

航空 CAE 发展的新机遇与挑战

岳中第

(中国一航制造所 研究员 政府特殊津贴专家, 100024)

摘要: 回顾航空结构领域 CAE 的发展进程, 包括航空结构分析、优化设计、飞机设计制造辅助集成系统等研制, 以及专业仿真到协同仿真的发展; 作者特别针对当前国家大飞机等项目对 CAE 发展带来的新机遇, 提出了航空结构领域 CAE 发展面临的挑战与某些数字化瓶颈问题。

关键词: 航空 CAE, 统一模型关联技术, 数字化瓶颈, 精细研发

1 航空 CAE 发展的里程碑

计算科学, CAE(Computer Aided Engineering), 是确保国家安全、竞争力及长期领先地位的一门科学。它的分支 - 航空 CAE, 作为飞机计算结构力学、流体力学、材料力学、电磁学在航空航天工程结构应用领域的技术集成, 早已成为我国先进航空航天产品设计制造的核心支撑技术。伴随着航空科学家应用计算机处理复杂航空工程问题能力的普及与提升, 航空 CAE 领域始终聚集着大量的科技精英, 在先进航空产品设计制造的各个领域自主创新, 艰苦攻关, 其业绩惊天动地, 为谱写共和国兰天的辉煌, 辐射着光和热。

1966 年, 当笔者毕业清华大学工程力学数学专业, 有幸进入中国飞机结构强度研究所工作时, 那正是手摇计算机时代。翻开飞机结构强度史[1]可以看到, 在飞机结构设计制造领域, 真正意义的航空 CAE 始于 70 年代初期。它几乎在一张白纸上起步, 经历了从孤岛软件开发、应用系统集成、国内外技术合作交流与多学科、多物理场、多集成系统协同仿真等几个阶段的发展飞跃。1971 年, 在国内仅有几台计算机的情况下, 中国航空科学技术研究院组建了飞机结构“中央翼区结构强度”课题组, 我们首先以某飞机的试验模型为研究对象: 用盒段模型研究机翼结构分析方法; 用薄壁组合十字架结构探索飞机的整机结构分析方法。紧接着, 该课题组又以新上马的干线飞机“运 10 翼身结构对接区应力分析”为工程应用目标, 探索大型飞机结构的整体分析技术。课题组采用有限元分析方法及子结构分析技术, 成功地实现了运十飞机中外翼、中央翼、中机身以及翼 - 身对接组合结构的有限元应力分析。这期间, 艰苦之状难以言表, 但运 10 飞机在结构设计、试验与试飞等环节的成功, 明显地宽慰着科技人员的辛劳。基于有限元分析方法在航空结构分析领域的初步成功应用, 从 70 年代中期到 90 年代末的这 20 年间, 在国防科工委的正确领导下, 航空部门先后组织了一系列重要的航空结构设计分析软件系统的研制, 填补了我国这个领域的多项空白, 应用于多种新型号, 获得了重大的技术进步与成功。下面, 仅对它的重要里程碑进行简述。

1.1 里程碑之一 - 飞机结构分析优化系统的诞生与发展

航空结构分析系统

1976 ~ 1979 年, 以著名计算力学专家冯钟越为主任工程师, 研制成功航空结构分析系统 HAJIF-I。这是我国航空领域第一个大型结构静力分析系统[2]。系统采用多级子结构分析方法与大型稀疏矩阵的多级超元矩阵存储处理技术, 通用性强, 能够分析大、中、小各种类型飞机的复杂结构在气动、集中力和惯性载荷作用下的变形与应力。该系统通过鉴定后, 在两年内先后成功应用到四种在研的飞机型号上, 实现了飞机部件与整机结构的变形与应力分析。从性能上看, 求解大型复杂结构的规模、效率、精度, 都能与国外同类软件相比较。

