

# 军用自动测试设备更新决策研究

朱海振<sup>1</sup>, 肖明清<sup>1</sup>, 赵 鑫<sup>1</sup>, 李 超<sup>1</sup>, 吴文杰<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038; 2. 93841 部队, 乌鲁木齐, 830000)

**摘要** 为了节约军用自动测试设备研制经费和全寿命周期费用,提升设备快速保障能力,达到效费比最大化目标,从测试保障整体角度,分析了被测对象需求、自动测试设备费用和测试设备服役寿命,对军用测试设备的更新问题建立了基于混合整数线性规划方法更新决策模型。针对某型军用飞机测试需求,分析不同基准费用条件下测试设备的更新决策问题,对比了更新决策结果对不同影响因素的灵敏度,得到了不同服役寿命设定条件下的更新决策结果,结果表明:5~7 倍单台基准费是 98% 被测对象对应测试设备更新决策的临界点;更新决策结果对移植费用灵敏度最高;新设备使用寿命延长到 20 a 时,可显著影响更新决策结果。

**关键词** 自动测试设备;混合整数线性规划;费用;更新决策

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.04.010

**中图分类号** TP39 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)04-0053-07

## Research on Renewing Decision of Military Automatic Test Equipment

ZHU Haizhen<sup>1</sup>, XIAO Mingqing<sup>1</sup>, ZHAO Xin<sup>1</sup>, LI Chao<sup>1</sup>, WU Wenjie<sup>2</sup>

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 93841, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** To save the developing and whole lifetime using cost of automatic test equipment, and attain the highest cost-effectiveness ratio, from the perspective of the whole test support system, a model is established for military automatic test equipment renewal based on mixed integer linear programming, which is grounded on analysis of unit under test demand, cost of automatic test equipment and lifetime of equipment on active service into consideration. According to the needs of a certain military plane in the test, this paper analyzes the renewing decision problem under different baseline costs. Compared the influence on the sensitivities of a variety of factors from the renewed outcomes, the outcomes of different lifetimes setting are also acquired. The outcomes show that 5 to 7 times of baseline cost are the critical renewing points of corresponding test equipment of 98% the number of units under test, the renewing decision is mostly effected by transplanting cost, and the outcome of renewing decision is obviously affected by prolonging the lifetime of new equipment to 20 years.

**Key words:** automatic test equipment; mixed integer linear programming; cost; renewing decision

随着军事装备技术的快速发展,军用自动测试设备(Automatic Test Equipment, ATE)在航空航

收稿日期: 2016-12-21

作者简介: 朱海振(1993—),男,河北沧州人,硕士生,主要从事武器系统与测试自动化研究。E-mail:13325388575@163.com

**引用格式:** 朱海振,肖明清,赵鑫,等. 军用自动测试设备更新决策研究 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(4):53-59. ZHU Haizhen, XIAO Mingqing, ZHAO Xin, et al. Research on Renewing Decision of Military Automatic Test Equipment [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(4):53-59.

天等国防领域的军用设备保障维护中起着重要作用,已成为军用飞机和机载武器系统安全稳定运行和准确操作的重要支撑技术。ATE包括完成测试任务的全部硬件和相应的操作系统软件,测试程序集(Test Program Set, TPS)与被测对象(Unit Under Test, UUT)及其测试要求密切相关,包括测试程序软件,测试接口适配器,被测对象测试所需各种文件<sup>[1]314-315</sup>。

目前部队服役的老旧遗留 ATE 由于服役时间长,且多为专用 ATE,存在测试对象覆盖范围窄、故障率高、可靠性差、测试保障费用高昂等问题。随着装备技术的发展,专用测试设备无法满足一体化测试保障的现实需求,为了提高资源利用率,满足一体化测试保障的现实需求。国内外军方都积极推动 ATE 的通用化<sup>[2]</sup>,最新研发的新型 ATE 多为通用测试设备。ATE 的更新包括研发新型 ATE 和将被测对象(Unit Under Test, UUT)对应的测试程序集(Test Program Set, TPS)从遗留 ATE 移植到新型 ATE。在部队的使用中,只有在 ATE 完全损坏或者武器系统换装的情况下才对测试设备进行更新<sup>[3]</sup>,除以上情况外,即使测试设备可用度不高、使用费用和维修费用高昂也不对测试设备进行更新换代,军用 ATE 更新现状存在着“短期节约,长期浪费”的问题,即短期内虽然节约了购买新型 ATE 的费用,但遗留 ATE 日常维护维修费用高昂,长远看来浪费经费。为了节省军用 ATE 寿命周期费用,减少测试设备的军费开支,对 ATE 的更新决策进行合理规划具有非常重要的意义。

