

民用飞机飞行试验任务 优化技术研究与实现

Investigation and Realization of Flight Test Task Optimization for Civil Aircraft

严子焜¹ 郭博智¹ Ding Zhongtao²/ Yan Zikun¹ Guo Bozhi¹ Ding Zhongtao²

(1. 上海飞机设计研究院, 上海 201210; 2. 2D Technology LLC, US 30004)

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China; 2. 2D Technology LLC, US 30004)

摘要:

针对具有复杂耦合关系的试飞任务难以进行全局优化的问题,提出了一种计算机辅助任务优化方法,该方法将复杂的试飞任务优化问题分解为多项串联问题,然后采用启发式算法(A*算法)和遗传算法相结合的混合遗传算法获得试飞任务单的较优组合,并以此为基础实现对试飞任务进行全局优化。工程应用表明,通过使用该方法获得的试飞任务优化结果置信度高,可有效缩短飞行试验任务周期和降低试验成本。

关键词: 民机; 试飞; 优化; 试飞计划; 试飞任务单; A星算法; 遗传算法

中图分类号: V217

文献标识码: A

[Abstract] We present an optimization method with computer assistant on dealing with difficulties in overview optimization for flight test task with complex coupling relationship. The method divided complex work into a series of simple items, and took up A start algorithm and genetic algorithm to achieve the target of overview flight test optimization. The application results show that it can ensure getting satisfaction of flight test card and reduce flight test task period and test cost effectively.

[Key words] Civil Aircraft; Flight Test; Optimize; Flight Test Planning; Flight Test Card; A Start Algorithm; Genetic Algorithm

0 前言

试飞任务优化是通过统筹规划试验产品状态和特征、试验内容、试验逻辑关系、环境条件、测试参数、改装、安全性以及工作负荷等诸多因素,合理安排试验资源,制订可执行的、高效的任务实施路径和任务单元,即试飞执行计划和试飞任务单。其中获得既符合执行要求,又满足任务单数量最少的试飞任务单组合是进行全局任务优化的核心技术。

文章提出一种试飞任务优化思路,采用启发式算法(A*算法)和遗传算法相结合的混合遗传算法进行试飞任务单的优化,以实现在通过启发算法获得局部最优解的基础上,利用遗传算法进行全机最优点的探索。

1 国内外技术研究现状

试飞任务优化将给型号研制进度和研制成本带来丰厚的收益,国内外航空企业均在此领域开展了技术研究工作,并积极的将研究成果应用于型号试飞工作中。

1.1 国际发展情况

国际上针对试飞任务优化技术的研究工作起步于20世纪80年代,其最先被应用于军机,而后逐步在民机试飞领域崭露头角。20世纪80年代,美国德莱顿飞行研究中心开发出ATMS(Automatically Test Management System),用以辅助试飞工程师进行试飞计划编制、试飞监控和飞行仿真等工作,此系统被应用于F-111、F-15等战斗机的试飞工作中;20世纪90年代,美国波音公司为F-22战斗机试飞

开发出 TPS (Test-Plan System), 通过在 TPS 内建立和维护试验信息数据库, 试飞工程师可实时根据试验状态点执行状态, 快速制订试飞计划; 美国波音公司使用 TPS 为波音 787 飞机试飞进行统筹规划, 将不同科目的试飞任务进行组合, 以高效利用每个架次的飞行时间; 加拿大庞巴迪试飞中心开发出 TPM (Test Point Manager), 包括为庞巴迪公司研发的各类飞机提供生成试飞任务单、动态管理试飞任务、制订试飞计划和形成试飞快速报告等多种功能。

1.2 国内发展趋势

我国在民机试飞优化技术领域尚处于发展阶段, 由于缺乏必要的技术手段和专业工具, 技术人员只能仅凭自身经验采用人工的方式对专业内的试飞任务进行局部优化, 优化结果对提高试飞效率帮助有限。

