

doi: 10.7690/bgzdh.2023.09.006

装备开发过程中任务与费用资源优化分配研究

王江为¹, 王馨懿²

(1. 陆军勤务学院, 重庆 401331; 2. 湖北经济学院信息与工程通信学院, 武汉 432300)

摘要: 针对基于集成产品研发团队(integrated product team, IPT)群的并行开发管理模式分析其在开发过程中怎样兼顾任务与费用。在对装备系统开发过程中, 制定关联任务分解原则, 建立任务分解模型, 并将任务与费用资源在不同 IPT 间进行优化分配。研究结果表明, 该研究可提高装备系统开发的效费比和管理水平。

关键词: 装备开发; IPT; 任务及费用; 效费比; 优化分配

中图分类号: TJ412 **文献标志码:** A

Research on Optimal Allocation of Tasks and Costs Resource in Process of Equipment Development

Wang Jiangwei¹, Wang Xinyi²

(1. Army Logistics University, Chongqing 401331, China;

2. School of Information and Communication Engineering, Hubei University of Economics, Wuhan 432300, China)

Abstract: Aiming at the concurrent development management mode based on integrated product team (IPT) group, this paper analyzes how to balance the task and cost in the development process. In the process of equipment system development, the principle of associated task decomposition is formulated, the task decomposition model is established, and the task and cost resources are optimally allocated among different IPTs. The results show that the study can improve the cost-effectiveness ratio and management level of equipment system development.

Keywords: equipment research and development; IPT; tasks and costs; cost-effectiveness ratio; optimization allocation

0 引言

装备系统开发是一个动态变化的过程, 效能与费用是开发过程中 2 个相互制约的因素, 必须要对这 2 个矛盾的自变量进行权衡与优化, 需针对用户的需求特点, 利用装备系统的效费评估结果对装备各种研制开发方案进行综合评价决策, 选定最佳开发方案。特别是大型复杂的装备系统, 由于设计方、生产制造方、使用方等多方参与, 更需进行权衡决策并不断持续优化改进。在此过程中, 相关各方需根据用户需求特点, 确定装备系统的效费门限值以及装备系统的关键性能参数和关键费用影响因素, 对活动设计过程进行分析, 寻求最佳效费比的装备设计研制生产方案。

1 IPT 开发管理模式的构架

集成产品研发团队(IPT)群并行开发管理, 针对当前多目标、多参与方的大型复杂装备系统开发, 是一种有效的管理模式, 现阶段正在广泛推行。IPT 群并行开发管理是指由装备系统的相关开发方组成系统的各个不同层次 IPT, 并由顶层 IPT

(overarching IPT, OIPT)在基于装备系统工作分解结构的基础上, 结合装备系统的结构特点, 对装备开发任务进行详细分解, 形成底层分系统、子系统、零部件等不同层次的工作 IPT(work IPT, WIPT), 并由 WIPT 负责装备详细开发任务。同时, 构建以用户为主导的吸收设计、制造等单位的财务、设计等部门的负责人组成 CPIPT(cost/performance IPT), CPIPT 根据既定装备的系统效能及费用目标值和门限值落实各个 WIPT 的效能和费用目标, 并要求各 WIPT 在 OIPT 的指导下完成装备开发任务的同时, 达到既定的系统效能及费用目标。各 WIPT 在装备开发过程中, 可根据实际情况对装备费用和效能目标适时提出补充建议或修改意见, 并反馈到 CPIPT, 由 CPIPT 进行综合权衡后, 决定新的 WIPT 的效费目标, 并对积极提出效能、费用改进的 WIPT 予以奖励。其结构模型如图 1 所示。

下图中: PM 代表项目经理; OIPT 代表顶层综合产品组; CPIPT 代表费用效能综合产品组; WIPT 代表工作综合产品组。通常, 各同级 WIPT 间彼此独立, 在上层 WIPT 的指挥协调之下开展工

