

# 飞行器地面试验评价方法研究

王文海<sup>1</sup>, 闫丽琴<sup>2</sup>, 司勇<sup>3</sup>

(1. 中国人民解放军空军航空维修技术学院, 长沙 410124;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041; 3. 中国人民解放军空军研究院, 北京 100076)

**摘要:** 为进一步提高飞行器的地面试验效能, 提出了一种基于试验建模的飞行器地面试验评价体系, 包括地面试验过程建模和适用度评价方法研究两个步骤, 针对试验需求与目标、试验任务、试验过程、试验资源、试验场、试验结果等 6 个试验环节, 进行基于 UML 机制的建模技术研究, 建模工具选择美国 Rational 公司的面向对象的可视化建模工具 RationalRose, 通过“蛛网图”评价、灰色关联分析和基准评价 3 种评价方法对试验模型进行了适用度指标评价研究, 通过适用度评价指标选出较优化的试验方案; 结合某飞行器地面点火试验方案, 构建了基于试验建模的试验评价体系, 对试验过程、试验方法、试验手段、试验数据等, 根据适用度评价方法进行了试验方案最优化研究应用, 取得了良好的验证效果。

**关键词:** 地面试验; 试验评价; 试验建模; 综合适用度

## Research on Aircraft Ground Experiment Evaluation Technology

Wang Wenhai<sup>1</sup>, Yan Liqin<sup>2</sup>, Si Yong<sup>3</sup>

(1. Air force aeronautical college of maintenance technique, The Chinese People's Liberation Army,

Changsha 410124, China; 2. Beijing aerospace measurement & Control Technology Co., LTD.,

Beijing 100041, China; 3. Academy of Air Force, The Chinese People's Liberation Army, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to improve aircraft's ground test efficiency, an aircraft ground test evaluation system based on test modeling was developed. The system had two procedures, test modeling and relevance evaluation. In view of six test elements including experiment demand and goals, assignment, procedures, resources, facility and results, research on modeling technology based on UML mechanism was carried out, and the modeling tools was RationalRose, an object-oriented visual modeling tool of Rational companies in the United States. According to three evaluation methods as spider net evaluation, gray relative analysis and reference evaluation, application of the test model is studied, and the better test plan was selected by comparing the evaluation index. Combined with an aircraft ground ignition test scheme, the application of test evaluation system based on the ground ignition test modeling was constructed. Around the test process, method, data and so on, the application was verified and good results were achieved.

**Keywords:** ground test; evaluation for test; test modeling; comprehensive applicability

## 0 引言

飞行器地面试验<sup>[1]</sup>是一项在地面模拟真实飞行环境下, 对飞行器、发动机及机载设备等进行探索、验证和研究的系统工程。试验覆盖装备全生命周期, 是发现和解决飞行器及部件在设计、生产、制造中的问题, 是促使新机各项指标更科学、更先进的不可缺少的环节。

国军标中地面试验规范给出了基本试验参数和试验方法, 在制定试验大纲和实际试验中往往遇到多种试验方案选择、不同试验环境搭建、不同试验数据处理方法等问题, 多个环节的耦合又造成试验误差放大。另外, 飞行器地面试验评价决定着试验结果的效能是否合理, 衡量地面试验是否达到预期试验目的, 如技术指标和功能要求的符合度、极限边界条件下的性能指标等。当试验效果较差时, 需要分析试验评价结果, 进而从试验过程、试验方法、试验手段或数据处理等方面进行试验修正, 进一步提高试验效能。

为解决这一问题, 文中提出了一种基于试验建模的地面试验适用度评价方法, 将试验需求、试验环境、试验过程、试验

方法、试验手段、试验数据处理整理在统一的试验模型中, 通过适用度评价选出最优化的试验方案。

## 1 基于 UML 方法的试验建模技术

对试验环节和试验行为的试验建模, 目的是为了计算多维度的中间适用度量度指标, 进而通过适用度计算算法得到综合适用度指标。首先采用基于统一建模语言(unified modeling language, UML)的建模方法对 6 个试验环节进行建模。UML 融合了早期各种建模语言的优点, 在面向对象分析和设计方面完全能够实现可视化建模过程。