在 ATE 更新决策研究中,文献<sup>[4~7]</sup>分别对 UUT 维修规划问题、预测维修决策优化问题、预期平均成本最小化的维修成本问题、保障人员优化体制问题进行了研究;文献<sup>[8~11]</sup>对于美军军用 ATE 更新、遗留设备软件升级策略进行了框架介绍。以上研究分别对费用问题的单方面进行了优化,现实条件下,完成的 ATE 更新不只有 UUT 的维修决策优化、人员配置优化问题,还有 TPS 移植、设备维持和设备服役寿命问题<sup>[12]</sup>,对于费用的整体规划才能从实际上节约设备采购和使用经费。

本文从保障系统整体角度,建立了混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)模型,模型将军用 ATE 更新决策问题视作分配问题来解决,通过不同更新方式之间费用对比,考虑使用费用、维持费用、保障费用、TPS 移植费用和硬件采购费用等因素,在保证测试能力前提下,规划 UUT 测试时间分配,最后以某型军用飞机测试需求为例进行分析,以 UUT 测试时间移植和 UUT

对应的 TPS 移植数量为指标,计算得出 ATE 各项费用和服役寿命对 ATE 更新决策影响。经测试,该模型可以为军用 ATE 更新提供有效参考。

## 1 更新决策问题描述

更新决策的目的是在保障测试需求的前提下,为达到效益最大,在设备服役寿命期内,比较遗留 ATE 和新型 ATE 的花费,因此,要考虑 UUT 需求、设备费用和服役寿命 3 个因素。

### 1.1 UUT 需求分析

航空设备维修评估是基于有组织的中继维修需求率  $o$  (Organizational Maintenance Demand Rate OIMDR) 和计划的飞行小时数,其他的参数包括每次使用强度  $q$  (Quantity Per Application QPA) 飞行应用率  $f$  (Fleet Application Percentage FAP)<sup>[13]</sup>, 每年飞行小时数  $a$  (A-year's Flying Hours AFH)。中继维修需求率等于一架飞机每个飞行小时的 UUT 更换数量,因此一年第  $i$  个 UUT ( $U_i$ ) 更换数量期望  $G_i$  为:

$$G_i = aoqf \quad (1)$$

因此,1 台测试设备一年期望的 UUT 测试时间  $W$  为:

$$W = \sum_i G_i T_i \quad (2)$$

式中:  $T_i$  为  $U_i$  在测试设备上的测试时间,再由对飞行小时数的规划,可以得到每一个 UUT 的测试需求时间。

### 1.2 ATE 费用

1) 遗留 ATE 费用。继续使用遗留 ATE 的费用主要是用于保证此类设备能在保持可用度的基础上完成相应的测试任务,这一部分的费用包括 3 个方面:①单台测试设备使用费用;②单台测试设备保障费用;③测试设备型号维持费用。其中测试设备型号维持费用由管理部门按装备的型号数量支出,同一型号设备共用一套备件,包括备件、电子元器件的更新、相关的管理费用以及新仪器或者仪器损坏后替代品的费用等。

2) 新型 ATE 费用。①新型 ATE 硬件费用;② TPS 移植费用(硬件费用和移植费用在设备更新第一年一次性支付);③单台测试设备使用费用;④单台测试设备保障费用;⑤测试设备型号维持费用。新型 ATE 也有相应的操作、维持、保障费用,通常情况下由于新技术的使用,新型 ATE 的这部分费用要远小于遗留 ATE。

### 1.3 ATE 服役寿命

模型中加入了 ATE 服役寿命的因素用以保证

模型在面向未来的武器系统延伸性,由于服役寿命的设定会影响到更新决策结果,如果使用时间相对较长,TPS 移植所支付的一次性费用将平均到整个服役寿命期,另外新型 ATE 的维持、保障费用较低,在 TPS 移植费用固定的情况下,服役寿命延长,模型决策结果会更倾向于测试设备更新。

