

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005410

## 运输类飞机运行符合性验证规划方法研究\*

张 夏<sup>1</sup> 孙有朝<sup>1</sup> 张越梅<sup>1,2</sup> 周永兴<sup>3</sup>(1. 南京航空航天大学 民航学院 南京 211106; 2. 中国商用飞机有限责任公司民用飞机试飞中心 上海 200125;  
3. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司试飞站 成都 610073)

**摘要:** 针对民航当局对运输类飞机运行符合性的评审要求,结合型号研制里程碑节点和飞机设计、制造、试验的不同状态,确定了不同阶段的运行符合性验证工作内容,提出了将运行符合性验证与型号合格审定进行协同规划的方法,提出了与研制、审定过程协调一致的运行符合性验证计划编制方法,构建了基于验证项目、验证资源、验证成本、验证时间等多参数的运行符合性验证规划模型,设计了基于遗传算法的运输类飞机运行符合性验证规划模型求解流程。算例表明,该方法在处理多目标约束的验证成本和验证时间最优解问题上具有可行性。

**关键词:** 运输类飞机;符合性验证;航空器评审;规划方法;遗传算法

中图分类号: V219 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.65

Research on scheduling method of operational compliance  
verification for transport airplanesZhang Xia<sup>1</sup> Sun Youchao<sup>1</sup> Zhang Yuemei<sup>1,2</sup> Zhou Yongxing<sup>3</sup>(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;  
2. Civil Aircraft Flight Test Center, Commercial Aircraft Corporation of China Co., Ltd., Shanghai 200125, China;  
3. Flight Test Station, Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., AVIC, Chengdu 610073, China)

**Abstract:** On the basis of the requirements of civil aviation authorities, combining with the stages and milestone nodes of developing the aircraft, working contents of compliance demonstration in different phases are determined, and a method of collaborative planning of compliance demonstration and type certification is put forward. Combining with the different states of aircraft design, manufacture and test, a method to compile the operational compliance demonstration plan that is in harmony with the development and certification processes is proposed. A multi-parameter scheduling model of operational compliance verification is built based on projects, resources, cost and time. A genetic algorithm (GA) based solving flow of the operational compliance verification scheduling model is designed. A case shows that the method is feasible in dealing with the optimal problem of verification cost and time for multi-objective constraints.

**Keywords:** transport airplane; compliance verification; aircraft evaluation; scheduling method; genetic algorithm

## 0 引言

运输类飞机的运行符合性即飞机型号设计对运行类民航规章的符合性,属于航空器评审组(AEG)的工作范围<sup>[1]</sup>。运输类飞机除了应满足 CCAR-25-R4《运输类飞机适航标准》所规定的设计要求以外<sup>[2]</sup>,还应在投入运行前满足 CCAR-91-R2《一般飞行和运行规则》和 CCAR-121-R4《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》中对安全运行的要求,这是运输类飞机能否从设计研发顺利投入航

线运行的必由之路,也是确保运输类飞机持续适航和安全运行的必要审查环节。

目前,中国民用航空局(CAAC)关于运行符合性评审工作颁布的主要指导材料是 AC-91-10-R1《国产航空器的运行评审》,主要涉及 CCAR-91-R2 部的 23 条条款以及 CCAR-121-R4 部的 54 条条款。欧洲航空安全局(EASA)规定运行适用性数据(OSD)运行符合性检查需满足 Part CAT 中的相关要求。美国联邦航空局(FAA)的运行符合性规章包括 CFR Part 91/121。CAAC/EASA/FAA 的运

收稿日期:2020-11-22

\* 基金项目:国家自然科学基金重点项目(U2033202)、装备预研领域基金(61400020402)、中央高校基本科研业务费(56XBC20018)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18\_0309)资助

行符合性评审要求并不完全相同,其中 CAAC 和 FAA 在规章体系上一致,EASA 则将评审内容分散在不同条款中,CAAC、FAA 运行符合性要求的范围也比 EASA 更全面。

