

doi: 10.7690/bgzdh.2021.02.003

# 基于云模型的装备维修保障系统评估

连云峰, 代冬升, 李会杰, 张福元

(中国人民解放军 32181 部队, 西安 710000)

**摘要:** 为发现装备维修保障系统存在的问题, 将云理论引入装备维修保障系统进行评估。在分析装备维修保障系统构成要素的基础上, 建立装备维修保障系统评估指标体系, 设计基于云模型的装备维修保障系统评估流程, 采用标准云计算、指标权重计算, 构建云计算和云相似度计算等模型, 并通过实例验证了评估方法的可行性。应用结果表明: 该评估能客观描述装备维修保障系统建设现状, 为装备维修保障系统建设决策提供参考。

**关键词:** 云模型; 装备维修; 系统评估

**中图分类号:** E917 **文献标志码:** A

## Equipment Maintenance Support System Assessment Based on Cloud Model

Lian Yunfeng, Dai Dongsheng, Li Huijie, Zhang Fuyuan

(No. 32181 Unit of PLA, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** In order to find out problems of the equipment maintenance support system, the cloud theory is introduced into the equipment maintenance support system assessment. On the basis of systematic analysis of the components of the equipment maintenance support system, the paper establishes the equipment maintenance support system assessment index system, designs the system assessment process based on cloud model, uses the standard cloud calculation model, the index weight calculation model, builds the cloud calculation model and the cloud similarity calculation model, and verifies the feasibility combination example of the assessment method. The application shows that the method can objectively describe the current situation of equipment maintenance support system construction, and provides reference for the next decision of equipment maintenance support system construction.

**Keywords:** cloud model; equipment maintenance; system assessment

## 0 引言

近年来的局部战争表明: 军事行动更加依赖于装备体系之间的对抗, 装备是否能够持续、稳定、高效地发挥作战效能, 逐渐成为战争成败的关键。通过对装备维修保障系统进行评估, 能够准确掌握装备维修保障系统建设现状, 发现装备维修保障系统存在的短板和问题, 为装备维修保障任务规划和装备维修保障系统建设提供决策支撑。

装备维修保障系统知识表示的不确定性决定了在对其进行评估时, 需要在定性描述和定量描述之间进行转换。当前定性描述和定量描述之间转换的方法主要是在模糊理论基础上衍生的方法, 如模糊综合评估法、模糊层次分析法等。这类方法是通过确定隶属度函数, 实现定性描述与定量描述的转换。由于在确定隶属度函数时, 大多采用了经验做法, 缺少必要的可行性论证, 并且隶属度函数确定后, 不能很好地体现评估过程随机性和评估结果的模糊性<sup>[1]</sup>, 因而不能很好地满足装备维修保障系统评估

需要。鉴于此, 笔者将云模型引入装备维修保障系统评估中, 以获得更加科学的评估结果, 为决策提供更加合理的支撑。

## 1 装备维修保障系统评估指标设计

### 1.1 装备维修保障系统构成要素分析

装备维修保障的基本任务是充分发挥各种维修资源的作用, 在平时采取多种装备维护和修理手段, 最大限度地使各种装备处于良好状态或规定储存保养状态, 满足部队作战训练及其他任务需要; 在战时采取多种紧急修理措施, 尽可能多地在有效时间内抢救、修复战损和故障装备, 提高武器装备的再生率和持续参战能力<sup>[2-3]</sup>。

装备维修任务的完成需要保障人员、维修设备、保障设施、维修器材、技术资料、组织指挥等要素的相互作用, 而这些也是维修保障系统的构成要素。其中: 维修人员是完成维修保障任务的主体, 包括具备专业素养, 熟悉装备结构原理、故障机理, 掌握维修技能的专业人员; 保障设备和保障设施是完

收稿日期: 2020-09-25; 修回日期: 2020-11-10

作者简介: 连云峰(1981—), 男, 河北人, 博士, 工程师, 从事装备保障综合论证研究。E-mail: 13831158662@163.com。

成保障任务的手段和依托，特别是随着装备技术含量的提升，维修任务的完成愈发倚重保障设备和保障设施的使用；维修器材是完成维修保障任务的物质支撑，特别是在“前换后修”作业方式下，维修器材对维修任务完成的作用更加凸显；技术资料是完成维修保障任务的依据，是开展维修保障活动的规范和标准；组织指挥是维修保障任务完成的神经中枢，保证了各组成要素的有机耦合，发挥系统最大效能。