收稿日期: 2023-05-19; 修回日期: 2023-06-18

作者简介: 王江为(1973—), 男, 湖北人, 硕士。

作，下层 WIPT 的负责人多为上层 WIPT 的主要构成人员。

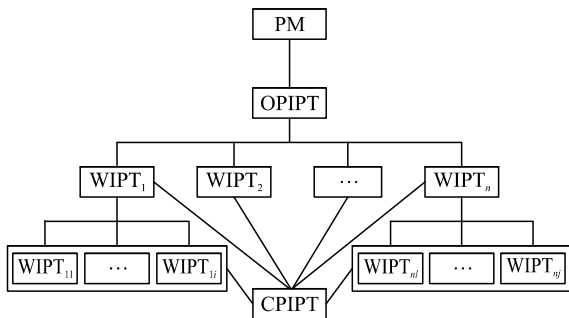


图 1 多层次的 IPT 组织结构模型

通过建立这种基于 IPT 群的装备开发组织管理模式，使相关各方组成一个以用户和装备产品为导向的技术优势互补、利益共享、风险分担的利益共同体，能够充分发挥各方的生产积极性和创造性。不同 WIPT 工作的并行推进能够大大加快装备开发的进度，用户和制造商在装备设计阶段的充分介入，能够大大提高装备系统的效费水平^[1]。

另外，由于装备系统开发是一个动态变化的过程，OPIPT 只有将整个装备系统开发细化到具体可操作的程度，才能开展工作。依据实际情况，应建立相应的任务分解结构，把复杂任务分解为多个简单、易于完成的任务，然后再根据各项任务的特点将其分配到不同的 IPT 中，由各 IPT 具体负责相关任务的开发。

2 装备开发过程中任务分解的基本原则

任务分解的目的是降低装备开发过程的复杂性，通过任务分解，把复杂的装备开发任务转化为许多简单、基本的任务，其分解的基本原则主要有以下几点：

- 1) 独立性原则。细化分解后的任务要具有一定的独立性，子任务的效能以及各子任务间的关系要明确，尽量减少子任务间相互协调、信息传递等工作。
- 2) 层次性原则。装备开发任务可分解为多个子任务，每个子任务又可分解为多个更低一层的子任务，任务分解层数要适中，保证每个开发任务的简单易行。
- 3) 组合性原则。通过适当的组合可以完成一个任务，经过适当的变换可完成另一任务。
- 4) 相似性原则。同一区域、相同性质可由用一个 IPT 完成的任务尽可能安排在一起。
- 5) 均匀性原则。分解大小、规模、难易程度要

尽量均匀，避免某一任务执行过于复杂，特别是对于关键任务环节的分解。因为过于复杂的任务往往容易引起较大的进度风险、费用风险，且风险诱因不容易分析和消除^[2]。

飞机设计任务的分解分配如图 2 所示。

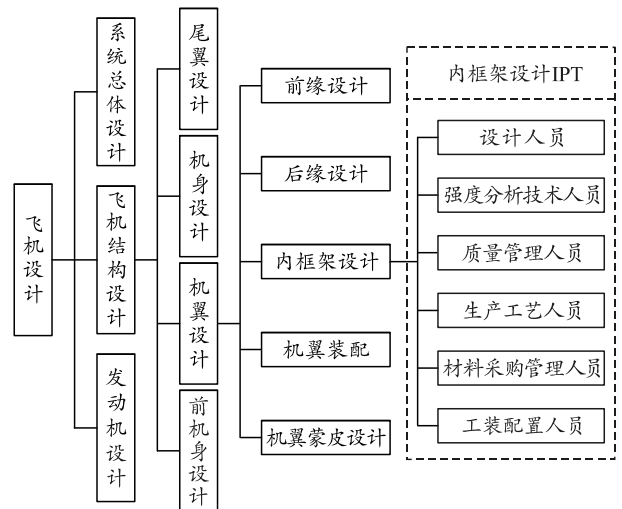


图 2 飞机设计任务的分解及分配

3 任务间耦合关系的解耦

分解后的装备系统各个开发子任务之间存在着大量的相互协调、相互作用的关系，正是这种关系，使得各个 IPT 能够协同工作，共同实现系统开发任务。这种相互影响、相互制约的关系称之为“耦合”。根据子任务间的耦合紧密程度不同，可将耦合关系分为松耦合、适度耦合和紧耦合 3 类，其相互制约的程度逐级递增。任务分解的关键在于尽量消除任务间的耦合效应，通过消除任务耦合可以使各个任务执行的独立性增强，一方面大大降低了不同开发 IPT 间的协调和通信，节省无谓的协调、通信等费用支出；另一方面可以合理安排任务的并行执行，大大加快装备开发的进度^[3]。

