

基于资源约束多项目调度问题的航空发动机 高空台并行试验调度模型研究

王业辉

(中国航空发动机集团有限公司, 北京 100097)

摘要: 高空模拟试车台(以下简称高空台)是研制先进航空发动机必不可少的关键试验设施。近年来,高空台试验需求连续激增,试验能力缺口问题日益突出,改善试验调度效率成为解决该问题的重要突破方向。为提升高空台试验调度效率,应用运筹学方法,引入项目调度理论和资源约束多项目调度问题(RCMPSP)理论,构建了高空台多试验舱并行试验调度模型。通过对比仿真数据的计算结果,验证了该调度模型的可行性和优越性,表明基于RCMPSP的并行试验调度方法在高空台计划调度中具有良好的工程应用前景。

关键词: 航空发动机;高空模拟试车台;资源约束;试验调度;多项目调度;运筹学

中图分类号: V233.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620(2026)01-0010-11

DOI: 10.3724/j.GTER.20250082

A parallel test scheduling model for aero-engine altitude simulation test facilities based on RCMPSP

WANG Yehui

(Aero Engine Corporation of China, Beijing 100097, China)

Abstract: The altitude simulation test facility is an essential testing infrastructure for developing advanced aero-engines. In recent years, the demand for altitude testing has surged continuously, leading to an increasingly prominent gap in testing capacity. Improving the efficiency of test scheduling has thus become a critical breakthrough direction. Operational research methods were innovatively applied by incorporating project management theory and resource-constrained multi-project scheduling problem (RCMPSP) theory to construct a multi-cell parallel test scheduling model for altitude simulation test facilities. Through comparative calculations based on simulation data, the feasibility and superiority of the proposed scheduling model have been verified, demonstrating that the RCMPSP-based parallel test scheduling method holds significant potential for engineering application in the planning and scheduling of altitude simulation test facilities.

Key words: aero-engine; altitude simulation test facility; resource constraints; test scheduling; multi-project scheduling; operations research

0 引言

航空发动机作为一种高度精密的热力机械,涉及学科众多、工作过程复杂,其设计过程存在众多不确定性因素与理想假定条件,高度依赖开展大量试

验对设计方案和功能性能进行验证^[1]。对于一型新研航空发动机,通常需要开展长达10 000 h的整机试验。其中,高空模拟试验是航空发动机考核验证的主要手段之一^[2]。

收稿日期:2025-06-02

基金项目:国家财政稳定支持项目(GJCZ-0303-02)

作者简介:王业辉(1987-),男,山东烟台人,高级工程师,硕士,主要研究方向为航空发动机工程管理。

引用格式:王业辉. 基于资源约束多项目调度问题的航空发动机高空台并行试验调度模型研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2026,39(1):10-20. WANG Yehui. A parallel test scheduling model for aero-engine altitude simulation test facilities based on RCMPSP[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2026, 39(1): 10-20.

近年来,我国航空发动机产业进入高速发展期,高空模拟试验需求持续快速攀升。然而,由于部分配套保障资源相对不足,高空模拟试车台(以下简称高空台)试验能力提升面临较大压力。以气源机组为例,机组扩容进度滞后于试验需求,无法支撑多个试验舱同时满负荷运行。其中,在多项项目管理中,共用资源的有效分配成为关键问题^[3-4]。基于经验的传统调度模式效率较低,严重限制了试验设备的综合利用率。因此,基于现有硬件设备条件改进高空台试验调度方法,构建面向多试验舱并行模式的调度模型,能有效缓解试验能力缺口,对满足持续增长的航空发动机试验验证需求具有重要意义。

尽管目前尚无针对航空发动机高空台试验调度问题的专门研究,但项目调度理论可以为这一问题提供有力的理论支持。项目调度理论起源于20世纪50年代,主要研究内容为在满足项目逻辑关系的前提下,通过有效的多项目调度安排,缩短项目完成时间、提高资源配置效率,是一种组合优化问题解决方法^[5]。随着众多学者持续地深入研究,项目调度理论得到不断丰富和完善,先后经历了不考虑资源约束的项目调度问题、资源约束单项目调度问题、资源约束多项目调度问题(Resource-constrained multi-project scheduling problem, RCMPSP)3个发展阶段^[6-7]。目前,国内外学者对RCMPSP在不同场景中的应用进行了广泛研究。FENDLEY^[8]针对静态环境下的RCMPSP,深入探讨了基于最小化自由时差的优先规则,为求解多项目调度难题提供了有效路径。DECKRO等^[9]创新性地提出了一种将多个项目整合为单一超级项目的优化策略,将复杂的多项目调度问题近似为单项目调度问题进行求解。

BOWERS等^[10]研究了RCMPSP在服装加工行业中的应用,发现应用多项目调度优化策略可将该行业的劳动生产率提升5.1%,验证了多项目调度理论在实际生产中的有效性和应用价值。巴杰和伍书剑^[11]针对航天多型号并行研制调度问题,设计了一种在资源受限环境下实施的多项目资源优化调度策略,并引入遗传算法进行求解,有效缓解了多项目资源分配难题,提高了项目调度管理效率。综上,RCMPSP已成为解决作业车间调度问题^[12]的重要方法,可为提升高空台试验调度效率提供思路。

本文针对高空台试验调度效率提升问题,运用运筹学方法,引入项目调度理论和RCMPSP理论,构建了一种面向多试验舱并行模式的试验调度定量模型,实现了基于有限资源约束条件下的快速调度排产,进一步挖掘和释放了高空台的试验潜力。研究成果也可作为航空风洞等类似大型工业设备集群的试验调度问题提供借鉴参考。

1 高空台基本信息

1.1 高空台基本原理和系统组成

高空台由空气系统、测试系统、动力系统、试验舱等组成,如图1所示^[13]。空气从供气机组流入,经加温或降温处理后,通过流量管进入发动机进口,发动机工作产生的高温燃气通过排气扩压器进入抽气机组,增压后排入大气环境。

