

doi: 10.7690/bgzd.2013.09.009

战术导弹技术成熟度评价模型及评价方法

彭绍雄¹, 安进², 王海涛², 钟文玲²(1. 海军航空工程学院飞行器工程系, 山东 烟台 264001;
2. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001)

摘要: 为提高战术导弹装备技术成熟度, 对战术导弹技术成熟度评价模型及评价方法进行研究。简要介绍国外技术成熟度概况, 构建我军战术导弹技术成熟度评价模型, 运用层次分析法和模糊综合评判法对战术导弹系统做技术成熟度等级评估算例演示。结果表明: 将层次分析法与模糊综合评判结合起来的评判方法能降低加权过程中人为因素影响, 计算简便, 易于系统编程开发, 为战术导弹技术成熟度评估和提高提供一种参考方法。

关键词: 技术成熟度; 战术导弹; 模糊综合评价法; 层次分析法**中图分类号:** TJ760.6 **文献标志码:** A

Evaluation Model and Method of Technology Readiness Level for Tactical Missile

Peng Shaoxiong¹, An Jin², Wang Haitao², Zhong Wenling²(1. Department of Aircraft Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Study on evaluation model and method of technology readiness level for tactical missile in order to enhancing technology readiness level for tactical missile. Introduce overseas general situation of technology readiness, set up our evaluation model of technology readiness level for tactical missile and calculates the technology readiness level of tactical missile based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation. The result shows it's efficacious to combine AHP and fuzzy comprehensive evaluation in evaluation to cut down the affect of artificial element. What's more, the model can calculate simply and draw up system program conveniently, which offers referenced for the evaluation and improvement of technology readiness for tactical missile.

Key words: technology readiness level; tactical missile; fuzzy comprehensive evaluation; AHP

0 引言

现代装备越来越追求先进的技术、优越的性能, 致使装备采办项目存在的技术风险也越来越大, 战术导弹装备亦是如此。针对这个问题, 英美等国推行技术成熟度评价, 以定量的尺度衡量装备技术发展状态, 识别其中的技术风险, 支撑装备采办项目转阶段决策, 取得了巨大的经济效益和军事效益。我们同样可以借鉴技术成熟度评价方法, 解决装备项目“拖进度、涨经费、降指标”等问题, 从而有效降低技术应用风险, 推动战术导弹相关的军工科技进步和装备建设快速发展。

笔者在研究国外技术成熟度评价的基础上, 建立了战术导弹技术成熟度评价模型, 对技术成熟度等级、评估流程、指标体系和评估方法进行了定义和构建, 并运用层次分析法和模糊综合评判法对战术导弹装备技术成熟度评价进行了算例演示。

1 技术成熟度概述

“技术成熟度等级”是对技术准备程度的量化和评测的标准, 是美国国家航空宇航局(national aeronautics and space administration, NASA)于 1989

年提出并用作评估工具的。起初这个成熟度为 7 级, 1995 年修订为 9 级。2002 年被美国国防部纳入武器采办条例中, 并在 2005 年正式定为 9 级。目前技术成熟度的概念已在国际上得到采用, 例如加拿大以及日本等国。现在一个国际工作小组已试图提出国际技术成熟度协议。同时, 也派生出一些专门的技术成熟度等级, 如“设计成熟度”、“材料成熟度”、“工艺成熟度”、“无损检测成熟度”及“制造成熟度”等。技术成熟度的九级定义^[1]为: TRL1: 基本原理被发现和报告; TRL2: 技术概念和用途被阐明; TRL3: 关键功能和特性的概念验证; TRL4: 实验室环境下的部件和试验台验证; TRL5: 相关环境下的部件和试验台验证; TRL6: 相关环境下的系统/子系统模型或原型机验证; TRL7: 模拟作战环境下的原型机验证; TRL8: 系统完成技术试验和验证; TRL9: 系统完成使用验证。

在美国国防部的技术成熟度评价中, 项目经理负责识别关键技术元素(central technology element, CTE), 独立评价小组负责确定 CTE 和实施技术成熟度评价(technology readiness assessment, TRA),

收稿日期: 2013-04-07; 修回日期: 2013-05-07

作者简介: 彭绍雄(1966—), 男, 湖北人, 硕士, 教授, 从事导弹武器系统工程、装备管理、信息管理研究。

美国国防部代表批准 TRA。一共包括 6 个步骤：1) 识别 CTE；2) 收集 CTE 数据；3) 确定 CTE；4) 实施 TRA；5) 提交 TRA；6) 批准 TRA。