1980 ~ 1981 年, 以著名颤振专家、工程院院士管德为主任工程师, 研制成功航空结构动力分析系统 HAJIF-II。这是航空领域第一个大型结构动力分析系统。系统采用同时迭代法及多级子结构动力综合技术, 具有结构固有振动特性计算、考虑主动控制系统的颤振计算和部分突风响应计算等功能, 与美国 1977 年公布的 NASTRAN 版本的动力部分大体相当。该系统在五种在研飞机型号上先后获得成功应用。

1982~1985年，以著名计算结构力学专家李希明为主任工程师，研制成功航空结构非线性分析系统 HAJIF-III。这是我国自行研制的第一个大型通用的结构非线性分析系统，主要为解决航空部门提出的日益增多的非线性结构分析问题。它采用了大型线性与非线性方程组的多种有效算法、特征值问题的多种解法与子结构分析技术，可以解决航空、航天及其他工程结构的静力线性分析、热应力分析、稳定性分析、大位移或大变形以及大位移情况下的弹塑性分析，也可用于新方法、新元素、新材料模式等方面的科学研究。该系统相当于国外 80 年代初期同类系统的先进水平。随后的继续开发，在航空动力学领域，成功研制出飞机结构振动环境预计系统 - VEP；在综合 HAJIF 系列功能的基础上，研制成功航空结构综合分析系统 HAJIF_X，其基本功能可以覆盖 NASTRAN 系统。HAJIF 系列软件先后获得包括国家科技进步一、二等奖在内的多项成果。

飞机结构设计优化系统

1979~1982年，以著名飞机副总设计师林梦鹤为主任工程师，研制成功飞机结构多约束优化设计系统 YIDOYU。早在 60 年代，黄玉珊教授提出“小展弦比机翼薄壁结构的直接设计法”和“力法 - 应力设计法”；70 年代初，钱令希教授提出“结构力学中的最优化设计理论与方法的近代发展”。这些理论和方法都为飞机结构优化设计指明了方向。YIDOYU 系统的应用对象是带操作面的翼面结构，考虑机身上的弹性支持和刚性外挂，其约束为静强度、位移、静气动弹性要求及一个给定情况下的颤振速度及结构最小尺寸。它可以用于新机研制的方案论证和飞机翼面结构打样设计。这是航空领域第一个飞机结构优化设计系统。