高空台供/抽气管网系统组成如图2所示。图中, $F_1 \sim F_N$ 代表不同的试验舱, N 为试验舱总数。试验舱之间为并联关系,共用供气机组、抽气机组等设备,通过管路对空气进行控制和分配,可实现单试验舱独立试验或多试验舱并行试验。由于加温降温装

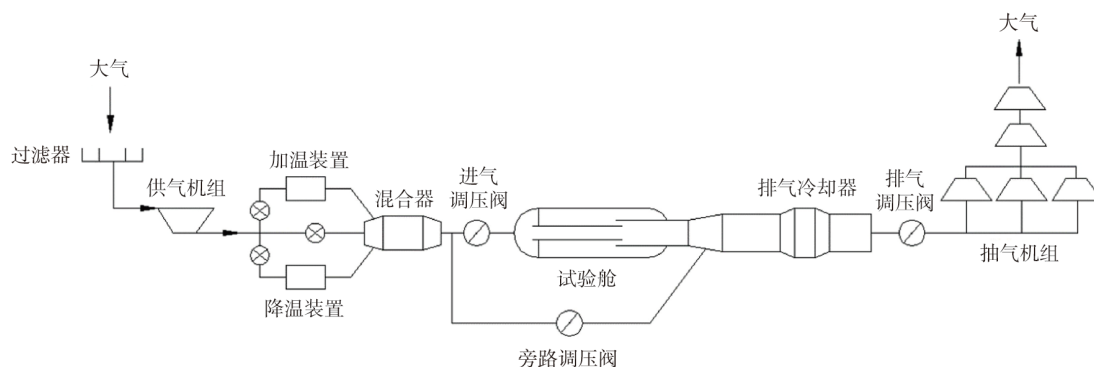


图1 高空台示意图

Fig.1 Schematic diagram of the altitude simulation test facility

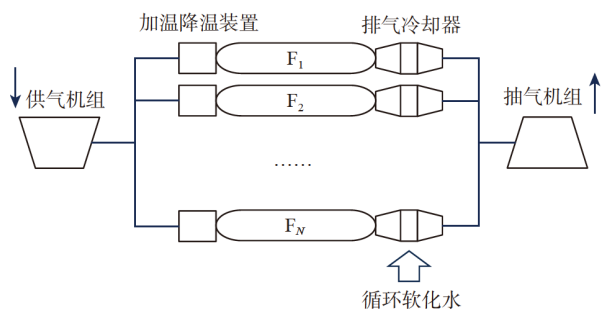


图2 高空台供/抽气管网系统组成

Fig.2 Altitude simulation test facility gas supply and exhaust pipeline networks system

置并非瓶颈资源,为简化模型,将其视为各试验舱自有资源。

1.2 试验任务分析

为实现特定的试验目的,高空模拟试验一般包括性能试验、功能试验等多个内容,需要在发动机工作包线内选择若干个规定状态点进行测试,分为多次试车。单次试车通常对应某一典型飞行任务剖面,包含1个或多个状态点,称为1个试验活动。根据试验要求,可将单次高空模拟试验划分为若干个试验活动,分别测试发动机在不同飞行任务、状态下的性能表现。

受航空发动机最大连续工作能力的限制,单个试验活动通常持续1~3 h,试验过程不可中断。2个试验活动之间为间隔段,用于发动机状态检查、试验数据分析、台架设备检修及下个试验活动开始前的准备等。以某型发动机为例,某日试验任务由5个试验活动组成,试验活动的时间安排如图3所示。

为完成规定的试验内容,各试验活动之间需遵循一定的先后关系,紧前活动完成是紧后活动开始的前提条件,即存在时序约束。以某试验舱某日试验任务为例,共计6个试验活动。其中,活动①为活动②的紧前项;活动②为活动③~⑤的紧前项;活动③~⑤为活动⑥的紧前项。上述试验活动的单代号网络计划如图4所示。

2 高空台现行调度模式分析

2.1 高空台计划调度管理体系

高空台作为航空发动机行业的共用关键设施,需要合理安排不同研制团队提出的试验需求,同时兼顾试验效率和试验安全性,其计划调度管理较为复杂。经过多年的实践摸索,高空台计划调度逐步

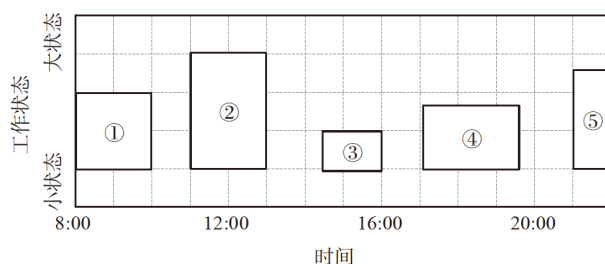


图3 试验活动的时间安排示例

Fig.3 Example of test activity time schedule

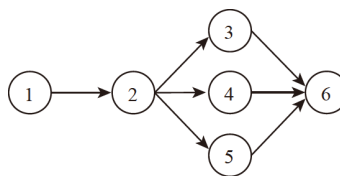


图4 试验舱试验活动单代号网络计划

Fig.4 Activity-on-node network for test activities in a test cell

形成了“年规划-周计划-日调度”的由粗到细、逐级分解的分层计划调度管理体系,如图5所示。年规划由集团总部试验计划主管部门下达,该部门每年年初统一收集汇总的各型号试验需求,根据经验排产模型制定各项试验的大致规划。年规划为粗能力计划,与试验配套资源不产生关联。周计划由试验基地总指挥下达,通过综合考虑试验进度、设备状态、试验相关性、试验能力等因素,协调确定各项试验的具体实施计划,以此推动试验基地各部门计划协同。周计划与试验配套资源之间为弱关联关系。日调度计划由试验总调度员下达,通过综合分析试验资源能力和资源需求等因素,协调确定各个试验活动的准确时间安排,以实现试车台与各保障设备之间的同步操作。日调度计划与试验配套资源之间为强关联关系。本文的研究对象为日调度计划。