## 2 模型建立与求解

为得到基于限制条件和费用优化的更新决策,建立针对更新决策问题的 MILP 模型。模型的前提是设定新型 ATE 为通用测试设备,可以完成所有遗留 ATE 的测试工作<sup>[14-15]</sup>,模型将每一个给定的遗留 ATE 所对应 UUT 看作是分立的变量,结果可以是遗留 ATE 部分或全部 UUT 移植到现有 ATE 或新型 ATE,剩余部分要继续使用遗留 ATE 进行测试。

### 2.1 变量声明

所有的数据变量和决策变量都设定为非负数,基于现实情况考虑,年度平均测试次数、费用和测试时间均为非整数,应用模型时,此类数据基于数据库的统计真实值取平均数。其余变量为 0-1 变量和整数变量。各变量名和对应的意义如下:

1)数据变量。 $G_t$ :在时间  $t$  内总的  $U_i$  测试任务量; $F_i$ : $U_i$  测试时间(h); $S_{ij}$ :把  $U_i$  的 TPS 移植到第  $j$  个 ATE( $A_j$ )上的费用; $C_j$ :采购 ATE $_j$  的费用; $A_{ij}$ :0-1 变量,如果  $U_i$  可能分配给  $A_j$ , $A_{ij}=1$ ,否则  $A_{ij}=0$ ; $O_{jt}$ :在时间  $t$  内操作和维修任何一个非零  $A_j$  量的费用; $M_{jt}$ :在时间  $t$  内操作和维修单个  $A_j$  的费用; $H_{jt}$ :在时间  $t$  内  $A_j$  用以测试 UUT 运行的费用; $P_{jt}$ :在时间  $t$  内, $A_j$  的可用时间。

2)决策变量。 $X_{ij}$ :0-1 变量,如果  $U_i$  被分配到  $A_j$ , $X_{ij}=1$ ,否则  $X_{ij}=0$ ; $D_{ijt}$ :0-1 变量,在时间  $t$  内,若有不少于一次的  $U_i$  分配到  $A_j$ , $D_{ijt}=1$ ,否则  $D_{ijt}=0$ ; $R_{ijt}$ :0-1 变量,若在时间  $t$  内,第一次  $U_i$  分配到  $A_j$ , $R_{ijt}=1$ ; $U_{jt}$ :0-1 变量,在时间  $t$  内调用任何一个  $A_j$ ,若  $Z_{jt}>0$ , $U_{jt}=1$ ,否则  $U_{jt}=0$ ; $Y_{ijt}$ :在时间  $t$  内  $U_i$  分配给  $A_j$  的测试时间(小时); $B_{ijt}$ :在时间  $t$  内  $U_i$  分配给  $A_j$  的累积测试时间(小时); $Z_{jt}$ :整数变量,在时间  $t$  内  $A_j$  的单元使用个数; $V_{jt}$ :整数变量,在时间  $t$  内加入到  $A_j$  的新单元数。

### 2.2 目标函数

在规划时间周期内,所有的 ATE 在能够满足 UUT 测试需求的情况下费用最小,ATE 的费用包括:操作测试 UUT、维护 ATE 和 ATE 日常保障费用、TPS 移植费用和新型 ATE 硬件费用。

混合整数线性规划模型的目标函数为:

$$\text{Min: } Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T Y_{ijt} H_{jt} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T Z_{jt} M_{jt} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T U_{jt} O_{jt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J X_{ij} S_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T C_j V_{jt} \quad (3)$$

### 2.3 约束条件

1)保证所有的 UUT 任务量在每个时间段内都要被分配到:

$$\sum_{j=1}^J Y_{ijt} \geq G_t F_i, \forall i \in I, t \in T \quad (4)$$

2)保证在起始时间  $t=1$  时,UUT 任务量能被分配到遗留 ATE:

$$Y_{ijt} = \begin{cases} G_t F_i, & S_{ij} = 0, \forall i \in I, j \in J, t = 1 \\ 0, & S_{ij} \geq 0, \forall i \in I, j \in J, t = 1 \end{cases} \quad (5)$$