2 任务优化工作思路

试飞任务优化是通过对试验和产品数据进行参数化梳理, 采用优化算法并充分使用“人”的经验将型号试飞任务合理安排到不同试飞架次中, 相关工作可分为建立数据库以实现参数化的数据应用、制定优化规则以降低优化计算的复杂程度和充分使用人的经验、开发优化算法进行任务优化、迭代数据保证试飞计划与试飞任务单之间的匹配性等四个步骤, 如图 1 所示。

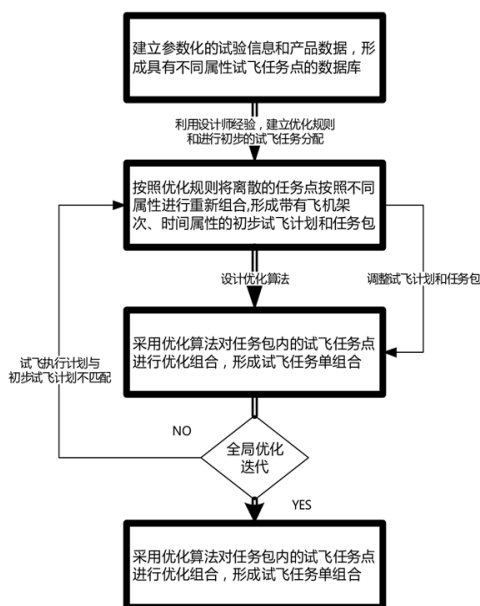


图 1 试飞任务优化思路

(1) 建立参数化的试验信息和产品数据: 建立参数化的试验和产品数据库是进行试飞任务优化

工作的基础, 通过将试验产品和试验信息按照不同的关联关系建立参数化的数据库, 形成具有不同属性的试飞状态点的数据库, 数据库中包括飞机/系统设计特征数据 (包括最大起飞重量、最大着陆重量、最大俯冲速度、发动机起动高度等)、性能数据 (包括油耗数据、失速速度、重心移动数据等)、试验性质 (包括研发试飞、符合性试飞、验证试飞等)、科目构型配置要求、试验形态数据 (包括试验高度、速度、重量、重心、襟/缝翼位置、发动机推力、飞行阶段等)、试验环境数据 (如温度、湿度、机场海拔、风向/风速、结冰、降雨等)、试飞方法 (包括标准或试飞程序、试验时间、工作负荷等)、风险等级、任务执行效率、科目逻辑顺序、测试参数和改装设备等;

(2) 制定优化规则: 任务优化是对试飞任务及相关元素进行分解和重组的过程, 通过将上述离散的试验和产品数据按照不同的试验性质、构型配置要求、测试/改装需求、环境条件需求和科目执行逻辑顺序需求等优化规则采用计算机辅助的方式进行重组, 形成具有飞机架次和时间属性的任务包 (即初步试飞计划), 如图 2 所示;

(3) 任务单优化: 任务优化是在第 (2) 项所获得的任务包的基础上, 通过建立基于飞行油耗、重心移动、预期的任务执行效率等因素的数学模型和优化算法, 将任务包内的试飞状态点安排到不同试飞任务单中, 并确定试飞任务点的执行顺序, 形成试飞任务单组合;

(4) 全局优化: 通过将第 (3) 项所获得的试飞任务单与第 (2) 项形成的初步试飞计划进行迭代, 形成上下匹配的试飞执行计划以及基于试飞计划的试飞任务单组合。