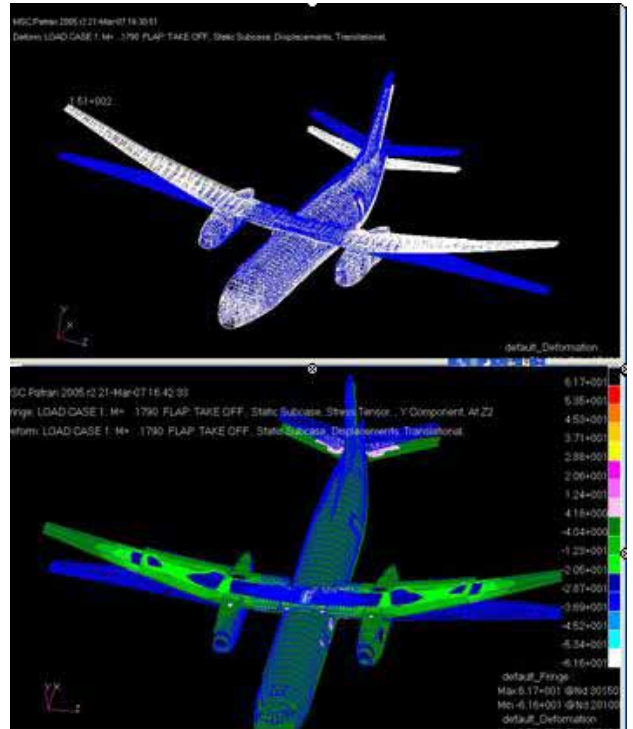


图 1 飞机整体结构应力与变形云图

1990~1995年，以著名计算力学专家丁惠良为主任工程师，在 YIDOYU 基础上，研制成功 COMPASS (COMPOSITE structural Analysis and Synthesis System)，它集成气动、结构、气动弹性、模型化和图形前后置处理于一体，可用于飞机初步设计与详细设计阶段的优化；其快速有限元建模、分析设计综合功能、气动弹性约束（含颤振）优化、复合材料铺层设计、解析法求解等方面居国内领先水平，达到 90 年代中后期国际先进水平，引起国外极大兴趣，先后与德国、印度建立技术合作关系。

1.2 里程碑之二 - 飞机设计制造初步集成系统

中德航空科技国际合作 - CADEMAs 系统工程

仅基于专业软件开发，对飞机设计是远远不够的。1983~1988年，航空部选派 CAD\CAE\CAM\PDM 方面能代表国家的精兵强将，组织了以著名航空制造技术专家李声远为总经理的具有 20 名各方面专家的中方技术团队，与德方的对等专家，在异国他乡开展航空技术合作，共同开发航空 CAD\CAE\CAM\Application Support 集成系统，简称 CADEMAs 工程，其开发内容有五方面：

- 1) NC - 改造与集成数控软件 (APT4 及 NCG-2/NCG-3)；
- 2) CAD - 开发飞机外形设计系统 (LOGICA) 及与 CAD 的集成接口；
- 3) CAE - 基于 NASTRAN，开发 CAE 的气动与结构分析接口；
- 4) DB - 基于 ORACLE，开发工程数据库的集成工具 DATA-BUS；
- 5) ST - 开发工程应用的系统集成支撑技术，包括图形接口及集成工具等。

在此期间，中方研制队伍最多发展至 40 人，国家付出较高费用。系统获得的基于国际先进水平的开发平台及二次开发的关键技术与诀窍，包括 CAD\CAE\CAM 方面的应用软件，直接推动着我国若干新机的研制，使航空 CAE 在更高水平上发展。

飞机设计应用集成系统 - CIEM (Computer Integrated Engineering Management)

1986~1995 年，以著名飞机设计师沙正平为主任工程师，航空部门组织全行业 CAD\CAE\CAM\PDM 方面的 100 多位专家，基于我国军机设计的实践经验，利用 CADEMAs 的国际合作成果，开发一个初具规模且交互实用的飞机计算机辅助设计、辅助分析、辅助制造集成系统（CIEM）。该系统集成飞机设计各主要专业及主要研制阶段的应用程序系统，首先实现了飞机总体设计、气动设计、结构强度分析、气动弹性、辅助制造与工程管理等方面的应用程序集成，为新机研制提供了一个强有力的工具。

先进设计技术的引进、移植与消化

随着改革开放，我国已经能够引进国外某些较先进的通用设计分析软件，其应用功能可覆盖飞机设计的多个应用领域：总体、气动、结构、强度、飞控、燃油、系统、起落架等功能软件。其中，结构强度功能主要是集成商用气动软件与结构分析软件（NASTRAN）的前后置处理程序。如图 1 所示的飞机整体结构应力与变形云图正是这些商用软件的典型应用。90 年代初，航空部门组织移植消化工程，就是利用 CADEMAs 部分成果，特别是数据库及图形支撑技术，将引进的先进通用软件成功地移植、集成到 IBM 计算机，为当时的民机和军机设计服务，为航空 CAE 的发展与工程化起到了“洋为中用”的推动作用。

回顾我国航空 CAE 自主创新发展的重要里程碑，可以清楚地看到，我国航空科技工作者完全具有聪明才智、自主创新、自强自立于世界民族之林的能力。只要全心全意地依靠它们，精心组织，我国航空结构 CAE 是可以而且能够大有作为的。中德航空科技合作使我们感受最深的是：如何以科学态度选择与构建先进的数字化设计制造系统的开发平台；在方案论证阶段，最重要的工作是对可能构成未来系统框架的各个工程应用子系统进行认真评测；整个系统工程开发有两个法则则是明白无误的：一是鲁迅先生提倡过的“拿来主义”，二是“踏着巨人的肩膀”攀登。