3)记录每个阶段分配到 ATE 上 UUT 的积累小时数:

$$B_{ijt} = \begin{cases} Y_{ijt}, & \forall i \in I, j \in J, t = 1 \\ B_{ijt-1} + Y_{ijt}, & \forall i \in I, j \in J, t = 2, \dots, T \end{cases} \quad (6)$$

4)保证 UUT 被合理的分配给相应的任务量:

$$\infty D_{ijt} \geq B_{ijt}, \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (7)$$

5)记录起始阶段分配到 ATE 的 UUT:

$$R_{ijt} \geq \begin{cases} D_{ijt}, & \forall i \in I, j \in J, t = 1 \\ D_{ijt} - D_{ijt-1}, & \forall i \in I, j \in J, t = 2, \dots, T \end{cases} \quad (8)$$

6)记录分配到每个 ATE 的累积 UUT 任务量:

$$W_{jt} \geq \sum_{i=1}^I Y_{ijt}, \forall i \in I, t \in T \quad (9)$$

7)保证有足够的 ATE 工作时间来执行任务量:

$$P_{jt} Z_{jt} \geq W_{jt}, \forall j \in J, t \in T \quad (10)$$

8)保证在任意时间段内都有测试系统在工作:

$$\infty U_{jt} \geq Z_{jt}, \forall j \in J, t \in T \quad (11)$$

9)限制分配到特定 ATE 上的 UUT:

$$A_{ij} \geq X_{ij}, \forall i \in I, j \in J \quad (12)$$

10)保证在对应时间任务量被分配到可用 ATE:

$$\infty X_{ij} \geq \sum_{t=1}^T Y_{ijt}, \forall i \in I, j \in J \quad (13)$$

11)购买的  $j$  型 ATE 的总数不超过运行 ATE 数量:

$$V_{jt} \geq \begin{cases} Z_{jt}, & \forall j \in J, t = 1 \\ Z_{jt} - Z_{jt-1}, & \forall j \in J, t = 2, \dots, T \end{cases} \quad (14)$$

## 3 某型军用飞机 ATE 更新决策分析

模型案例分析选择了 6 个型号的遗留 ATE,以及某型军用飞机上的 470 个 UUT。设定购买的新

型 ATE 为通用测试设备,可以完成所有 470 个 UUT 的测试工作。

所选用的 6 种型号的遗留 ATE 为内场航电自动测试设备(ATE1)、数字测试设备(ATE2)、雷达电子战测试设备(ATE3)、数模电视测试设备(ATE4)、电源控制组合测试设备(ATE5)、升级系统测试台(ATE6),新型通用自动测试设备(ATE7)。

### 3.1 参数设置

模型的参数输入、结果输出见图 1。

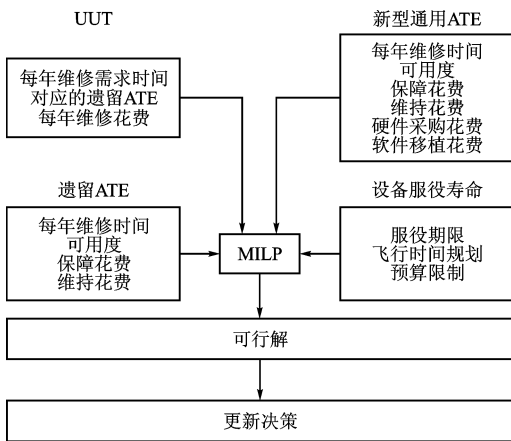


图 1 模型输入输出框图

Fig. 1 Inputs and outputs of the model

各个型号的 ATE 可用度、每台 ATE 年度工作时间和各型号 ATE 年度需求测试时间见表 1。

表 1 ATE 年度工作时间、年度需求测试时间、支持测试 UUT 数量

Tab. 1 Annual workload, annual testing time needed, and number of available UUTs of ATEs

ATE 名称	可用度 $P_j/\%$	工作时间 /h	需求时间 /h	支持测试 UUT 数量
ATE1	70	2 934	12 620.33	350
ATE2	85	3 542	9 086.42	46
ATE3	48	1 993	25 785.03	27
ATE4	84	3 502	52 952.95	21
ATE5	95	3 952	4 196.49	22
ATE6	93	3 866	24 266.73	4
ATE7	95	3 952		470