### 1.2 指标体系构成

按照维修保障能力的构成要素分析，通过查阅文献[4-5]和咨询有关专家，在系统分析装备维修保障能力形成因素的基础上，遵循科学性、一致性、独立性的原则，舍弃作用不大的因素，只考虑作用明显、对装备维修保障系统影响较大因素，构建装备维修保障系统评估指标体系如表 1 所示。

表 1 装备维修保障能力评估指标体系

评估目标	一级指标	二级指标
装备维修保障系统 A	保障人员 A1	人员满编率 A11
		专业覆盖率 A12
		人员称职率 A13
		人员技能水平 A14
	维修设备 A2	品种配套率 A21
		数量配套率 A22
		设备完好率 A23
		设备通用性 A24
	保障设施 A3	设施配套率 A31
		设施完好率 A32
		设施使用率 A33
		设施适用性 A34
	维修器材 A4	品种配套率 A41
		数量配套率 A42
		质量完好率 A43
	技术资料 A5	种类配套率 A51
数量配套率 A52		
资料适用性 A53		
组织指挥 A6	需求获取能力 A61	
	筹划决策能力 A62	
	组织计划能力 A63	
	协调控制能力 A64	

## 2 基于云模型的装备维修保障能力评估

### 2.1 云模型理论分析

云模型是我国李德毅院士在传统模糊集理论和概率统计的基础上提出的一种定性概念与定量表示之间不确定性转换模型<sup>[6]</sup>。它能够把定性概念的模糊性和随机性集成在一起，构成定性和定量描述之间的映射，实现定性语言值与定量数值之间的转换，将模糊的信息直观准确地表达<sup>[7-8]</sup>。

#### 2.1.1 云定义

设  $U$  是一个普通集合， $U=\{u\}$ ，称为论域。关于论域  $U$  中的模糊集合  $A$ ，是指对于任意元素  $u$  都存在一个有稳定倾向的随机数  $\eta_A$ ，称为  $u$  对  $A$  的隶属度。如果论域中元素是简单有序的，则  $\eta_A$  可以看作是变量  $u$  的隶属度在  $U$  上的分布，称为云；如果论域中元素不是简单有序的，而根据某个法则  $f$ ，可将  $U$  映射到另一个有序的论域上  $U'$ ， $U'$  中的一个且只有一个  $u'$  与  $u$  对应，则  $u'$  为变量  $u$  的隶属度在  $U'$  的分布，称为云。

#### 2.2.2 云的数字特征

云用期望值  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_e$  来表征。期望值  $E_x$  是最具代表性的数字特征，是定性概念转换后所有量化值的平均值；熵  $E_n$  是用来度量定性概念粒度的量，通常用于表示定性概念的模糊程度，熵越大，定性概念越模糊，其云图的离散程度也越大；超熵  $H_e$  是对熵不确定性度量，能较好体现指标的稳定性，即可以反映出云图中云滴的凝聚程度<sup>[9]</sup>。图 1 是云数字特征(50,16.67,01)的云图。

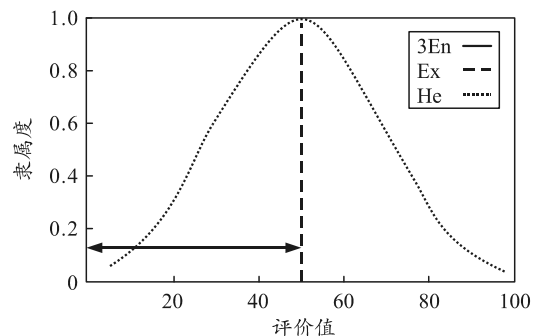


图 1 云数字特征及云图

### 2.2 云发生器

为了实现在评估过程中，将模糊性和随机性集成在一起，通过设计正向云发生器和逆向云发生器完成定性概念和定量描述之间的映射。

#### 2.2.1 正向云发生器

正向云发生器用于实现定性概念到定量概念映射<sup>[10]</sup>。设云数字特征为  $(E_x, E_n, H_e)$ ，隶属度函数为  $\exp(-(x_i - E_x)^2 / k\sigma^2)$ ，其中， $k$  为常数，可以根据评估需求进行调整。云数字特征生成  $n$  个云滴的计算方法如下：

- 1) 生成 1 个均值为  $E_n$ ，方差为  $H_e$  的正态随机数  $\sigma_i$ ， $\sigma_i = \text{NORM}(E_n, H_e)$ ；
- 2) 生成 1 个均值为  $E_x$ ，方差为  $\sigma_i$  的正态随机