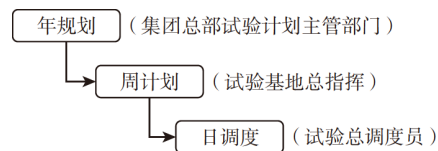


图5 高空台分层计划调度管理体系

Fig.5 Hierarchical planning and scheduling management system for the altitude simulation test facility

2.2 高空台现行调度模式的主要特点

高空台现行调度模式主要有以下3方面特点:

(1) 基于“人工经验、集中磋商”的调度指挥模

式。依赖传统人工作业模式进行排产,由试验总调度员及各二级调度员通过集中磋商方式确定调度方案。

(2) 基于“分包组合、留足备用”的资源分配规则。由于高空台调度排产涉及供气、抽气、软化水等多种共用瓶颈资源,资源约束关系复杂,依靠人工难以进行快速精确计算。为避免资源干涉,一般采取分包组合方式,即根据各试验舱最大资源需求量对共用资源进行分配,形成相对固定的2个或3个试验舱组合关系,确保各试验舱资源供应充足。

(3) 基于“分段排产、串行运行”的任务排产规则。为减少试验资源在各试验舱之间转移的次数,将各试验舱以4~8 h为单位划分排产时段,进行分段排产。同一排产时段内,各试验舱完全占据所分配的试验资源,按照串行模式开展试验。各试验舱分别独立调度,不需要进行横向交互协调。

2.3 高空台现行调度模式的主要问题

高空台现行调度模式主要存在以下3方面问题:

(1) 过于依赖个人经验。现行调度模式建立在人工作业的基础上,调度方案的优劣很大程度上取决于试验总调度员的个人能力与经验,存在调度知识经验化、隐性的问题,不利于试验基地的科学、

规范、高效运转。

(2) 调度决策效率低。由于高空台系统庞大、资源约束关系复杂,人工调度的计算难度较大,往往需要反复协调修改调度方案,单次调度决策的耗时通常较长。在计划执行发生异常问题的情况下,重调度的响应速度较慢。

(3) 资源利用率较低。在“串行运行、留足备用”的调度模式下,试验资源按照各试验舱的最大需求量进行分配,且试验间隔段的资源不会释放转移给其他试验舱,导致气源等共用资源富余量较大,机组设备空耗较多,造成试验资源大量浪费。

以供气资源为例,现行调度方案及资源负荷如图6所示。按照上午、下午2个时段进行分段排产(试验活动代码以2位数字组合表示,分别代表试验舱编号和该舱试验活动序号)。从图6(b)可以看出,该模式下资源负荷波动较大,存在多个资源利用率较低的时间截面。

3 高空台并行试验调度模型

3.1 问题描述

优化目标主要为缩短试验工期,具体描述如下:定义 (i, j) 为第 i 个试验舱中的第 j 个试验活动,其

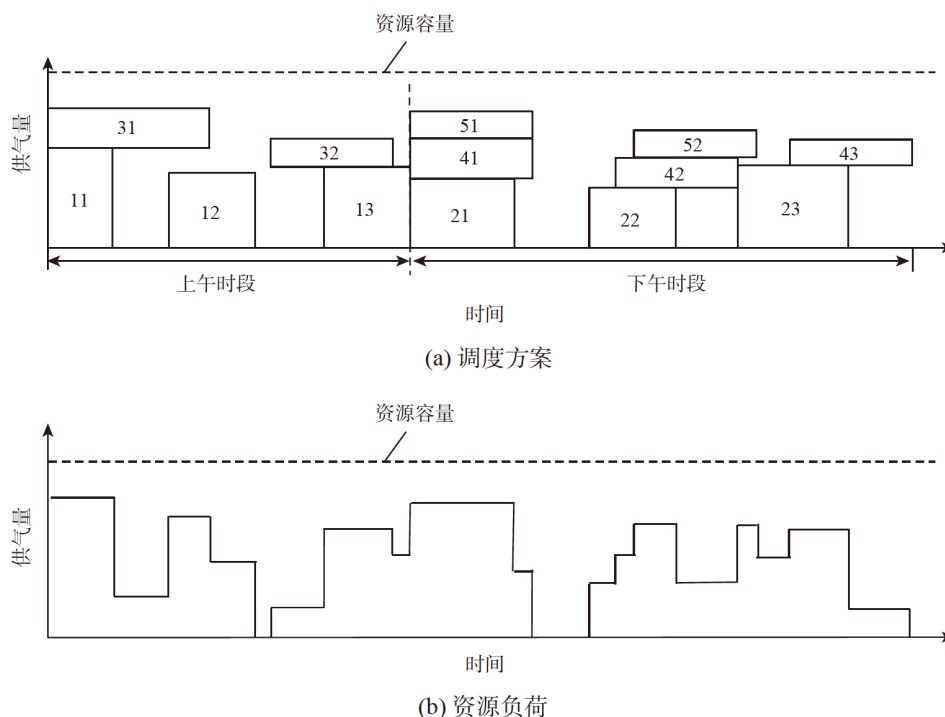


图6 串行调度排产方案及资源负荷

Fig.6 Serial scheduling production plan and resource load

中第 i 个试验舱包含 J_i 个试验活动,试验活动均为单执行模式、不可抢占;在试验舱 i 中,各个试验活动之间存在时序约束关系,试验活动 (i,j) 与其紧前活动之间存在Finish-Start型搭接关系,时滞 $t_{\text{lag}} \geq 1 \text{ h}$; N 个试验舱共用 K 种可更新瓶颈资源,每种资源均可同时分配给不同试验舱;在任意时间 t ,各试验舱所有进行中的试验活动集合 $A_t = \{(i,j) | (i,j) \in V_i \wedge s_{ij} \leq t < s_{ij} + p_{ij}\}$, V_i 为各试验舱试验活动的合集, s_{ij} 、 p_{ij} 分别为 (i,j) 的启动时间和工期, A_t 对资源 k 的需求总量 r_k 不得超出资源 k 的容量 R_k 。为更清晰地表达该问题,构造1个多试验舱并行试验的有向网络(AON)模型,在当日各试验舱试验活动开始前和结束后额外增加1个虚拟的总起始任务S和1个虚拟的总结束任务F。S和F为虚拟活动,只用来表达优先关系,不占用工期和资源。通过这2个虚拟任务将各试验舱全部试验活动合并为1个新的项目,如图7所示(图中数字为试验活动编号)。