在实际应用中^[2]，1~4 级成熟度为第 1 阶段，在该阶段内提出武器解决方案并进行分析；5~6 级成熟度等级为第 2 阶段，与武器装备的技术开发相对应，在实验室内进行组件的验证评估，从第 7 级成熟度进入产品的工程及制造开发计划；经 8~9 级成熟度，进入生产及服役，如图 1。

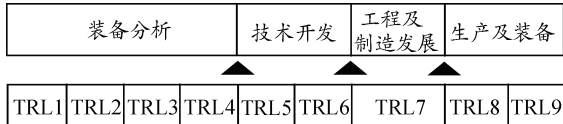


图 1 技术成熟度等级与武器研制的关系

2 战术导弹技术成熟度评价模型

我国开展技术成熟度评价仍处于起步阶段，缺乏深入的理论研究和广泛的实践经验。结合我国实际情况充分消化吸收美军技术成熟度评价的理论方法和组织管理经验，使技术成熟度评价为我国武器装备采办项目全寿命周期的关键决策点提供支撑，对提高我国武器装备采办项目的效益有积极作用。

2.1 战术导弹技术成熟度等级定义

针对战术导弹装备，结合我国装备的研发流程，对战术导弹技术成熟度等级细化和定义(如表 1)。

表 1 战术导弹技术成熟度九级定义

成熟度等级	相应的等级描述	对应研发阶段
TRL1	基本原理得到观察和报告	技术理论研究
TRL2	应用设想明确，得到详尽阐述	技术应用研究
TRL3	预研攻关的初步实现，关键功能特性得到实验室证明	先期技术开发
TRL4	完成预研攻关，完成实验板或元部件，得到实验室环境的可行性论证	可行性论证
TRL5	方案明确、详尽，完成部件组合，得到低逼真度的实验与验证	方案阶段
TRL6	完成工程的分系统样机，得到中逼真度的实验与验证	工程研制阶段
TRL7	完成工程的系统样机，得到高逼真度的实验与验证	定型阶段
TRL8	定型，真实系统研制完成，验收	生产阶段
TRL9	批量生产，成功执行任务并得到维修保障等服务	使用保障阶段

2.2 战术导弹技术成熟度评价流程

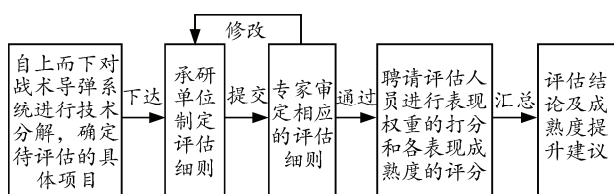


图 2 战术导弹技术成熟度评价流程

在我国装备管理体制下，进行战术导弹技术成熟度评价，首先对战术导弹装备进行从上而下的技术分解，然后进行细则制定、组织评估人员，并进行评估打分和结果报告。具体的评价流程如图 2。

3 战术导弹技术成熟度评价方法

尽管美国国防部的技术成熟度等级得到广泛的认同和使用，但只根据技术成熟度的定义，TRL 只是粗略的技术成熟度等级划分标准，要应用 TRL 必须解决 TRL 具体评价方法的问题。

笔者尝试采用 AHP-FUZZY 方法对战术导弹系统的技术成熟度进行评价。模糊综合评判法(fuzzy comprehensive evaluation)是一种基于模糊数学的综合评价方法^[3]，该综合评价法根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价，即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价。它具有结果清晰、系统性强的特点，能较好地解决模糊的、难以量化的问题，适合各种非确定性问题的解决。而战术导弹制造成熟度评估不确定性因素很多，很多指标难以量化，符合模糊综合评判法的研究对象特征，所以笔者选取此方法评估制造成熟度。AHP-FUZZY 方法操作步骤^[4-5]如下：