数  $x_i, x_i=NORM(E_x, \sigma_i)$ ;

3) 计算隶属度  $u_i = \exp(-(x_i - E_x)^2 / k\sigma^2)$ , 获得 1 个隶属度为  $u_i$  的云滴  $drop(x_i, u_i)$ ;

4) 重复 1)–3), 直至生成  $n$  个云滴为止。

### 2.2.2 逆向云发生器

逆向云发生器用于实现定量描述到定性概念的映射<sup>[11]</sup>。设样本空间为  $X(x_1, x_2, \dots, x_m)$ , 该样本空间生成云数字特征  $(E_x, E_n, H_e)$  的计算模型如下:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= 1/n \sum_{i=1}^n x_i \\ E_n &= \sqrt{\pi/2} \left| \sum_{i=1}^n |x_i - E_x| / n \right| \\ H_e &= \sqrt{1/(n-1) \sum_{i=1}^n (x_i - E_x)^2 - E_n^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

## 3 基于云模型的评估模型

装备维修保障系统的评估要能够满足不同层级和类型管理部门对装备维修保障系统建设情况的评估需求, 需要从底层指标评估结果出发, 通过逐级合成计算的方式, 逐级计算各级指标的评估结果, 并引入评判集作为评估结果分析的依据。

为此, 笔者设计基于云模型的装备维修保障系统评估过程如下:

1) 咨询领域专家确定评判集的取值及置信区间;

2) 按照评判集的构成, 利用正向云发生器, 生成标准云模型;

3) 邀请领域专家对底层指标进行打分, 利用逆向云发生器, 生成评估结果云模型;

4) 计算结果云与标准云相似度, 计算底层指标评估结果;

5) 设计评估指标权重计算模型, 计算各级指标权重;

6) 设计云合成模型, 计算上层指标评估结果, 直至完成评估目标。

### 3.1 评判集及标准云计算模型

评判集是对评估指标作出由各种评估所组成的集合。一般按照评估对象特点, 通过领域专家来确定评判集的取值, 记作  $E=[e_1, e_2, e_3, \dots, e_n]$ , 评估结果限定在  $[0, 1]$  区间内。

$$\left. \begin{aligned} q(e_i) &= [a_{ei}, b_{ei}] \\ \bigcup_{k=1}^n q(e_i) &= [0, 1] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中:  $a_{ei}$  和  $b_{ei}$  为  $[0, 1]$  区间上的常数, 且  $a_{ei} \leq b_{ei}$ ;  $q$  为  $e_i$  在置信区间  $[a_k, b_k]$  的映射关系。

在评判集的基础上, 为每个评判语言值生成一个云图, 称为标准云。设定性语言  $e_i$  对应的数值区间为  $[a_i, b_i]$ , 根据置信区间求解定性语言的云数字特征, 计算模型如下:

$$\text{当 } a_{ei}=0 \text{ 时, } \begin{cases} E_{xei} = a_{ei} \\ E_{nei} = \frac{b_{ei}}{3} \\ H_{eei} = s \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{当 } b_{ei}=1 \text{ 时, } \begin{cases} E_{xei} = b_{ei} \\ E_{nei} = (b_{ei} - a_{ei})/3 \\ H_{eei} = s \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{当 } a_{ei} \neq 0 \text{ 且 } b_{ei} \neq 1 \text{ 时, } \begin{cases} E_{xei} = \frac{a_{ei} + b_{ei}}{2} \\ E_{nei} = \frac{b_{ei} - a_{ei}}{6} \\ H_{eei} = s \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $s$  反映了随机性, 取值越大, 随机性越大, 造成的误差越大, 进而导致评估结果难以确定。文中  $s=0.01$ 。

通过计算, 获得标准云数字特征  $(E_{xe1}, E_{xe2}, \dots, E_{xen}; E_{ne1}, E_{ne2}, \dots, E_{nen}; H_{ee1}, H_{ee2}, \dots, H_{een})$ 。在标准云数字特征基础上, 利用正向云发生器生成多维标准云图。

