

浅谈民机强度有限元分析适航认证技术

Preliminary Research of Airworthiness Certification of Civil Aircraft Strength by Finite Element Analysis

吴存利 / 中国飞机强度研究所

摘要: 结合国外发展经验, 初步阐述了国内民用飞机基于有限元分析适航认证中的一些问题, 以及应采取的策略。

关键词: 有限元分析; 适航认证

Keywords: finite element analysis; airworthiness certification

0 引言

作为计算机辅助工程软件重要组成部分, 结构有限元分析软件促进了飞机从传统的设计-试验-制造模式向设计-分析(部分取代试验)-制造模式的发展。在飞机初始设计阶段, 其目的是获得结构的传力路径以及满足结构静动强度和刚度的均衡构型, 这些任务都可以通过对结构有限元分析来实现。利用有限元分析, 可以缩短

结构设计周期, 降低设计费用。

在航空工业中, 确定飞机结构适航符合性的常规方法是进行分析和试验, 以此来确认结构是否满足强度和刚度要求。目前确定飞机结构完整性的方法首先是采用有限元数值方法给出所有工况的数值结果, 然后选择典型工况进行试验验证, 如全尺寸静力、疲劳和动力试验。由于试验费用高, 周期长, 因此有必要改进传统的设计验

证方法。可通过整机有限元分析与部件试验验证相结合的方式, 减少全机静力试验的工况。因为这一新的验证理念已引起国内外飞机设计制造单位和适航部门的关注, 所以需要探索和研究由此产生的新问题。

1 适航符合性问题

根据CCAR25R3C的§ 25.307条款, 适航符合性要求飞机结构在每一

高性能的新材料研制是提高产品性能和可靠性的重要环节。配套成件, 特别是轴承, 往往成为新机研制工作的瓶颈。应责成轴承研究厂所对如何保证航空轴承优质配套供应问题进行专题研究, 或者组建航空轴承研究生产中心。

3) 建立战略性合作伙伴关系

与国际知名厂家建立战略性合作伙伴关系, 进行长期合作, 在共同发展中实现我国直升机产品的自主创新。

从目前国际合作的形式来看, 合

作方式可以归于两大类, 一是以项目为中心的联合开发和生产, 如EH-101、“虎”、NH-90、EC-120、S-92、AB139、BA-609等项目均采用这种形式; 二是以资产为纽带的公司结构重组形式, 如法国宇航公司直升机部与德国MBB公司组建的欧洲直升机公司、意大利阿古斯塔公司与英国韦斯特兰公司合并而成的阿古斯塔-韦斯特兰公司就是两个典型案例。

4) 加大资金投入

我国直升机传动系统领域研制的

基础较为薄弱, 必须在各项政策措施配套的同时, 加大资金投入, 才有可能实现跨越式发展, 赶上世界先进水平。

5) 稳定和培养人才队伍

大胆起用青年科技人员, 重点培养和引进高水平、德才兼备的科技骨干, 以增强科研实力。

AST

作者简介:

姚灿, 硕士, 工程师, 主要从事飞机发动机生产过程的质量监控工作。

临界受载情况下均符合条款 § 25.305 的强度和变形要求。只有在经验表明结构分析方法对某种结构是可靠的情况下,对于同类结构,才可用结构分析来表明结构的符合性。

为了使飞机结构刚度和强度满足适航符合性要求,飞机设计制造时必须满足适航条款,即在预期的各种严重载荷组合和不利环境条件下,结构仍能具有足够的强度和刚度,以确保结构不失效和保证安全航行。要特别关心疲劳累积效应,以及材料、部件尺寸、载荷近似和结构模型化过程中的不确定性带来的结构刚度和强度裕度下降问题。

一种可以预期的前景是,通过用试验中某几种指定工况的测量值来验证全机有限元静力分析模型,最后将它应用到其他设计工况中。用全机静力分析来确定结构的主传力路径,并说明结构各个部件所承受的载荷;通过试验或结构工程分析获得飞机结构各部件许用载荷,利用结构许用载荷和工作载荷来确定结构的强度裕度,从而向适航部门提供预计的结构的载荷分布、变形、局部应力和应变以及结构各部件的强度裕度,以获得适航批准。另外,结构分析模型以及强度和刚度计算结果可用于将来对飞机改型,可通过少量的部件试验,使飞机改型机获得适航部门的认可。