对于运输类飞机运行符合性的 AEG 工作,国内民航制造商缺少运行符合性验证经验,鉴于此,在深入分析局方与运行符合性相关规章要求的基础之上,研究运行符合性验证计划编制方法和实施流程,构建运输类飞机运行符合性验证规划模型,为科学合理规划运输类飞机运行符合性验证工作提供参考,推动运输类飞机的研制和投入运行。

## 1 运行符合性工作内容

运行符合性评审符合性验证计划的编制需要与运输类飞机型号研制阶段及里程碑节点相结合,将型号合格审定(TC)与 AEG 运行符合性评审验证内容进行协同规划。

根据 TC 与 AEG 运行符合性评审的一般情况,可按航空器的生命周期将审定过程划分为概念设计阶段、要求确定阶段、符合性计划制定阶段、计划实施阶段和证后阶段<sup>[3]</sup>。AEG 评审工作主要横跨 TC 审定过程中的要求确定、符合性计划制定、计划实施 3 大阶段,主要职责包括<sup>[4]</sup>:

- 1) 参与符合性验证试验和型号检查核准书(FAA 项目)试验,评定飞机及其系统是否符合营运要求;
- 2) 审查持续适航维修大纲,编写维修审查委员会(MRB)报告;
- 3) 审查飞行手册及其修订;
- 4) 制定主最低设备清单(MMEL);
- 5) 制定型号定级要求;
- 6) 参与机组定员决定;
- 7) 参与应急撤离演示;
- 8) 制定飞行机组睡眠区接受标准;
- 9) 制定专用或特殊的培训装置要求;
- 10) 参与功能与可靠性试验;
- 11) 协调飞行标准委员会(FSB)、飞行运行评审委员会(FOEB)、MRB;
- 12) 作为型号合格审定委员会(TCB)成员和飞行审查委员会成员。

与型号研制阶段、TC 审定阶段同步的 AEG 运行符合性评审符合性验证工作流程如图 1 所示。

### 1.1 要求确定阶段

与运行符合性 AEG 评审相关的工作在召开 TCB 会议阶段。召开 TCB 会议的目的是考虑工程设计、飞行试验、制造、维修和运行各方面的要求,对型号的合格审定进行综合规划。在这一工作阶段,应将运输类飞机的运行符合性评审要求提供给会议讨论,并将这些要求融入到此后编制的审定计划之中。