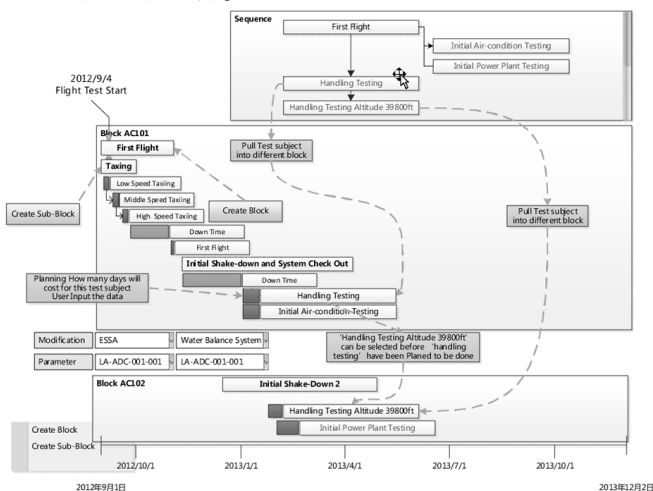


图 2 初步试飞计划设计示意图

3 基于混合遗传算法的任务单优化

试飞任务单优化是缩短飞行试验任务周期和降低试验成本最为直接的手段,其自动批量生成试飞任务单功能是任务优化的核心技术,优化结果将作为任务全局优化的依据。

3.1 数学建模

制定任务包是基于试验性质、构型配置、测试/改装需求、环境条件需求和执行逻辑顺序等因素进行的,因此,在进行试飞任务单优化时,可仅考虑机组行为和飞机在飞行过程中的客观变化,即试验形态中的重量/重心、飞行阶段、机组工作负荷和任务执行效率等几方面因素的影响。

3.1.1 飞机重量/重心变化模型

飞机在飞行过程中会由于油量的减少而发生飞机重量/重心的变化,因此,为保证优化结果的有效性(即飞机预计形态应与试飞状态点所要求的形态相互匹配),需基于精确的飞行油耗建立重量/重心变化模型。

3.1.1.1 飞行油耗

为真实地反映飞行过程中的油耗变化,文章使用 FMS Performance Database(飞机 FMS 数据)和工程模拟器数据(执行试飞任务所需油耗)建立飞行油耗模型,以获得真实的飞行燃油消耗率。

对于正常飞行内容,如起飞、爬升、进入空域、建立姿态、返场、下降、进近和着陆等油耗和时间数据,采用线性插值的方式获取(数据源:Performance Database),如表 1、表 2 所示;对于试飞任务的油耗和时间数据,采用机组使用模拟器的模拟试验的结果计算,如表 3 所示,主要计算公式如下:

$$F_i = f(\text{PHASE}, \text{ISA}, \text{SPD}, \text{ALT}, \text{GWT}) \quad (1)$$

$$T_i = f(\text{PHASE}, \text{ISA}, \text{SPD}, \text{ALT}, \text{GWT}) \quad (2)$$

$$F_{\text{ACTUAL}} = F_{\text{TO}} + \sum F_{\text{CLIMBi}} + \sum F_{\text{CRVSEi}} + \sum F_{\text{DESI}} + \sum F_{\text{TI}} \quad (3)$$

$$T_{\text{ACTUAL}} = T_{\text{TO}} + \sum T_{\text{CLIMBi}} + \sum T_{\text{CRVSEi}} + \sum T_{\text{DESI}} + \sum T_{\text{TI}} \quad (4)$$

3.1.1.2 飞机重量/重心

(1) 飞机重量

飞机重量作为试飞的关键参数,受到燃油箱剩余油量的影响,在进行任务优化时,可根据飞行油耗模型中所获得的 F_{ACTUAL} ,获得飞机执行任务时的实际重量状态。

$$\text{GWT} = W_{\text{TO}} - F_{\text{ACTUAL}} = W_{\text{TO}} - F_{\text{TO}} - \sum F_{\text{CLIMBi}} - \sum F_{\text{CRVSEi}} - \sum F_{\text{DESI}} - \sum F_{\text{TI}} \quad (5)$$

表 1 某型飞机 Performance 数据格式
(FUEL FLOW)

因素	阶段	起飞	爬升	巡航	下降	……
	温度/°C	-20	-10	-5	5	……
	速度/Mach	0.48	0.52	0.56	0.60	……
重量/kg		61 728.4	66 137.6	70 546.8	79 365.2	
高度/ft	1 000	32.77	35.72	38.15	44.22	……
	1 500	48.92	53.31	57.12	66.33	……
	2 000	65.07	70.69	75.81	88.02	……
	2 500	81.22	87.98	94.52	109.58	……
	3 000	97.07	105.02	113.14	130.95	……
	3 500	112.96	122.03	131.60	151.90	……
	4 000	128.74	139.03	150.00	172.91	……
	4 500	144.33	156.05	168.31	193.88	……
	5 000	159.90	173.05	186.43	214.86	……
	……	……	……	……	……	……

