

doi: 10.7690/bgzdh.2020.08.012

基于模糊理论的导弹质量评估

周璐¹, 冯玉光², 顾均元²

(1. 海军航空大学研究生一队, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空大学 310 教研室, 山东 烟台 264001)

摘要: 为更好地掌握导弹的质量状态, 对基于模糊理论的导弹质量评估进行分析。根据导弹自动化测试系统的测试结果, 采用层次分析法对导弹的质量评定体系进行分类, 构建导弹质量评估框架。对导弹测试数据的质量等级划分规则进行设计, 通过二相 Fuzzy 统计法, 拟合出导弹归一化测试数据属于各个质量状态的隶属函数模型舱, 并对导弹各系统以及导弹整体进行了质量综合评定。评估结果验证了该评价体系是合理的。

关键词: 质量评估; 模糊理论; 二相 Fuzzy 统计法; 隶属函数; 模糊综合评判

中图分类号: TJ760 **文献标志码:** A

Missile Quality Assessment Based on Fuzzy Theory

Zhou Lu¹, Feng Yuguang², Gu Junyuan²

(1. No. 1 Brigade of Postgraduate, Navy Aviation University, Yantai 264001, China;

2. No. 310 Staff Room, Navy Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to grasp the quality state of missile better, the missile quality evaluation based on fuzzy theory is analyzed. According to the test results of missile automatic test system, the quality assessment system of missile is classified by AHP, and the missile quality assessment framework is constructed. The classification rules of missile test data quality grade are designed. Through two-phase Fuzzy statistical method, the membership function model cabin of missile normalized test data belonging to various mass states is fitted, and the missile system and the whole missile quality are evaluated comprehensively. The evaluation results verify that the evaluation system is reasonable.

Keywords: quality assessment; fuzzy theory; two-phase Fuzzy statistical method; membership function; fuzzy comprehensive evaluation

0 引言

导弹质量评估中“质量”指的是质量管理学中的质量概念。国际标准 ISO9001 2008 对质量的定义为: 一组固有特性满足要求的程度。现阶段导弹质量监控工作中主要采取“四等七级”质量评定模式, 过多地依赖服役年限、外观以及导弹履历^[1], 而忽略了导弹测试数据; 因此, 该质量评定方法并不能真实地反映导弹的作战效能, 仅仅直观反映了导弹的一种服役经历。根据质量的定义, 导弹的质量就是其能完成作战目标的程度, 表现在导弹能否正常发射、飞行并精确打击目标点。导弹测试工作就是用于检查、验证导弹系统的功能和主要技术性能, 并且通过测试结果进行故障定位, 保证导弹处于良好的战备状态^[2]。笔者以导弹测试数据为质量评估指标, 通过数据分析, 根据测试值是否在参数范围内, 以及测试值与标准值的偏差来判定装备质量水平, 评定结果能更加客观真实地反映导弹质量状态。

1 基于模糊理论的导弹质量评估

1.1 导弹质量评估框架构建

导弹结构由弹体结构、电气系统、动力系统、制导系统和引战系统^[3]5 大系统组成。在对导弹进行测试时, 自动化测试系统对导弹各系统(引战系统除外)的各个参数进行逐一测试, 测试结果体现的是导弹性能方面的质量水平。

对导弹自动化测试系统的测试结果分析可知: 测试系统对导弹的弹体结构、电气系统、动力系统, 以及制导系统中能反映导弹质量的相关参数进行了全面检测, 全面分析导弹的性能质量状态。导弹质量评估框架如图 1 所示。

首先采取层次分析法对导弹的质量评定体系进行总体分类, 目标层为导弹总体质量, 准则层为导弹各系统质量, 方案层为各项测试项目的质量。

测试数据种类繁多, 每种数据测出的量值对应的标准值、阈值和单位各不相同^[4], 无法进行统一的数据分析; 因此, 先将所有测试数据进行无量纲

收稿日期: 2020-03-14; 修回日期: 2020-04-01

作者简介: 周璐(1997—), 女, 安徽人, 硕士, 从事武器系统运用与保障工程研究。E-mail: 1203666474@qq.com。

化，并将数据值转化到[0,1]之间，也就是数据的归一化^[5]。对所有的测试数据进行此类处理之后，数据与数据之间就存在一定的统一性，杂乱无章的数据就变成能够反映测试单元质量状态的量值。