基于 UML 方法的飞行器地面试验模型包括: 试验需求与目标、试验任务、试验过程、试验资源、试验场和试验结果。模型中除了对所属试验环节的特征属性进行描述外, 还包括输入输出接口、数据需求和约束条件。试验模型之间可以通过继承、包含和数据驱动等关系进行关联。模型之间的关联用来表达试验环节之间的行为, 本文中提出了 6 个试验行为, 包括: 需求生成任务、任务规划过程, 过程配置资源、资源发布试验场、试验场记录试验结果、结果对比需求。这些行为通过模型的接口和关联关系连接, 通过适用度计算算法, 可计算出行为对应的中间适用度, 如生成适用度、规划适用度、配置适用度等。

试验建模工具<sup>[2]</sup>选择美国 Rational 公司的面向对象的可视

收稿日期: 2017-12-06; 修回日期: 2018-01-08。

作者简介: 王文海(1967-), 男, 湖南湘乡人, 硕士、副教授, 主要从事嵌入式技术控制方向的研究。

化建模工具 RationalRose, 它包括了 UML、OOSE 以及 OMT, 因而可以方便建立基于 UML 描述的系统模型, 能够提供清晰的 UML 表达方法和完善的工具, 是一套能满足所有建模环境 (Web 开发, 数据建模, VisualStudio 和 C++) 需求能力和灵活性的完整解决方案。

建模机制按照 UML 规范定义的逻辑层次进行, 主要包括静态模型和动态模型。静态建模是建模语言的基础, 主要包括类图、对象图、构件图以及相应的部署图等。动态建模是主要由交互图 (包括时序图和协作图)、状态图、活动图来进行描述。UML 的建模机制如图 1 所示。

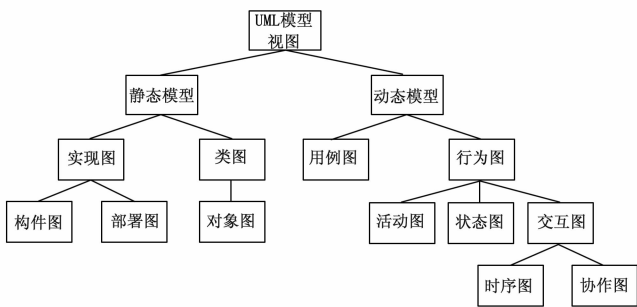


图 1 UML 建模机制

试验模型共包括 12 个模型, 包括 6 个静态模型和 6 个动态模型, 其中静态模型描述 6 个试验环节, 包括试验需求、试验任务、试验过程、试验资源、试验场和试验结果, 动态模型对应 6 个试验行为, 包括生成、规划、配置、发布、记录和对比, 如图 2 所示。

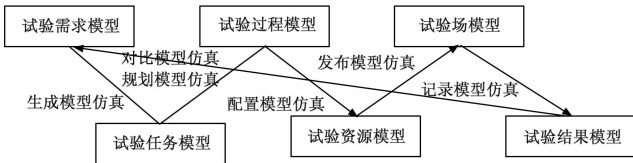


图 2 试验环境与行为模型建模

针对上述 6 个试验环节进行行为建模, 模型包括元对象模型和对象模型。元对象模型是指进行概念描述建模的模型图, 模型中包含该试验环节通用特征的描述, 如类型、参数、状态、接口、数据需求和约束条件等。试验对象模型主要根据试验环节所关联的元对象模型进行继承、派生和扩展。对象模型可以是一类元对象模型单独继承/扩展产生, 也可以是一个已定义好的对象模型继承而来, 也可以是由多个对象模型派生出来, 提供单个对象模型无法支持的功能<sup>[3]</sup>。

6 个试验环节模型间通过行为连接, 分别为需求生成任务、任务规划过程、过程配置资源、资源发布试验场、试验场记录试验结果、试验结果对比需求。通过中间适用度评价算法对行为过程进行仿真并得出中间适用度, 通过评价最终得到综合适用度。综合适用度在一定程度上反映了针对试验需求和试验目标的试验效能问题。

