

# 基于系统工程的可制造性优化

葛磊,温勤

(上海飞机制造有限公司,上海 200436)

**摘要:**以飞机小翼可制造性为研究对象,运用系统工程方法的利益攸关方捕获—功能分析—需求分析—设计综合的过程模型,对小翼结构进行优化,并通过强度、安全、维修、工艺等各专业对优化设计进行验证。结果证明优化设计提高了飞机产品质量和可制造性能力,也验证了系统工程方法在提高项目运作效率上有非常重要的意义。

**关键词:**飞机;可制造性;优化;系统工程

**中图分类号:**V214.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2019)06-0202-03

## Optimization of Manufacturability based on System Engineering

GE Lei, WEN Qin

(Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

**Abstract:** The winglet's manufacturability is taken as object of study. The needs-acquire-function analysis-requirements analysis-design synthesis process model in the system engineering method is used to optimize its the structure, and its design is verified in the strength, safety, maintenance and manufacturing process. The result shows that this optimization improves the product's quality and manufacturability, and it is proved that the system engineering method is of great significance in the improvement of the operating efficiency.

**Keywords:** plane; manufacturability; optimization; system engineering

## 0 引言

系统工程作为一门学科,是人们在社会实践中,特别是在大型工程或经济活动的组织、规划、生产、管理及复杂产品系统的设计与研制过程中,发现所要面临和需要解决的共性问题后,综合考虑各方面的因素,统筹兼顾,总结实践经验,借鉴和吸收了一些基础和邻近学科的理论方法,逐步形成起来的。

关于系统工程<sup>[1-2]</sup>的基本概念,国际上与系统工程相关的组织机构从不同的角度有着不同的解释,而对于民用飞机制造来说国产民用飞机要获得商业营运成功并想占据世界民用飞机的一席之地,取得 FAA 认证是必由之路。因此理解 FAA 的系统工程思想显得尤为重要<sup>[3]</sup>。2014年,FAA 出版《系统工程手册》(systems engineering manual, SEM)提出 FAA 系统工程的框架并从贴合操作的角度对系统工程的过程、技术管理原则、专业工程的具体内容进行了指导,强调了元素在过程中的体现。其定义:系统工程是一门专注于整个系统,而非其中某个组件的设计及应用的学科;它强调从整体的视角看待某个问题,包括问题的各个方面、所有相关因素,并将管理和技术层面有机统一起来。

## 1 系统工程分析方法

### 1.1 研制技术过程

系统工程中的技术过程<sup>[4]</sup>主要关注系统生命周期中

的技术活动,充分地获取各个利益攸关方的需要并经过处理转换成为系统需求,并以此需求为基础进行系统的设计及实现,最终获得客户的满意。

在民用飞机系统的每一个层级,都应完成一个完整的系统设计和系统实现工作,即系统研制的技术活动,由系统设计过程集(system design progress)和系统实现过程集(system realization progress)两个部分组成,具体见图 1。

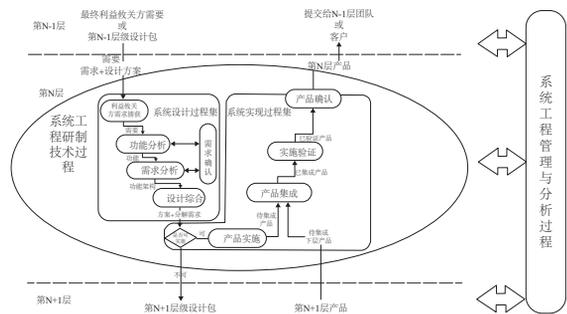


图 1 系统工程技术活动

由图 1 可见研制过程中的前 4 个过程构成了利益攸关方捕获—功能分析—需求分析—设计综合的过程模型,该过程描述了系统工程的正向设计过程<sup>[5]</sup>。

### 1.2 利益攸关方需要捕获

利益攸关方需要捕获主要是为了完整地识别项目的利益攸关方,形成利益攸关方清单,并基于该清单来获取各利益

作者简介:葛磊(1985—),河南信阳人,工程师,硕士研究生,主要研究方向为全机对接装配。

攸关方的需要,然后在捕获到原始利益攸关方需要的基础上,进行筛选排序及综合,最终形成利益攸关方清单。

### 1.3 功能分析

功能是一种用户期望的产品行为,建立在用户需求定义之上,且定义功能时不考虑其具体实现。功能分析主要是描述功能特性,包括功能的识别以及定义,同时进行相应的功能分解和功能分配,最终形成相应的功能清单、架构及各功能间的接口。

### 1.4 需求分析

需求分析是将上述的利益攸关方需要经过功能分析的结果转化为正式的技术需求,包括功能性需求和非功能性需求,并且经过需求标准描述后形成一个满足各利益攸关方需要的产品需求集。