由于各系统对应的测试项目很多，其中很多测试项目相似，对整个系统的质量所起到的权重也大体相同；因此，将相似项目合并，对应处理后的归一化测试数据取其平均值，可以简化评定过程，也省去了繁琐的重复计算。这样，导弹的每个系统就可以分为几大模块，每个模块都有对应的归一化量值。每个模块的质量对各系统质量的影响权重各不

相同。权重的分配也是一项重要的工作，在计算过程中既要考虑主观因素又要考虑客观因素，以此加强权重计算结果的可信性。同理，准则层的各导弹系统质量也有相应的权重。

经过上述的无量纲化以及权重计算之后，导弹质量状态评定模型的数据处理完成。在对各系统的质量评定方法中，选用隶属函数模型构建^[6]与模糊综合评判法相结合的方式，得到各系统的质量状态。由各系统质量评定导弹性能质量时，重复上述步骤，即多级模糊综合评判法^[7]，得到最终导弹性能质量状态。

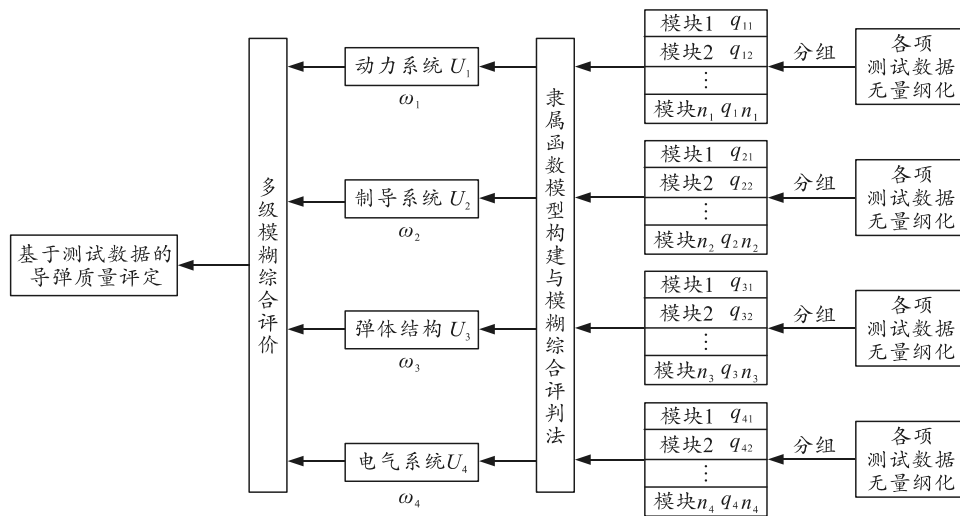


图 1 导弹质量评估框架

1.2 基于导弹测试数据的质量等级划分规则设计

以导弹测试数据为主要评定指标，将海军导弹

装备的质量划分为优秀、良好、中等、较差、恶化和故障 6 个等级^[8]。划分的基本原理如图 2 所示。

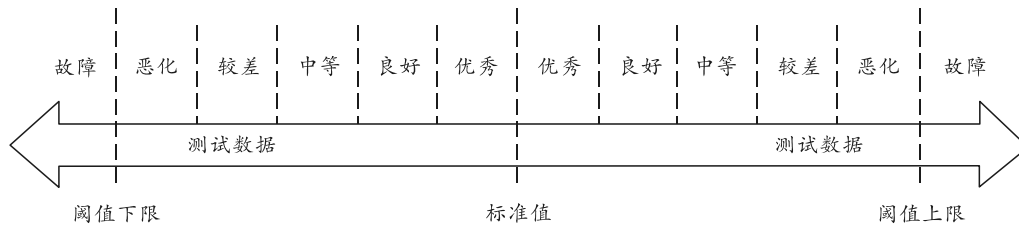


图 2 基于测试数据的导弹质量等级划分

如图所示，对于导弹某个测试项目的测试数据而言，一定存在着相应的阈值上下限(阈值上限或者阈值下限)以及规定的标准值。测试项目对应的质量等级是由测试结果距离标准值以及阈值上下限的程度所决定的。当测试结果越靠近标称值，对应的质量等级越好；当测试数据越接近阈值的上下限值，则对应的质量等级越差；当测试数据处于阈值范围之外时，则说明该测试项目处于故障状态，需要对故障项目进行维修，排除故障之后导弹才可以正常使用。