图 3 为任务间耦合关系的模型。在此模型中： C_i 为任务 T_i 的费用分配； P_i 为任务 T_i 的完成任务的效能水平； Y_{ij} 为影响任务 T_j 但属于任务 T_i 控制的关键变量，任务间耦合的解耦就是要消除不同任务间的关联变量 Y_{ij} 。

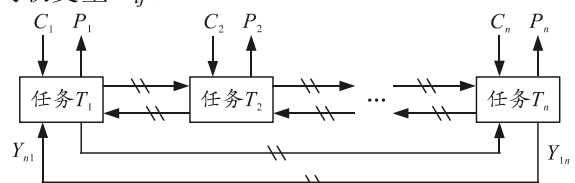


图 3 任务间耦合关系模型

用 $x_{ij} \in [0, 1]$ 表示关联变量 Y_{ij} 对任务 T_j 的影响程

度, 0 表示 Y_{ij} 对任务 T_j 没有影响, 1 表示 Y_{ij} 对任务 T_j 具有强烈影响, 只有 T_i 顺利完成才能保证 T_j 的实施, 任务内部的自影响视为 0, 即 $x_{ii}=0$ 。那么对于

任意任务 T_i , 其所受影响强度总量为 $x_i = \sum_{k=1}^n x_{ki}$;

同样, 其对其他任务的总影响强度为 $y_i = \sum_{k=1}^n x_{ik}$ 。所以

以任务 T_i 和任务 T_j 之间的耦合强度可用下式表示:

$$c_{ij} = x_{ji}/x_i + x_{ij}/x_j。$$

$c_{ij}=0$ 表明任务 T_i 和 T_j 相互独立, 没有耦合。当 c_{ij} 大于某一阈值 c_0 时, 可考虑任务 T_i 和 T_j 合并形成新的任务, 以降低其耦合, 减少不同任务间的通信和协调; 对于 x_i 较大者要尽量把任务 T_i 往后安排, y_i 较大的任务 T_i 要尽量提前安排; 当 x_{ij}/x_j 值较小时, 可采用对 Y_{ij} 赋初值的方法对任务 T_i 和 T_j 进行解耦; 对 x_{ki} 和 $x_{ik}(k=1, 2, \dots, n)$ 按大小顺序排序, 分别取排名靠前的任务组成耦合集 S_1 和 S_2 , 对其取交集, 从而可得关于任务 T_i 的耦合集 $S, S=S_1 \cap S_2$, 对于 S 内的任务从时间进度上要尽量集中安排执行, 从任务分配上要尽量交由相互关系密切或者同一地域的 IPT 去执行^[4]。

4 装备开发任务的分配

装备系统开发强调并行的目的就是要充分利用装备开发联盟内的各种资源和参与开发的各个成员的专业领域知识进行协同作业, 任务分解完成后, 就要根据各个成员的能力特点, 把每一项任务分配到各个 IPT 中, 实现 IPT 间的分工与协作, 满足用户对装备系统功能、进度、质量、费用、服务、环境(F、T、Q、C、S、E)等全方位的需求^[5], 为此笔者提出了以下任务分配方法。

设某装备系统的开发任务共分解为 m 个子任务, 那么其任务集为 $T=(T_i)_{1 \times m}$, 所有任务共由 n 个 IPT 予以完成, 各 IPT 所组成的成员集为 $M=(M_j)_{1 \times n}$ 。X 为 IPT 状态矩阵: $X=(x_{ij})_{m \times n}$, 其中 x_{ij} 表示第 j 个 IPT 对任务 i 的状态。

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{IPT}_j \text{ 可以完成任务 } i \\ 0 & \text{IPT}_j \text{ 不能完成任务 } i \end{cases}$$

那么对于任意任务 $T_i(i=1, 2, \dots, m)$, 其可选择的 IPT 为 $I_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})(M_1, M_2, \dots, M_n)^T$ 。