2 新机遇、挑战与从协同仿真到精益研发

自 90 年代以来，航空 CAE 作为国家数字化工程的重要核心组成部分获得了巨大的发展。飞机数字化设计、数字化制造、数字化管理及虚拟现实技术，均变成了现实。随着综合国力增强，随着多种新飞机型号蓝天翱翔；航空科技实力在国内外大交流、大学习中持续沉淀、积累、成长、壮大；中国航空科技工作者终于有了争创“世界一流”的梦想、勇气与物质基础；新一代航空发动机、战机、轰炸机、强敌机、军民两用直升机、地效飞行器等都有了可鼓舞人奋进的发展蓝图。特别是，国家大飞机项目集中体现出的国家意志与时代要求，已经不可避免地落到今天的航空科学家肩上。航空 CAE 的发展跨过了新的里程碑 - 从协同仿真到精益研发的新时代。这是 50 多年来梦寐以求、前所未有的大好机遇！

然而，机遇与挑战并存。我们必须清晰看到，尽管在计算机软硬件条件、国内外通用的工程应用技术以及设计制造的硬环境（诸如，高级办公设施、宽大大房、各种数控机床及引进设备等），我们与国外相差不多，但是，在飞机与发动机的数字化设计、制造及管理核心支撑技术方面，与波音、空客的发展水平相比，他们在前面早已发展数十年，我们既不在一个起跑线，也不在一个平台。我们现在缺乏的往往已经不仅是经费，而是航空 CAE 这样的核心支撑技术。尽管“中国制造”在世界有些铺天盖地，然而航空领域却例外，即是在中国大地上也不能轻而易举地书写，更不用说“中国创造”。著名飞机设计专家崔德刚研究员总结到：要发展大型民用客机，必须首先突破 10 项关键技术，诸如：（1）民用大型飞机总体设计技术；（2）现代民用飞机的气动特性预测方法；（3）民用大型飞机的噪声预测和减噪措施；（4）民用大型飞机载荷确定技术；（5）高效结构和强度设计技术；（6）长寿命高可靠性结构设计技术；（7）民用大型飞机防雷设计和抗高强度辐射设计；（8）多轮起落架设计技术；（9）先进复合材料结构设计技术；（10）适航审定的特殊要求的鉴定技术等。毫无例外，这些都是航空 CAE 要急需解决的重大课题。由于我国航空 CAE 长期处于相对封闭研发及传统专业学科仿真的技术水平，而发达国家却早已迈进多物理场、多专业、多子系统的数字化协同仿真时代。对于协同仿真及某些专业的技术环节，我们也许不是外行，但是纵观飞机数字化设计制造的全过程，我们容易发现，我们研发、工程应用与技术成熟度都无法让人宽心。就以大飞机使用先进复合材料进行结构设计为例，波音、空客已经用到占机体结构总重的 50% 上下，而我们在新机研制中使用复合材料的总重在 10% 上下。虽然说我们不能以某种材料的使用论成败英雄，但是充分发挥先进复合材料优异的性能强度比一直是提高新飞机技战术性能所追求的关键技术。因此，我们要真

正实现飞机设计制造技术的飞跃，必须要构建一个与国际航空 CAE 接轨的协同仿真数字化支撑平台，这才是大飞机项目与其它许多飞机新型号要走向“世界一流”的核心基础技术。航空 CAE 确实迎来了大发展的新里程碑！但回顾 40 余年的经历，深感这是一个具有何等挑战性的重要而艰巨的事情！

