

# 军、民用飞机可靠性工作的比较与分析

曾照洋, 彭文胜

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

**摘要:**针对国产军用飞机和国外民用飞机研制过程中的可靠性工作进行对比分析,从飞机装备总体可靠性出发,分别分析了设计分析、试验验证、管理活动的特点和局限性以及军、民用飞机可靠性工作的差异性;从民用飞机可靠性工作面向运营要求、经济可承受性、可靠性设计保证的角度给出目前国内飞机装备开展可靠性工作的建议。

**关键词:**军、民用飞机;可靠性;研制流程;设计保证;可用性;运营要求

**本文引用格式:**曾照洋,彭文胜. 军、民用飞机可靠性工作的比较与分析[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(S1): 44-49.

**Citation format:**ZENG Zhaoyang, PENG Wensheng. Comparison and Analysis of Reliability Activities Between the Military and Civil Aircraft[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(S1): 44-49.

中图分类号:TJ85

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2019)S1-0044-06

## Comparison and Analysis of Reliability Activities Between the Military and Civil Aircraft

ZENG Zhaoyang, PENG Wensheng

(China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

**Abstract:** Due to the difference of operational requirements and scenarios between military aircraft and civil aircraft, there are also differences in the design and development process and reliability work in the development process. In this paper, the reliability work of domestic military aircraft and foreign civil aircraft in the development process was compared and analyzed, focusing on the analysis of the working ideas and activities of reliability. From the perspective of overall reliability of aircraft equipment, this paper analyzed the characteristics and limitations of its design and analysis activities, test and verification activities and management activities, and compared and analyzed the differences of reliability work between military and civil aircraft from these dimensions. Finally, the paper gave some suggestions on the reliability of domestic aircraft equipment from the perspective of operational requirements, economic affordability and reliability design assurance.

**Key words:** military and civil aircraft; reliability; development process; design guarantee; availability; operational requirements

在航空装备领域,可靠性是保证军用飞机任务完成的一个重要的质量特性,也是保证民用飞机安全、运营效率的一个重要指标<sup>[1,2]</sup>。我国军用飞机可靠性工程经过多年的发展,已经形成了以军用标准为指导的较为完善的思路和工作

体系<sup>[3]</sup>。而民用飞机由于其严格的适航审定、运营过程中的安全性、经济性要求,因此具有远高于军用飞机的可靠性水平。民用飞机作为一种大宗商品,其研制一方面要满足适航规章的需求,另一方面要满足航空公司运营的签派要求,保

收稿日期:2019-04-04;修回日期:2019-05-01

基金项目:工信部民机科研项目“面向运营要求的民用飞机可靠性设计保证技术研究”(MJ-2016-J-91)

作者简介:曾照洋(1979—),男,高级工程师,主要从事飞机装备可靠性研究,E-mail:846937304@qq.com。

证航空公司的声誉和盈利水平,因此民用飞机的可靠性水平要求非常高。民用飞机的可靠性研制过程遵循安全性研制过程,在民用飞机研制全过程中按照里程碑阶段进行可靠性的需求捕获、需求确认和需求验证<sup>[4-7]</sup>,具体工作按照设计验证、功能核查、独立监控的形式开展<sup>[8-9]</sup>。

本论文分别分析了现阶段我国军用飞机的可靠性工作思路以及国外民用飞机制造商如空客等的可靠性工作思路,对比分析了两类飞机可靠性工作的差异和共同点,并且从民用飞机可靠性工作的可借鉴之处给出了我国飞机装备可靠性工作的发展趋势和几点建议。

## 1 军用飞机可靠性工作的现状

### 1.1 军用飞机可靠性的技术发展过程

我国军用飞机可靠性工作的总体思路以“做实传统,引入创新”为主。“做实传统”,是指在开展可靠性工作过程中,将国军标中规定的可靠性项目和活动做实;“引入创新”,是指在传统可靠性工作的基础上,研究和引进新的技术方法。在这个思路的指导下,我国军用飞机的可靠性技术随着