### 3.2 指标权重计算模型

主观赋权法的赋权结果能够体现领域特征, 但是会受到主观因素影响; 客观赋权法赋权结果比较准确, 但是随机性较强, 容易造成偏差。笔者将主观赋权法和客观赋权法相结合, 通过定性分析与定量计算, 来求解权重。其计算模型如下:

$$\omega = \begin{cases} 1, i=1 \\ \frac{1}{2} + \sqrt{-2 \ln(2(i-1)/n)} / 6, 1 < i \leq \frac{n+1}{2} \\ \frac{1}{2} - \sqrt{-2 \ln(2-2(i-1)/n)} / 6, \frac{n+1}{2} < i \leq n \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $n$  为指标个数;  $i$  为重要度级别, 由专家研讨决定, 若指标同等重要, 则  $i$  取值相同。

在求解相对权重  $\omega$  的基础上, 通过归一化处理获得最终指标权重  $\omega^*$ 。

### 3.3 合成云计算模型

对上层指标的评估通过对下层云的指标权重和对应的数字特征进行合成来实现, 计算模型如下:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \sum_{i=1}^m E_{xi} \times \omega_i \\ E_n &= \sqrt{\sum_{i=1}^m E_{ni}^2 \times \omega_i} \\ H_e &= \sum_{i=1}^m H_{ei} \times \omega_i \end{aligned} \right\} (7)$$

其中： $m$  为指标个数； $\omega_i$  为指标权重。

### 3.4 云相似度计算模型

对于底层指标，在专家打分的基础上，利用云逆向生成器可以生成评估结果云；对于其他指标，在通过云合成模型可以生成评估结果云。

生成评估结果云后，需要对结果云和标准云之间进行相似度计算，将结果云映射到评判集上，相似度最高的评语即为该项指标的评估结果<sup>[12]</sup>。

设结果云数字特征为，标准云数字特征为，结果云  $(E_{xzj}, E_{nzj}, H_{ezj})$  和标准云  $(E_{xei}, E_{nei}, H_{cei})$  相似度  $\gamma_k$  计算模型如下：

- 1) 在结果云中，生成 1 个均值为  $E_{xzji}$  为期望值，方差生为  $H_{ezj}$  的正态随机数  $\sigma_{zj}$ ， $\sigma_{zj} = \text{NORM}(E_{nzj}, H_{ezj})$ ；
- 2) 在结果云中，生成 1 个均值为  $E_{xzj}$  为期望值，方差生为  $\sigma_{zj}$  的正态随机数  $x_{zj}$ ， $x_{zj} = \text{NORM}(E_{xzj}, \sigma_{zj})$ ；
- 3) 将  $x_{zj}$  代入标准云的隶属度函数中，求得隶属度  $u_{zj} = \exp(-(x_{zj} - E_{xei})^2 / k\sigma_{ei}^2)$ ；
- 4) 重复 1)–3)，直到生成  $n$  个  $u_{zj}$ ；
- 5) 计算  $\gamma_k = \sum_{j=1}^n u_{zj} / n$ 。

## 4 实例分析

笔者以陆军某合成旅装备维修保障系统为例，对基于云模型装备维修保障系统评估过程进行分析。

### 4.1 标准云确定

按照装备维修保障系统领域的经验做法，并咨询领域专家意见，确定评判等级及置信区间如表 2。

表 2 评判等级划分

评语集	优	良	中	较差	很差
置信区间	80~100	70~90	60~80	50~70	0~60

按照式(3)–(5)计算标准云数字特征为：  
 $C_{\text{优}}(100, 6.67, 0.01)$ ， $C_{\text{良}}(80, 3.33, 0.01)$ ，  
 $C_{\text{中}}(70, 3.33, 0.01)$ ， $C_{\text{较差}}(60, 3.33, 0.01)$ ，  
 $C_{\text{很差}}(0, 20, 0.01)$ 。