1) 建立评估指标体系层次结构^[6]。

表 2 战术导弹技术成熟度评价指标体系

系统技术成熟度	一级指标	二级指标
战术导弹技术成熟度等级 L	导弹弹体技术成熟度 U_1	弹身技术成熟度 V_{11}
		弹翼技术成熟度 V_{12}
		舵面技术成熟度 V_{13}
	推进系统技术成熟度 U_2	发动机技术成熟度 V_{21}
		发动机架技术成熟度 V_{22}
		燃料系统技术成熟度 V_{23}
导管技术成熟度 V_{24}		
附件技术成熟度 V_{25}		
固定装置技术成熟度 V_{26}		
制导控制系统技术成熟度 U_3	测量装置技术成熟度 V_{31}	
	程序装置技术成熟度 V_{32}	
	解算装置技术成熟度 V_{33}	
	敏感装置技术成熟度 V_{34}	
	综合装置技术成熟度 V_{35}	
	放大交换器技术成熟度 V_{36}	
引战系统技术成熟度 U_4	执行机构技术成熟度 V_{37}	
	壳体技术成熟度 V_{41}	
	装填物技术成熟度 V_{42}	
	引信技术成熟度 V_{43}	
电气系统技术成熟度 U_5	传爆系列技术成熟度 V_{44}	
	配电控制盒技术成熟度 V_{51}	
	点火电池技术成熟度 V_{52}	
	发电机技术成熟度 V_{53}	
	调压率波器技术成熟度 V_{54}	
	弹上电缆网技术成熟度 V_{55}	

导弹系统结构复杂，质量评估指标繁多。为方便评估指标体系的建立，在文献[7-8]的基础上，笔者按照导弹系统结构分层，组成导弹的技术成熟度

为一级指标层。对每一组成剖析，分析其关键技术要素，建立如表 2 所示的多层次结构评价指标体系。

2) 确定因素集和评定集。

因素集即评价项目或指标的集合，评定集即评价等级的集合。

在战术导弹技术成熟度分析中，按照上节建立的指标体系，对于一级指标，因素集 $U=\{U_1,U_2,U_3,U_4,U_5\}$ ，对于二级指标，因素集 $V_1=\{V_{11},V_{12},V_{13}\}$ ， $V_2=\{V_{21},V_{22},V_{23},V_{24},V_{25},V_{26}\}$ ， $V_3=\{V_{31},V_{32},V_{33},V_{34},V_{35},V_{36},V_{37}\}$ ， $V_4=\{V_{41},V_{42},V_{43},V_{44}\}$ ， $V_5=\{V_{51},V_{52},V_{53},V_{54},V_{55}\}$ 。

在战术导弹技术成熟度评估中，按照 2.1 节中战术导弹技术成熟度等级定义，评定集 $E=\{TRL1,TRL2,\dots,TRL9\}$ 。

3) 统计、确定单因素评价隶属度向量，并形成隶属度矩阵。

隶属度是模糊综合评判中最基本和最重要的概念。所谓隶属度 r_{ij} ，是指多个评价主体对某个评价对象在某个评价因素 i 方面做出 e_j 评价的可能性大小(可能性程度)。隶属度向量 $R_i=\{r_{i1},r_{i2},\dots,r_{im}\}$ ， $i=1,2,\dots,n$ ， $\sum_{j=1}^m r_{ij}=1$ ，隶属度矩阵 $R=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}$ 。

4) 运用 AHP 确定评估指标的权重系数，从而确定权重向量。

笔者采用层次分析法确定 U_i 和 V_{ij} 的权重系数，通过两两比较的方式，确定一级指标对目标层的判断矩阵为 $B=(b_{ij})_{n \times n}=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix}$ 。

利用方根法近似计算判断矩阵 B 的具体步骤^[9]：

① 计算矩阵 B 中每行所有元素的乘积 $M_i=\prod_{j=1}^n b_{ij}, i=1,2,\dots,n$ ；

② 计算 M_i 的 n 次方根 $w_i=\sqrt[n]{M_i}$ ；

③ 将 w_i 归一化 $\bar{w}_i=w_i/\sum_{j=1}^n w_j$ ，特征向量 $A=(\bar{w}_1,\bar{w}_2,\dots,\bar{w}_n)^T$ 即为一级指标相对目标的权重；

④ 计算 A 的最大特征值 $\lambda_{\max}=\sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nw_i}$ ，其中 $(AW)_i$ 为向量 AW 的第 i 个元素；

⑤ 一致性检验，计算一致性指标 $CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}$ ，

查找相应的平均随即一致性指标 RI ，计算相对一致性指标 $CR=CI/RI$ ，若 $CR \leq 0.1$ ，则认为判断矩阵一致性可接受，否则重新构造判断矩阵。同理可构建二级指标相对一级指标判断矩阵并计算对应的权重。