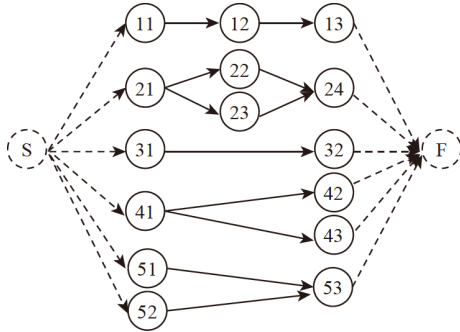


图7 多试验舱并行试验网络计划
Fig.7 Multi-cell parallel test network plan

为将航空发动机高空台并行试验调度问题转化为抽象的数学模型,作如下假设:①试验活动工期、时序、资源等已知且固定,不考虑突发因素导致的变动;②除共享同一组资源外,不同试验舱之间不存在时序约束等其他关联关系;③除供气、抽气、软化水3种瓶颈资源外,其他共用资源的供应量充足;④忽略资源在不同试验舱之间转移的时间;⑤试验活动不允许中断,一旦开始必须执行完毕,且中途不允许插入其他活动。

3.2 问题建模

模型涉及的参数包括试验舱序号 $i(i=1,2,\dots,N)$,试验舱 i 中试验活动序号 $j(j=1,2,\dots,J_i)$,时段序号

$t(t=0,1,\dots,T)$,资源序号 $k(k=1,2,\dots,K)$,试验活动 (i,j) 的工期 p_{ij} ,试验活动 (i,j) 的紧前试验活动集合 P_{ij} ,试验活动 (i,j) 的启动时间 s_{ij} ,试验活动 (i,j) 的完成时间 c_{ij} ,时刻 t 的全部执行中的试验活动 A_t ,可更新资源 k 的供应量 R_k ,试验活动 (i,j) 对资源 k 的需求量 r_{ijk} ,试验活动 (i,j) 与紧前活动完成时间之间的最小时滞 $t_{\text{lag,min}}(t_{\text{lag,min}}=1 \text{ h})$ 。

同一试验舱内的试验活动之间需满足时序约束条件,同时与其紧前活动之间应满足最小时滞约束,跨试验舱的试验活动之间不存在紧前关系约束。各试验舱内部试验活动之间的时序关系如式(1)所示,全部紧前试验活动结束且经过最小时滞后,其紧后活动方可开始。

$$\max_{(i,h) \in P_{ij}} c_{ih} + t_{\text{lag,min}} \leq s_{ij}, \forall i,j \quad (1)$$

所有试验活动在试验过程中均需共用同一个瓶颈资源库。供气、抽气、软化水3种资源的容量无法满足各试验舱满负荷并行试验的需求,是制约并行试验的共用瓶颈资源。

在任意时间 t ,各试验舱执行中的试验活动对资源 k 的总需求不能超过其容量,如式(2)所示。决策变量 x_{ijt} 代表试验活动 (i,j) 的执行状态,其定义如式(3)所示。

$$R_k \geq \sum_{(i,j) \in A_t} r_{ijk}, \forall k,t \quad (2)$$

$$x_{ijt} = \begin{cases} 1, & \text{试验活动}(i,j) \text{在时间段} t \text{完成} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

上述问题的数学模型可表示为

$$\min \max_i \sum_{t=0}^T t \cdot x_{ijt} \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \sum_{t=0}^T x_{ijt} = 1, \forall i,j \quad (5)$$

$$\sum_{t=0}^T (t - p_{ij}) x_{ijt} - \sum_{t=0}^T t \cdot x_{iht} \geq t_{\text{lag,min}}, \quad \forall (i,h) \in P_{ij}, \forall i,j \quad (6)$$

$$R_k \geq \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{J_i} r_{ijk} \sum_{\tau=t}^{t+p_{ij}-1} x_{ij\tau}, \forall k,t \quad (7)$$

$$x_{ijt} \in \{0,1\}, \forall i,j,t \quad (8)$$

式(4)表示优化目标为追求多试验舱试验完工时间的最小化;式(5)表示各试验活动均不可抢占,且不可重复执行;式(6)表示各试验舱内部试验活动之间的时序约束及最小时滞约束;式(7)表示共用瓶颈资源约束;式(8)定义了决策变量。

4 实例求解和结果分析

利用实例验证的方法,对采用人工串行调度模式和并行混排调度模式所获得的结果进行对比,测算方案在缩短工期、提升资源利用效率等方面的优化效果。

4.1 实例描述

为满足保密要求,构造一组仿真数据作为算例。按照当日下达的试验任务计划,共需完成13个试验活动,涉及5个试验舱($F_1 \sim F_5$)。根据各项试验任务的规定程序,可以确定各试验舱试验活动之间的执行先后顺序,由此可知当日全部试验活动的AON图,如图8所示。00、60分别代表全部试验的开始和结束,本身不占用工期和资源。试验舱的总供气量为790 kg/s,总抽气量为110 000 m³/min,总软化水流量为43 000 m³/h。每个试验活动对各类试验资源的需求量如表1所示。

4.2 算例求解及结果分析

4.2.1 人工串行调度

按照“分包组合、留足备用”的资源分配原则,基于各试验舱试验最大资源需求量与现有资源总供应量,形成相对固定的多试验舱组合。按照各试验舱试验最大资源需求量将试验资源进行分切,试验资