2 基于分析的民机适航认证

利用分析方法来验证民机结构的刚度和强度的要求愈来愈迫切。目前在民机研制中,对其初始设计的原型机进行试验,试验载荷取自飞机飞行载荷包络线。然而经验表明,因为飞机强度试验所采用的载荷有时并不能反映结构所承受的真实载荷,所

以飞机载荷谱需要作修改,这就导致出现非预期载荷,这种非预期载荷可认为是对预计载荷的修正。在这种情况下,飞机适航认证不需再通过试验验证,而是通过有限元分析,因为适航部门已接受原先的有限元分析模型,所以适航部门也接受由此模型在修正载荷下的响应以及载荷在结构中的传力路径。如果对飞机结构部件作了修改,对飞机结构适航认证就需要做部件试验。

采用分析技术对飞机适航认证,其分析方法本身需要通过试验确认。即只有通过试验表明该分析方法对某种结构是可靠的情况下,对于同类结构,才可用该方法对飞机进行适航认证。如果分析方法得不到确认,或该方法用于不同类型结构,那么分析结果只能用作参考,不能证明结构的符合性。

3 基于分析的适航认证中的技术问题

从飞机设计验证的发展趋势看,部分工况的全机结构的静力试验将不可避免地经部件试验验证的分析来取代。针对我国民机适航认证目前的发展状态,本节从基于分析的适航认证方法对分析流程、建模技术、软件的完整性和可靠性等问题展开讨论,并说明应采取的措施。

3.1 分析流程

分析流程是一批具有飞机设计知识、飞机有限元建模分析经验的专家制定的。一个合格的分析流程是通过已有确定分析结果的实际工程结构来完成评定的,这些分析结果来自于先前产品分析中的试验结果,或专业人员的经验,或已被理论和经验证明的。分析流程评定测试是由具有一定水平

的技术人员独立完成,以保证流程适合于解决某类问题。分析流程鉴定记录应详细,使其他人员在不参考其他资料下能重复分析过程。

制定分析流程应包括:计算结果数据及其精度;流程的应用范围以及局限性;流程运行所需要的输入数据;所采用的软件和硬件设备;分析中的有限元建模过程说明;分析流程遵循质量体系。

对分析流程的应用范围及其局限性应详细说明,以确保相应的分析流程只在这个范围内应用。分析范围指的是所分析结构的物理特征、载荷条件和分析类型等。局限性指对结构特性模拟以及理论假设等的局限性。

有限元建模过程说明包括模型几何表示、网格尺寸及构造、载荷、边界条件及约束、材料行为、应力输出插值和物理问题解释等,这些信息应完整地以报告形式给出。所有这些信息能够足够使一般有限元分析者或具有有限元分析知识的人顺利地重复其过程。

3.2 结构有限元建模技术

在飞机初始设计中,重点在于得到载荷在结构中的传力路径。传统上,载荷在结构中的传力路径是通过古老的经典分析方法、工程梁理论及工程经验获得的,这些方法显著依赖于先前的设计经验。随着有限元分析技术愈来愈成熟,飞机设计中将广泛采用有限元技术。

有限元方法对飞机设计的最大影响在于用它来对飞机结构进行分析验证或结构的应力检查,应力检查涉及对飞机主结构进行总体名义应力分析以及飞机部件细节应力分析。采用有限元方法对飞机总体名义应力分析的目的在于确认结构设计过程中载荷传力路径。

总体名义应力分析结果的可靠性通过与应变测量结果比较确认。为了完成这一项任务,需要对分析结果进行处理。

结构细节强度分析采用多种手段,包括经典工程方法和数值方法。利用这些技术,已开发出一些专用的软件,如飞机加筋结构强度分析软件STRANAS。随着有限元技术的发展,人们广泛采用有限元进行细节分析,但是仅靠有限元方法无法得到结构的强度裕度,还必须与结构的失效理论、试验结果以及工程经验方法有机地结合在一起。飞机结构的强度裕度作为飞机适航性验证重要数据将提交适航部门,另外当对原飞机结构进行改型时,飞机结构的强度裕度是重要的参考数据。