## 2 基于试验建模的飞行器地面试验评价体系实现

地面试验适用度评价体系分为两个过程: 试验建模和适用度评价。评价体系提出了适用度的试验评价效能指标, 并给出了度量和计算方法, 最后按照不同评价方法对适用度进行评

价, 得到综合适用度值。如图 3 所示。

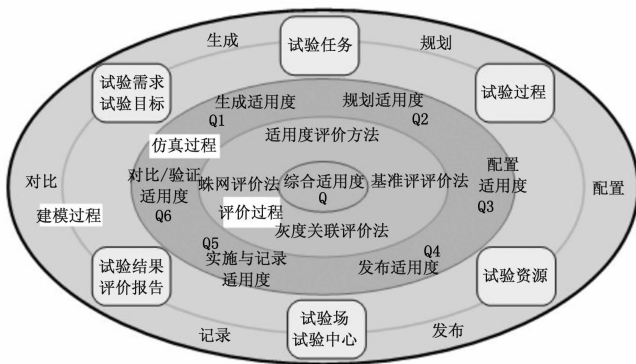


图 3 地面试验适用度评价体系

通过对试验需求、试验任务等 6 个试验环节进行调研, 将所有试验相关元素和过程进行开放式结构建模, 如试验需求模型、试验任务模型、试验资源模型等。每个模型之间通过行为进行关联。行为过程即仿真过程, 如试验需求生成试验任务, 试验任务规划试验过程等。仿真结果就是评价体系中的中间适用度, 适用度度量采用评分制, 如试验过程配置试验资源的配置适用度可分为 1~10 分, 资源占用最少而且试验过程完全覆盖的为 10 分, 其次为 9 分, 依次类推。这样仿真结果便是一组多维度的中间适用度值。通过评价体系中的评价方法计算获取最后的综合适用度值。中间适用度评价方法可采用蛛网评价法、灰色关联评价法、基准评价法等。

## 3 基于中间适用度的适用度评价方法

运用已建立的地面试验适用度评价体系研究本文开展的验证试验及进行地面试验建模和适用度评价。结合验证方案试验结果进行比较和验证, 给出适合飞行器地面试验的最优方案选择和试验策略。

通过“蛛网图”评价、灰色关联度分析和基准评价 3 种评价方法对飞行器在设计研制试验、生产和交联静态试验、地面试验整个过程进行适用度评价。不同评价方法将对应不同的适应度评价价值, 结合试验验证方案对试验过程、试验方法、试验手段、试验数据进行适用度评价方法最优化研究, 并形成评价方法选择标准。

如图 4 所示, 建立飞行器地面试验的中间适用度评价体系, 将试验模型生成的中间适用度 Q1~Q6, 通过不同的适用度评价方法获取综合适用度值, 最终选取综合适用度值较高的试验方案进行验证。

### 3.1 蛛网评价法

蛛网图 (spider chart) 评价法<sup>[4]</sup>, 又称为戴布布拉图或雷达图评价法, 是一种图形综合评价方法, 将评价对象的评价指标状况通过二维平面图形展示。该评价方法的中心思想是: 根据需要确定被测评对象的主要评价指标, 优化选择方法与选择相应的数值, 对主要评价指标进行数值处理, 通过专家评分法、对比分析法等, 获取具有选择可比性的无量纲指标值。利用上述方法建立飞行器地面试验评价的蛛网图, 共包括 6 个轴线, 分别对应地面试验建模过程中的 6 个中间适用度指标, 将中间适用度值在蛛网图对应位置进行描点, 然后连线构成一个六边形, 所得六边形的面积对应试验方案的综合适用度, 面积最大者试验方案最优, 如图 5 所示。