当导弹某个测试项目处于优秀、良好、中等质量状态时，说明质量状态符合导弹作战使用的基本要求，平时只需做好规定的维护保养工作，保证质量状态维持在一种较好的状态。

当导弹某个测试项目处于较差状态时，说明导弹经过贮存、使用后，质量状况下降，为保证导弹的可靠性，应当对测试数据状态较差的导弹部件进行重点监控和维护，避免质量等级进一步恶化，甚至达到故障状态。

当导弹某个测试项目处于恶化状态时，说明导

弹经过贮存、使用后，质量状况下降，当导弹处于恶劣环境条件下或者执行值班任务时，处于恶化状态下的导弹部件有很大的概率转化为故障状态；因此，可以对相应的部件进行视情维修以及预防性维修，防止故障的出现。

当导弹某个测试项目处于故障状态时，说明导弹经过贮存、使用后，质量状况下降。由于受到各种因素的影响，出现性能退化，当其性能降低到可接受范围之外时，就认为该部件处于故障状态。在后续的导弹质量评分过程中，不对处于“故障”状态的部件进行评分。

1.3 质量等级的级值

如表 1 所示，海军导弹的 6 个质量等级的级值分别取数字 1~6。

表 1 质量等级的级值

质量等级 级值	优秀 1	良好 2	中等 3	较差 4	恶化 5	故障 6
------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

2 模糊理论在导弹质量评定中的应用

2.1 模糊理论的基本概念

美国控制论的专家扎德教授于 1965 年在《信息与控制》上发表了“模糊集合”，从此模糊数学宣告诞生。模糊集合是客观存在的模糊概念的必然反映，模糊存在于人类思维和语言交流中，是一种不确定性的表现。

模糊集合的定义为：给定论域 U ， U 到 $[0,1]$ 闭区间的任一映射

$$\mu_A: U \rightarrow [0,1]。$$

其中确定 U 的一个模糊集合 A ， μ_A 称为模糊集合 A 的隶属函数，反映了模糊集合中的元素属于该集合的程度， A 被称为 U 上的 Fuzzy 集。若 A 中的元素用 x 表示，则 $\mu_A(x)$ 称为 x 属于 A 的隶属度。 $\mu_A(x)$ 的取值范围在 $[0,1]$ 之间，若 $\mu_A(x)$ 的值越接近 1，则表示 x 属于 A 的程度越高；若 $\mu_A(x)$ 的值越接近 0，则表示 x 属于 A 的程度越低。可见，模糊集合完全由隶属函数所描述。通常，模糊集合的表示方式为 Zadeh 表示法^[9]，即用论域中的元素 x_i 与其隶属度 $\mu_A(x_i)$ 按照下式表示：

$$A = \mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n。$$

式中： $\mu_A(x_i)/x_i$ 并不代表“分数”，而是表示论域中的元素与其隶属度 $\mu_A(x_i)$ 之间的对应关系；“+”不表示“求和”，而是表示模糊集合在论域 U 上的整体。在这个表示法中，隶属度为 0 的项可以不写入。

隶属函数是对模糊概念的定量描述，正确地确定隶属函数，是运用模糊集合理论解决实际问题的基础。隶属函数的确定本质上是客观的，但是又带有主观性，一般是根据经验或者统计数据分布规律进行确定的，也可以由专家或者权威人士给出。由模糊集合的相关概念可知，隶属函数的值域在 $[0,1]$ 之间。以实数域 R 为论域时，称隶属函数为模糊分布。常见的模糊分布有正态型、 Γ 型、戒上型、戒下型^[10]4 种类型。

2.2 各模块质量模糊化隶属函数的选择

在导弹没有故障的前提下，将导弹的质量等级分为优秀、良好、中等、较差、恶化 5 种状态。测试数据归一化的结果在区间 $[0,1]$ 之间，测试数据越靠近 1，说明测试数据越靠近标称值，对应的导弹模块质量状态越好；测试数据越靠近 0，说明测试数据越靠近边界值，对应的导弹模块质量状态越差。笔者将归一化的测试数据分别量化到上述 5 个等级的隶属度上，进行各个模块的等级评定。对各个模块的等级评定，通过大量数据进行函数模型的拟合，对某个数据属于某个等级的隶属度统计计算。

类比于随机实验，一个 Fuzzy 统计实验^[11]有 4 个核心要素：

- 1) 论域 U ；
- 2) 实验所要处理论域 U 的固定元素 x_0 ；
- 3) 论域 U 的可变动的普通集合 A' ， A' 作为 Fuzzy 集 A 的可塑性边界的反映，可由此得到每次实验中 x_0 是否符合 Fuzzy 集 A 所刻画的模糊概念的一个判决；
- 4) 条件 S 限制着 A' 的变化。