5) 计算综合评定向量。

对第 s 个评估对象的 U_i 的综合评估结果为 $B_i^{(s)}=A_i \cdot R_i^{(s)}$ 。

6) 计算综合评定值。

由 U_i 的综合评估结果 $B_i^{(s)}$ 得第 s 个评估对象的 U 所属指标 U_i 对各评估指标的评估矩阵为 $R^{(s)}=[B_1^{(s)},B_2^{(s)},\dots,B_m^{(s)}]^T$ ，于是对评估对象的综合评价结构为 $B=A \cdot R^{(s)}$ 。将评定集各等级赋值，即第 1 级取 d_1 ，第 2 级取 d_2 ， \dots ，第 g 级取 d_g ，则各评估指标等级值化向量 $D=(d_1,d_2,\dots,d_g)$ ，所以第 s 个评估对象的综合评价值为 $W=B \cdot D$ 。

4 算例

某型战术导弹的任务是完成对敌大、中型水面舰艇和编队的超视距攻击，现按照采购方要求对其进行技术成熟度评价。按照上一节建立的评价模型，运用 AHP-FUZZY 方法对其进行技术成熟度评价。

1) 建立评估指标体系层次结构。

按照上节建立的战术导弹技术成熟度评估指标体系作为层次结构对象，按照目标层(系统技术成熟度等级 L)、中间层(一级评估指标 $U_i(i=1,2,\dots,5)$)和基本层(二级评估指标 $V_{ij}(i=1,2,\dots,5; j=1,2,\dots,n_i)$)的形式排列起来的三层次评估指标体系层次结构。评估对象的序号为 $s(s=1,2,\dots,q)$ ， $L(s)$ 代表第 s 个评估对象的综合评估值； U 代表一级评估指标 U_i 所组成的集合，记 $U=U_1,U_2,\dots,U_m$ ； $V_i(i=1,2,\dots,m)$ 代表二级评估指标 V_{ij} 所组成的集合，记为 $V_i=V_{i1},V_{i2},\dots,V_{in_i}$ 。

2) 确定因素集和评定集。

3) 统计、确定单因素评价隶属度向量，并形成隶属度矩阵。

在战术导弹制造成熟度评估中，组织专家进行评估打分，设共有 25 个评分专家，专家序号为 $k(k=1,2,\dots,25)$ ，即由 25 个专家对第 s 个评估对象按照评估指标 V_{ij} 评分等级标准进行技术成熟度等级评定，填写评估表，统计专家评估表，计算隶属度矩阵得：

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.12 & 0.20 & 0.40 & 0.24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.08 & 0.08 & 0.28 & 0.36 & 0.20 & 0 \\ 0 & 0 & 0.04 & 0.04 & 0.16 & 0.24 & 0.32 & 0.12 & 0.08 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.12 & 0.20 & 0.48 & 0.08 & 0.12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.08 & 0.40 & 0.52 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.12 & 0.36 & 0.48 \\ 0 & 0 & 0 & 0.08 & 0.04 & 0.16 & 0.24 & 0.36 & 0.12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.08 & 0.12 & 0.80 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.04 & 0.60 & 0.32 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.28 & 0.48 & 0.24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.08 & 0.32 & 0.48 & 0.12 \\ 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.20 & 0.44 & 0.32 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.08 & 0.16 & 0.60 & 0.08 & 0.04 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.04 & 0.80 & 0.08 & 0.04 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.08 & 0.76 & 0.12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.12 & 0.56 & 0.24 & 0.04 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.28 & 0.64 & 0.08 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.08 & 0.88 & 0.04 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.16 & 0.56 & 0.20 & 0.04 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.72 & 0.24 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.04 & 0.64 & 0.28 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.16 & 0.76 & 0.04 \\ 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.04 & 0.08 & 0.68 & 0.08 & 0.08 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.08 & 0.92 \end{bmatrix}$$

4) 确定评估指标 U_i 和 V_{ij} 的权重系数, 从而确定权重向量。

确定判断矩阵, 按照层次分析法计算各评估指标的权重系数, 并进行一致性检验。得到权重向量:

$$A = (0.216\ 4 \quad 0.199\ 7 \quad 0.199\ 7 \quad 0.184\ 5 \quad 0.199\ 7)^T$$

$$A_1 = (0.391\ 2 \quad 0.323\ 2 \quad 0.285\ 6)^T$$

$$A_2 = (0.323\ 8 \quad 0.150\ 0 \quad 0.189\ 8 \quad 0.150\ 0 \quad 0.071\ 6 \quad 0.1148)^T$$

$$A_3 = (0.142\ 3 \quad 0.145\ 2 \quad 0.139\ 3 \quad 0.143\ 3 \quad 0.143\ 3 \quad 0.143\ 3)^T$$