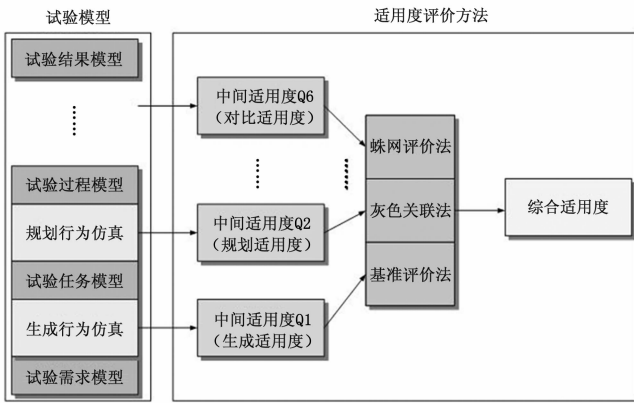


图 4 适用度评价方法示意图

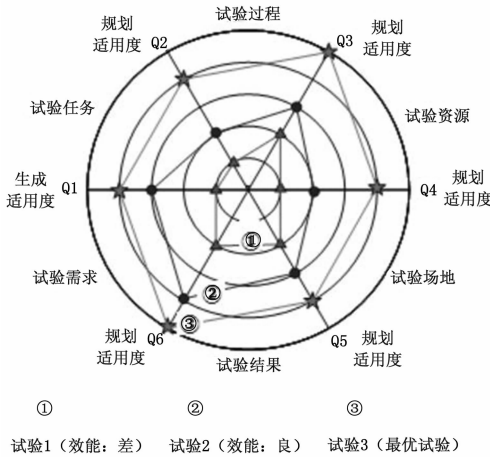


图 5 蛛网图评价法示意图

蛛网图评价<sup>[5]</sup>适合多个试验方案的综合评估，能较好地体现系统评价的真实性，在实际应用中，通过具体问题进行分析，采用比较合理的方式和科学的方法来确定影响因素的分数相对值。蛛网图具有简单、直观的特点，多为特征评价方法，在同一图形上可呈现出多方面的特征，比较性强。但是，相对交互性较差，不能通过改变设计质量来修改方案，一般先应对评价指标进行充分分析，且生成的评价报告只能作决策参考。

### 3.2 灰色关联评价法

灰色关联度法是在信息不完整或不确定时，用来衡量两因素间相似或相异程度的方法，若两个因素相关程度较高，两者之间的关联度就高，反之就低。因此，灰色关联度法的核心内容是关联度的建立<sup>[6]</sup>。

通过灰色关联方法<sup>[8]</sup>对试验方案进行评价的基本模型是：继承已有试验的适用度，并定为参考序列，按照灰色系统理论计算综合适用度（灰色关联度），综合适用度排序高的为最优试验。评价算法如下：

令历史试验的中间适用度作为参考序列  $x_0, x_i (i = 1, \dots, 6)$  为比较序列。数据列的长度为  $m$  (参照试验分析模型个数  $m = 6$ )， $x_0(k), x_i(k)$  分别为序列  $x_0$  与  $x_i$  中第  $k$  个数，令  $\Delta_{i0}(k) = |x_i(k) - x_0(k)|$ ，则  $x_0(k)$  与  $x_i(k)$  的关联系数为：

$$\gamma(\chi_i(k), \chi_0(k)) = \frac{\min_i \min_k \Delta_{i0}(k) + \epsilon \cdot \max_i \max_k \Delta_{i0}(k)}{\Delta_{i0}(k) + \epsilon \cdot \max_i \max_k \Delta_{i0}(k)} \quad (1)$$

式 (1) 中， $\epsilon \in [0, 1]$  为分辨系数。

根据关联系数，求得综合适用度。

$$\gamma(\chi_i, \chi_0) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \gamma(\chi_i(k), \chi_0(k)) \quad (2)$$

对综合适用度  $\gamma(\chi_i, \chi_0) (i = 1, 2, \dots, n)$  进行大小排序，适用度越大，说明其对应的数据序列越接近参考序列，所对应的试验方案为优。

灰色关联度法应用范围较广，特别适合于指标值数量较少、而且离散の場合，是一种很好的分析系统中多因素关联程度的评价方法。

### 3.3 基准评价法

评价时一般先选定一个基准试验<sup>[5]</sup>，如历史试验的平均水平。通过试验建模，仿真求得中间适用度，作为基准数据。将待评价中间适用度指标和权重评价因子代入评价算法，求得综合适用度。

$$Q = \sum_{i=1}^6 A_i \times M_i \quad (3)$$

其中： $A$  为权重评价因子，由下面层次分析法求得。

根据评价指标体系构造判断矩阵，依据指标体系中各层指标的关系，利用比率标度方法，对同一准则下多层次各个指标进行两两比较和量化，构造判断矩阵<sup>[5]</sup>。求出判读矩阵的最大特征根，并进行一致性检验。

$$rf_t = \frac{rf_t}{\sum_{i=1}^6 rf_i} \quad (t = 1, 2, \dots, 6) \quad (4)$$

$$RF = \sum_{i=1}^6 rf_i \cdot v_i \quad (5)$$

基准评价法通过将各试验方案与基准试验方案进行对比，使得实验方案中的各项指标度量规范化和无量纲化，从而解决了指标量纲不一致的缺陷，可作为一个定量评价标准进行系统的综合评价。