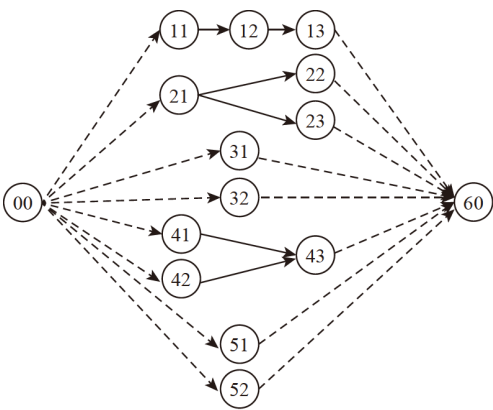


图8 试验活动网络计划
Fig.8 Network plan for test activities

源分配量如表2所示。综合考虑试验资源约束和试验所需工期,可粗略地将上午时段分包给1号试验组合($F_1+F_2+F_5$),下午时段分包给2号试验组合(F_3+F_4)。

在串行调度模式下,由于采用“留足备用”的方式分配试验资源,各试验舱均可视为不考虑资源约束的项目调度问题,可采用关键路径法进行排产计算。由于各试验活动存在自由时差,在总工期固定的前提下,可形成多种调度方案。选取其中一种调度方案作为示例,形成的计划网络如图9所示。其中,试验活动01为虚拟试验活动,作为1号试验组合与2号试验组合的连接节点,本身不占用工期和资源。根据各试验活动的工期,同时考虑最小时滞,计算可知此调度方案的关键路径为00-21-22-23-01-41-42-43-60,最优调度方案对应的总工期为11.40 h。

表1 试验活动信息
Table 1 Information for test activities

试验舱	试验活动编号	工期/h	紧后活动	供气量/(kg/s)	抽气量/(m ³ /min)	软化水流量/(m ³ /h)
F ₁	11	0.80	12	350	25 870	12 750
	12	1.00	13	300	22 500	17 550
	13	1.00	60	310	26 720	12 160
F ₂	21	1.20	22,23	280	44 700	18 000
	22	0.90	60	260	31 500	15 210
	23	1.50	60	320	39 200	16 880
F ₃	31	2.10	60	160	48 400	10 400
	32	1.20	60	130	35 750	7 600
F ₄	41	1.30	43	180	44 550	12 870
	42	1.30	43	130	39 320	8 450
	43	1.20	60	115	31 620	6 730
F ₅	51	1.30	60	120	29 700	8 580
	52	1.30	60	120	36 300	7 800

最优调度方案转化后的试验活动调度时间如表3所示。最优调度方案的甘特图如图10所示。

表2 各试验舱试验资源分配方案

Table 2 Test resource allocation plan for each test cell

试验任务	供气量/(kg/s)	抽气量/(m ³ /min)	软化水流量/(m ³ /h)
1号试验组合	F ₁	350	27 000
	F ₂	320	45 000
	F ₅	120	37 000
2号试验组合	F ₃	160	49 000
	F ₄	180	45 000

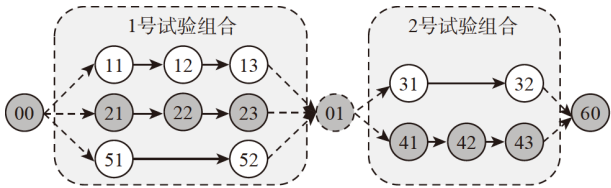


图9 串行调度网络计划

Fig.9 Serial scheduling network plan

表3 串行调度时间表

Table 3 Serial scheduling timetable

试验活动编号	开始时间	结束时间	试验活动编号	开始时间	结束时间
11	8:00	8:48	32	16:42	17:54
12	9:48	10:48	41	13:36	14:54
13	11:48	12:48	42	15:54	17:12
21	8:00	9:12	43	18:12	19:24
22	10:12	11:06	51	8:00	9:18
23	12:06	13:36	52	10:18	11:36
31	13:36	15:42	—	—	—

根据以上调度时间表,结合各试验活动的资源需求量,可分别计算得出相关资源的时序负荷,如图11~图13所示。全工期内的供气、抽气、软化水资源的平均利用率分别为36.88%、47.18%、38.68%。

4.2.2 并行混排调度

研究证实,遗传算法等启发式算法在求解RCMPSP问题方面具有良好的适用性^[14],为此采用遗传算法进行求解。根据文献[15]推荐的经验参数,设置交叉概率为0.9,变异概率为0.1,种群规模为30。为确保种群充分迭代演化,将遗传算法的最大迭代次数设置为500次。调度方案的适应度值表示为目标函数值,即总完工时间。从图14中可以看出,