我国从事信息化仿真技术的领军企业对搭建航空 CAE 的企业级协同仿真平台早就进行了较长的深入研发。2007 年前后，已经推出了一些企业级协同仿真的支撑平台 - PERA[3]，提出了由协同仿真、技术创新和质量管理三大体系构成的精益研发技术体系[4]。协同仿真的目标有三：一是提高数字化设计制造技术水平与数值仿真分析效率，使仿真作用最大化，充分发挥工具、流程与数据的潜能，完成以前无法完成的作用；二是降低仿真工作难度，让尽量多的人可以驾驭仿真技术，让新手更早地进入高产能状态；三是将仿真分析引入到企业产品生命周期的整个阶段，让尽量多的飞机设计制造工程师愿意且有可能介入到仿真流程，从仿真分析成果中受益。针对航空航天这类复杂数字军工产品及对协同仿真内容的深入解析，这个平台可能面临的技术问题，或者需要给出技术解决方案的，主要有：多学科优化、多场耦合分析、电磁场分析、流场分析、温度场分析、结构静动疲分析、多体动力学分析、工艺仿真与制造过程模拟、电路仿真、液压仿真、虚拟试验仿真等等。同时，用户对这个协同仿真平台的通用功能，也提出六个方面的技术要求：(1) 仿真项目管理；(2) 仿真流程集成；(3) 仿真技术集成；(4) 多学科仿真；(5) 仿真数据管理；(6) 智力资源管理。

总之，面对航空 CAE 发展的崭新机遇及实际工程的技术要求，直接推动着航空 CAE 从专业子系统集成仿真到多专业协同仿真的发展，从协同仿真走向精益研发技术体系指明的发展道路。这必将强力助推我国先进的航空设计制造技术健康地向前发展。

3 航空 CAE 发展的若干数字化瓶颈

面对前所未有的发展机遇，航空 CAE 要发展还必需克服各个专业学科领域留下的数字化瓶颈。限于篇幅及笔者的自身经历，这里仅浅谈飞机结构强度方面的若干数字化瓶颈问题。

3.1 关于飞机设计制造数字化模型的关联技术

飞机设计必须集成总体、气动力、结构强度、气动弹性等多专业的应用程序。它的设计过程(方案设计阶段、初步设计阶段、详细设计阶段)传递的是各个专业学科的数字化模型。这里，气动模型、结构分析模型、数控工艺制造模型，都是在飞机结构模型基础上派生建立的。飞机结构的外形及进气道的内表面等是总体气动仿真模型的技术依据。而结构强度计算模型却是以飞机零件与构件为技术依据建立的有限元网格模型 (FEA)，而构成这个模型的各种元素具有各自零件、构件的材料与物理特性属性。因此，建立各类零件、构件 (包括各腹板梁、肋腹板、蒙皮等) 与 FEA 的关联技术，建立蒙皮、进气道与相应总体气动数字模型的关联技术，建立与数控加工模型 (CAD 模型) 的关联技术，成为总体气动集成仿真、结构强度设计优化及数控加工仿真的基础技术。

传统上，飞机三维实体几何模型 (CAD)、气动网格模型 (CFD)、结构分析网格模型 (FEA) 以及隐身设计分析模型、热分析模型都是按专业仿真各自建立的，他们的仿真实论、模型简化与建模方法都不相同，目前我们还没有真正的规则或协议进行关联与规范。因此，飞机结构部件与整机 CAD/CAE 之间的数据转换需要建立应有的规则，先进的数字化设计与工艺制造之间也需要建立有效的协议、标准与转换工具。

目前，飞机设计仿真软件要集成，仿真流程数据链要连续，在业内是有高度共识的。设计阶段、制造过程的数字化模型转换，从一个工艺到另一个工艺的数据链管理，需要严格的标准与协议，目前也正在成为国家数字化工程的基本内容。因此，在搭建飞机数字化协同仿真平台时，必须首先面对各专业从协同仿真到精益研发的各种模型之间的关联技术。显然，这是一个重要且复杂的数字化瓶颈之一。