若 I_i 中可选择的 IPT 唯一, 那么将优先把任务 T_i 分配给该 IPT, 否则遵循以下顺序完成任务分配。

1) 建立用户对任务的渴望程度矩阵。由用户对

该开发任务的 F、T、Q、C、S、E 等各项要求采用 1~9 打分法进行打分, 分值分别代表用户对各项要求的渴望程度^[6], 从而可得评判矩阵 $W=(w_{ij})_{6 \times 6}$, 其中 $w_{ij}=1/w_{ji}$ 。

2) 求解各指标的权重向量。采用 AHP 法对其求解可得各指标的权重向量 $w=(w_1, w_2, \dots, w_6)$, w_1, w_2, \dots, w_6 分别与 F、T、Q、C、S、E 等要求相对应。

3) 求解成员能力评判矩阵。由 OIPT 对各 IPT 满足各项用户需求的能力进行评价, 得到成员能力评判矩阵 $MC=(mc_{ij})_{n \times 6}$ 。

4) 制定相应的目标值和门限值。由 CPIPT 给出装备系统该项开发任务 F、T、Q、C、S、E 等要求的目标值 $o_j(j=1, 2, \dots, 6)$ 和门限值 $t_j(j=1, 2, \dots, 6)$ 。

5) 求解成员满足目标能力矩阵。根据成员能力矩阵 MC 确定成员对目标满足能力的各项分值 mm_{ij} :
越大越优型目标:

$$mm_{ij} = \begin{cases} (mc_{ij} - t_j)/(o_j - t_j) & t_j \leq mc_{ij} \leq o_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

越小越优型目标:

$$mm_{ij} = \begin{cases} (t_j - mc_{ij})/(t_j - o_j) & o_j \leq mc_{ij} \leq t_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

并形成各成员满足目标能力的分值矩阵 $MM=(mm_{ij})_{n \times 6}$ 。

6) 求解各 IPT 总体能力。利用下式可以求得各 IPT 对该项开发任务的总体能力水平:

$$TC = MM \cdot w^T = (tc_i)_{m \times 1}。$$

7) 实施任务分配。对 $tc_i(i=1, 2, \dots, n)$ 按大小进行排序, 分值最大者所对应的 IPT 就是该任务所要分配的 IPT。

任务 T_i 一旦完成分配, 就要相应把该 IPT 从可选 IPT 中剔除, 以进行下一项任务 T_{i+1} 的分配, 直至所有任务分配完毕。

5 IPT 间费用资源的分配

各 IPT 在接受 OIPT 的任务分配后, 需要由 CPIPT 根据其任务的复杂程度 IPT 完成任务的效能水平对其进行费用资源的分配, 各 IPT 作为不同利益群体, 其所获费用资源的分配数额直接决定了其可能的收益水平, 在装备系统开发总费用目标既定的情况下, 一方所获分配数额过多必然损害其他 IPT 的收益水平, 过少则该 IPT 不能有效完成装备系统开发任务^[5]; 因此, 必须对其进行合理的费用

分配。良好的费用资源分配机制要起到应有的激励作用，激励各 IPT 在费用约束下最大化开发任务的效能水平^[5,7]。

令 CPIPT 所确定的系统总开发费用为 C_0 共有 m 个 IPT 获得装备开发任务分配。 $x_i(i=1, 2, \dots, m)$ 为第 i 个 IPT 所获费用资源分配数额； c_{0i} 为其所可能获得数额的最大上限； $P_i(x_i)$ 为在所获费用资源为 x_i 时第 i 个 IPT 完成分配任务的效能水平； α_i 为任务复杂程度系数，对 CPIPT 来讲，其费用分配的目标是通过费用合理分配来获取系统效能最大化，而对各 IPT 来讲，则是在根据其所获分配的任务来最大化费用分配数额^[8]。其分配步骤如下：

1) 由 CPIPT 向各 IPT 发布费用资源基本分配原则和相关激励原则，其中用于基本的费用资源分配的费用总额为 C_1 ，根据基本原则各 IPT 所获分配数额为 x_{0i} ，满足 $\sum_{i=1}^m x_{0i} = C_1$ ，可保证每一项任务的最低完成目标实现；用于激励的费用资源总额为 C_2 ，

根据各 IPT 完成任务的效能水平和任务复杂度进行分配，以保证最大化任务完成的效能水平^[9-10]。

2) 各 IPT 根据其所获分配的任务初步估算其可能获取的费用资源的分配数额，并据此确定自己的详细任务执行计划，并向 CPIPT 汇报其在不同费用资源条件下对任务完成的可能情况。