根据上述核心要素，为了得到真实可信的导弹归一化测试数据属于各个质量状态的隶属度，可以采用二相 Fuzzy 统计法对该问题进行解决。

以质量等级“中等”为例进行二相 Fuzzy 统计说明。做出各个归一化测试数据属于“中等”质量区间的函数隶属度图，进行导弹质量状态随着导弹归一化测试数据变化规律函数模型的拟合。

取已经归一化的各个模块的测试数据 $X \in [0,1]$ ，Fuzzy 集 A 表示 Fuzzy 概念：质量等级为“中等”。使用 Fuzzy 统计来确定各个归一化测试数据值对 A 的隶属度。

选取 128 位对导弹质量评定工作有经验的专家或者工作人员^[12](经验丰富、结论可信)，通过每个人对于“中等”质量状态的理解，报出最适宜的

“中等”质量状态的归一化测试数据取值范围，具体数据如表 2 所示。

表 2 “中等”质量状态对应归一化测试数据取值范围统计

“中等”测试数据取值范围(128组)							
0.50~0.82	0.58~0.80	0.54~0.85	0.55~0.87	0.57~0.86	0.56~0.85	0.55~0.75	0.54~0.74
0.51~0.81	0.61~0.80	0.60~0.86	0.61~0.85	0.55~0.85	0.47~0.80	0.47~0.76	0.60~0.73
0.52~0.79	0.59~0.78	0.51~0.78	0.50~0.78	0.54~0.78	0.46~0.77	0.49~0.73	0.59~0.75
0.53~0.78	0.46~0.79	0.52~0.79	0.51~0.79	0.54~0.77	0.48~0.78	0.48~0.74	0.59~0.76
0.50~0.79	0.47~0.77	0.53~0.80	0.53~0.77	0.57~0.80	0.50~0.79	0.61~0.76	0.60~0.74
0.53~0.78	0.49~0.78	0.45~0.77	0.52~0.79	0.56~0.77	0.53~0.73	0.57~0.75	0.56~0.73
0.51~0.77	0.49~0.77	0.44~0.78	0.45~0.78	0.48~0.78	0.52~0.74	0.57~0.75	0.55~0.75
0.45~0.77	0.48~0.78	0.45~0.79	0.48~0.77	0.49~0.79	0.51~0.76	0.56~0.73	0.54~0.76
0.58~0.82	0.58~0.83	0.58~0.83	0.58~0.69	0.61~0.69	0.60~0.70	0.61~0.70	0.56~0.66
0.50~0.84	0.59~0.83	0.59~0.82	0.60~0.71	0.60~0.70	0.61~0.71	0.60~0.69	0.62~0.67
0.51~0.83	0.59~0.82	0.61~0.81	0.55~0.72	0.56~0.71	0.56~0.69	0.61~0.71	0.64~0.68
0.53~0.73	0.52~0.74	0.60~0.69	0.55~0.70	0.55~0.72	0.57~0.72	0.59~0.72	0.65~0.66
0.52~0.74	0.51~0.70	0.61~0.70	0.54~0.70	0.56~0.71	0.54~0.71	0.58~0.70	0.63~0.67
0.58~0.75	0.50~0.69	0.60~0.71	0.58~0.71	0.60~0.72	0.61~0.69	0.59~0.72	0.64~0.66
0.59~0.76	0.53~0.69	0.59~0.72	0.59~0.72	0.59~0.69	0.58~0.71	0.57~0.71	0.64~0.68
0.58~0.73	0.51~0.70	0.58~0.71	0.61~0.69	0.58~0.69	0.60~0.72	0.59~0.69	0.62~0.67

统计出表中最小值与最大值，分别为 0.45 和 0.85。根据上述数据，通过统计计算，可模拟出测试数据属于“中等”质量状态的隶属函数。将 X 分组，每组以中值为代表计算隶属频率，每组的步进值取 0.04，统计计算结果如表 3 所示。

表 3 测试数据属于“中等”质量状态的隶属频率

分组序号	分组	代表值	频率/组	相对频率 Δ
1	0.43~0.47	0.45	5	0.039
2	0.47~0.51	0.49	19	0.148
3	0.51~0.55	0.53	46	0.359
4	0.55~0.59	0.57	74	0.578
5	0.59~0.63	0.61	120	0.938
6	0.63~0.67	0.65	128	1.000
7	0.67~0.71	0.69	121	0.945
8	0.71~0.75	0.73	79	0.617
9	0.75~0.79	0.77	54	0.422
10	0.79~0.83	0.81	18	0.141
11	0.83~0.87	0.85	7	0.055