3.2 飞机机体结构的 FEA 快速建模技术

采用通用 CAD 系统，就能实现 CAD 快速建模。例如，采用 CATIA 系统就能很好地实现飞机机体结构的数字化建模和予装配。但是，面对设计并行化与模型数字化，实现飞机机体结构的有限元分析 (FEA) 快速建模，并与数字化的 CAD 模型、气动载荷模型紧密集成，却一直是飞机结构设计师最关心的重要基础技术之一。CAD 软件商向我们推荐的整体解决方案，即 CAD 实体模型自动转换为三维 FEA 模型，在零件实

体一级也许可以使用，但在解决机体结构的部件或整机一级，这种方案往往导致几百万、甚至上千万节点的 FEA 模型，而最终的分析结果却无法让专家们相信它的正确性。在这种解决方案里，薄壁组合结构被视为三维连续实体结构，“组合”变成“铸合”，“薄壁”变成“实体”，使飞机结构的传力特性受到扭曲。事实上，我国航空 CAE 专家利用自己创造的“板杆梁”理论，解决了飞行器这类薄壁组合机体结构的整机分析，建立了机体结构 FEA 建模的固有力学简化方法[5]，在航空航天领域得到广泛认同与应用。

我们“十五”期间从事的武器装备数字化建模项目，就是基于 CAE_X 平台进行二次开发，探索并建立了飞机机体结构 FEA 快速建模的参数化特征技术及原型系统：既能实现 CAD/CAE 的紧密集成，又能对机体部件结构的 FEA 模型自动生成三维节点坐标、单元节点编号、材料特性与物理特性数据等。系统建立了机体典型特征结构的模型程序库、材料库、型材库，开发了友好的用户界面。图 2、3 表示一组飞机翼身特征结构的组合模型。图 4 展示机翼复合材料结构的交互建模。图 5 展示飞机标准型材数据库的调用，元素的物理特性数据通过人机对话实现定义。

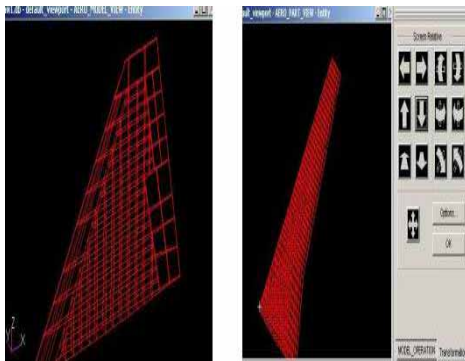


图 2 某军机与民机翼的特征组合模型

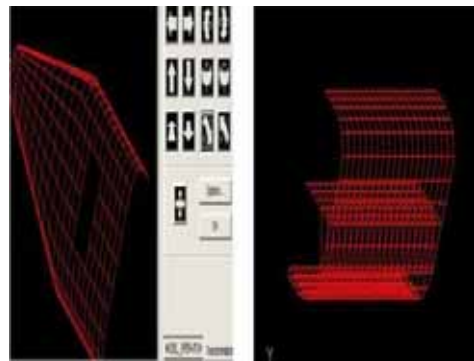


图 3 模拟机身的特征组合模型

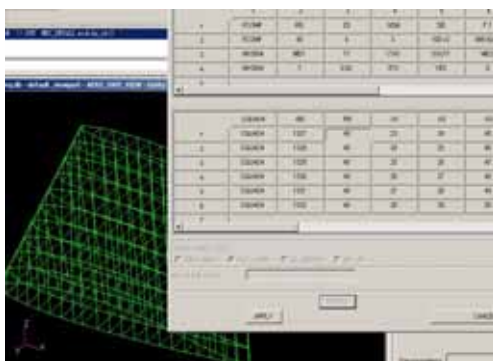


图 4 机翼复合材料结构的人机交互建模



图 5 基于产品型材特性库的元素编辑

2003 年国力调查报告表明，某知名设计所面对一种新机，建立 CAD 模型，采用 CATIA，2 个月就完成了；但是，在某 CAE 平台建立整机 FEA 模型，却需要 18 个工程师工作一年半之久。