### 1.5 设计综合

设计综合通过定义和分配产品组件元素的方式,将功能架构和需求转换成物理架构,并且此物理架构能够完整地满足各功能的要求。此过程具有明显的专业协同化及迭代化特点。技术过程对应的关系如图 2 所示。

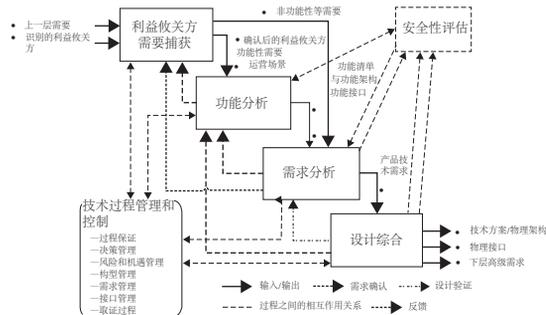


图 2 技术过程关系

## 2 基于系统工程的可制造性优化

可制造性设计<sup>[6-7]</sup>(design for manufacturing,DFM),它主要是研究产品本身的物理特征与制造系统各部分之间的相互关系,并把它用于产品设计中,以便将整个制造系统融合在一起进行总体优化,使之更规范,并能进一步降低成本,缩短生产时间,提高产品可制造性、质量,提高工作效率。

### 2.1 背景介绍

翼梢小翼作为飞机翼尖的重要减阻装置,对于提高飞机的燃油效率和改善飞行品质具有重要的作用。以国产某飞机翼梢小翼为例(图 3),其结构形式为:展长 1.65 m,根弦长 1.379 m,尖弦长 0.337 m,前缘后掠角 50°,外形有上弯、后掠、外撇、渐缩、超临界等特征。结构本体采用复合材料结构,考虑闪电防护,翼尖和前缘采用金属结构,其中复材占 76%,金属结构占 24%。

由于其结构设计较复杂。在小翼的制造、安装过程中多次重复出现一些问题,如:复合材料本体二次胶接脱粘

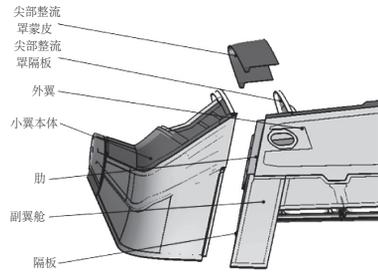


图 3 小翼结构形式

缺陷;装配困难,较难满足互换性要求;更换困难,存在运营风险等。

### 2.2 基于系统工程的优化

按照利益攸关方需要捕获—功能分析—需求分析—设计综合的过程模型对上述国产某飞机小翼问题进行系统分析。首先进行各利益攸关方需要捕获,对于民用飞机制造来说,主要的利益攸关方为客户、供应商、监管、主制造商等,对各利益攸关方需求捕获进行综合后形成利益攸关方清单及需要见表 1。

表 1 利益攸关方需要清单

攸关方类型	利益攸关方	制造性相关需要
SH1 客户	航空公司	翼梢小翼互换性好,以便于备件的准备 翼梢小翼的安装不能危害安装及维修人员的安全
	维修公司 MRO	翼梢小翼减阻性能优越 翼梢小翼更换成本低 翼梢小翼的可维修性好
	租赁公司	翼梢小翼更换次数少
	制造供应商	翼梢小翼制造工艺性好
SH2 供应商	试验供应商	需进行翼梢小翼全尺寸试验进行适航验证
SH3 监管方	局方(CAAC)	对飞机安装维修的相关操作需满足行业标准程序及技术规范
	环保	翼梢小翼的生产及安装过程需确保符合环保性要求
	安监	生产和安装翼梢小翼的过程中确保相关人员的安全
SH4 主制造商	顶层规划	飞机翼梢小翼减阻性能好,能显著降低油耗,提高经济性 翼梢小翼的连接结构设计应考虑互换性要求
	设计中心	翼梢小翼与外翼对接应选择合理的设计基准 翼梢小翼在结构设计上需降低制造难度,提高小翼本体结构工艺性
	制造中心	翼梢小翼设计基准合理,装配定位简单 翼梢小翼可加工工艺性好

以利益攸关需求捕获形成的表 1 利益攸关方和相应的需要清单为输入进行相应的功能分析,将小翼可制造性

的功能分解为提高零部件安装的便捷性及提高制造质量的稳定性两个方面,然后根据这两个方面继续对功能树进行分解,具体功能树见图4。

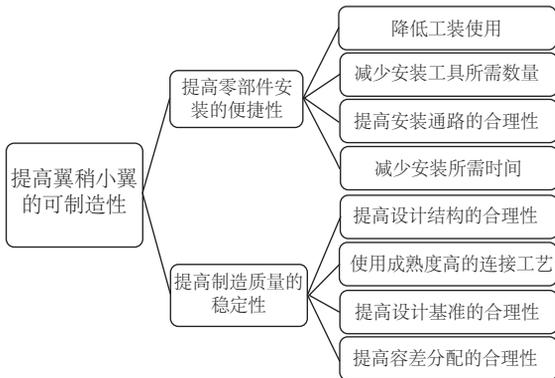


图4 功能清单

以功能清单和功能架构及其他利益攸关方的需要等为输入,基于功能分析的结果,通过评审、评估、排序、平衡所有利益攸关方的需求进行相应需求分析,并对需求进行确认,具体的需求分析结果见表2。