表 2 某型飞机 PERFORMANCE 数据格式(TIME)

因素	阶段	起飞	爬升	巡航	下降	……
	温度/°C	-20	-10	-5	5	……
	速度/Mach	0.48	0.52	0.56	0.60	……
重量/kg		61 728.4	66 137.6	70 546.8	79 365.2	
高度/ft	1 000	0.15	0.16	0.18	0.20	……
	1 500	0.23	0.25	0.27	0.31	……
	2 000	0.31	0.34	0.36	0.41	……
	2 500	0.38	0.41	0.45	0.52	……
	3 000	0.46	0.50	0.54	0.62	……
	3 500	0.54	0.59	0.63	0.72	……
	4 000	0.62	0.67	0.72	0.83	……
	4 500	0.70	0.76	0.82	0.93	……
	……	……	……	……	……	……

表 3 某型飞机工程模拟器数据示意

状态点编号	试验时间/min	试验油耗/lb	工作负荷	备注
TPS-001-005	1.5	213.4	3	
TPS-012-006	20	673.6	3	
TPS-031-015	3	440.6	6	
TPS-033-017	2.5	361.7	4	

其中 W_{TO} 受飞机配重方案影响。

(2) 飞机重心

飞机重心同样也是试飞的关键参数,受到燃油箱剩余油量、起落架位置以及机组成员重量和位置(使用缺省值或在进行试飞任务单优化前由人工进行定义)的影响,根据飞行油耗模型中所获得的 F_{ACTUAL} 和重心计算公式,获得飞机执行任务时的实际重心状态。

$$MOMENT_{EMPTY} = \begin{cases} Y_{CG} \times W_{EMPTY}, & \text{GEAR UP} \\ Y_{CG} \times W_{EMPTY} - \Delta MOMENT_x, & \text{GEAR DOWN} \end{cases} \quad (6)$$

$$MOMENT_{FUEL} = Y_{FUEL} \times F_{LOAD} \quad (7)$$

$$MOMENT_{CREW} = Y_{CREW} \times W_{CREW} \quad (8)$$

$$Y_{ACTUALCG} = \frac{MOMENT_{EMPTY} + MOMENT_{FUEL} + MOMENT_{CREW}}{W_{EMPTY} + W_{CREW} + F_{LOAD} - F_{ACTUAL}} \quad (9)$$

$$CG_{ACTUAL} = 100 \times \frac{Y_{ACTUALCG} - Y_A}{C_A} \quad (10)$$

其中 C_A 和 Y_A 均为飞机常数, Y_{FUEL} 、 Y_{CG} 和 Y_{CREW} 为飞机称重的实测数据,可获得飞机在特定配重方案下的重心变化曲线,如图3所示。

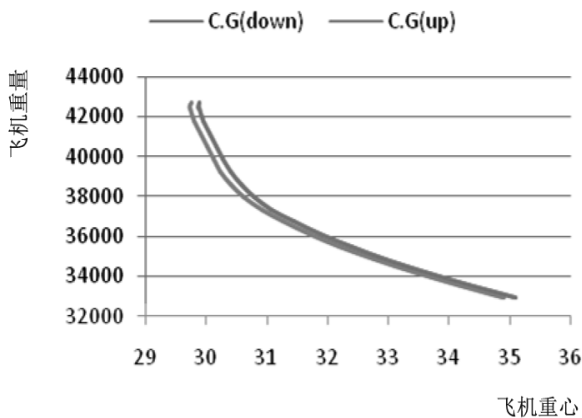


图3 某型飞机在某一配重方案下重心-重量变化曲线(示意)