我国军用飞机的重点机型的更新换代在不断发展<sup>[6,10]</sup>。

在“七五”“八五”期间,我国军用飞机可靠性工作处于事后补课阶段,工作目标是使飞机的可靠性和寿命由“不达标”到“达标”的状态。这个阶段的代表机型包括歼7/8飞机。第二个阶段由事后补课到按照军用标准进行设计分析和鉴定,主要依据 GJB450—1998《装备可靠性工作通用要求》开展部分可靠性工作项目,重点按照 GJB899—1990《可靠性鉴定和验收试验》开展可靠性鉴定试验。这个阶段的代表机型是现役的三代机。到国产四代机阶段,军用飞机可靠性工作一方面按照 GJB450A《装备可靠性工作通用要求》开展相应的可靠性项目<sup>[11]</sup>,GJB450A 的标准体系框图如图 1 所示。另一方面,引入新的工作理念和技术方法,我国军用飞机可靠性工作提出了“高可靠、长寿命”的目标,在研制阶段,引入了仿真试验-设备物理试验-系统综合试验-现场试验为思路的可靠性综合评价方法。突破传统的可靠性模拟试验的概念,突出设备的可靠性强化试验和可靠性加速试验的重要性<sup>[12]</sup>。在设计方面提出基于故障物理模型的性能与可靠性一体化设计技术,以保证可靠性工作和性能设计工作的关联性<sup>[13]</sup>。

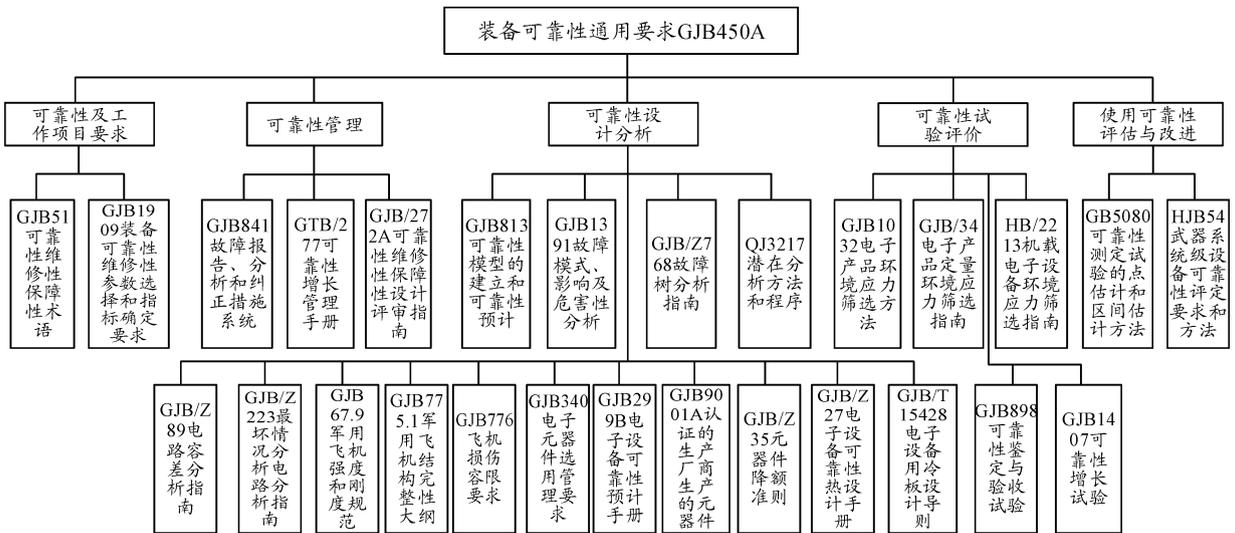


图 1 基于 GJB450A 的可靠性工作标准体系

现阶段,随着军用飞机装备的功能复杂化,我国军用飞机的可靠性工作提出了以基于模型系统工程(Model Based System Engineering, MBSE)为过程的新的可靠性理念和技术方法。新的可靠性理念由单点控制变成过程控制,由数据证明到证据证明,由传统的概率统计转为逻辑推理。以使建模方法支持系统要求、设计、分析、验证和确认等活动,这些活动从概念设计阶段开始,持续贯穿到设计开发以及后来的所有的寿命周期阶段。MBSE 能够科学合理地定义系统框架,将可靠性的设计分析验证工作一体化地融入到系统设计中,更高效地进行可靠性工作。并且 MBSE 还可以综合安全性、测试性、维修性、保障性、环境适应性等,形成 MBSE 的军用飞机通

