

民用航空发动机构型差异管理分析

张成武,郝朝杰

(中国航发商用航空发动机有限责任公司,上海 200241)

摘要:为确保试验结果可支撑产品需求符合性声明,满足适航相关的构型管理要求,依据差异性分析原理,在试验件构型与所验证的产品构型之间存在差异的情况下,通过差异性分析的方法证明其对试验结果无影响而允许其存在,从而降低制造和试验成本、缩短研制周期;在设计、试验环节开展构型差异标识、更改控制、审核等专项管控,确保构型差异始终处于可控状态。

关键词: 构型管理;民用航空发动机;构型差异;适航

中图分类号: V37

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.04.002

Analysis of Configuration Difference Management of Civil Aeroengine

ZHANG Cheng-wu, HAO Chao-jie

(AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd, Shanghai 200241, China)

Abstract: In order to ensure that the test results could support the conformity statement of product requirements and meet the requirements of airworthiness configuration management, based on the principle of difference analysis and under the condition of differences between the test piece configuration and the product configuration verified, it was proved that it had no influence on the test results and allowed it to exist by means of difference analysis, thus reducing the cost of manufacture and test and shortening the development cycle. Special management and control such as configuration difference identification, change control and audit were carried out in the period of design and test to ensure that the configuration difference was always under control.

Key words: configuration management; civil aeroengine; configuration difference; airworthiness

0 引言

构型管理的目标是通过标识、控制、审核等活动建立和维持产品属性、需求、设计以及使用维护信息之间的一致性^[1-2]。在航空发动机研制过程中,由于设计、制造、试验的各种复杂因素,构型管理的“一致性”要求难以实施,使得构型信息之间的差异普遍客观存在。例如,设计更改导致产品构型与试验构型存在差异;在加工过程中产生的偏离/超差导致实物构型与设计构型存在差异等等。

民用航空发动机在可靠性、安全性方面要求极高,产品型号必须通过适航当局的严格审查才能进入市场。在研制过程中构型差异普遍存在的情况下,如何确保产品满足适航要求,是发动机构型管理必须要

面对的难题。当前,中国民用航空器适航取证经验十分有限,在整个研发周期内如何完整地贯彻适航取证相关要求的经验严重匮乏,在构型管理相关标准中也并未对其如何管理专门描述^[1-2]。文献[3]对商用飞机取证过程中产生构型差异的主要原因进行归纳,但并未从原理上分析如何在构型差异存在的情况下满足“一致性”要求,也未对如何管理构型差异提出完整的解决方案。

本文基于差异性分析原理、方法和差异产生的原因,论述了允许构型差异存在的合理性和必要性;从差异性分析所需要素出发,识别产品研发过程中与这些要素相关的所有环节,形成针对构型差异的完整解决方案。

收稿日期:2019-05-16 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:张成武(1988),男,硕士,工程师,从事航空发动机构型管理;E-mail:c.w.zhang@outlook.com。

引用格式:张成武,郝朝杰.民用航空发动机构型差异管理分析[J].航空发动机,2020,46(4):8-13. ZHANG Chengwu, HAO Chaojie. Analysis of configuration difference management of civil aeroengine[J]. Aeroengine, 2020, 46(4): 8-13.

1 差异性分析原理与应用

产品构型包括其所具备的所有功能属性与物理属性,需要通过验证确保产品构型能够满足所有的需求^[4]。鉴于不同的需求所需要的验证方法、环境、通过准则等各不相同,产品的需求通常会通过一系列不同的验证活动分别进行符合性验证。因此,在单个验证活动中,所验证的只是产品的部分需求,用于验证的“产品”(即试验件)只要能证明可以满足策划所规定的这部分需求即可,并不需要所有构型均参与验证。产品需求与产品构型的对应关系如图 1 所示。从图中可见,产品需求包括需求①、需求②,构型①~④用于满足需求①,构型④、⑤用于满足需求②。当单次验证活动只验证需求①时,构型①~④必须参与验证,而构型⑤则不需要。说明在本次验证活动中,试验件构型①~④必须与产品构型保持一致,而构型⑤不影响需求①的验证结果。因而在验证活动中,允许与产品构型存在差异。