注:需求时间为每型 ATE 所支持测试 UUT 年度测试需求时间  $F_i$  求和所得,表 1 和表 2 数据为  $t$  取 1 时数据,当寿命设定变化时乘以相应的倍数

本例中 6 型 ATE 测试项目不重叠,故不考虑 UUT 移植到遗留 ATE 情况。

全部 470 个 UUT 的年度测试时间为 129 000 h,要完成全部的保障任务需要 5 台 ATE1,3 台

ATE2,13 台 ATE3,16 台 ATE4,2 台 ATE5,7 台 ATE6,此外考虑到可能会存在全部的 UUT 测试工作被移植到新型通用自动测试设备(ATE7)上的情况,全部的年度工作测试时间需要 33 台 ATE7。每台遗留 ATE 每年基准保障费用和每型遗留 ATE 每年基准维持费用见表 2。

表 2 ATE 年度保障费用与维持费用

Tab. 2 Annual cost of sustaining and supporting ATEs

ATE 名称	单台基准保障费用 $H_j/\text{元}$	每型基准维持费用 $O_j/\text{万}$
ATE1	25 000	85
ATE2	7 500	68
ATE3	37 000	85
ATE4	7 500	68
ATE5	7 500	51.3
ATE6	7 500	23
ATE7	5 000	12

模型以 UUT 测试保障任务为更新决策基准,UUT 的测试工作由遗留 ATE 移植到新型 ATE 即代表 ATE 更新,对于 ATE 的更新情况建立了 2 个衡量指标:一是 470 个 UUT 对应 TPS 的移植数量百分比;二是 UUT 测试时间移植百分比。

新型 ATE 服役寿命设定为 10 a,ATE1 支持测试的 350 个 UUT 类型为 LRU(Line Replaceable Unit),剩余 120 个 UUT 类型为 SRU(Line Replaceable Unit),LRU 的 TPS 移植的基准费用  $S_{ij}$  ( $i$  取值为 1~350)为 100 万元,SRU 的 TPS 移植基准费用  $S_{ij}$  ( $i$  取值为 351~470)为 30 万元(本例中  $j$  取值为 7),新设备硬件费用  $C_j$  为每台 150 万元,人员操作费用和电费  $M_j$  为每台遗留每年 12 万元,每台新型 ATE 每年 11 万元。

### 3.2 模型案例应用求解

使用 MATLAB YALMIP 线性规划工具箱来解决多限制条件下的目标优化问题,由于 MILP 存在约束条件松弛问题,其所有可行解的存在于一个凸集中,而凸集中的元素任意组合仍为问题的可行解,故目标决策的解集包含于其对应松弛问题解集,松弛问题最优解目标函数不优于目标决策可行解函数值,求解时运用隐枚举法,在松弛问题可行域中,先搜索所有限制空间中的更新决策的可行解<sup>[16-18]</sup>,后对比决定最优化目标函数更新决策,同时对各个决策影响因素进行了计算比较,得出对更新决策影响灵敏度较高的因素。

### 3.3 结果分析

模型对不同的基准费用和不同的类型费用基准比进行了对比,通过分析不同费用参数条件下的更新决策结果,可以得出决策结果对不同因素的灵敏度。在仿真结果图中,采用不同倍数单台基准费用表示,即:每台设备保障费用,设定为表 2 中单台基准保障费用的不同倍数条件下模型更新决策的结果。横坐标类型费用基准比 1~10 表示,每个型号设备维持费用设定为表 2 中每型基准维持费用的 1~10 倍条件下模型更新决策结果。纵坐标分别表示总的 UUT 测试时间移植百分比和 470 个 UUT 移植数量的百分比。

图 2 和图 3 给出了在不同的设备保障费用和每个型号设备维持费用情况下的移植决策曲线。曲线表明 5~7 倍单台基准费是 98% UUT 测试设备更新决策的临界点;剩余 2% 数量的 UUT 对应的测试设备为 ATE6,对于 ATE6 由于其可用度很高、维持费用的基准较低,将单台基准费用设定为 10 倍仍不需要移植到新型 ATE。