用质量特性设计方法和模型,具有很大的应用前景<sup>[14-15]</sup>。

### 1.2 军用飞机研制过程的可靠性管理模式

我国军用飞机研制过程可靠性管理采用“制定计划-过程控制-状态鉴定”的模式,过程为:订购方(军方)提出可靠性研制总要求—研制单位根据研制要求制定可靠性工作计划—研制单位开展转阶段可靠性评审—研制单位开展可靠性鉴定(状态鉴定)<sup>[16]</sup>。

在型号研制过程中,军方在型号论证阶段给出研制总要求<sup>[17]</sup>,其中包括对型号可靠性的定性和定量要求。研制单位根据型号研制总要求,制定型号可靠性工作计划,其目的是规定在型号的研制过程中,具体开展的可靠性工作项目以

及对应的可靠性设计和验证的要求。可靠性工作的过程控制以军用飞机型号转阶段评审作为手段,载体主要是研制方提供的工作总结报告和技术报告。评审内容包括是否完成了项目规定的可靠性工作以及开展的可靠性工作形式是否符合要求,包括数据源是否合理,工作迭代次数是否符合要求等,目的是保证可靠性工作开展的正确性和完整性。可靠性状态鉴定是研制方向军方证明型号的可信性技术指标已经达到了项目研制要求,并且证明在型号研制和试验过程中暴露的问题和故障是否彻底归零。鉴定试验是可靠性状态鉴定最重要的依据。

## 2 面向运营要求的民用飞机可靠性工作

### 2.1 民用飞机研制过程中可靠性工作思路

民用飞机主制造商在开展可靠性工作时,结合 SAE JA1000,针对可靠性工作的三大问题:如何准确把握用户的可靠性要求、如何设计满足用户需求的可靠性以及如何向用户证明可靠性已经得到了满足,来确定民用飞机的可靠性工作活动<sup>[18]</sup>。同时,主制造商可靠性工作部门还按照民用飞机系统工程的研制思路,以 SAE APR 4754A 规定的飞机研制过程为参考,分别是可靠性的需求捕获、可靠性的需求确认以及可靠性的需求执行验证,最终形成可靠性工作程序<sup>[5,9,19]</sup>。在可靠性工作中,民用飞机主制造商非常重视产品成熟度和成本控制,对于不同类型的产品,采取不同类型的可靠性设计分析工作和符合性验证过程。这种思路一方面可以节省民用飞机研制的总时间,另一方面可以达到经济成本的控制目标。

### 2.2 面向运营要求的系统工程过程

基于 SAE ARP 4754A 的飞机研制系统工程过程的 V 字模型框图如图 2 所示<sup>[20]</sup>。民用飞机可靠性工程过程主要是进行可靠性的需求捕获、可靠性的需求确认、可靠性的需求设计实现以及可靠性的需求的执行验证 4 个部分。

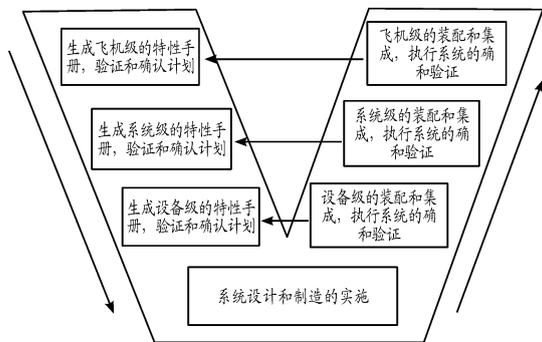


图 2 基于 4754A 的民用飞机研制系统工程过程的 V 字模型框图

#### 1) 可靠性需求的捕获

民用飞机可靠性需求捕获过程是基于利益攸关方,面向

运营场景进行可靠性需求的捕获。一般航空公司的需求:经济性,安全性,舒适性;民用飞机主制造商的需求和目标包括:运行中断率,航班延误率,航班取消率,部件和设备的 MTBF、MTBUR 水平<sup>[22]</sup>。

#### 2) 可靠性需求的确认

可靠性需求的确认保证可靠性需求正确性、完整性。确认的方法主要包括追溯性、分析、模型、试验、相似性、工程评审等 6 种方法。

#### 3) 可靠性需求的设计实现

可靠性需求的设计实现是通过设计、制造和检测等手段实现飞机各级产品的可靠性需求。

#### 4) 可靠性需求的执行验证

可靠性需求的执行验证是确定可靠性的需求的执行程度满足了规定的要求。验证的方法包括:检查和评审、分析、试验或验证、使用经验等 4 种。需求确认和验证关系框图如图 3,其工作流程如图 4。