3.1.2 工作负荷

工作负荷反映了试飞机组在执行试飞任务时的工作强度,过高或过低的工作负荷均会对试飞机组执行试飞任务带来不利影响,如表4所示。

表4 工作负荷量对试飞组执行任务的影响

过低的工作负荷	注意力下降,出现无聊情绪
适宜的工作负荷	负荷适中且稳定
过量的工作负荷	持续高度紧张,大量复杂操作
无法承受的工作负荷	无法承受

为保证试飞机组的较好表现,需对工作负荷进行量化处理,以保证机组人员在执行试飞任务单中所要求任务内容时的工作负荷曲线处于适宜的工作负荷范围内,对于不可避免的过量的工作负荷,应提前告知机组进行准备。如图4所示。

工作负荷量化的评定需统筹考虑机组能力、任务风险等级以及试飞程序复杂程度等多种复杂因素,目前相关工作负荷的量化数据主要使用模拟器训练数据、经验数据和机组评估方式获得。

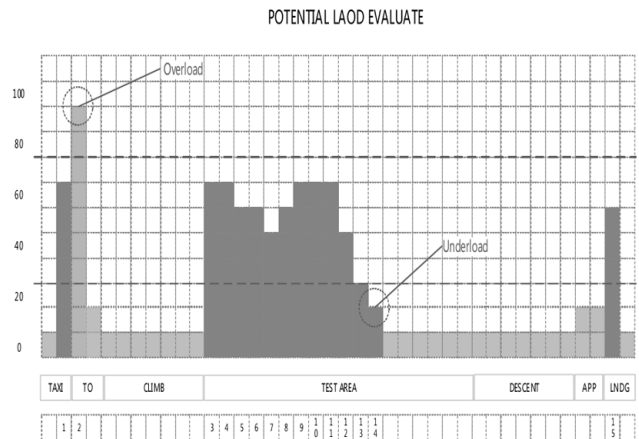


图4 某架次工作负荷量化估算

3.1.3 执行效率

任务执行效率受到机组驾驶水平、试飞操作精度要求、气象条件等多方面因素影响,目前执行效率主要采用统计以往机型试飞经验数据的方式获得。

3.2 优化算法

对于解决任务包内试飞任务点分配到不同试飞架次中并制定架次内试飞状态点的执行顺序的优化问题,可将试飞任务单和试飞状态点理解为容器和待装货物,其尺寸可分别根据起飞、飞行和进近着陆阶段分别定义为飞机重量 X 重心 X 工作负荷的函数。在保证配重方案更改最少的前提条件下,容器使用最少,即飞行架次最小,属于典型的多种物品多容器三维装箱(3/V/L/R 类型)问题。

通过采用启发式算法(A*算法)和遗传算法相结合的混合遗传算法,对每个新产生的后代在其进入下一代群体之前应用启发算法求局部最优解,然后采用遗传进行全机最优点的探索,混合遗传算法总体框架如图5所示。