根据表中数据，以归一化测试数据分组值 x 为横坐标，以分组值对应的相对频率 Δ 为纵坐标，描画出统计直方图如图 3 所示，再将中点值用曲线相连，便可以得出“中等”质量状态的相对频率曲线。

分析图中的曲线以及相关数据，分别选用岭型隶属函数 y_1 、三角型隶属函数 y_2 、高斯型隶属函数 y_3 对已知曲线进行拟合。由表中数据可知：

当 $x \notin [0.45, 0.85]$ 时，不存在于任何一个区间内，对应的相对频率为 0；

当 $x \in \{0.45, 0.85\}$ 时，对应的频率极低，在构建函数模型时，可以将这 2 个值作为函数零界，即对应频率取值为 0；

当 $x \in [0.45, 0.85]$ 时，对应的隶属函数曲线应当尽可能拟合图 3 中的曲线。

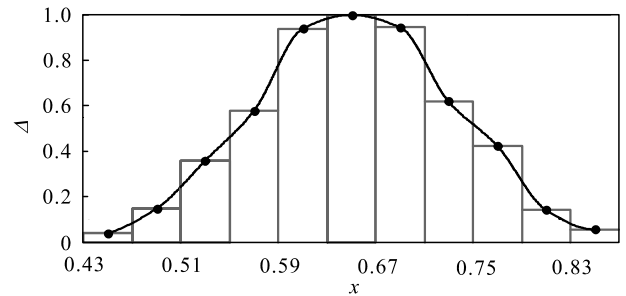


图 3 “中等”质量状态的相对频率直方图及曲线

根据上述曲线图的相关数据以及上述条件的要求，设置三类拟合函数的最佳方程分别为：

$$y_1 = \begin{cases} 0 & x < 0.45 \\ 0.5 + 0.5 \sin 5\pi(x - 0.55) & 0.45 \leq x \leq 0.85 \\ 0 & x > 0.85 \end{cases}$$

$$y_2 = \begin{cases} 0 & x < 0.45 \\ 5x - 2.25 & 0.45 \leq x < 0.65 \\ -5x + 4.25 & 0.65 \leq x \leq 0.85 \\ 0 & x > 0.85 \end{cases}$$

$$y_3 = \begin{cases} 0 & x < 0.45 \\ e^{-(x-0.65)^2/0.012} & 0.45 \leq x \leq 0.85 \\ 0 & x > 0.85 \end{cases}$$