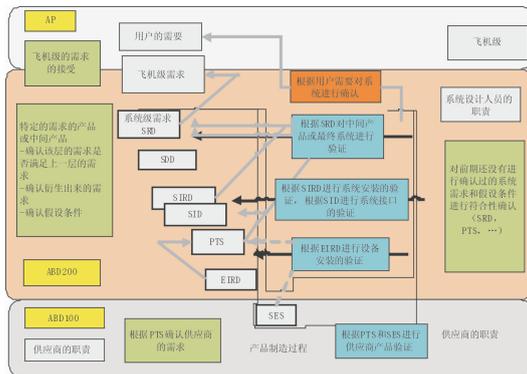


图 3 需求确认和验证关系框图

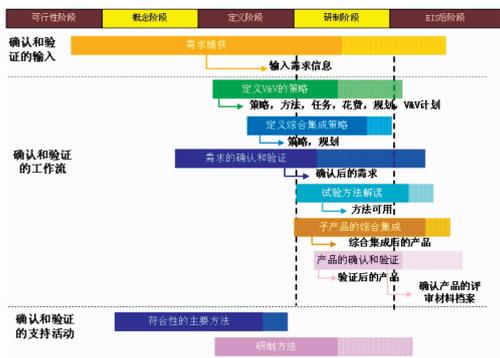


图 4 需求确认和验证的工作流程

### 2.3 设计保证体系框架下的可靠性安全性一体化设计

#### 2.3.1 设计保证体系框架

设计保证是国外的民用航空组织 (FAA, EASA 等) 对民用飞机主制造商的一种管理约束,主要目的是采取一系列技术及管理措施以保证最终的产品性能、安全性和可靠性<sup>[22-24]</sup>。

设计保证体系主要包括设计、适航、独立监控三大职能,

以及落实三大职能所需的组织机构、职责、程序、资源等四大要素。三大职能分别为:

- 1) 能够设计产品或零部件,并且这些产品或零部件能够满足适航和环境保护的要求;
- 2) 具有独立的核查功能,以展示或证明符合了这些适航或环境保护的要求;
- 3) 具有独立监督功能,进行 DAS 中文档或程序符合性的独立监督。

设计保证体系下可靠性工作框图如图 5。

### 2.3.2 民用飞机可靠性安全性一体化技术

民用飞机研制流程一般可以分为 4 个阶段,其示意图如图 6。4 个阶段又细分为 14 个里程碑节点,MO ~ M13, M14

飞机研制结束。在整个民用飞机研制过程中,安全性/可靠性评价过程支持飞机的各项研制活动,目标是达到运营商和适航当局要求的最优的安全性/可靠性水平。

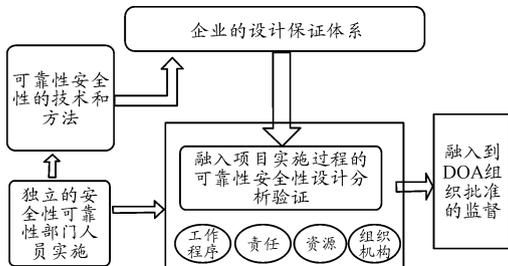


图 5 设计保证体系下可靠性工作框图

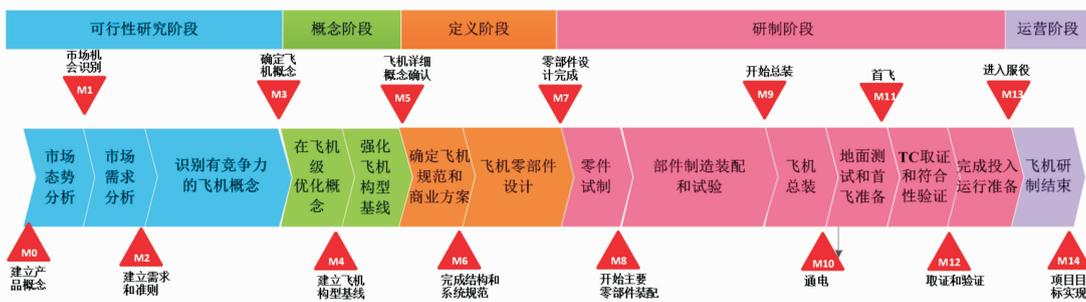


图 6 典型的民用飞机研制流程示意图

## 2.4 民用飞机的可靠性工作组织和实施方式

### 2.4.1 可靠性安全性一体化的工作组织

在民用飞机的研制过程中,可靠性安全性一体化工作组织会按照型号的研制过程分为 6 个小组,分别为 G0:负责与局方相关的可靠性安全性活动;G1:飞机级的可靠性安全性活动;G2:系统设计的可靠性安全性活动;G3:集成组装的可靠性安全性活动;G4:供应商的可靠性安全性活动;G5:运营过程中的可靠性安全性活动。可靠性安全性一体化工作组织及交互关系框图如图 7。