每架航空器投入运行前都必须根据计划的运行种类表明其对相应运行规章的符合性。为表明这样的符合性,需采取对新型号航空器编制运行符合性清单的方式形成评审

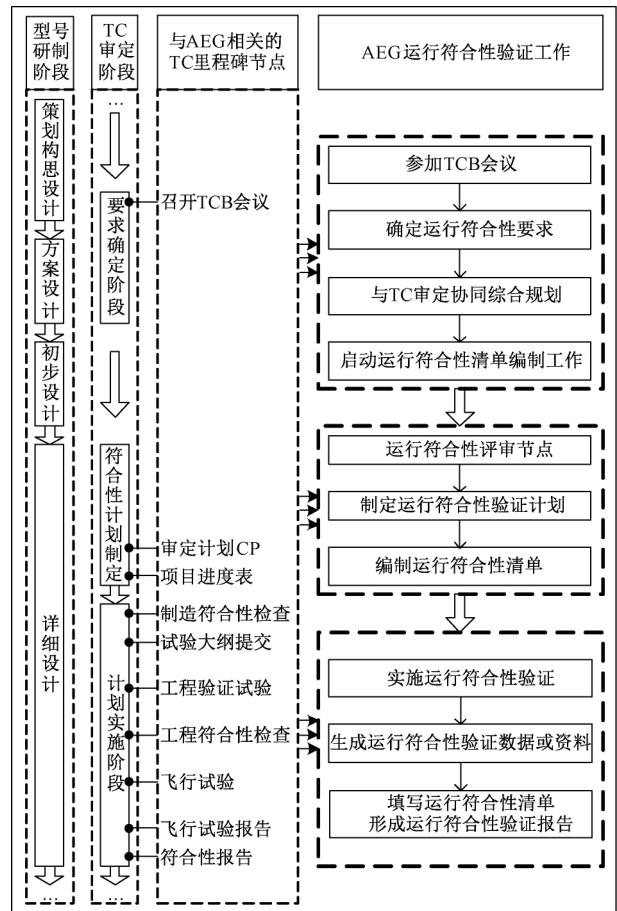


图 1 运行符合性评审符合性验证流程

结论。在本阶段中,应根据航空器的运行要求,启动运行符合性清单的编制工作。

### 1.2 符合性计划制定阶段

符合性计划制定阶段输出的与运行符合性 AEG 评审相关的成果包括:

- 1) 批准的审定计划(CP),或经签署的专项合格审定计划(PSCP);
- 2) 项目进度表,包含审查组/申请人确定的里程碑节点,里程碑节点主要包括完成分析的节点、试验大纲提交节点、型号检查核准书(TIA)签发的节点、制造符合性检查节点、飞行试验节点、设计保证系统审查节点、重要问题的解决计划,以及其他影响项目完成的节点;
- 3) 符合性检查清单。

在该阶段,运行符合性 AEG 评审工作应充分结合项目进度表中的里程碑节点,制定运行符合性评审符合性验证计划,同时按照运行符合性清单要求制定符合性检查单,为开展计划实施阶段的工作奠定基础。

### 1.3 计划实施阶段

航空器型号合格审定中对与航空器运行方面相关要求的评估工作由 AEG 负责。审查组应按与 AEG 的协调机

制要求,在型号合格审定过程中保持与 AEG 沟通和协调。

## 2 运行符合性验证内容

与型号合格审定计划协调一致,开展运行符合性验证之前应确定审查组/申请人确定的里程碑节点,即完成分析的节点、制造符合性检查节点、试验大纲提交节点、工程验证试验节点、工程符合性检查节点、飞行试验节点,以及其他影响项目完成的节点,以及符合性验证资料、清单、报告的提交日期等信息。

运输类飞机运行符合性验证应针对预期运行环境的规章要求进行,主要包括与运行符合性相关的 CCAR-91-R2 中的 23 条条款、CCAR-121-R4 中的 54 条条款,考虑不同条款内容的特点,采用书面验证和操作验证的方法<sup>[5]</sup>,对运行符合性 AEG 评审提交文件进行验证。验证结果形成运行符合性清单,该清单可用于表明对运行规章的符合性,可记录符合性工作的完成情况,清单的形式如表 1 所示。

表 1 运输类飞机运行符合性清单示例

规章条款	项目	符合性说明
第 91.403 条	按目视飞行规则运行的仪表和设备	子项目 磁罗盘 计时表 ...
	...	安装要求/ 实际安装/ 要求 说明
	...	1 个
	...	1 个
...	...	...

## 3 运行符合性验证规划模型

在型号研制的详细设计阶段,开展飞机细节设计、试验与试制、工程样机制造与应用、飞行试验、文件和手册编写工作,与此同时,TC 审定开展符合性计划制定与计划实施工作<sup>[6]</sup>。依据 AEG 运行符合性评审的要求与特点,从 TC 工作流程中提取出需关注的里程碑节点,包括编制审定计划 CP、制定项目进度表、制造符合性检查、试验大纲提交、工程验证试验、工程符合性检查、飞行试验、飞行试验报告提交、符合性报告提交等。

### 3.1 验证计划编制方法

结合飞机(模拟器)设计、制造、试验的不同状态,根据不同验证项目的需求选取合适状态下的时间节点进行运行符合性验证。如,在样机制造的初始阶段,可采用书面验证方法对运行符合性 AEG 评审提交文件专有内容、产品构型定义文件等方面进行验证<sup>[7]</sup>;在样机(模拟器)制造完成之后,可采用操作验证的方法开展与运行操作相关的地面试验(飞行模拟器试验)验证工作<sup>[8]</sup>;对于 TC 审定中已进行过实际操作验证的项目,可直接形成结论性的验证结果。运行符合性验证计划编制方法如图 2 所示。