表2 需求清单

	功能块	功能项	目标需求
提高翼梢小翼可制造性	提高零部件安装的便捷性	降低工装使用	尽量采用本体定位
		减少安装工具所需数量	标准件尽量统一
		提高安装通路的合理性	利用肋口盖在端面上安装紧固件
		减少安装所需时间	减少紧固件的使用数量
	提高制造质量的稳定性	提高设计结构的合理性	减少硬硬胶结,避免局部变形
		使用成熟高的连接工艺	尽量采用紧固件连接,避免采用胶结连接
		提高设计基准的合理性	以肋端面为设计基准,同时也为装配基准
		提高公差分配的合理性	合理分配外形公差、对缝处间隙以及阶差

根据利益攸关方捕获—功能分析—需求分析—设计综合的过程模型,进行最终的设计综合,对小翼对接方案进行设计优化。以提高小翼在制造、安装过程及航线运营中的互换性为根部目标,将原套接形式(图5)更改为对接形式(图6)。在根部设计对接密封肋,实现翼梢小翼根部对接肋与外翼肋平面实现面面贴合,以实现最后对接及后续的互换。为保证小翼的对接界面精度,该肋板加工采用金属数控机加一体成形;采用剪切销(传递升力,转矩产生的剪切裁荷)和对拉螺栓(传递弯矩产生的拉压裁荷)将小翼与外翼盒段连接,以2个剪切销和1个贴合平面为基准,控制6个方向自由度。对接时,操作人员仅需观察小翼蒙皮与外翼上下壁板端部和后缘的对缝,确保外形公差满足设计要求即可。

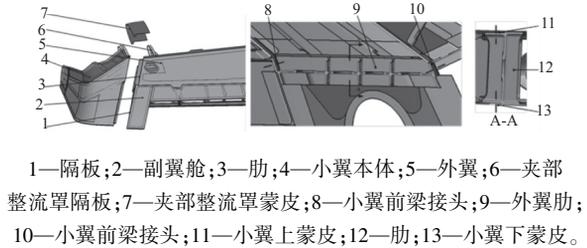


图5 改前套接形式

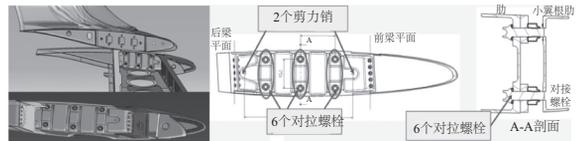


图6 改后对接形式

经过强度计算,评估得出优化方案满足强度要求。

对工艺工装的影响,由于对小翼本体结构和小翼对接方案进行了优化设计,原小翼生产装配工装需要重新设计制造,主要包括:小翼蒙皮工装、小翼装配工装、肋工装、小翼对接工装。

对制造装配可行性进行分析,优化后的小翼设计方案降低了小翼本体制造难度及小翼对接装配难度。设计方案的优化整体提高了小翼本体的生产工艺性,装配操作空间的便利性和开敞性,提高了产品质量及生产效率,对优化后方案进行模拟拆装验证及工具验证(图7)。同时该方案提高了小翼的维修性和互换性,且对安全性、可靠性等指标无影响。



图7 拆装及工具验证

将优化后的方案应用于实际生产并进行设计验证,验证中新增零件工装及装配工装各2套。通过零件制造车间对比优化前后零件制造周期,制造周期有明显缩短。因为尽量统一紧固件的类型使得工人操作过程中减少了工具更换,最重要的是更改了对接连接方式,方便现场操作。根据装配车间工时系统对比,优化后的结构装配工作工时相较优化前有34%的缩短。更改后为对接方式且主要为螺栓连接,更利于互替换的净边状态要求,不会产生余量打磨等工作,使互替换有大幅度的提高,小翼拆装时间均有大幅缩短。该优化后设计外形无变化,不影响气动,同时强度校核满足动强度及静强度要求,优化后的设计方案使得可制造性有大幅的提升。

### 3 结语

通过系统工程分析方法在实际飞机领域应用,以小翼安装可制造性为研究对象应用系统工程方法,完成识别各利益攸关方的需要,完成功能分析建立相应的功能树,经过需求分析形成需求清单,最终经过设计综合完成小翼结构优化,并且在强度及工艺实施上进行相应验证,验证结果证明优化提高飞机产品质量和可制造性能力,也验证了系统工程方法对于项目运作效率有非常重要的意义。

(下转第220页)