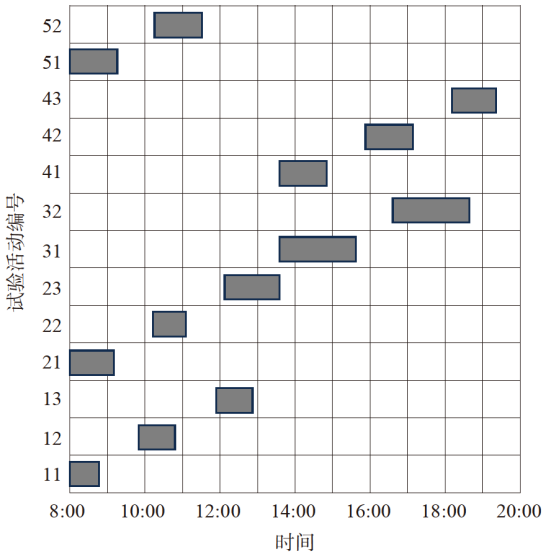


图10 串行调度甘特图

Fig.10 Gantt chart for serial scheduling

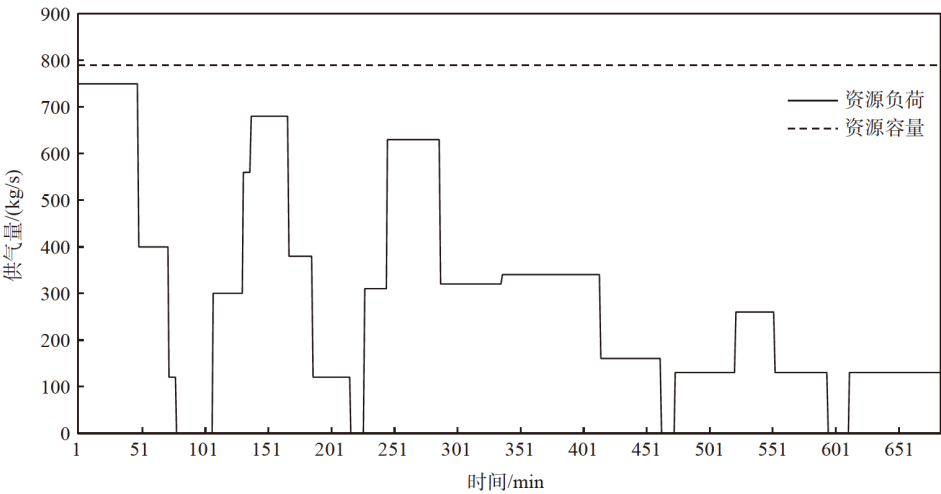


图11 串行调度供气资源时序负荷

Fig.11 Temporal load of gas supply resource for serial scheduling

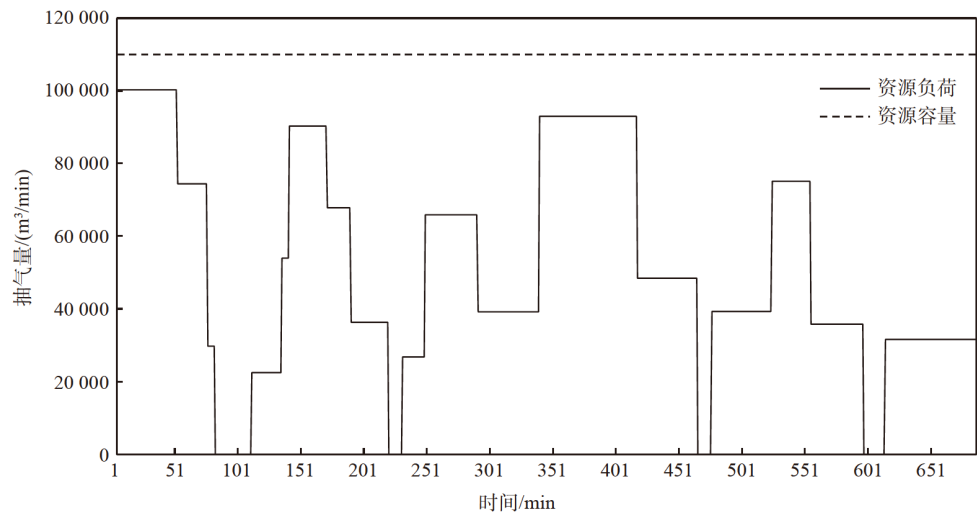


图12 串行调度抽气资源时序负荷
Fig.12 Temporal load of exhaust resource for serial scheduling

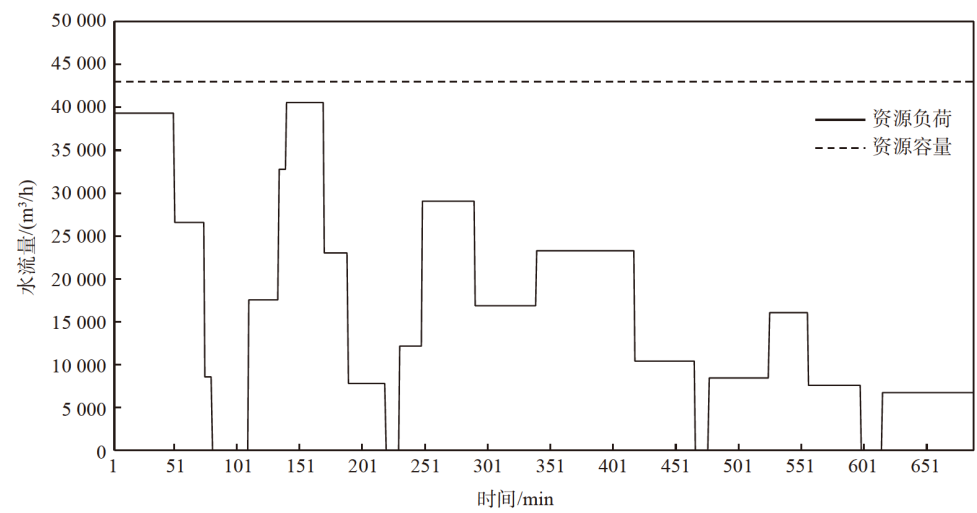


图13 串行调度软化水资源时序负荷
Fig.13 Temporal load of softened water resource for serial scheduling

本模型生成调度方案的总完工时间在第0代已经远小于串行分段调度模式,在算法迭代至150代后基本趋于收敛。

针对本算例,运用遗传算法进行了30次重复计算,得到的调度方案完工时间范围为6.90~7.40 h。选取其中的最佳调度方案(总完工时间为6.90 h)进行转化,转化成的调度时间如表4所示。并行混排调度方案的甘特图如图15所示。

根据以上调度时间表,结合各试验活动的资源需求量,可分别计算得出相关资源的时序负荷,分别如图16~图18所示。全工期内的供气、抽气、软化水资源的平均利用率分别为60.37%、77.47%、63.55%。

表4 并行混排调度时间表
Table 4 Parallel scheduling timetable

试验活动 编号	开始时间	结束时间	试验活动 编号	开始时间	结束时间
11	8:00	8:48	32	12:42	13:54
12	9:48	10:48	41	11:24	12:42
13	12:42	13:42	42	8:00	9:18
21	8:00	9:12	43	13:42	14:54
22	13:48	14:42	51	9:12	10:30
23	10:48	12:18	52	12:18	13:36
31	9:18	11:24	—	—	—