在安排验证项目时,需重点考虑如下因素:

1)与 TC 审定项目的协同规划。对于 TC 审定中已经验证的项目,直接引用 TC 审定结论;对于 TC 审定中未充分验证的项目,补充书面或操作试验方法进行验证;对于 TC 审定中未涉及的项目,按照运行符合性验证要求选择合适的方法进行验证。

2)对飞机状态的要求。如整机、非整机、地面试验(机载设备测试)、飞行试验、模拟器试验等<sup>[9-11]</sup>。

3)验证项目的重要性。对飞行安全性、经济性等方面<sup>[12-13]</sup>有重要影响的,可优先安排测试和验证。

4)验证方法的复杂性。考虑单个验证项目是否需要采用多种验证方法进行验证,以及方法实施的先后顺序。

5)验证项目的相关性。将有操作先后顺序要求或相关程度较大的验证项目安排在同一次验证试验中,整合试验资源。

6)验证项目持续时间。根据不同项目验证时间要求统筹规划验证工作,在试验条件允许的情况下,可并行开展多个验证项目。

### 3.2 验证工作实施流程

运行符合性验证工作的实施流程如图 3 所示,其中:

1)验证计划准备阶段根据现有条件,制订项目清单、人员清单、设备清单以及飞机/模拟器/部件清单等。

(1)项目清单的内容包括项目编号、项目名称、项目所属分组、项目重要性等级(重大/重要/一般)、项目复杂度等级(复杂/一般)、项目完成截止时间、项目完成所需时间、项目对飞机状态的要求、项目对设备的要求、项目对人员的要求、环境要求等。项目所属分组,项目分组的原则是将有操作先后顺序要求或相关程度较大的验证项目安排在同一批验证中,有利于节省时间、降低成本、提高效益,整合验证资源。项目的重要性和复杂度需要预先分级,重要性等级可以分为重大、重要和一般 3 级,复杂度等级可分为复杂、一般两级,等级高的项目优先安排验证。项目对飞机状态的要求是指各项目应在何种飞机状态下验证,如整机、机头、机身、模拟器等。项目对设备的要求是指各项目在验证时需要何种设备以及每种设备所需要的数量等。项目对人员的要求是指各项目在验证时,需要的各种专业人员及其人数以及性别、身高、视力等,可按专业分为演示、目击、救护人员等。所有人员可按等级分为高级、中级和初级等。环境要求是指各项目验证对环境的特殊要求,如特殊天气下的验证等。

(2)人员清单的内容包括验证人员姓名、单位、职务/职称、专业、验证工作可参与时间、身体状况等。需要确定所有参与验证的人员姓名、人员所属单位、人员职务/职称、人员专业。确定所有人员的验证工作可参与时间。身体状况是包括性别、身高、视力等,可根据验证要求具体细化。