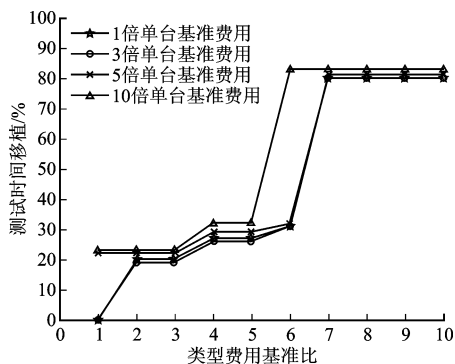


图 2 测试时间移植变化曲线

Fig. 2 Variation curve of testing time transferred

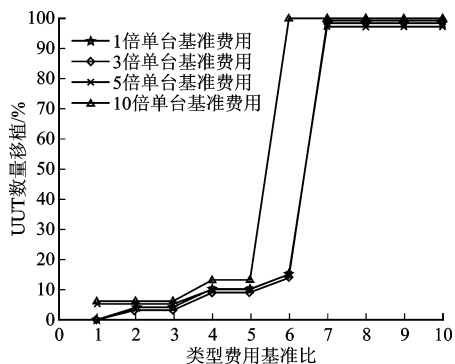


图 3 UUT 对应 TPS 数量移植变化曲线

Fig. 3 Variation curve of TPSs transferred corresponding to UUTs

图 4(a)~(c)是在 1 倍、0.5 倍、0.1 倍的基准移植费用下,测试时间的决策移植百分比;图 5(a)

~(c)是在 1 倍、0.5 倍、0.1 倍基准移植费用条件下 UUT 对应 TPS 决策移植数量,结果表明,决策结果对于移植费用的灵敏度较高,对比基准移植费用、0.5 倍和 0.1 倍基准费用条件下的曲线可以发现,降低移植费用可以显著地使决策更倾向于 ATE 更新。

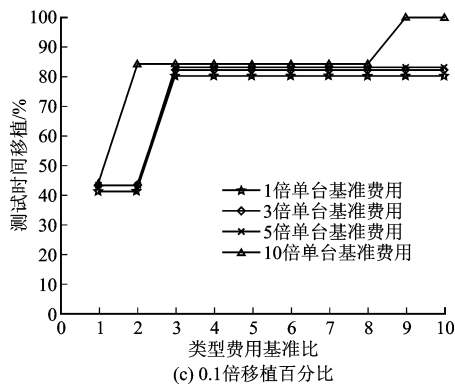
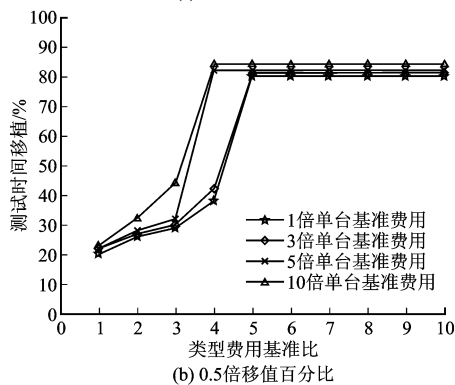
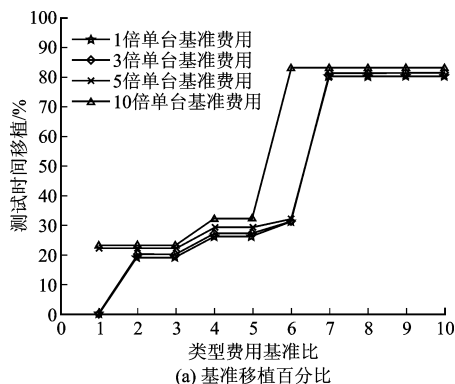
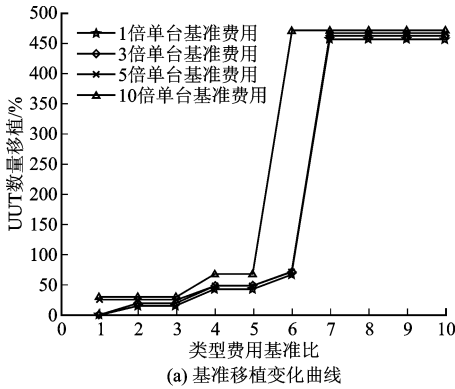