实践表明，FEA 快速建模的参数化特征设计技术，既能有效地缩短 FEA 建模周期，也能体现飞机计算结构力学的理论与实践。只要我们将支持飞机方案设计的 FEA 快速建模的原型系统工程化，不仅从原型上、更从工程实践上加以认真总结，可以直接缩短新机设计的周期。因此，这个瓶颈是能够变通途的。

3.3 飞机机体结构的数字化结构强度校核

这是一个飞机结构整机分析与细节分析的集成仿真问题。整机结构分析完成后，细节结构的强度校核才能开始。国内外如此。但是，我们占用人力多，周期长。某知名设计所，整机结构分析后，各结构件的强度校核，需要 20 多个工程师，工作 1~2 年之久；如果方案设计要改进，原则上又要花费更多的人力与时间。在中德科技合作中，我们早就看到，在上世纪 80 年代欧洲就已经建立较完整的飞机“梁-壳-长桁”强度校核系统。而在我国支撑飞机结构设计的强度细节校核软件，其目前的效率实在难以令人满意，制约着我国飞机数字化设计的周期长短。

3.4 飞机制造工艺的数字化仿真与制造过程的管理

飞机结构的高新性能是与新材料、新工艺的大量使用密不可分的。但是，这些先进的制造工艺是通过先进的数字化 CAE 模型，进行制造过程的数值仿真，并辅之以少量必需的实物验证试验才能获得。我们仅以广泛应用于空天结构的先进高压容器 - 金属内胆复合材料全缠绕气瓶设计与制造为例，说明数字化设计制造的特点和要求。根据 ISO11439 要求，它需要：建立可用的材料非线性分析方法与流程；建立正确的弹-塑性、应力-应变模型；建立多纤维缠绕层构成的材料本构方程与平衡方程，以及分析纤维缠绕张力作用下的预应力等。这就要求正确地建立各复合材料层的本构关系；对于金属内胆，要采用金属材料双线性各向同性强化模式；必须正确地应用预应力技术。这样，就能带来一系列静强度和疲劳强度上的优点。

研制某航宇产品的实践表明，我们基于 ANSYS/APDL 二次开发的 CAD/CAE 软件与美国知名高新技术咨询公司(HEI)基于 ARGOR 开发的软件，针对同一产品的几种不同设计与制造参数，进行七种载荷工况的非线性分析，能够得到相同工程精度的数值结果。图 6、7 分别是产品封头过渡区结构的缠绕模型与局部应力云图。它精细地表明，具有不同缠绕厚度和方向的各个结构层应该具有不同的层间应力状态。