## 4 评估方法应用

点火试验是飞行器地面试验的关键部分，通过地面试验对点火器的工作状态、时序控制等进行测量评估，以便为飞行器正式飞行试验提供可靠的数据<sup>[7]</sup>。本评估方法在某飞行器地面点火试验中对试验需求、试验任务等 6 个试验环节进行调研，将所有试验相关元素和过程进行开放式结构建模，每个模型之间通过行为进行关联，生成仿真过程，通过中间适用度评价算法，得到一组多维度的中间适用度值 (1~10)，然后采用蛛网评价法、灰色关联评价法、基准评价法等进行综合评价得到综合适用度值，依据适用度值，选取效能高的方案进行试验，取得了良好的验证效果。

### 4.1 飞行器地面点火试验建模

以某飞行器地面点火试验方案需求为例进行试验建模研究，根据 UML 建模规范，首先明确点火试验方案中，点火系统的边界即系统参与者：点火发控设备、系统操作人员、指控系统、点火器、控制软件、定时器等。其中点火器可选择点火电路或模拟负载两种试验方案，使用 RationalRose 软件建立试验方案的动态模型，对参与者进行用例分析，生成的用例图如图 6 所示，描述系统中各参与者所对应的不同功能。

用例图在 UML 建模语言中起支配作用，描述系统外部可

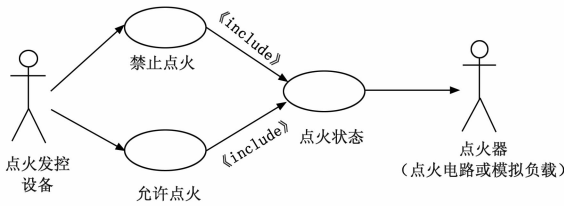


图 6 用 RationalRose 软件生成的用例图

见的行为, 确定了一种强制力量, 并驱动和约束后续功能的开发。用例视图生成后, 进入与用例图对应的行为视图生成阶段, 该行为模型是对一个具有明确业务功能的描述, 因此其模型元素主要包括以下内容: 时序图、活动图等, 采用 RationalRose 工具进行描绘, 可以清晰、高效地完成对某飞行器地面点火试验任务的需求分析, 同理为试验任务、试验过程、试验设备等 6 个试验环节分别建模, 进行行为关联, 生成两种点火试验方案的试验建模仿真过程。

#### 4.2 点火试验中间适用度评价应用

基于上述两种某飞行器地面点火试验方案的试验模型, 在试验方案比较选择过程中, 首先根据模型建立中间适用度评价体系, 如图 7 所示。不同试验阶段的适用度值需综合各阶段对应的主要评价指标获取。评价指标覆盖了试验方案的多方面因素, 而且能够根据指标的度量值反映用户需求, 并由此来反映各适用度指标对整个试验方案的综合影响程度。例如综合某点火试验方案的试验任务复杂程度和试验任务满足试验需求的程度, 可得到方案对应的生成适用度  $Q_1$  的对应度量值。