4.2.3 对比分析

由上述分析可以看出,相较于人工串行调度,并

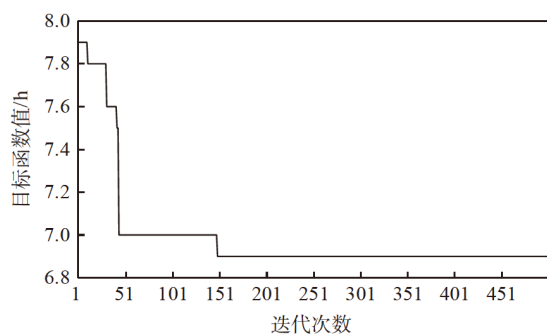


图14 最优个体目标函数值变化曲线

Fig.14 Variation curve of the objective function value for the best individual

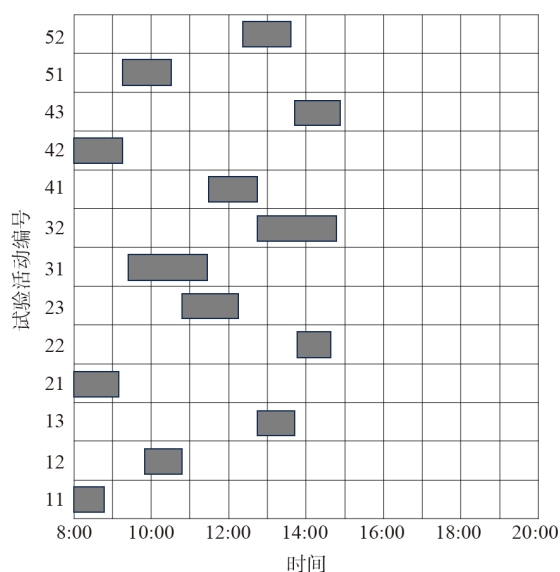


图15 并行混排调度甘特图

Fig.15 Gantt chart for parallel scheduling

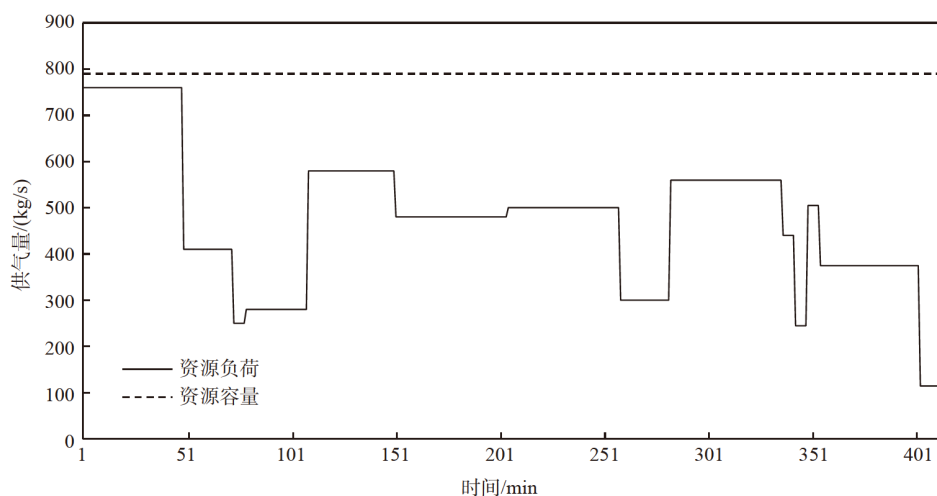


图16 并行混排调度供气资源时序负荷

Fig.16 Temporal load of gas supply resource for parallel scheduling

行混排调度模型优化效果明显;试验工期大幅缩短,由11.40 h降至平均7.16 h,试验排产更加紧凑;资源负荷相对均衡,资源利用率显著提高,供气、抽气、软化水资源的平均利用率分别从36.88%、47.18%、38.68%提升至60.37%、77.47%、63.55%。

5 结束语

为解决航空发动机高空台试验调度决策难、资源利用率低、试验排产工期长等问题,针对并行试验调度问题开展了深入研究。基于高空台运行特点,通过项目调度理论构建了高空台试验计划模型,创新采用RCMPSP模型将高空台调度问题转化为带最小时滞的资源约束多项目调度问题,利用运筹学理论建立了最优化数学模型并求解。算例分析证明,相较于人工串行调度,并行混排调度模型可使总完工时间缩短37.19%,使供气、抽气、软化水资源的平均利用率分别提升23.49百分点、30.29百分点、24.87百分点,证明了该方案的可行性和优越性。研究成果为优化高空台试验调度引入了全新方法,在工程应用中具有良好潜力。

未来的研究方向主要包括3个方面:①考虑紧急任务插单、设备故障、可用资源变动等不确定因素干扰后,原定调度方案不再最优时,研究构建动态调度优化模型及算法,重新优化原定调度方案,实现高效重调度;②考虑试验人员的多技能性,基于人力资源的柔性约束,进一步完善调度模型,将人力资源调度纳入试验调度方案;③基于本文的研究思路和调度