(3)设备清单的内容包括设备编号、设备名称、设备数量、设备工作环境条件、设备可用时间等。需要确定所有设备的基本信息(设备编号和名称),并确定该设备的可用

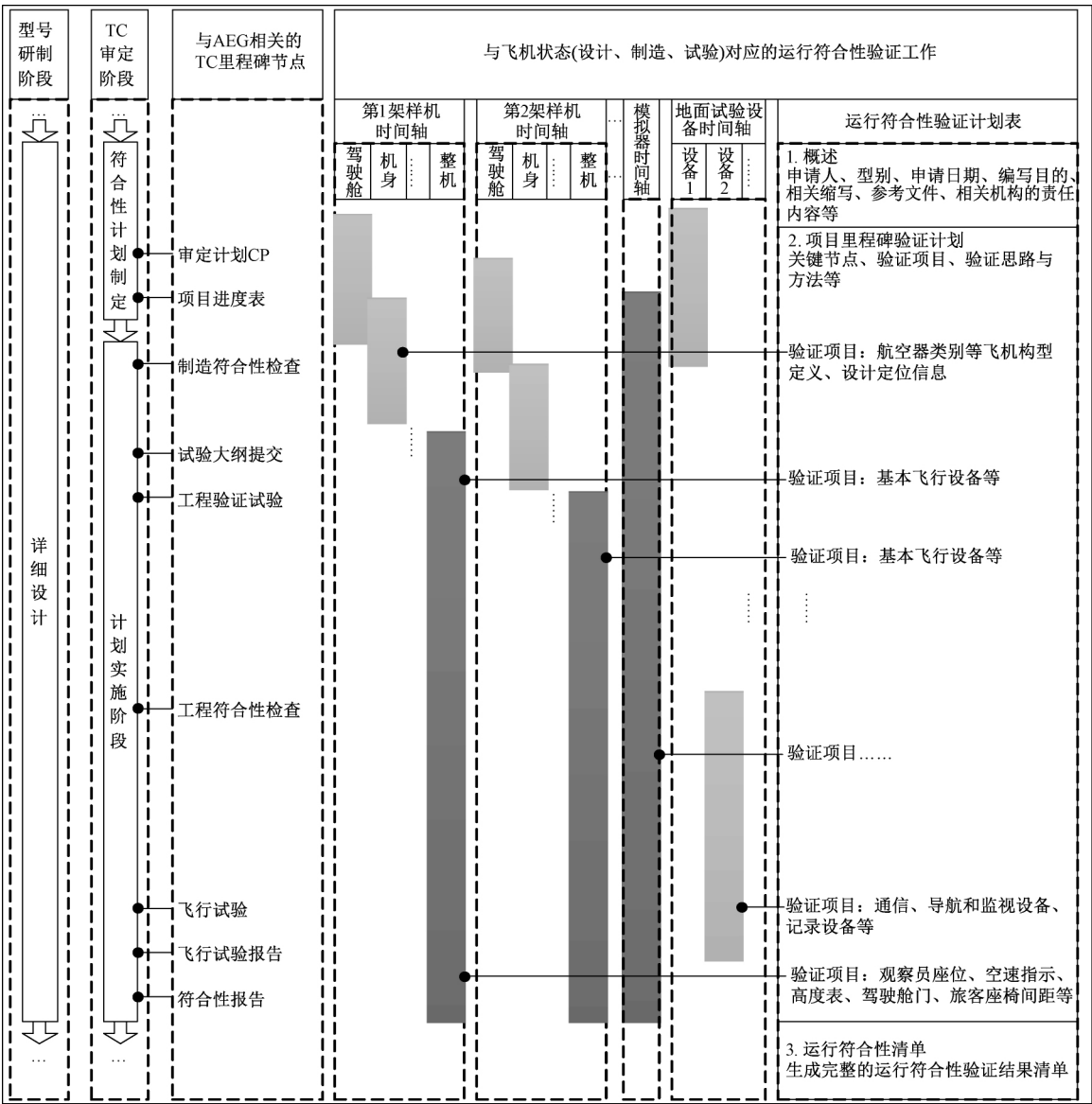


图 2 运行符合性验证计划编制方法

数量、存放地点等。设备工作环境条件是指各设备需要在何种环境下工作,例如限制温度、压力、噪声等<sup>[14-15]</sup>。确定设备可用时间,包括开始时间和结束时间。

(4)飞机/模拟器/部件清单的内容包括飞机/模拟器/部件、状态、工作环境条件、可用时间等。飞机/模拟器/部件是指验证所需的飞机/模拟器/部件的架次或编号。工作环境条件是指各设备需要在何种环境下工作,例如限制温度、压力、噪声等。确定飞机/模拟器/部件的可用时间,包括开始时间和结束时间。

2)制订/修订验证计划阶段,第一次开展项目验证需制订验证计划,验证开始后每天迭代修订验证计划。制订/修订验证计划主要依据步骤 1)的清单,为所有项目/剩余项目确定验证计划,包括时间安排、飞机架次安排、人员