使用 Matlab 做出拟合效果图如图 4—6 所示。

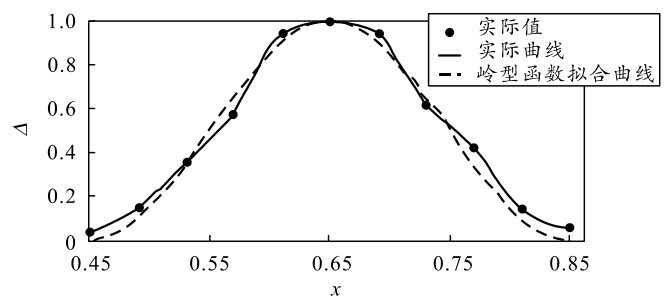


图 4 岭型函数拟合效果

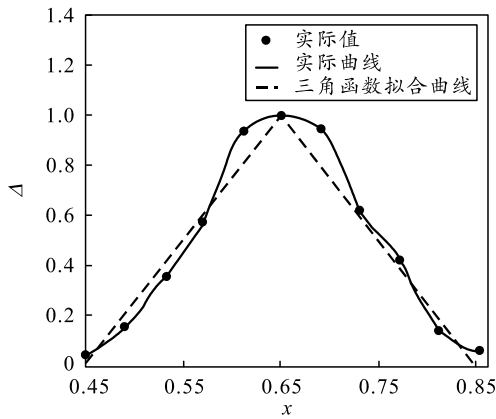


图 5 三角型函数拟合效果

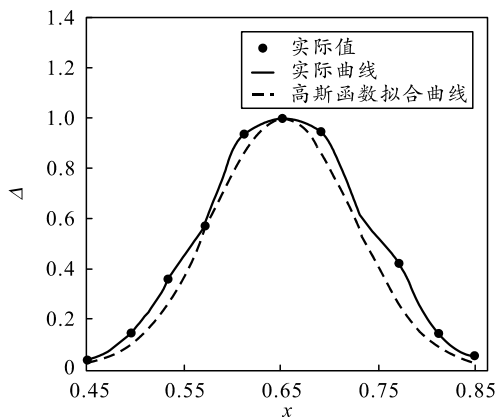


图 6 高斯型隶属函数拟合效果

记表 3 中各中点值对应的隶属频率为 p_{0x_i} ，三角函数、折线型函数、正态分布函数对应点的函数值分别记作 p_{1x_i} 、 p_{2x_i} 、 p_{3x_i} ，总体误差用 δ 表示，则

$$\delta_j = \sum_{i=1}^{11} |p_{0x_i} - p_{jx_i}|, j=1,2,3。$$

其中 x_i 表示对应的自变量分组中点值，共有 11 个。

使用上述公式分别计算 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 的值，进行比较。值越小说明拟合程度越好，函数模型越贴近实际值。计算结果如表 4 所示。

表 4 各拟合函数总体误差

拟合函数	总体误差
δ_1	0.470
δ_2	0.590
δ_3	0.607

通过计算结果得到 δ_1 的值最小，说明拟合效果最好，岭型函数模型最贴近实际值；因此，选用岭型函数模型作为各归一化测试数据的隶属函数。

同理，使用二相 Fuzzy 统计法对“优秀”“良好”“较差”“恶化”4 种质量状态进行专家评定，共选取 18 名专家进行评定，确定数据范围。得到各个质量状态对应的统计直方图以及拟合曲线如图 7—10 所示。