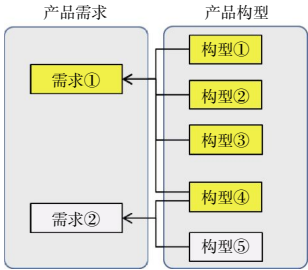


图 1 产品需求与产品构型的对应关系

因此,在特定的验证活动中,产品构型信息可以通过分析是否影响需求的研制结果而进一步细分,对于直接相关的构型信息应确保满足“一致性”要求,但其他不影响验证结果的构型信息则可以存在差异,该验证活动仍然有效。

鉴于此,当试验件构型与产品构型产生差异时,可以通过分析产生差异的构型是否属于本次验证活动的直接相关构型,该差异的存在是否影响验证结果,即差异性分析,来判断试验件是否可以用于本次验证活动。例如,根据 CCAR 相关条款要求,用于需求符合性验证的试验件与产品允许存在构型差异,型号合格证的申请人在提交符合性报告时,要包含试验构型及其相对于产品构型的差异说明,并对构型差异进行影响分析^[5]。完成试验后提交需求符合性声明时常用的构型差异性分析方式见表 1。其中,产品与试验件的转子叶片不同,2 个零件在流道内的叶片尺寸、气动型面等构型上均一致,仅叶片榫头(非流道内部分)部分的构型不同,但对于试验结果无影响,根据差异性分析原理,可以允许该差异的存在。

表 1 构型差异性分析(示例)

名称	产品零 / 组件号	试验件零 / 组件号	是否一致	差异内容	影响性分析
机匣	12345	12345	是		
转子叶片	98765	98764	否	叶片榫头处倒角尺寸不同	本试验为性能试验,叶片榫头不影响流道尺寸,对试验结果无影响
……	……	……	……	……	……

2 构型差异产生原因

2.1 测试改装

民用航空发动机在取得产品合格证之前,需要经过大量、严苛的试验,证明其相对于需求的符合性。在试验过程中,为了获取发动机真实、细致的工作状态参数,需要在试验件上加装各种测试设备。因此,在不影响试验结果的前提下,试验件会在产品设计构型的基础上进行一定的改装,造成用于试验件的设计构型与最终取证的产品构型之间存在差异。

2.2 设计更改

航空发动机作为典型的复杂系统,取证试验科目多、周期长,在试验验证过程中还会经历大量的设计更改,用于解决试验过程中发现的问题。受试验成本和进度的限制,经分析认为设计更改对已完成的试验没有直接影响,则不会将更改后的产品设计构型再重复试验验证。试验验证过程中的构型演变如图 2 所示。从图中可见,高压涡轮转子叶片在叶片振动应力试验时构型为 01,经验证满足了振动应力相关需求,在开展部件气动性能试验时,因叶片底部的冷却气流通道设计不合理,叶片构型由 01 更改为 02,重新进行试验且满足了气动性能相关需求。当开展整机试验时,因榫头和盘之间的配合尺寸不合理,叶片构型由 02 更改为 03,重新进行试验且满足了整机相关需求。尽管叶片 03 完成了整机试验,但与 01、02 在叶片振动特性和气动性能一致,可以通过差异性分析原理将叶片 01、02 的试验结果用于支撑叶片 03,不需要重复验证。民用航空发动机由大量零部件构型组成,研制过程中需经过大量不同科目、不同层级的试验,几乎不存在 1 套完整的产品设计构型完成所有的

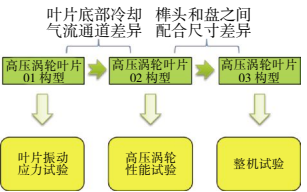


图 2 试验验证过程中的构型演变

试验验证,造成各试验件构型与最终取证的产品构型之间存在差异。

2.3 特定试验目的

由于试验件的加工制造属于小批量定制,成本高、周期长。为了降低制造成本、缩短周期,在一些特定的试验科目上(尤其是破坏性试验),对不影响试验结果的试验件设计构型做简化处理。例如,对中介机匣进行强度、刚度试验时,其内部流道的型面、外部管路的接口等对试验结果几乎没有影响,因而在试验件设计时,通常会对这些部位进行简化,减少零件的加工工序,避免试验构型与最终取证的产品构型之间存在差异。

2.4 制造缺陷

在研制阶段,由于制造工艺尚不成熟,试验件的加工过程中经常存在实物不符合图纸要求的问题,即偏离或超差。鉴于零件报废、重新投产会带来成本增加和进度拖延,对一些不影响单次试验结果的偏离或超差件,可以通过定义其限制使用范围的方式让步接收。例如,在某机匣加工过程中产生裂纹导致其使用寿命不符合设计要求,但其所应用的试验件只进行一定时限的气动性能试验,该机匣的实际寿命满足试验时长需求,且裂纹的存在不影响试验结果,那么该机匣仍可用于该次试验,只需要限制其后续的使用即可。因此,对制造缺陷的让步接收会导致实际试验的构型与产品构型之间的差异。