为保证试飞任务单的可执行性和安全性,经优化的试飞任务单需由机组和技术人员共同进行内容检查和确认,具体如图6所示。

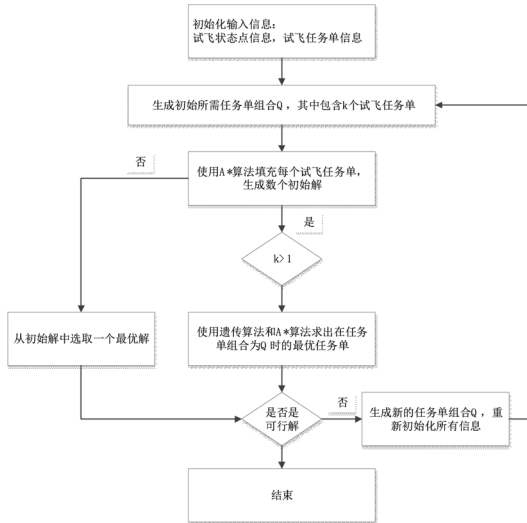


图5 混合遗传算法总体框架示意图

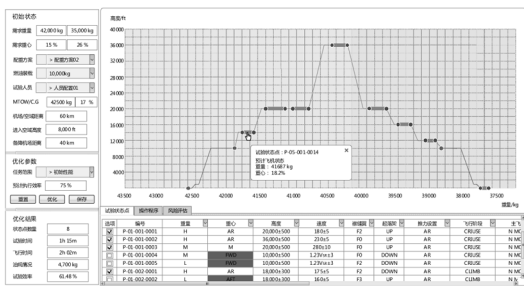


图6 试飞任务单检查界面示意图

4 结论

通过采用分步实施和计算机辅助决策的方法进行试飞任务优化,模拟器仿真和多架次飞行的实际试用结果表明:基于此方法开发的试飞任务优化计算机辅助决策系统可有效提高试飞效率;所获得优化结果置信度较高,与预期设计目标相符。通过开展上述工作,得出的结论如下:

(1) 梳理试飞过程中存在的各种影响因素和耦合关系,梳理试飞业务流数学模型,以实现进行分布优化的目的,也为后续进行试飞任务的精细、动态管理奠定了基础;

(2) 实现对试验对象和试飞任务需求的参数化处理,形成标准化试验信息数据库,为使用计算机手段进行任务优化工作提供了可能;

(3) 进行优化算法应用于试飞领域的探索,完成基于飞机重量、重心、工作负荷等变量的试飞任务优化程序的开发,有效地提高了试飞效率。

目前试飞任务优化计算机辅助决策系统主要基于工程数据,考虑一定的人为因素对试飞任务的

影响和采用人工方式设置影响因子的方式对试飞任务进行优化,后续可引入试飞经验模型和驾驶员在环的虚拟试飞技术,进一步提高优化结果置信度,给机组提供更为直观的优化结果。

参考文献:

- [1] Stoliker F N. Introduction to Flight Test Engineering[R]. AGARD-AG-300 Vol. 14. 1995.
- [2] Dean Carico. Tiltrotor analytic flight test and training support[J]. Aerospace Conference Proceedings. 2002; 5-2501-5-2510.
- [3] 沙长安,刘选民,梁相文,等. 当今世界试飞技术现状及未来发展[C]. 中国航空学会飞行力学与飞行试验专业委员会第十九届学术交流会论文集,2003;232-241.
- [4] 周自全. 飞行试验工程[M]. 北京:航空工业出版社,2010.
- [5] 曲桂金. 从飞机总体角度规划试飞工作[J]. 飞机设计, 2005, (1): 67-70.
- [6] 黄明石,刘永志,等. 飞行试验管理系统的设计与软件实现[J]. 飞行力学,2000,18(4): 14-16.
- [7] Marle D. Hewett, David M. Tartt etc. The development of an automated flight test management system for flight test planning and monitoring[J]. ACM, 1988, 324-333.
- [8] Victor W, Bender, Gerald Cahill etc. Automating the flight test planning process[C]. Digital Avionics Systems Conference, 1994, 14th DASC; 83-88.
- [9] Thomas lampe and Lars Bergwall etc. TEST-PLA N to KUN G: An automated flight test planning environment applied to the JAS-39 gripen flight test program[Z]. Swedn: Saab-Scania AB, 1992, 4: 11-21.
- [10] 郎海英. F22 战斗机的飞行试验[J]. 飞行试验, 1997, 11(3): 12-18.
- [11] George Marsh. Boeing's 787: trials, tribulations, and restoring the dream[J]. Reinforced plastics. 2009, 0034-3617; 16-21.
- [12] 辛晓文,杨龙,王小峰,等. 飞行试验计划管理系统初探[J]. 飞行试验,2000,16(2): 45-48.
- [13] Dorigo M, Caro GD, Gambardella LM. Ant algorithms for discrete optimization[J]. Artificial Life, 1999, 5(2): 137-172.
- [14] Merkle D, Middendorf M. Modeling the dynamics of ant colony optimization[J]. Evolutionary Computation, 2002, 10(3): 235-262.
- [15] 沈宏良,余勇军,刘旭,等. 试飞科目的最优排序问题研究[J]. 南京航空航天大学学报,2000,32(3): 312-317.