在标准云数字特征的基础上，按照 2.2.1 节中云正向发生器的计算过程，生成标准云如图 2 所示。

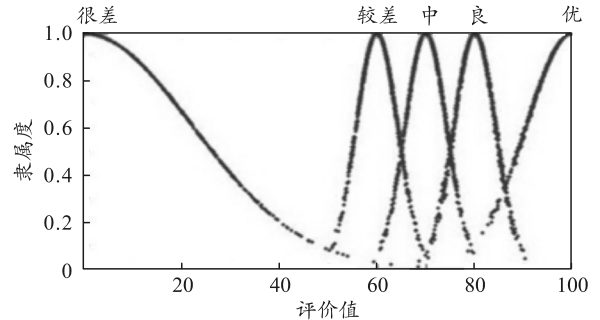


图 2 标准云图

### 4.2 单指标评估

对于二级指标的评估，邀请 7 位领域专家进行打分，结果如表 3 所示。

表 3 专家打分结果

指标	专家						
	1	2	3	4	5	6	7
A11	79	87	76	73	91	80	72
A12	83	82	81	84	81	80	84
A13	81	72	79	86	74	69	73
A14	62	68	63	75	59	73	66
A21	92	81	79	86	90	83	89
A22	78	83	82	74	77	73	75
A23	62	58	59	67	64	60	71
A24	73	67	61	63	67	62	63
A31	72	73	69	74	73	71	68
A32	61	59	62	66	61	58	67
A33	89	91	81	87	83	86	81
A34	72	77	73	80	77	75	78
A41	82	81	74	90	89	77	86
A42	78	72	79	76	82	73	76
A43	83	89	88	87	84	90	92
A51	71	73	68	70	72	69	74
A52	60	58	56	70	67	69	63
A53	73	71	64	66	69	63	69
A61	89	78	82	88	83	80	84
A62	78	75	82	79	83	81	78
A63	82	77	85	91	84	88	79
A64	80	82	72	71	76	71	76

在专家打分的基础上，利用式(1)中逆向云发生器模型，计算结果云数字特征如表 4 所示。

表 4 二级指标云数字特征

指标	云数字特征	指标	云数字特征
A11	(79.71, 6.75, 2.08)	A41	(82.71, 6.04, 0.73)
A12	(82.14, 1.64, 0.45)	A42	(76.57, 3.33, 0.95)
A13	(76.29, 6.14, 1.56)	A43	(87.57, 3.12, 0.74)
A14	(66.57, 5.83, 0.53)	—	—
A21	(85.71, 5.06, 1.32)	A51	(71.00, 2.15, 0.22)
A22	(77.43, 3.84, 0.48)	A52	(63.29, 5.78, 1.69)
A23	(63.00, 4.66, 0.57)	A53	(67.86, 3.79, 0.92)
A24	(65.14, 4.14, 0.55)	—	—
A31	(71.43, 2.25, 0.34)	A61	(83.43, 3.84, 1.11)
A32	(62.00, 3.22, 0.97)	A62	(79.43, 2.76, 0.11)
A33	(85.43, 4.04, 1.02)	A63	(83.71, 4.71, 1.33)
A34	(76.00, 2.86, 0.45)	A64	(75.43, 4.40, 0.26)

利用 3.4 节中云相似度计算模型，计算二级指标结果云与标准云之间的相似度计算结果和二级指标评估结果如表 5 所示。

表 5 二级指标评估结果

指标	优	良	中	较差	很差	结果
A11	0.180 4	0.560 5	0.226 4	0.034 9	0.000 3	良
A12	0.174 0	0.838 2	0.028 3	0.000 0	0.001 2	良
A13	0.095 7	0.510 0	0.396 9	0.058 2	0.004 2	良
A14	0.009 7	0.097 9	0.545 8	0.391 5	0.015 4	中
A21	0.364 6	0.432 7	0.047 8	0.000 9	0.000 9	良
A22	0.077 4	0.668 6	0.312 8	0.007 1	0.002 9	良
A23	0.002 0	0.019 6	0.354 4	0.602 6	0.021 9	较差
A24	0.003 1	0.031 6	0.537 0	0.469 8	0.016 6	中
A31	0.013 6	0.184 1	0.843 0	0.050 7	0.006 4	中
A32	0.000 8	0.003 1	0.255 0	0.738 0	0.022 9	较差
A33	0.323 4	0.485 4	0.028 3	0.000 1	0.000 9	良
A34	0.051 8	0.598 8	0.428 0	0.005 8	0.003 3	良
A41	0.247 1	0.562 2	0.133 7	0.005 5	0.001 6	良
A42	0.063 6	0.638 1	0.359 7	0.009 0	0.003 3	良
A43	0.435 9	0.290 6	0.004 5	0.000 0	0.000 5	优
A51	0.011 1	0.153 3	0.870 9	0.060 2	0.006 7	中
A52	0.003 3	0.038 2	0.384 4	0.538 4	0.023 5	较差
A53	0.006 9	0.083 5	0.676 0	0.300 7	0.011 3	中
A61	0.247 8	0.618 9	0.050 3	0.000 4	0.001 2	良
A62	0.106 6	0.834 3	0.152 4	0.000 5	0.002 0	良
A63	0.277 2	0.569 8	0.065 3	0.002 5	0.001 2	良
A64	0.056 5	0.527 5	0.470 8	0.029 4	0.004 2	良