安排和设备安排等。

3)计划执行阶段,以工作日为时间单位,执行当日计划。可根据具体情况,调整计划修订循环时间长短(如半天、两天等)。

4)每工作日结束判断当日的计划是否完成,若未完成,需向上反馈,重新修订验证计划并进行迭代。

5)若当日计划已经完成,判断剩余项目的验证条件(飞机、设备、人员等状态)是否发生变化,若有变化,需向上反馈,重新修订验证计划并进行迭代。

6)若当日计划已经完成,剩余项目的验证条件没有变化,则执行已有的验证计划并根据流程有需要地迭代直至项目全部完成。

7)完成验证总结报告。

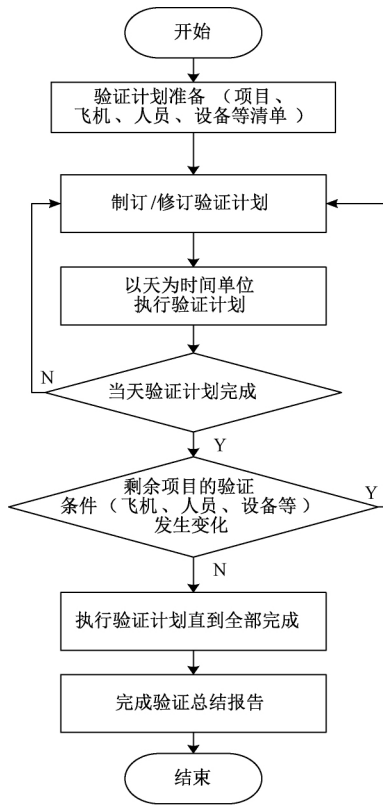


图 3 运行符合性验证工作实施流程

### 3.3 规划模型

#### 1) 参数定义

运行符合性验证规划模型涉及到的输入参数有验证项目、验证资源(试验机、模拟器、零部件等)、验证成本(人力、物力等消耗)、验证时间 4 大类,分别定义为:

##### (1) 验证项目(Project)

$$P = [p_1 \ p_2 \ \cdots \ p_m] \quad (1)$$

式中:  $m$  表示验证项目总数。

##### (2) 验证资源(Resource)

$$R = [r_1 \ r_2 \ \cdots \ r_n] \quad (2)$$

式中:  $n$  表示验证资源总数。

##### (3) 验证成本(Expense)

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (3)$$

式中:  $c_{ij}$  表示验证项目  $p_i$  依托资源  $r_j$  进行验证的成本。

##### (4) 验证时间(Time)

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ t_{m1} & t_{m2} & \cdots & t_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (4)$$

式中:  $c_{ij}$  表示验证项目  $p_i$  依托资源  $r_j$  进行验证所需时间。

另外,定义 0-1 矩阵  $Y$  表示运行符合性验证任务的分配情况(即验证项目与验证资源的联系):

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (5)$$

式中:  $y_{ij} = 1$  表示验证项目  $p_i$  需依托资源  $r_j$  完成,否则  $y_{ij} = 0$ 。

#### 2) 数学模型

分别以规划方案中各验证项目的验证成本与验证时间比值的累计和最小、总验证时间最小为目标函数,即:

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} y_{ij} / t_{ij} \quad (6)$$

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad (7)$$

同时满足约束:

$$\text{s. t. } \begin{cases} LB_c \leq c_{ij} \leq UB_c \\ LB_t \leq t_{ij} \leq UB_t \\ y_{ij} = 0, 1 \\ i = 1, 2, \cdots, m \\ j = 1, 2, \cdots, n \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $LB_c$  和  $UB_c$  分别表示验证项目  $p_i$  依托资源  $r_j$  进行验证的成本上下界;  $LB_t$  和  $UB_t$  分别表示验证项目  $p_i$  依托资源  $r_j$  进行验证的时间上下界。

#### 3) 算法流程

上述 2) 中所构建的数学模型属于多目标函数优化问题<sup>[16]</sup>,模型求解的复杂度取决于验证项目总数  $m$  和验证资源总数  $n$  的规模。本文基于遗传算法(genetic algorithm, GA)<sup>[17]</sup>给出模型求解的基本思想和流程。