3 构型差异管理的意义

由于在试验验证过程中允许通过差异性分析支撑需求符合性声明。为此,对试验构型与产品构型之间的差异进行适当管控,不但可以消除构型差异对验证活动的影响,还可以通过允许构型差异的存在而降低制造和试验成本,缩短研制周期。然而,如果对构型差异的存在不采取相应的管理措施,则会造成产品构型失控,差异逐渐累积到最终声明需求符合性时,导致差异性分析不成立,必须重新安排制造和试验,对成本和进度造成巨大影响,甚至导致产品无法取证。因此,必须在常规的构型标识、构型控制、构型审核等管理活动中有针对性地增加配套管理规则,使得在整个研制过程中产生的构型差异始终在可控范围内,确保差异性分析最终可以支撑需求符合性声明。

4 构型差异标识

实施差异性管理的前提是完整地获取构型差异并标识出来。按照表 1 中对构型差异分析的要求,使构型标识至少满足以下 3 方面:

(1)产品构型、试验构型所对应的件具有明确的定义和区分,使设计人员可以清晰地识别分析对象。

(2)件号能惟一代表分析对象的构型,使设计人员从件号即可准确地判断出哪些构型存在差异,并追溯至相应的工程图样/模型进行对比分析。

(3)不同件号之间的构型能够快速地分析对比出差异,提高设计人员的工作效率。

4.1 有效性标识

差异性分析的前提是明确区分产品构型和试验构型。识别分析的对象,一般通过零组件的有效性标识实现。

采用件号编码规则区分零组件的有效性是中国航空发动机设计单位的常用方法。然而,当新的有效性出现时,必须增加新的件号才能定义,这样会存在大量件号不同但构型一致的情况,设计文件和实物的通用性很差。而 Boeing、Airbus、GE、Turbo-meca 等诸多航空产品制造商均通过 BOM 定义零组件的有效性,使得有效性独立于设计文件进行单独标识^[9],实现零组件的设计构型与适用范围的分离管理,大大提高了设计文件和实物的通用性。在进行差异性对比分析时,通过 BOM 定义的有效性分别列出产品构型和试验构型的件号清单,即可准确地识别出分析对象。

4.2 设计更改后的件号标识

“单一件号对应单一构型”是构型管理领域国际通用的基本原则^[7-8],件号应惟一代表分析对象的构型,通过件号可追溯到零/组件的构型信息。通常,在构型信息首次发布时,件号与零组件构型总是一一对应;当零组件构型发生设计更改时,必须遵守相应的管理规则,确保标识满足“单一件号对应单一构型”的原则。

当设计构型需要更改时,应首先判断更改前后构型的有效性是否发生变更。若无变更,则原有设计文件可以升版,更改后的构型直接保留原有件号及有效性;若发生变更,更改后的构型不能完全承接更改前构型的有效性,必须新增件号用于标识更改后的构型。例如,某压气机叶片零件图发生更改,更改前的构

型已经用于前2台发动机并且不进行更改,则应保留原件号,新增件号用于标识更改后的构型,同时,原有件号的有效性变为仅适用于前2台发动机,新增件号的有效性则为第3台开始的其他台份发动机。

目前国内很多航空发动机设计单位并未严格执行以上换版换号规则,而是采用“多版本有效”的管理模式。当更改前后的有效性发生变更时,仍然升版原有设计文件,通过不同的版本区分更改前后的构型及有效性。在这种模式下,所有出现件号的地方包括装配图、设计目录、加工订单、实物标印、差异性分析等都必须添加相应的版本信息,否则无法准确、惟一地追溯到零/组件构型。若将版本号与件号合并用于区分零/组件构型,那么版本号相当于件号的一部分,“换版”即“换号”,本质上仍然符合“单一件号对应单一构型”的原则。在这种模式下,所有版本的文件都可以被使用,对于部分因设计错误而需要替代的版本则无法与其他版本显著区分,增加了管理成本和构型误用的风险,因此不建议采用。