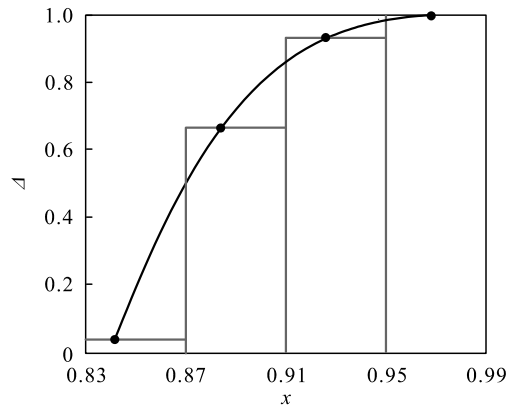


图 7 质量状态为“优秀”的统计直方图及对应曲线

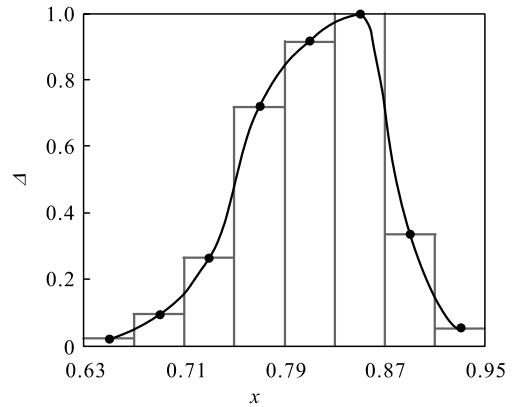


图 8 质量状态为“良好”的统计直方图及对应曲线

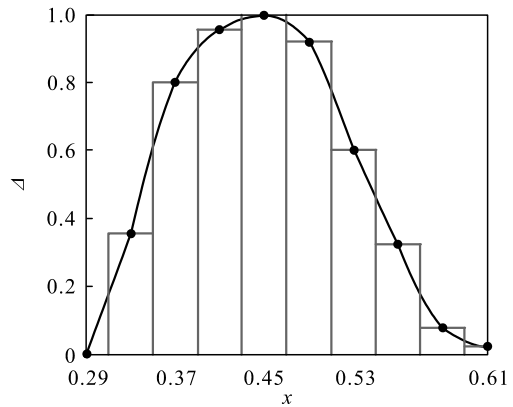


图 9 质量状态为“较差”的统计直方图及对应曲线

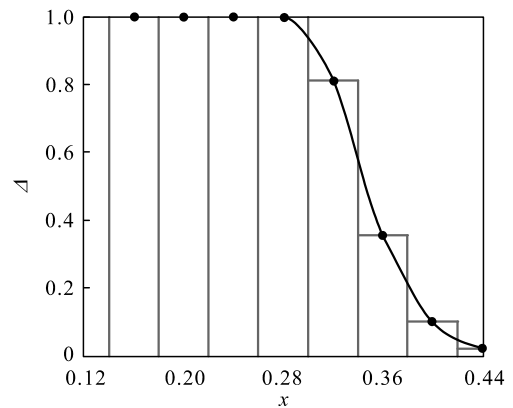


图 10 质量状态为“恶化”的统计直方图及对应曲线

根据上述各个质量状态等级的数据统计结果、统计直方图以及曲线图，使用岭型隶属函数对各个质量状态的曲线进行拟合。由上述曲线图可以得出：每个质量状态的曲线变化规律以及相应的特征值，特征值的近似取值需要考虑到各个质量状态的过渡阶段，相对频率之和为 1。综合考虑以上各因素，具体的分析结果如表 5 所示。

表 5 各个质量状态的拟合岭型隶属函数特征值

质量状态	拟合岭型隶属函数		
	峰值处的 x	最小值 x	最大值 x
优秀	0.95	0.85	1.00
良好	0.85	0.65	0.95
中等	0.65	0.45	0.85
较差	0.45	0.30	0.65
恶化	0.30	0	0.45

各质量状态对应的岭型拟合隶属函数分别为：

1) “优秀”等级对应的隶属函数。

$$\Delta_1(x) = \begin{cases} 0 & x < 0.85 \\ 0.5 + 0.5 \sin 10\pi(x - 0.9) & 0.85 \leq x \leq 0.95 \\ 1 & x > 0.95 \end{cases}$$

2) “良好”等级对应的隶属函数。

$$\Delta_2(x) = \begin{cases} 0 & x < 0.65 \\ 0.5 + 0.5 \sin 5\pi(x - 0.75) & 0.65 \leq x < 0.85 \\ 0.5 + 0.5 \sin 10\pi(x - 0.8) & 0.85 < x < 0.95 \\ 0 & x > 0.95 \end{cases}$$

3) “中等”等级对应的隶属函数。

$$\Delta_3(x) = \begin{cases} 0 & x < 0.45 \\ 0.5 + 0.5 \sin 5\pi(x - 0.55) & 0.45 \leq x \leq 0.85 \\ 0 & x > 0.85 \end{cases}$$

4) “较差”等级对应的隶属函数。

$$\Delta_4(x) = \begin{cases} 0 & x < 0.3 \\ 0.5 + 0.5 \sin \frac{20}{3}\pi(x - 0.375) & 0.3 \leq x < 0.45 \\ 0.5 + 0.5 \sin 5\pi(x - 0.35) & 0.45 \leq x \leq 0.65 \\ 0 & x > 0.65 \end{cases}$$

5) “恶化”等级对应的隶属函数。

$$\Delta_5(x) = \begin{cases} 1 & x < 0.3 \\ 0.5 + 0.5 \sin \frac{20}{3}\pi(x - 0.225) & 0.3 \leq x \leq 0.45 \\ 0 & x > 0.45 \end{cases}$$

综合上述隶属函数公式，绘制出导弹各质量状态的岭型隶属函数曲线如图 11 所示。

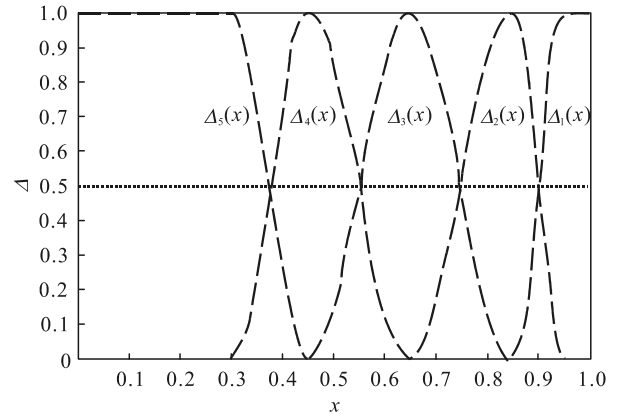


图 11 导弹各质量状态的岭型隶属函数曲线

根据图 11，当导弹某个模块的归一化测试数据确定之后，对应上述隶属函数曲线图，可以得到该模块质量状态的模糊化表示，即对应各个质量状态的隶属度值。

例如：当导弹某个模块的归一化测试数据为 0.8，根据图 11，得到该模块隶属于“良好”等级 $\Delta_2(x)$ 和“中等”等级 $\Delta_3(x)$ ，将 $x=0.8$ 代入对应的隶属函数中，得到对应质量状态的模糊集合为

$$A = \frac{0.8536}{\Delta_2(x)} + \frac{0.1464}{\Delta_3(x)}$$

上式并非表示分数，而是表示归一化测试数据 0.8 隶属于“良好”等级 $\Delta_2(x)$ 的隶属度为 0.8536，隶属于“中等”等级 $\Delta_3(x)$ 的隶属度为 0.1464。