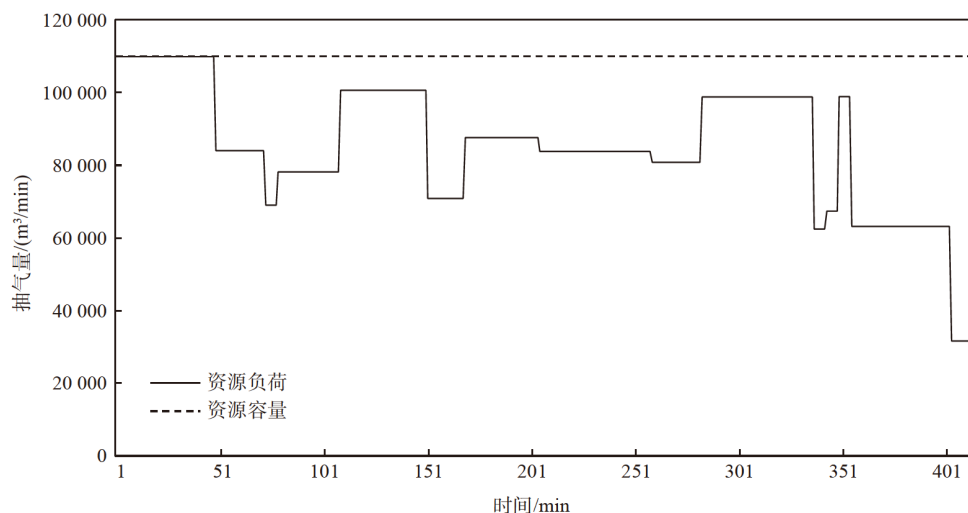


图17 并行混排调度抽气资源时序负荷

Fig.17 Temporal load of exhaust resource for parallel scheduling

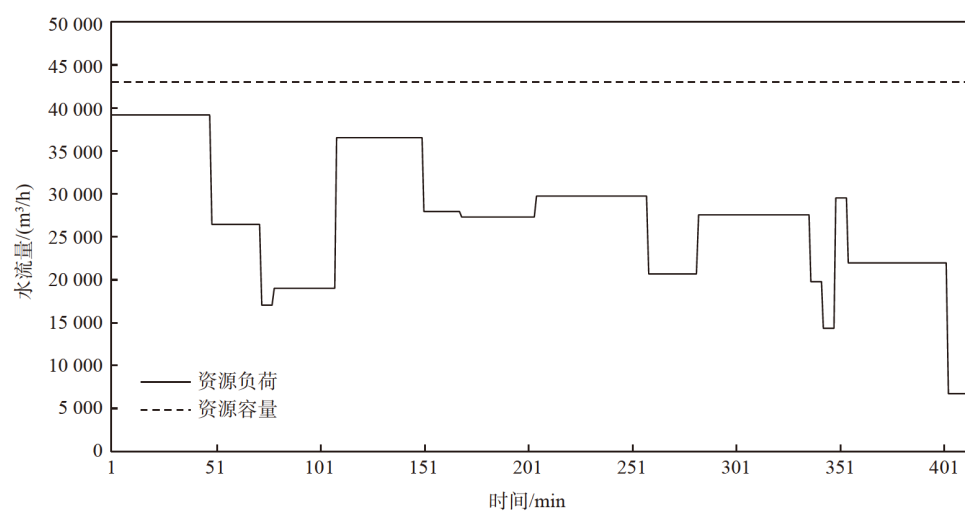


图18 并行混排调度软化水资源时序负荷

Fig.18 Temporal load of softened water resource for parallel scheduling

模型,进一步丰富目标函数类型,面向实际调度需求,构建加权任务拖期最小化、资源总成本最小化、试验资源均衡化等多种优化目标,进一步拓展调度模型的适用场景。

参考文献:

- [1] 张志国. 航空发动机高空模拟试验设施建设与发展思考[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2022, 35(3): 56-62.
ZHANG Zhiguo. Thoughts on the construction and development of aero-engine altitude simulation test facilities[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2022, 35(3): 56-62. (in Chinese)
- [2] 侯敏杰, 刘冬根. 航空发动机高空台的发展与展望[J]. 航空科学技术, 2012, (3): 1-4.
HOU Minjie, LIU Donggen. Development and prospects of aero-engine altitude test facilities[J]. Aeronautical Science and Technology, 2012, (3): 1-4. (in Chinese)
- [3] TURNER J R. The handbook of project-based management leading strategic change in organizations[M]. New York: McGraw-Hill, 2009.
- [4] ENGWALL M, JERBRANT A. The resource allocation syndrome: the prime challenge of multi-project management?[J]. International Journal of Project Management, 2003, 21(6): 403-409.
- [5] 万国华. 排序与调度的理论、模型和算法[M]. 北京:

- 清华大学出版社,2019.
- WAN Guohua. Theory, models, and algorithms of sequencing and scheduling[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2019. (in Chinese)
- [6] 熊燕华,沈厚才,周 晶,等. 工程项目调度技术研究综述[J]. 数学的实践与认识,2013,43(21):1-14.
- XIONG Yanhua, SHEN Houcai, ZHOU Jing, et al. A review of project scheduling techniques[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2013, 43(21): 1-14. (in Chinese)
- [7] BURKE R. 项目管理:计划与控制技术[M]. 陈勇强. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- BURKE R. Project management: planning and control techniques[M]. CHEN Yongqiang. Beijing:China Architecture & Building Press,2008. (in Chinese)
- [8] FENDLEY L G. The development of a complete multi-project scheduling system using a forecasting and sequencing technique[D]. Phoenix:Arizona State University,1967.
- [9] DECKRO R F, WINKOFSKY E P, HEBERT J E, et al. A decomposition approach to multi-project scheduling [J]. European Journal of Operational Research, 1991, 51(1):110-118.
- [10] BOWERS M R, GROOM K, MORRIS R. A practical application of a multi-project scheduling heuristic[J]. Production and Inventory Management Journal, 1996, 37(4):19-25.
- [11] 巴 杰,伍书剑. 航天型号多项目资源调度方法研究[J]. 宇航学报,2012,33(10):1552-1556.
- BA Jie, WU Shujian. Research on multi-project resource scheduling methods for aerospace models[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(10): 1552-1556. (in Chinese)
- [12] 崔建双. 项目调度问题模型与优化方法[M]. 北京:科学出版社,2018.
- CUI Jianshuang. Models and optimization methods for project scheduling problems[M]. Beijing:Science Press,2018. (in Chinese)
- [13] 侯敏杰,田金虎,刘 涛. 航空发动机高空模拟试验[M]. 北京:科学出版社,2021.
- HOU Minjie, TIAN Jinhu, LIU Tao. Altitude simulation testing of aero-engines[M]. Beijing:Science Press, 2021. (in Chinese)
- [14] 寿涌毅. 项目调度的数学模型与启发式算法[M]. 杭州:浙江大学出版社,2019.
- SHOU Yongyi. Mathematical models and heuristic algorithms for project scheduling[M]. Hangzhou:Zhejiang University Press,2019. (in Chinese)
- [15] 汪民乐,高晓光,范阳涛. 先进遗传算法及其工程应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,2019.
- WANG Minle, GAO Xiaoguang, FAN Yangtao. Advanced genetic algorithms and their engineering applications[M]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press,2019. (in Chinese)