$$A_4 = (0.163\ 6 \quad 0.278\ 8 \quad 0.278\ 8 \quad 0.278\ 8)^T$$

$$A_5 = (0.194\ 7 \quad 0.205\ 3 \quad 0.194\ 7 \quad 0.200\ 0)^T$$

5) 计算综合评定向量。

$$B_1 = A_1 \cdot R_1 = (0 \quad 0 \quad 0.011\ 4 \quad 0.052\ 9 \quad 0.118\ 5 \quad 0.237\ 3 \quad 0.364\ 2 \quad 0.192\ 8 \quad 0.022\ 8)$$

$$B_2 = A_2 \cdot R_2 = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.012\ 0 \quad 0.044\ 9 \quad 0.100\ 9 \quad 0.236\ 5 \quad 0.285\ 7 \quad 0.320\ 0)$$

$$B_3 = A_3 \cdot R_3 = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.011\ 3 \quad 0.056\ 5 \quad 0.170\ 1 \quad 0.549\ 4 \quad 0.178\ 4 \quad 0.034\ 6)$$

$$B_4 = A_4 \cdot R_4 = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.011\ 2 \quad 0.078\ 1 \quad 0.648\ 0 \quad 0.238\ 5 \quad 0.024\ 2)$$

$$B_5 = A_5 \cdot R_5 = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.007\ 8 \quad 0.015\ 6 \quad 0.031\ 6 \quad 0.289\ 9 \quad 0.242\ 1 \quad 0.413\ 1)$$

6) 计算综合评定值。

对战术导弹技术成熟度的综合评价结构

$$B = A \cdot R = (0 \quad 0 \quad 0.002\ 5 \quad 0.017\ 7 \quad 0.051\ 1 \quad 0.126\ 2 \quad 0.413\ 2 \quad 0.226\ 8 \quad 0.162\ 7)$$

在战术导弹技术成熟度等级评估中, 可取评定集等级量化向量为 $D = (1, 2, \dots, 9)^T$, 则战术导弹技术成熟度的综合评价值为 $L = B \cdot D = 7.261\ 0$, 取 8。即该型导弹说出技术成熟度等级为 8 级, 可以定型, 真实系统研制完成并验收。

从分析和计算过程可以看出, 将层次分析法与模糊综合评判结合起来的评价方法, 能降低加权过程中人为因素影响, 从而使技术成熟度评价结果更为合理、可靠。

5 结束语

笔者通过应用技术成熟度评价方法, 简要制定了战术导弹技术成熟度九级标准, 提出了战术导弹技术成熟度评估指标体系, 并建立了基于层次分析法和模糊综合评判法的技术成熟度评估方法模型。理论上能够较为客观、科学地对战术导弹装备技术成熟度进行综合评估, 建立模型计算简便, 易于系统编程开发, 具有较强的可行性和操作性。但影响导弹装备技术成熟度的因素很多, 研究仍待深化, 可在今后战术导弹技术成熟度评估实践中进一步验证、改进。该研究可对战术导弹技术成熟度以及研制阶段质量改进和优化提供参考, 以找出技术发展短板, 进行重点技术突破。

参考文献:

- [1] John C.M. technology readiness levels, Advanced concept office of spaceaccess and technology (2)[N]. NASA, a white paper, 1995-04-06.
- [2] 马宽, 王崑声, 李永立. 技术成熟度模型的改进及在中国航天工业管理中的应用[J]. 科学决策, 2011, 52(10): 52-65.
- [3] 汪应洛. 系统工程[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2010: 131-132.
- [4] 陈松辉, 邱宏理. 基于 AHP 和模糊综合评价法的登陆作战效能分析[J]. 舰船电子工程, 2013, 224(2): 91-93.
- [5] 杨志华, 刘顺利. 基于 AHP-Fuzzy 法的防空兵指挥信息系统评估研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(11): 37-39.
- [6] 胥辉旗, 田燕妮, 陈望达. 基于弹上总线的导弹装备测试性设计方法[J]. 兵工自动化, 2012, 31(1): 1-3.
- [7] 于剑桥, 文仲辉, 梅跃松, 等. 战术导弹总体设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 1-2.
- [8] 沈如松. 导弹武器系统概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 3-6, 74-192.
- [9] 王肖飞, 薄延珍, 孔东明. 技术成熟度评价方法在导弹武器系统中的应用研究[J]. 战术导弹技术, 2011, 32(6): 32-35.