4.3 指标权重计算

按照 3.2 节所描述的方法，通过咨询领域专家将下层对上层指标重要程度进行排序结果如下：

$$S(A1)=[4,3,1,2]; S(A2)=[1,2,2,3];$$

$$S(A3)=[2,2,3,1]; S(A4)=[1,2,1];$$

$$S(A5)=[1,2,1]; S(A6)=[1,1,2,2];$$

$$S(A)=[1,2,4,2,3,1].$$

按照式(6)计算各指标权重结果如下：

$$\omega_{A1}^*=[0.121 5,0.200 0,0.400 0,0.278 5];$$

$$\omega_{A2}^*=[0.345 7,0.240 7,0.240 7,0.172 9];$$

$$\omega_{A3}^*=[0.240 7,0.240 7,0.172 9,0.345 7];$$

$$\omega_{A4}^*=[0.377 3,0.245 3,0.377 3];$$

$$\omega_{A5}^*=[0.377 3,0.245 3,0.377 3];$$

$$\omega_{A6}^*=[0.294 8,0.294 8,0.205 2,0.205 2];$$

$$\omega_A^*=[0.215 3,0.160 9,0.107 7,0.160 9,0.140 0,0.215 3].$$

4.4 综合指标评估

在二级指标云数字特征基础上，通过式(7)计算一级指标云数字特征如表 6 所示。

表 6 一级指标云数字特征

指标	云数字特征	指标	云数字特征
A1	(75.19,5.53,1.11)	A4	(83.01,4.49,0.79)
A2	(73.82,4.41,0.72)	A5	(67.91,3.92,0.85)
A3	(73.16,3.06,0.65)	A6	(80.67,3.89,0.68)

通过 3.4 节中云相似度计算模型，计算一级指

标结果云与标准云之间的相似度计算结果和一级指标评估结果如表 7 所示。

表 7 一级指标评估结果

指标	优	良	中	较差	很差	结果
A1	0.070 9	0.486 9	0.480 0	0.055 7	0.004 5	良
A2	0.037 7	0.424 5	0.561 3	0.054 8	0.005 3	良
A3	0.026 1	0.339 8	0.683 3	0.036 9	0.005 1	中
A4	0.248 8	0.605 2	0.069 1	0.001 3	0.001 3	中
A5	0.007 6	0.080 7	0.689 1	0.275 0	0.011 3	中
A6	0.152 9	0.721 9	0.148 0	0.001 2	0.001 8	良

如图 3 所示，在一级指标云数字特征基础上，计算综合云数字特征为(76.18, 4.40, 0.82)，在标准云上的隶属度为(0.069 6, 0.579 8, 0.419 8, 0.023 6, 0.003 7)，综合评价为良。

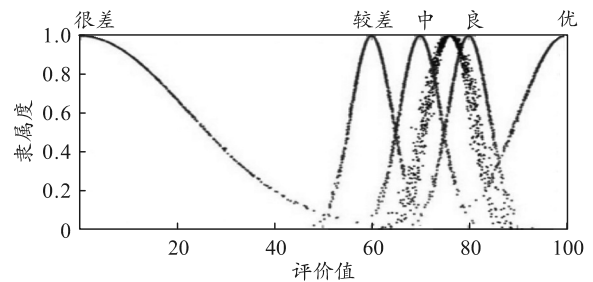


图 3 综合云评价结果

通过评估可以发现：该合成旅的设备完好率、设施完好率较差，技术资料整体较差，这主要是由于该合成旅新调整组建，装备设备由其他单位转隶而来，技术状态未达到规定要求，且营区基础设施建设不够完善。下一步，应着重完善维修保障设施建设，加大维修设备需要检修力度，尽快使其恢复技术状态。

5 结论

笔者构建了基于云模型的装备维修保障系统评估方法，设计了标准云计算模型、指标权重计算模型、合成云计算模型和云相似度计算模型，并以实例的形式给出了方法的应用过程。该方法的使用能够实现定性概念与定量描述之间的转换，能够保证评估过程的随机性和评估结果的模糊性，具有很强的实用价值，不仅能够为装备维修保障系统评估提供手段，而且可以为其他军事系统评估提供参考。

参考文献：

[1] 刘淇. 正态云模型模糊推理系统及其应用研究[D]. 郑州：郑州大学, 2014: 17-30.

[2] 王利辉, 王凯, 刘慎洋. 车辆装备战时维修保障能力评估模型研究[J]. 军事交通学院学报, 2019, 21(5): 37-41.