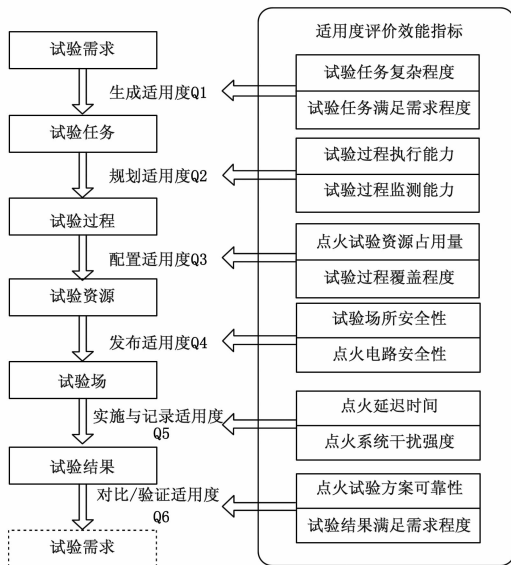


图 7 某飞行器地面点火试验中间适用度评价效能图

根据上述中间适用度评价体系, 各适用度指标的度量需综合对应的评价指标来获取, 对于两种试验方案不同阶段的适用度  $Q_1 \sim Q_6$ , 根据评价体系中的适用度评价主要指标, 可以得到两组多维度的中间适用度值 (1~10), 分别采用蛛网图法、灰度关联法、基准评价法进行方案的适用度评价计算, 获取综合适用度, 对比两种方案的综合适用度值, 优先选取适用度高

的方案进行试验验证。

1) 采用蛛网图法进行试验方案对比评价, 将两种点火试验方案的中间适用度进行对比综合评价。由于试验生成、试验规划、试验配置、试验发布、试验实施与记录、试验对比验证与试验方案的性能成正相关性, 因此构建的蛛网图面积越大, 表明对应的试验方案性能越高, 方案的可行性越好。

如图 8 所示, 将两种试验方案的 6 个中间适用度值在蛛网图上上进行描点并连线, 形成两个星型图像, 该图像反映了两种方案各评价指标的状态。可以从图中比较直观得出试验方案 2 的蛛网图面积大于试验方案 1 的蛛网图面积, 即方案 2 的综合适用度值大于方案 1 的综合适用度值。依据适用度值与试验方案的正相关性, 可优先选取效能高的试验方案 2 进行地面点火试验。

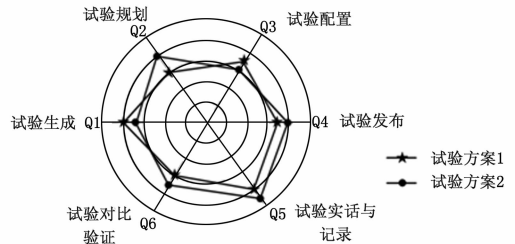


图 8 某飞行器地面点火试验方案蛛网图对比

2) 采用灰度关联法, 对两种点火试验方案的中间适用度进行综合评价, 选取历史试验的一个中间适用度作为参考序列, 并对比参考序列进行灰度关联度计算, 分别求出两种试验方案相对参考序列的中间适用度关联系数  $\gamma_i(j) (i = 1, 2, j = 1, 2, \dots, 6)$ , 如表 1 所示。

表 1 试验方案灰度关联系数

方案	试验生成	试验规划	试验配置	试验发布	试验实施与记录	试验对比验证
1	0.8 695	0.8 400	0.9 545	0.8 077	0.7 778	0.84
2	0.8 452	0.9 718	0.8 961	1	0.8 519	0.9 718

根据灰度关联系数求两种方案的灰度关联度, 即综合适用度:

$$\Gamma_{01} = 0.8483 \quad (6)$$

$$\Gamma_{02} = 0.9228 \quad (7)$$

比较得  $\Gamma_{01} > \Gamma_{02}$ , 说明方案 2 的比较序列更接近参考序列, 方案 2 与参考方案的关联度更高, 可优先选取方案 2 进行地面试验。

3) 采用基准评价法, 依据试验方案指标体系中各指标的关系, 对同一准则下各个指标进行两两比较和量化, 并根据一致性条件, 求得判断矩阵  $P$ , 按照和法将  $P$  每一列数值进行归一化处理, 得出各评价指标的权重系数如下:

$$A = \left[ \frac{10}{27}, \frac{10}{81}, \frac{10}{81}, \frac{5}{27}, \frac{5}{27}, \frac{10}{81} \right]^T \quad (8)$$

根据权重系数, 求得各方案的综合适用度:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^6 A_i * M_i = 8.0864 \quad (9)$$

$$Q_2 = \sum_{i=1}^6 A_i * M_i = 8.3333 \quad (10)$$

(下转第 300 页)