3) 由 CPIPT 根据各 IPT 所汇报的不同费用资源条件下的各任务执行情况构建统一费用资源分配模型，并据此对费用资源进行分配^[11]。

令 $e_i = [P_i(x_i) - P_i(x_{0i})] / P_i(x_{0i})$ ，反映了 CPIPT 对 IPT 完成任务效能的相对满意程度，CPIPT 可以据此对 IPT 予以奖惩， e_i 值越大其所获分配的费用资源数额越大，反之越小，以激励各 IPT 充分利用费用资源以提高任务的效能水平，各 IPT 所获激励费用分配比例的确定可根据 $\omega_i(x_i) = \alpha_i d_i / \sum_{i=1}^m \alpha_i d_i$ 进行计算。

其中： $d_i = (1 + e_i)^\beta$ ， $0 < \beta < 1$ ，且 $i = 1, 2, \dots, m$ 。

所以第 i 个 IPT 所获激励费用数额的分配为：

$$x_{1i} = \omega_i(x_i) C_2。$$

第 i 个 IPT 所获费用总额为：

$$x_i = x_{0i} + x_{1i}。$$

由此可得，最优费用资源分配模型为：

$$\max \sum_{i=1}^m \lambda_i P_i(x_i); \quad \sum_{i=1}^m x_{0i} = C_1; \quad \sum_{i=1}^m x_{1i} = C_2。$$

式中： $c_1 + c_2 \leq c_0$ ； $c_{1i} = \omega_i(x_i) c_2$ ，且 $x_i = x_{0i} + x_{1i} \leq c_{0i}$ ， λ_i

为各项任务对系统效能总体水平的影响程度。

6 结束语

装备系统开发过程建模、过程分析、过程优化及改进是优化装备开发过程的重要技术手段，是以费用为独立变量的装备开发管理过程研究中的重点课题之一，对于进一步提升装备方案设计水平、实现装备系统的价值增值具有重大的意义和作用。由于其概念新、难度大，笔者借鉴其他领域一些技术与方法予以研究，尚有大量技术细节需要完善补充^[12]。不仅如此，由于装备开发过程的建模与优化需要机械、信息等不同专业领域技术知识的支持，技术难度大，但随着各种建模技术和信息技术的发展，这些问题必将被克服，该技术的研究和应用也必将产生巨大的经济效益，并提高装备研制开发管理的水平。

参考文献：

- [1] 答翔, 陈春良, 张仕新, 等. 多约束条件下战时装备维修任务分配方法[J]. 兵工学报, 2017, 38(8): 1603-1609.
- [2] 于凤竺, 方光统, 杨瑞平, 等. 面向任务的舰船装备维修保障资源优化配置研究[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(6): 79-83.
- [3] 魏孟. 复杂产品设计变更下考虑执行时间可控的任务分配问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [4] 王鹏飞, 史左敏, 张磊. 基于作战任务需求的装备保障性设计[J]. 中国战略新兴产业, 2019(12): 75.
- [5] 周文明, 李福秋, 李孝鹏, 等. 航天复杂多阶段任务系统可靠性指标分配综合权衡优化方法[J]. 质量与可靠性, 2017(5): 13-17.
- [6] 王玉娟. 基于并行工程思想的新产品开发流程优化[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2019.
- [7] 王雅君, 时君丽, 樊双蛟. 基于过程-数据模型的制造费用资源优化配置[J]. 工业工程, 2015, 18(6): 130-137.
- [8] 皇甫丹丹. 基于并行工程的新产品开发流程优化及进度管理研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2018.
- [9] 王凌, 吴楚格, 范文慧. 边缘计算资源分配与任务调度优化综述[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(3): 509-520.
- [10] 岳果成. 高新技术企业研究开发费用的管理优化[J]. 财会学习, 2019, 23(6): 15-19.
- [11] 李梦. 面向云计算资源的收益优化模型与任务分配算法的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [12] 常金平, 商福亮, 周玮. 武器装备研制费用数据信息的采集和分配方法研究[J]. 情报理论与实践, 2012, 35(1): 96-98.