在结构失效分析中,要考虑结构几何非线性和材料非线性,结构有限元建模更需精化,更需反映结构的物理特性,以便得到结构后屈曲变形状态中的弯曲应力。常规地,要计算结构的几何刚度矩阵,即使它不应用于非线性分析,也可用来检查几何线性近似方法对结构响应模拟的程度。

为了通过适航批准,对结构分析需要考虑两方面因素,首先对总体有限元模型检查以确保建模时已考虑了结构的关键部位,分析结果能解释结构强度和刚度退化原因。再者,利用结构细节模型所得到强度分析结果可用来精确地预测结构失效部位。对金属和复合材料混合结构,在失效区域,由于金属部件屈服引起载荷重分布,使分析显得更困难。在细节应力分析中,需要考虑结构材料的非线性乃至几何非线性。

3.3 软件完整性和可靠性

采用有限元分析来证明结构的符合性,必须保证软件的完整性和可靠

性。经验表明,用于飞机设计的分析模块,常用的模块功能可靠,可作为飞机设计标准分析模块,不常用的模块因其功能未经过详细测试,其分析结果不可靠。软件中的理论方法要通过其他手段验证。

对分析软件完整性和可靠性的确认是飞机基于分析获得适航认证的重要条件,需要通过以下几个过程完成。

1) 软件评估和认证

首先要分清软件评估和软件认证两个过程,软件评估是用户根据软件预期应用对软件理解,评估的目的是保证软件适应于未来任务需求,即了解其内在的缺陷性,并知道这些缺陷对所完成任务不构成影响。而软件认证是根据其技术和功能对软件发展能力的理解,认证的目的是通过证明软件有其应有的功能。因而一般认为,软件认证是证实软件能可靠地完成任

务,而对软件评估是证明软件在产品分析中的可应用性。

软件所采用的理论以及算法是软件评估中两个最基本的要素,对理论基础、数值算法以及其应用范围的检查足以说明软件的应用性及其缺陷性。

软件认证是软件供应商职责,它是软件质量控制过程一部分,用户的职责是确保供应商完成对软件的认证工作。认证过程中所采用的考题及结果作为软件支持证据应包含在测试手册中。认证测试必须包括对软件功能的基本测试,这些测试能说明软件功能的完整性和收敛性。如果没有认证测试记录,则要求软件供应商提供软件研制过程中测试题,检查测试题是否覆盖了软件的功能、数值算法等。

2) 软件质量控制措施

软件供应商也需要提供令人满意和有效的软件研制中质量控制措施。

与用户有关的软件质量体系中最重要的是:(a) 软件研制过程中质量控制;(b) 软件认证;(c) 软件计算误差控制和修正。

由于软件开发商所采用质量控制体系差异很大,因此用户要确保开发商所采用的软件质量控制方法是符合有限元质量控制体系的。

3) 软件验收测试

验收软件时,要对软件进行测试。从软件的最初版本到后来的每一次高版本都要采用例题测试。在实际操作中,对初始发布的版本作完整的测试,对后续推出的升级版本采用简单的测试方法,即通过比较升级版本与老版本的计算结果,来评定升级版本,如果测试题是新增加的,则要通过人工去详细检查。

在测试过程中,如果计算结果有重大变更,要向软件供应商和结构分析者说明,同时有必要改进分析流程,并重复对软件的鉴定过程。对软件测试完后,如果结果满意,软件才可以应用于结构的完整性分析。

3.4 团队的能力以及对个体的要求

结构的分析质量以及分析结果的可信性依赖于全体人员的经验能力和其所拥有的专业知识。所说的专业知识,不仅指具有深厚的专业理论知识,同时还应包括以下两方面知识:一是熟悉所承担任务,更重要的是对分析的结构有先前所积累的经验;二是应该具有软件的专业知识,以保证软件能正确地运行,防止数据丢失或系统瘫痪,以及数据传递中丧失其完整性。

由于有限元分析结果的可信度依赖于分析者的经验和专业知识能力,因此需要对有限元从业人员以及管理者或监督者进行专业知识能力和工程经验认定,详细说明分析团队中各

成员知识水平和经验能力。特别是当分析结果用来对结构的完整性作出评估,需要一个既有工程经验又有专业水平的人给出权威性的结论时,这种对分析团队各成员能力认定就显现出其优越性。理想情况是,这种对从业人员能力认定能被其他权威机构接受。