##### (1) 初始化分配方案种群

在  $m \times n$  矩阵  $C$  和矩阵  $T$  的每一行(列)产生随机数,产生初始验证任务分配矩阵群,并根据约束条件筛选出符合要求的矩阵构成分配方案初始种群。

##### (2) 交叉

随机选择种群中的若干任务分配矩阵构成交叉子群,随机选择该子群中矩阵的任意位置作为交叉点进行元素重组,根据约束条件筛选出符合要求的矩阵构成新一代分配方案种群。

##### (3) 变异

根据设定的变异概率从种群中随机选择任务分配矩阵的任意位置进行变异,改变矩阵中参数值的分布情况后添加到新一代分配方案种群中。

##### (4) 复制

对于没有进行交叉和变异的任务分配矩阵,直接添加到新一代分配方案种群中。

##### (5) 循环迭代

重复交叉、变异、复制的过程,根据目标函数的收敛情况更改迭代次数,直至设定的误差阈值后获得最优任务分配矩阵。

### 3.4 模型算例

设定运行符合性验证项目总数  $m=4$ 、验证资源总数  $n=4$ ,验证任务分配矩阵  $Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ ,每项验证项目  $p_i$  依托资源  $r_j$  的验证成本  $c_{ij}$  满足约束:

$$\text{s. t.} \begin{cases} 20 \leq c_{11} \leq 80 \\ 30 \leq c_{12} \leq 90 \\ 40 \leq c_{21} \leq 100 \\ 50 \leq c_{22} \leq 100 \end{cases} \quad (9)$$

每项验证项目  $p_i$  依托资源  $r_j$  的验证时间  $t_{ij}$  满足约束:

$$\text{s. t.} \begin{cases} 4 \leq t_{11} \leq 8 \\ 5 \leq t_{12} \leq 9 \\ 5 \leq t_{21} \leq 8 \\ 5 \leq t_{22} \leq 8 \end{cases} \quad (10)$$

设定种群大小为 200、最大进化代数 10 000、目标函数偏差阈值为 0.1,通过遗传算法得出的两个目标函数值之间的变化关系如图 4 所示,得出的  $c_{ij}$  和  $t_{ij}$  最优解共 60 组,部分最优解如表 2 所示,各组最优解组合下对应的目标函数值如表 3 所示。

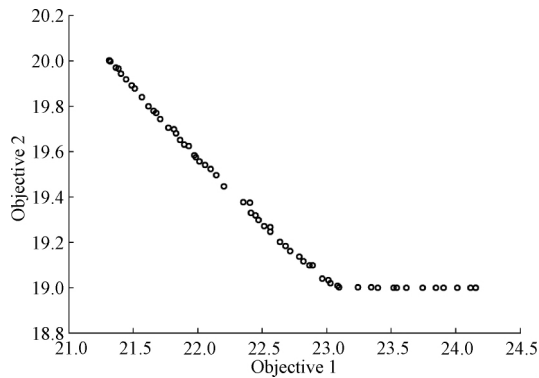


图 4 目标函数值变化关系

表 2 遗传算法得出的部分最优解

组号	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{21}$	$c_{22}$	$t_{11}$	$t_{12}$	$t_{21}$	$t_{22}$
1	24.5	84.2	40.0	50.1	3.9	4.9	4.9	4.9
2	20.0	31.0	40.0	50.0	4.0	5.0	5.1	5.8
3	24.5	84.2	40.0	50.1	3.9	4.9	4.9	4.9
4	23.3	84.2	40.0	50.1	4.0	5.0	5.0	5.0
5	20.4	53.9	40.0	50.1	4.0	5.0	5.0	5.0
...	...	...	...	...	...	...	...	...
60	20.0	31.0	40.0	50.0	4.0	5.0	5.1	5.8

表 3 部分最优解组合下的目标函数值

组号	$f_1$	$f_2$
1	24.2	18.9
2	21.3	20.0
3	24.1	18.9
4	23.8	19.0
5	23.1	19.0
...	...	...
60	21.3	19.9