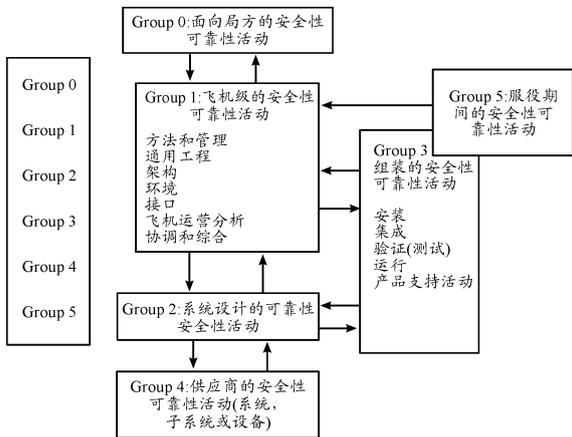


图 7 民用飞机可靠性安全性一体化工作组织和交互关系框图

### 2.4.2 民用飞机可靠性安全性组织工作方式

民用飞机研制过程中,可靠性安全性小组工作人员以 IPT 的形式进驻到民用飞机各个研制团队中,在团队中,可靠性安全性一体化工作组织各个小组之间有明确的职责和分工,并且各个小组之间也具有很强的交互性。小组之间的各种交联关系如图 8 所示。

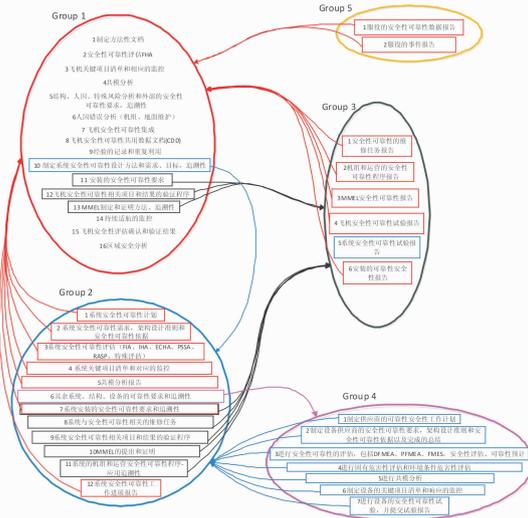


图 8 各个工作组工作项目的交联关系

各个小组具体的分工和工作关系如下:

飞机级可靠性工作小组的主要职责包括方法和管理、通用工程活动、架构、环境、接口、飞机运营分析、协调和综合；系统级的可靠性工作小组的职责包括支持系统设计过程，包括系统设计、系统安装、系统集成、系统验证、运行和产品支持活动；集成组装工作小组的职责包括对飞机和系统组装过程进行可靠性的监控、通过组装对飞机和系统设计进行相应的试验验证和维修任务制定；设备级和零组件级主要职责包括支持供应的飞机设备或零组件的可靠性设计、制造和试验，保证设备或零组件具有良好的可靠性；运营可靠性组主要职责包括负责飞机在运营过程中的可靠性安全性的数据收集和整理。

### 3 军民用飞机可靠性工作的对比分析

#### 3.1 军民用飞机可靠性工作的共同点

##### 1) 思路发展的统一性

目前军用飞机基于 MBSE 的可靠性设计与验证过程，从军用飞机的可靠性需求的捕获、可靠性需求的确认、可靠性的验证 3 个方面对可靠性的技术活动进行组织和实施，并且利用统一模型语言，与研制过程中的性能进行迭代和优化。民用飞机基于 ARP4754A 的可靠性设计保证，也是从民用飞机研制系统工程的角度出发，分别从工作程序、责任、资源、组织 4 个要素，对可靠性工作进行实施和监督。将可靠性需求捕获、可靠性需求确认、可靠性的执行验证相关的活动融入民用飞机研制流程中形成统一的程序和过程。