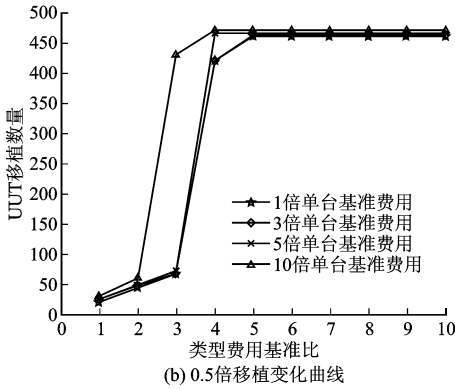
图 4 不同移植费用测试时间移植百分比

Fig. 4 Transferred percentage of testing time under various transferring cost

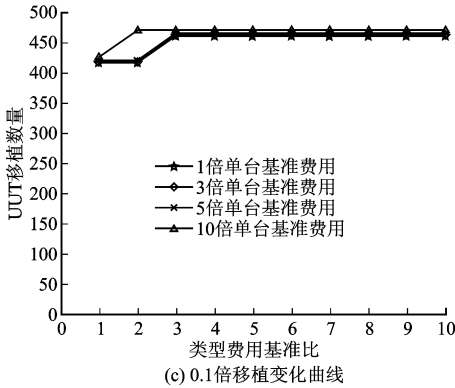
以上的决策结果是设定新型 ATE 的使用期限为 10 年的条件下得出的,图 6 和图 7 给出了设备服役年限为 20 年的更新决策结果,对比图 2 和图 3,由于在决策中存在着一性支付的移植费用,延长使用年限减少了每年的移植费用,同时,新型 ATE 有可用度高、维持费用和保障费用低的优势,随着设定服役寿命延长,新型 ATE 在这方面的优势变得更加明显。



(a) 基准移植变化曲线



(b) 0.5倍移植变化曲线



(c) 0.1倍移植变化曲线

图5 不同基准移植费用 UUT 对应 TPS 数量移植变化曲线

Fig. 5 Variation curve of number of TPSs transferred corresponding to UUTs under various transferring cost

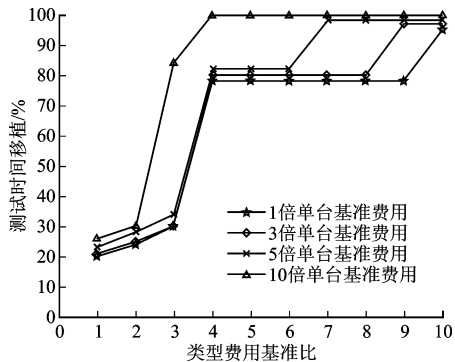


图6 服役寿命 20 a 测试时间移植百分比

Fig. 6 Transferred percentage of testing time under 20 years lifetime

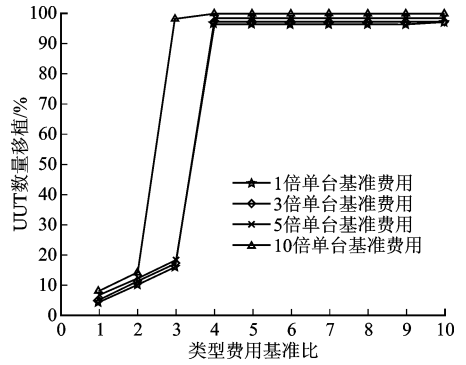


图7 服役寿命 20 a UUT 对应 TPS 数量移植百分比变化曲线

Fig. 7 Variation curve of number of TPSs transferred corresponding to UUTs under 20 years lifetime

### 4 结语

本文建立了混合整数线性规划模型,模型将测试设备更新问题视作分配问题来解决,在模型中考虑了维持费用、保障费用、TPS 移植费用和服役寿命问题,通过规划费用和测试时间给出更新决策方案。最后以某型军用飞机测试需求为例进行了分析,结果表明,模型可以从费用和测试时间角度,解决军用 ATE 更新不科学问题。长远看,坚持发展通用测试设备是费效比更高的方向,也是未来测试平台上发展系列化通用测试设备的基础。模型的评估方法可以为现有平台上 ATE 更新提供参考。

### 参考文献(References):

[1] 肖明清,王学奇. 机载导弹测试原理 [M]. 北京:国防工业出版社,2011.  
XIAO M Q, WANG X Q. Test Principles of Airborne Missile [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)