## 4 结 论

本文研究了运输类飞机运行符合性验证规划方法,得出如下结论:

1) 运输类飞机运行符合性验证工作是型号合格审定工作并行的,在 TC 需求确定阶段、符合性计划制定阶段、计划实施阶段都需要展开相应的运行符合性验证工作。

2) 为了顺利通过局方评审,应结合飞机设计、制造、试验的不同状态,编制与型号研制阶段、TC 审定里程碑节点协调一致的运行符合性评审符合性验证计划。

3) 运行符合性验证流程应包括验证计划准备、制订/修订验证计划、计划执行、迭代修改验证计划、完成验证总结报告等步骤,规划模型应对验证项目、人员、设备以及飞机/模拟器/部件等资源情况进行动态分配以优化验证效率,验证案例表明,该方法能在多目标约束的情况下获得验证成本和验证时间的最优解。

## 参考文献

- [1] 徐林,郭云东,孙有朝. 运行符合性评审的适航符合性方法研究[J]. 航空计算技术, 2019, 49(1): 130-134.
- [2] 贺旺,殷媛媛. 民用飞机运行类型符合性验证研究[J]. 科学技术创新, 2019(22): 54-55.
- [3] 马小骏,彭焕春. 系统工程在大型客机运行支持系统研制中的应用综述[J]. 航空学报, 2019, 40(1): 522376.
- [4] AP-21-AA-2011-03-R4 航空器型号合格审定程序[S]. 北京:中国民用航空局, 2011.
- [5] 李卿卿. 民机交互式电子技术手册编制与验证方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
- [6] 肖女娥,张博,阎芳,等. 显示和机组告警系统适航审定方法研究[J]. 电光与控制, 2020, 27(2): 55-59, 84.
- [7] 李卿卿,曹焱,孙有朝,等. 民用飞机技术出版物验证方法探讨[J]. 中国民航飞行学院学报, 2015, 27(2): 37-41.
- [8] 周文藻. 飞行模拟器运动系统逼真度评估方法研究[D]. 天津:中国民航大学, 2020.

- [9] 苗磊, 贺中, 赵忠良, 等. 某飞行器大攻角通气测力试验装置研制与应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(2): 150-157.
- [10] ZHENG Y, LU Y, JIE Y, et al. Predicting workload experienced in a flight test by measuring workload in a flight simulator[J]. Aerospace medicine and human performance, 2019, 90(7): 618-623.
- [11] KLYDE D H, SCHULZE P C, MELLO R S F, et al. Assessment of a scalogram-based pilot-induced oscillation metric with flight-test and simulation data[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2020, 43(11): 2058-2072.
- [12] 彭宇, 何永福, 王少军, 等. 飞行数据异常检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 1-13.
- [13] WANG M, TIAN C, ZHANG N, et al. Verifying a scheduling protocol of safety-critical systems [J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2019, 37(4): 1191-1215.
- [14] 蔡凯武. 热负荷状态下机载无级变速器韧性加工控制[J]. 电子测量技术, 2019, 42(24): 1-5.
- [15] 孔叔钊, 胡湘洪. 基于适航的民机机载设备环境试验标准需求分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2019, 37(4): 83-88.
- [16] 刘建军, 司光亚, 王艳正, 等. 基于模型的多目标优化问题方法研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(11): 2138-2145.
- [17] 叶彦斐, 童先洲, 刘之境. 一种基于改进遗传算法的柔性车间调度方案[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9): 81-84.

#### 作者简介

张夏, 博士研究生, 主要研究方向为适航技术与管理。

E-mail: janshire@nuaa.edu.cn

孙有朝, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为飞机/发动机安全性设计与验证技术、适航符合性验证与审定技术、航空安全与风险评估技术等。

E-mail: sunyc@nuaa.edu.cn

张越梅, 研究员, 主要研究方向为飞机型号适航技术与管理等。

E-mail: zhangyuemei@comac.cc

周永兴, 高级工程师, 主要研究方向为飞机飞行试验技术。

E-mail: zhouyongxing132@163.com