##### 2) 底层技术活动的共通性

从军民用飞机可靠性工作体系架构上来看，可靠性底层的技术活动具有共通性，目前军用飞机和民用飞机的技术活动都参考 SAE JA1000 和 STD0009 的相关标准，底层技术活动如可靠性建模、可靠性分析、可靠性强化试验和加速试验等技术活动等从方法本质上具有一致性和共通性。

#### 3.2 军民用飞机可靠性工作的异同点

##### 1) 可靠性工作目标和思路

军用飞机以面向作战，完成任务为目标，军用飞机以 GJB 作为依据开展可靠性工作；民用飞机确保安全，以经济效益最大化为主，民用飞机建立可靠性安全性研制保证流程和运营支持体系。

##### 2) 可靠性技术方法和活动

可靠性指标确定：军用飞机指标确定是军方综合各方面因素给出飞机顶层的可靠性指标，飞机可靠性指标有 MTBF、MTTR、首翻期、总寿命等；民用飞机指标确定是主制造商权衡经济性，和航空公司协商确定可靠性指标，包括空中中断率、地面中断率、失效状态发生概率、MTTR、机组报告率等；

可靠性建模和分配：军用飞机在飞机级和系统级要进行可靠性建模，可靠性分配依据飞机级可靠性模型，而民用飞机在飞机级和系统级不进行可靠性建模，可靠性分配过程依据 FHA 和架构进行分配；

可靠性预计和验证：军用飞机的可靠性预计主要通过手册等资料进行预计，大部分机载设备需要进行可靠性鉴定试验。民用飞机级的可靠性预计基于大量的历史数据进行，一般对设备不开展鉴定，通过担保的方式。

##### 3) 供应商管理

军用飞机对主承包商和转承包商以驻厂(所)代表的形式进行审查和指导，承制单位对转承制单位的产品可靠性水平以可靠性设计审查和试验鉴定作为转段依据，可靠性鉴定作为最终考核依据。民用飞机主制造商多级合同招标方式(联合研制合同、型号批产合同)，重视供应商技术成熟度和产品成熟度，可靠性水平以供应商担保为主，部分重要产品进行试验鉴定。

### 4 思考和建议

#### 4.1 差异产生的根源

前文对军用飞机可靠性工作和民用飞机可靠性工作的差异进行了对比分析，军用飞机和民用飞机同属于航空装备，造成可靠性工作差异的根源主要有几点：

##### 1) 军民用飞机运用场景

军用飞机面向作战任务，其运用场景除了战时完成任务，主要还是日常的训练。因此，对于可靠性的要求以保证任务成功为主；而民用飞机的运用场景主要是航空公司用于航空交通运输的日常运营，其对可靠性安全性提出了极高的要求；运营场景差异导致了军用飞机和民用飞机的样本量、可靠性数据的差异，民用飞机的样本量大于军用飞机的样本量，由于运营频次的差异，使得民用飞机的可靠性数据远远大于军用飞机的可靠性数据。

##### 2) 工作体制

目前而言，军用飞机的工作体制还缺乏独立监管，导致可靠性工作的效果难以保证；而民用飞机具有完整的设计保证体系和严格的设计组织批准，因此能够切实地保证可靠性安全性的要求的落实。

#### 4.2 军民用飞机可靠性工作的相互借鉴之处

军用飞机的基于模型系统系统工程的可靠性思路能够将可靠性、安全性、测试性、维修性、保障性等通用质量特性于一体，并且通过数据模型实现可设计、制造、使用的信息流的无二义的交互，使得通用质量特性和产品设计融为一体。虽然该方法还没有真正在工程应用中普及，但是基于同一语言的模型技术对于民用飞机可靠性工作是一种很好的借鉴。

民用飞机面向运营需求的系统工程思路，在可靠性安全性一体化的设计保证，供应商采用分级管理模式，在飞机研制过程中，分别签订供应商的联合研制合同和型号生产合同。联合研制供应商可以是多家合作，而型号生产供应商是唯一合作。在进行供应商可靠性管理过程中，充分考核供应商技术和产品的成熟度水平，采用供应商可靠性担保-赔付方式。对于军用飞机可靠性工作也具有一定的启发。