4.3 偏离超差后的实物标识

当试验件在加工制造过程中不满足图纸要求时,可以通过偏离/超差流程实现对实物让步接收,并记录实物与设计构型之间的差异。尽管试验件的设计构型未发生变更,但具体参与试验的实物构型在做差异性分析时不应再使用试验件的设计构型,而应将其实物构型与产品构型直接对比。为确保准确地追溯到实物构型,应对其分配新的件号,并标印在实物上。例如,GE公司在原有设计构型的件号基础上增加2位大写字母(如件号为12345P01的零件在加工过程中产生了3个超差件,其中有2个实物的构型相同,经审理后同意让步使用,则2个构型相同的实物重新定义件号“12345P01AA”和“12345P01AB”),作为偏离/超差实物的件号,既满足“单一件号对应单一构型”的基本要求,又体现了与设计构型的关联。

然而,目前中国绝大部分航空发动机设计单位并未对偏离/超差的实物分配独立的件号标识,而是依靠实物的序列号(或“批次+顺序号”)追溯实物构型,使原本标印在实物上的件号无法发挥惟一追溯的作用,并且只有标印单独序列号的实物才可以发生偏离/超差,从而使管理成本提高并增加实物误用的风险。另外,当实物因故障、临时改装等原因改变构型,无法通过实物的序列号区分,需要再增加额外的标识(如

单据编号、时间等),使得追溯成本高且易出错。因此,不推荐依靠实物的序列号区分偏离/超差构型。

4.4 差异内容标识

零/组件的构型通常通过工程图定义。为快速获取产品构型与试验构型的差异,在工程图管理上增加专门的构型差异标识。

大部分设计构型的更改是在原有设计基础上局部调整,构型差别不大的零组件合并在同一张图纸上定义,相同构型部分统一描述,不同部分再额外区分,显示不同件号之间的构型差异。“一图多件”的标识方式使图号与件号相互独立,需要建立二者之间联系。GE公司的工程图采用“一图多件”的管理模式,如图3所示。件号由图号、构型号2部分组成。图纸编号为“12345”,对应的3个构型号分别为P01、P02、“P03”,则3个零件号依次为12345P01、12345P02、12345P03;其尺寸除 L 以外,其他均相同,可直接标注,而尺寸 L 采用列表的方式分别定义每个零件所对应的尺寸,显示出不同零件之间的差异,从而通过编号规则实现图纸和件号之间的双向追溯。中国尽管在HB 7729-2003^[9]中提出“一图

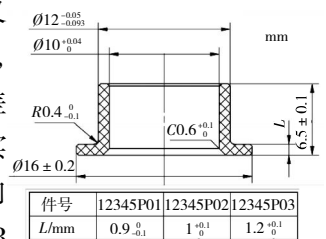


图3 “一图多件”
图纸标注示例

多件”的管理方式,但仅用于成组设计的小零件,并未广泛用于其他零件的构型差异标识。

“一图多件”的管理模式以2维工程图为基础,目前部分设计单位已开始推广使用3维模型^[10],件号与模型文件更适合一一对应的管理模式,在新增件号时,可以额外要求附加更改单,记录更改前后的差异,以便在后续差异性分析时追溯。

5 构型差异控制

5.1 设计更改的差异控制

在试验验证过程中,产品构型发生的设计更改会导致已完成验证的试验件构型与产品构型之间产生差异。为此,不仅要评估更改对产品的影响,还应将更改所涉及的已完成和正在开展的试验验证项目纳入更改评估范围。如果该产品构型已在某试验项目中完成了符合性验证,应详细对比该构型更改前后的差异,并分析此差异是否影响已完成试验的验证结果。

的构型管理活动基础上,补充了针对构型差异的管理方案。民用航空发动机在研制过程中可直接在现有的构型管理流程和标准中添加相应的要求和具体执行细则;军用航空发动机尽管不需要经过适航审定,相关标准也未对差异性分析做出明确的要求^[11-13],但是在构型管理的原理和方法上,军、民用发动机之间并无显著差别。近些年,“军民融合”已上升至国家战略,客观上要求在标准体系上尽可能实现军民通用^[14],在美国曾有从执行军用构型管理标准直接转向执行民用标准的先例^[15]。因此,在军用航空发动机研制过程中也可以参照本文提出的管理方案,并以此推动其他构型管理要求在项目研制过程中的贯彻执行。

参考文献:

- [1] TechAmerica Standards & Technology Department. Configuration management standard:ANSI/EIA 649-B-2011 [S]. USA:TechAmerica, 2011:5.
- [2] Attention G-33 Committee. Configuration management standard implementation guide:GEIA-HB-649TMA (R) [S]. USA:SAE International, 2005:18.
- [3] 龚文秀. 民用飞机构型差异管理分析 [C]// 中国航空学会总体分会. 2014 年学术年会论文集. 上海: 中国商飞上海飞机设计研究院, 2014:348-351.
GONG Wenxiu. Analysis of configuration difference for civil aircraft [C]// General Association of Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Proceedings of 2014 Academic Conference. Shanghai:COMAC Shanghai Aircraft Design & Research Institute, 2014:348-351. (in Chinese)
- [4] SAE Aerospace. Guidelines for development of civil aircraft and systems SAE ARP4754A [S].USA:SAE International, 2010:65-66.
- [5] 中国民用航空局航空器适航审定司. 航空器型号合格审定程序 AP-21-AA -2011-03-R4 [EB/OL]. (2011-03-18) [2018-09-20]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201511/t20151102_8036.html.
Aeronautical Airworthiness Certification Department of Civil Aviation Administration of China. Procedure of aeronautical type certification AP-21-AA -2011-03-R4 [EB/OL]. (2011-03-18) [2018-9-20]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201511/t20151102_8036.html. (in Chinese)
- [6] 刘雅星,郑晶晶. 飞机产品数据模块化构型管理[J]. 航空制造技术, 2010(3):57-60.
LIU Yaxing,ZHENG Jingjing. Module configuration management of aircraft data [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(3): 57-60. (in Chinese)
- [7] 汉斯·亨利奇·阿尔特菲尔德. 商用飞机项目—复杂高端产品的研发管理[M]. 唐长红,译.北京:航空工业出版社,2013:215-222.
- Hans H A. Commercial aircraft projects—managing the development of highly complex products[M]. Translated by TANG Changhong. Beijing: Aviation Industry Press, 2013:215-222. (in Chinese)
- [8] Flouris T,Lock D. Aviation project management [M]. Aldershot:Ash-gate Publishing, 2008:236.
- [9] 中国航空综合技术研究所. 航空产品 CAD 文件管理规定:HB 7729-2003 [S].北京:国防科学技术工业委员会,2003:6-7.
Aviation Industry Corporation of China Aero-Polytechnology Establishment. Management of CAD documents for aviation products:HB 7729-2003 [S]. Beijing :Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 2003:6-7. (in Chinese)
- [10] 李健,邱明星,苏媛媛,等. MBD 技术在航空发动机设计中的应用 [J]. 航空发动机, 2015, 41(1):32-35.
LI Jian, QIU Mingxing, SU Yuanyuan, et al. Research on application of MBD technology in aeroengine design[J]. Aeroengine, 2015, 41(1): 32-35. (in Chinese)
- [11] 国务院、中央军委军工产品定型委员会办公室. 军工产品定型程序和要求:GJB 1362A-2007 [S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2007:4-7.
Office of the Military Products Finalization Committee of the State Council and the Central Military. Procedure and requirement of military products approval: GJB 1362A-2007 [S]. Beijing:The General Armament Department of the PLA, 2007:4-7. (in Chinese)
- [12] 国务院、中央军委军工产品定型委员会办公室. 军工产品设计定型文件编制指南 第3部分: 设计定型申请:GJB/Z 170.3-2013 [S]. 北京:中国人民解放军总装备部, 2013:1-2.
Office of the Military Products Finalization Committee of the State Council and the Central Military. Compilation guide of military products approval documents part 3: products approval request:GJB/Z 170.3-2013 [S]. Beijing:The General Armament Department of the PLA, 2013:1-2. (in Chinese)
- [13] 总装电子信息基础部. 技术状态管理: GJB 3206A-2010 [S].北京: 中国人民解放军总装备部, 2010:23-24.
General Armament & Electronic Information Base Department. Configuration management:GJB 3206A-2010 [S]. Beijing:The General Armament Department of the PLA, 2010:23-24. (in Chinese)
- [14] 周慧贞,王秀华,王强,等. 外军军民融合式装备保障实践及启示 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2010, 21(4):6-9.
ZHOU Huizhen, WANG Xiuhua, WANG Qiang, et al. Practices and revelations of civil-military integration equipment support of foreign forces [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2010, 21(4):6-9. (in Chinese)
- [15] 王庆林. 基于系统工程的飞机构型管理[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2017:84-85.
WANG Qinglin. Aircraft configuration management based on system engineering[M]. Shanghai:Shanghai Scientific & Technical Press, 2017: 84-85. (in Chinese)

(编辑:贺红井)