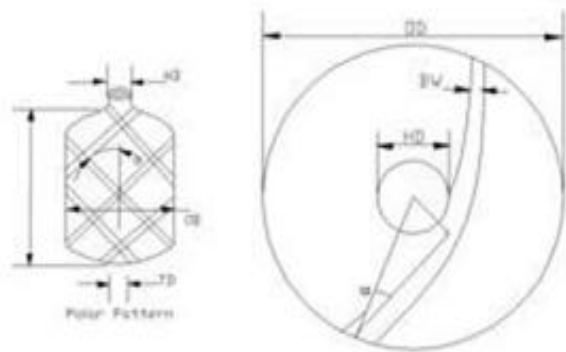


图 6 空天领域高压容器缠绕示意模型

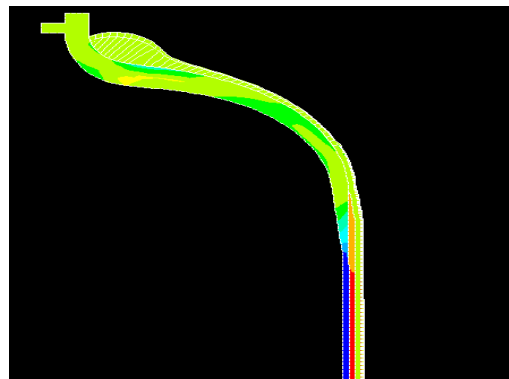


图 7 封头区域的应力分布云图

“十五”期间，基于数字化设计制造要求开发的 CNG - 3 产品 CAD/CAE/CAM/PDM 集成技术平台，实现了产品设计制造过程数据链的集成管理。这一仿真技术，对于飞机机体结构（如进气道、机翼机身结构）及空天生命保障系统的复合材料铺层与缠绕设计，无疑具有一定的工程实践意义。但是，这毕竟是一个很局部的制造环节的仿真技术。对于飞机结构数字化制造过程涉及的 CAE 仿真技术，既传统又新鲜，往往需要进行工程力学数学方法的研究。飞机的部件及整体结构设计多采用线性结构分析（线性静力学与动力学），个别环节用到非线性结构分析。但是，制造过程的 CAE 仿真，涉及多是非线性（或非常非线性）结构分析，例如超塑成形工艺等，方法成熟性需要理论支撑与试验验证，过程的复杂性需要程序集成、协同仿真和数据链管理。以高强易脆材料的大型整体构件的高速数控切铣工艺为例，机床与构件的颤振问题是首先要解决的工程力学问题。多至数十个槽腔的加工路线的选择，机加工工艺参数的确定与优化，往往都是非常困难的力学数学方法问题，既需要有理论上的创新，又需要有试验与检验上的创新，既要解决整体复杂构件的变形问题，又要研究加工部位细节结构的应力分析问题。这些均需要在理论与实践的结合上取得大的突破，均需要协同仿真与精益研发技术体系的实施与完善。

参考文献：

- [1]飞机结构强度专业史，中国航空工业史丛书，1991 年。
- [2]岳中第，多重子结构分析的超元矩阵方法，航空学报，第 1 卷第 2 期，1980。
- [3]田锋，仿真 - 企业协同的最后一战，数字军工，总第 3 期，2007 年第 3 期。
- [4]张国明，精益研发时代来临，数字军工，总第 7 期，2007 年第 1 期。
- [5]岳中第，航空组合结构的有限特征建模技术，计算力学学报，第 14 卷增刊，1997。

作者岳中第 简介

自然科学研究员，国务院政府特殊津贴专家。1940年9月生。1966年毕业于清华大学工程力学数学专业；1969~1983年在中国一航强度所从事航空结构分析系统研制；1984~1987年参加中德航空国际科技合作，任中方专家工作队副队长；1989~2006年在中国一航制造所从事飞机 CIEM 系统工程开发及 CAD/CAE 集成技术研究。从事航空 CAE 研发 40 余年，本文涉及到的几个里程碑及众多项目，正是笔者对同行、战友共同事业的综述，也是对自身征途的感悟和对航空 CAE 未来发展方向的技术探讨。笔者获得近 10 项部级与国家级科学技术成果进步奖。现任北京偌维特机械科学技术发展中心特聘专家及某高科技有限公司高级技术专家。

通讯地址：北京市朝阳区西大望路甲 1 号

温特莱中心 A 座 5A 层

邮编：100028

工作电话：Tel：86-10-65388718-187

Mobile: 13693093270

E-mail: zhongdi.yue@ansys.com.cn

论文类别：本论文可分在 6 类“**航空航天结构**”或者 1 类“**力学分析与计算**”。

* 予研项目：飞机制造业数字化工程子项目

作者简介：岳中第(1940-)，男，四川人，自然科学研究员，国务院政府特殊津贴专家，长期从事航空结构分析技术研究 (zhongdi.yue@ansys.com.cn)。