[2] 于劲松,李行善. 下一代自动测试系统体系结构与关键技术 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(1): 1-3.  
YU J S, LI X S. Architecture and Key Technologies of Nest Generation Automatic Test System [J]. Computer Measurement & Control, 2005, 13(1): 1-3. (in Chinese)

[3] 张丽叶. 装备更新经济性分析 [J]. 装备学院学报, 2012, 23(5): 36-39.  
ZHANG L Y. Economic Analysis of the Equipment Update [J]. Journal of Academy of Equipment, 2012, 23(5): 36-39. (in Chinese)

[4] 刘凯. 贝叶斯网络维修决策系统的开发与应用研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学,2004.  
LIU K. Research on Development and Application of

- Maintenance Decision System Based on Bayesian Network [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [5] 徐玉国, 邱静, 刘冠军, 等. 基于损伤标尺的电子设备预测维修决策优化 [J]. 航空学报, 2012, 33(11): 2093-2105.
- XU Y G, QIU J, LIU G J, et al. Optimal Predictive Maintenance Decision of Electronics Based on Canaries [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(11);2093-2105. (in Chinese)
- [6] 金灿灿, 左洪福. 民航发动机性能预测与视情维修决策研究 [J]. 计算机仿真, 2014, 31(7): 95-98.
- JIN C C, ZUO H F. Performance Prediction and Maintenance Decision of Aero-Engines [J]. Computer Simulation, 2014, 31(7): 95-98. (in Chinese)
- [7] 刘伟, 虞水俊. 军用电子装备维修编制决策支持系统研究 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(1): 5-8.
- LIU W, YU S J. Study on Decision Support System for Electronic Armament's Maintenance Structure [J]. Computer Simulation, 2006, 23(1): 5-8. (in Chinese)
- [8] U S General Accounting Office. Military Readiness DOD Needs to Better Manage Automatic Test Equipment Modernization [R]. GAO-03-451, 2003.
- [9] GELLER A, GEORGE D, TRIPE R S, et al. Supporting Air and Space Expeditionary Forces: Analysis of Maintenance Forward Support Location Operations [M/OL]. [2016-10-11]. <http://www.abbey.com.au/>.
- [10] 刘锁文. 美国国防部自动化测试设备的更新换代及其管理 [J]. 计测管理, 2008, 28(2): 54-57.
- LIU S W. Renewal and Measurement of DoD ATE [J]. Computer Measurement & Management, 2008, 28(2): 54-57. (in Chinese)
- [11] 张宝珍. 美国国防部推进通用开放式自动测试系统采办的“五步走”策略 [J]. 测控技术, 2009, 28(1): 172-177.
- ZHANG B Z. The “Five-Step” Strategy for DoD ATE Acquisition [J]. Measurement & Control Technology, 2009, 28(1): 172-177. (in Chinese)
- [12] ZHANG B, CHEN Y S, ZHANG G Z. Research on Automatic Test Equipment (ATE) and Test Technology of Foreign Army [J]. Computer Automated Measurement & control, 2002, 10(1): 1-4.
- [13] 苏涛, 郝梦媛. 动态规划在装备更新优化中的应用 [J]. 价值工程, 2014, 31(2): 64-67
- SU T, HAO M Y. Application of Dynamic Programming to the Optimization of Equipment Renewal [J]. Value Engineering, 2014, 31(2): 64-67. (in Chinese)
- [14] KEATING E G, DIXON M. Investigating Optimal Replacement of Aging Airforce Systems [J]. Defence and Peace Economics, 2004, 15(5), 421-431.
- [15] GALWAY L A, TRIPP R S, RAMEY T L, et al. New Agile Combat Support Postures [R]. Cakf RAND Corporation MR-1075-AF, 2000.
- [16] NEMHAUSER G L, WOLSEY L A. Integer and Combinatorial Optimization [M]. Wiley-Interscience Series in Discrete Mathematics and Optimization, 1988, 763.
- [17] 高洪深. 决策支持系统(DSS)理论方法案例 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- GAO H S. Decision Supporting System: Theories Methods & Cases [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [18] 胡运权, 郭耀煌. 运筹学教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- HU Y Q, GUO Y H. Operations Research [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)