若将模糊化结果使用矩阵形式表示，则有

$$R = (0.8536 \ 0.1464 \ 0 \ 0 \ 0)$$

3 导弹质量的模糊综合评判

按照一定的标准对导弹某个模块进行评价，称为单一评价。从众多单一评价的基础上获得对导弹系统的整体评价，成为综合评价^[13]。导弹系统质量就是通过各模块的质量进行综合评价得到的。

设导弹某系统各模块质量的权重值为 q_1, q_2, \dots, q_n ，则这些模块组成的权重向量为

$$q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$$

记模块 i 经过模糊化后得到的模糊集合为：

$$R_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}, r_{i5})$$

n 个模块组成的单一评判矩阵为

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{n5} \end{pmatrix}$$

可以求得导弹某系统的质量模糊集合 X 为:

$$X = q \circ R。$$

其中 \circ 为算子。对 X 进行归一化, 可得到导弹某系统对各个质量等级的隶属度。

同理, 由导弹各系统质量评定导弹整体质量, 仍然使用模糊综合评判法, 整个评价体系为二级模糊综合评判。

设导弹各个系统间质量的权重值为 w_1, w_2, \dots, w_n , 则这些模块组成的权重向量为

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n)。$$

记导弹系统 i 经过模糊综合评判之后的得到的模糊集合为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5})$, 则 4 个导弹系统组成的单一评判矩阵为:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{15} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{41} & x_{42} & \dots & x_{45} \end{pmatrix}。$$

可以求得导弹综合质量模糊集合 Y 为:

$$Y = \omega \circ X。$$

至此, 笔者使用导弹模块的模糊隶属函数拟合法, 以及二级模糊综合评判法确定了导弹整体的质量状态, 得到导弹质量属于各个质量状态的隶属度, 对导弹的质量状态实现了更加清晰准确的掌握。

4 结束语

相对于现阶段“四等七级”的评定办法, 面向导弹性能的等级评定办法更加科学, 也更契合部队导弹装备质量监控的发展需求。同时, 在装备信息化建设的发展趋势下, 基于测试数据的质量评定办法能更加理想地贴合信息化条件下导弹质量等级自动评定的发展需求。可见, 基于导弹测试数据、使

用模糊理论建立的导弹质量评价体系是合理的。

参考文献:

- [1] 梁峰, 白海威, 赵建泉. 装备质量监督智能化体系建设[J]. 装备学院学报, 2016, 27(3): 75-80.
- [2] 齐飞. 武器装备维修质量评估方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
- [3] 孔祥祯, 王永攀, 杨江平. 装备维修质量评价研究综述[J]. 装备制造技术, 2016, 9(5): 66-71.
- [4] 杨明耀. 军械装备维修现场数据采集技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [5] 姚云峰, 伍逸夫, 冯玉光, 等. 装备健康状态评估方法研究[J]. 现代防御技术, 2012, 40(5): 156-161.
- [6] 徐廷学, 安进, 郑磊, 等. 装备质量评估系统关键技术研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2015, 30(6): 563-567.
- [7] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010: 67-75.
- [8] 裴晶晶, 安进, 王雯珂. 海军导弹装备质量状态等级划分与评估[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(12): 2309-2311.
- [9] 雷英杰. 直觉模糊集理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 57-65.
- [10] 徐廷学, 李志强, 顾均元, 等. 基于多状态贝叶斯网络的导弹质量状态评估[J]. 兵工学报, 2018, 39(2): 391-398.
- [11] 彭祖赠, 孙楹玉. 模糊(Fuzzy)数学及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007: 107-113.
- [12] SAKELLAROPOULOS G C, NIKIFORIDIS G C. Prognostic performance of two expert systems based on Bayesian belief networks[J]. Decision Support Systems, 2000, 27(4): 431-442.
- [13] HUA Z S, GONG B G, XU X Y. A DS-AHP approach for multi-attribute decision making problem with incomplete information[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 34(3): 2221-2227.