### 4.3 飞机装备可靠性工作发展趋势

#### 1) 以用户需求为目标的可靠性设计保证

可靠性工作的最终目标是使得产品的可靠性水平满足用户的需求,未来随着航空装备的功能越来越复杂,使用场景越来越复杂多变。如何建立一套捕获和确认用户需求、实现用户需求以及向用户证明可靠性需求已经满足,并且全过程独立监督的可靠性设计保证体系,是将来面对功能日益复杂的航空装备可靠性设计研制的一个重要技术发展方向。

#### 2) 考虑经济性的,通用质量特性综合集成的高效率的理论方法

随着技术的发展,航空装备也朝着更高性能、更绿色环保、更安全、更高效运营、更经济的趋势发展。装备可靠性也从单一的可靠性变成了包含了测试、维修、保障、环境适应、安全等通用质量特性综合集成和一体化的转换。因此如何建立一套有效的系统工程体系方法,科学地、经济地组织各个通用质量特性的工作,使得效能最大化,成本最低化,是将来可靠性理论发展的一个重要方向。

## 5 结论

本文进行了我国军用飞机和国外民用飞机研制过程中的可靠性工作的对比分析,重点介绍了以空客公司为代表的国外民用飞机的可靠性工作的思路、管理组织和技术方法。总结了军民飞机可靠性工作的共同点和异同点,并且从民用飞机面向运营要求的可靠性工作思路出发,给出了对于军用飞机可靠性工作的借鉴和参考。论文展望了飞机装备可靠性工作的发展趋势,对于我国飞机装备研制的可靠性工作开展具有一定的参考价值。

## 参考文献:

[1] 张银龙,申兆祥,卞士川,等. 装备可靠性、耐久性与寿命之间的关系[J]. 兵器装备工程学报,2013,34(8):76-79.

[2] 肖慧鑫,王静滨. 未来武器装备可靠性维修性保障性发展趋势[J]. 国防技术基础,2006(4):17-19.

[3] 任占勇,武月琴,曾照洋. 高可靠性产品的一体化设计[J]. 中国质量,2010(3):12-14.

[4] JACKSON S. Systems Engineering For Commercial Aircraft [C]// Incose International Symposium. 1997.

[5] SAE ARP4754A. Guidelines for development of civil aircraft and systems[S].

[6] 祝耀昌,曾照洋. GJB 450A《装备可靠性工作通用要求》的简要介绍和分析[J]. 航天器环境工程,2008,25(4).

[7] STAPELBERG R F. Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design[J]. United Kingdom Springer,2009.

[8] Airbus Design Organization Manual(DOM)[S].

[9] 林伟贤. 民机可靠性设计与评价系统的设计实现[J]. 航空标准化与质量,2016(5):44-48.

[10] 杨为民. 可靠性、维修性、保障性总论[M]. 北京:国防工业出版社,2000.

[11] GJB450A—2004,装备研制可靠性通用要求[S].

[12] MIL—STD—785B,Reliability Program for systems and Equipment Development and Production[S].

[13] 曾声奎. 系统可靠性设计分析教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001.

[14] EISENMANN H,MIRO J,KONING H P D. MBSE for European Space-Systems Development [J]. Insight, 2009, 12(4):47-53.

[15] AUTHORS S. A Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies[J]. 2013.

[16] 彭苏娥,王蕴辉,王群勇. 质量与可靠性管理[M]. 北京:电子工业出版社,2004.

[17] MOIR I,SEABRIDGE A,JUKES M. Military Aircraft Adaptations[M]//Civil Avionics Systems,Second Edition. 2013.

[18] SAE JA 1000 1998—06 (an American National Standard), Reliability Program Standard[S].

[19] 马赞,王鹏,肖女娥. SAE ARP4754A 中研制保证等级分配方法的应用研究[J]. 航空维修与工程,2013(2):68-70.

[20] 丁鼎. 基于模型的系统工程在民机领域的应用[J]. 沈阳航空航天大学学报,2012,29(4).

[21] 刘毅,吴海桥,丁运亮,等. 对确定民航客机可靠性与维修性设计指标的探讨[J]. 民用飞机设计与研究,2003(4):39-42.

[22] AM2616\_Safety and Reliability Handbook[S].

[23] HADDON D R,WHITTAKER C J. Aircraft airworthiness certification standards for civil UAVs [J]. Aeronautical Journal,2003,107(1068).

[24] BOWEN J,STAVRIDOU V. Safety-Critical Systems, Formal Methods and Standards[J]. Software Engineering Journal, 1993,8(4):189-209.