对个体的要求表现在分析人员不仅应具有一定的理论水平和专业知识,同时要具有有限元建模求解能力以及有限元软件应用经验。当他们不具备这些条件时,需要对其进行知识培训。知识培训包括常规的理论知识解释以及有限元方法实践。较为有效的培训方法有:讲授有限元知识;对某个有限元软件应用实践。这种培训方法可以使培训人员很好了解有限元知识,以及对不同有限元软件的掌握。

4 适航部门对基于分析认证的评估能力

适航技术人员的职责就是保证飞机能安全运行,利用分析来对飞机结构进行适航认证,适航技术人员有能力对飞机设计单位提供的分析结果的精确性和可靠性进行评估。对分析结果的评估根据以下事实:分析过程的记录和分析队伍的经验和能力;结构建模方法可靠性的依据,即分析人员提供以往对类似结构建模的实例;对软件功能可靠性评估措施;最后对分析过程的详细说明和记录。在技术层面,适航技术人员应该要求来自具有建模、分析和软件专业知识的第三方专家支持。如果不具备上述能力,则所有的分析过程以及分析结论也将得不到认可,那么对飞机结构刚度和强度适航认证只能通过试验来实现。

5 对开展基于分析适航认证的初步建议

基于分析对飞机结构进行适航认证在国外已取得初步成果,英国韦斯特兰公司民用直升机WG30就是通过分析认证取得适航资格。我国利用分析对飞机结构进行适航认证尚处在技术论证状态,还没有实质性进展,主要原因在于我国尚未建立基于分析的适航认证体系,对目前所使用的软件没有进行充分的测试和评估,也没有对结构分析人员形成一套建模分析资质考评方法。更重要的是,适航技术人员还没有能力利用分析结果对飞机进行适航认证。

在国内开展基于分析适航认证技术,需要建立一套基于分析对飞机结构强度刚度认证体系;成立有限元标准专业机构,负责制定有限元分析质量保证体系以及基于分析认证的流程;建立有限元测试题库,包括软件测试题库以及分析人员资质认证题库。对飞机设计部门,为了实现利用分析对飞机适航性认证,要加大力度培养一批专业技术人员。需要对从事有限元分析的技术人员分析资质进行认定,建立这些人员技术档案。对适航认证部门来说,需要培养具有分析认证能力和经验的适航技术人员,对飞机设计部门提供的分析结果能作出正确的评估。

在飞机设计部门,需要加大力度发展有限元建模分析技术,保证有限元分析结果的可靠性。研发飞机结构疲劳、断裂、非线性分析技术,加快对现有分析技术的改进,研制以适航认证为目标的分析流程。另外,加大力度致力于对目前建模方法和分析方法的可信性研究,飞机设计单位有义务证

明他们所采用的软件已被充分验证,建模技术相当可靠以及对所有类型的分析任务配备合格技术人员。

目前,飞机适航验证仍以全机静力试验为主。由于机体外载荷,内力和最终应力分析确定受到分析方法的适用性和所使用的假设和分析模型的理想化的限制,迄今为止,还没有证明这些分析限制已减少到能够免除飞机静力试验的程度,但随着有限元建模和分析技术的发展并逐步成熟,经过试验考核的有限元技术将应用于飞机结构强度和刚度分析中。在民机适航认证中,以分析验证逐步取代部分物理试验验证,达到减少民机适航认证的物理试验量,缩短飞机研制周期,节省设计成本,提高我国民用飞机设计制造的竞争能力。

AST

参考文献

[1] National Engineering Laboratory. Quality Systems Supplement to ISO 9001 Relating to Finite Element Analysis in the Design and Validation of Engineering Products. National Agency for Finite Element Methods and Standards[S]. East Kilbride, Glasgow G75 0QU, UK: Department of Trade and Industry, August 1989.

[2] John Barlow. A Role Model for Quality Management in Finite Element Analysis[C]. The 70th Meeting of the Structures and Materials Panel of AGARD, Sorrento, Italy: April 1990.

作者简介:

吴存利,博士,研究员,主要从事计算力学、飞机结构强度等方面的研究。