): 81-86.
- [19] 张伟. 基于云模型的雷达辐射源威胁评估与干扰决策研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2014.
- [20] 卜广志. 武器装备体系的技术成熟度评估方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(10): 1994-2000.