

# HyperWorks 复合材料 CAE 仿真建模、分析与优化

## CAE Simulate Modeling, Analysis and Optimization of HyperWorks for composites

澳汰尔工程软件(上海)有限公司 王钰栋



王钰栋

毕业于北京航空航天大学, 现任 Altair 公司北方区技术经理, 拥有 10 年工程仿真经验, 在飞机结构分析优化, 包括复合材料剪裁设计方面有丰富项目经验。

复合材料比强度、比模量高, 耐腐蚀、抗疲劳, 所以在结构重量要求越来越严格的航空航天领域得到了越来越多的应用。但复合材料在设计制造中还有很多难点, 设计中需要大量试验件测试, 成本很高。CAE 仿真及优化是相对低成本解决各种技术难题, 合理设计复合材料, 缩短研

应用 Altair 公司的 HyperWorks 工程软件平台在复合材料 CAE 建模、分析与优化方面的功能, 可以让飞机设计师缩短设计时间, 提高结构性能, 并降低整体重量。

发周期的重要技术手段。

复合材料的大量应用是飞机结构设计中的一个主要趋势。根据空客的数据, A350XWB 全机使用 53% 复合材料。其中 A350XWB 机翼翼盒加筋下壁板长 32m、宽 6m, 由碳纤维增强复合材料(CFRP)制造, 是目前世界上商用飞机中最大的复合材料部件。波音 787 客机全机也使用了 50% 的复合材料。从上述二者最新型号飞机所使用材料可以直接看出, 复合材料已经是新型干线飞机主要使用的结构材料, 尤其是纤维增强铺层复合材料和蜂窝夹芯复合材料。限于篇幅, 本文主要针对这 2 种常用的复合材料进行讨论。

Altair 公司是世界领先的 CAE 仿真软件提供商和工程咨询服务公司, 其享有盛誉的 HyperWorks 工程软件平台<sup>[1]</sup>为复合材料有限元仿

真和设计优化提供了完整的解决方案。在 Altair 和波音、空客等所分别合作建立的航空优化中心, 双方的工程师在涉及到波音 787、空客 380、A350XWB 的具体项目中, 大量使用了该技术。通过 HyperWorks 中的前处理软件 HyperMesh、显式非线性有限元求解器 RADIOSS、结构优化创新设计工具 OptiStruct 以及仿真后处理软件 HyperView, 为客户提供了直观的可视化建模、精确的有限元仿真、创新的优化设计以及高效的仿真数据处理。Altair 复合材料的仿真优化功能, 已经在波音、空客、庞巴迪<sup>[2]</sup>等国外航空企业得到了广泛应用, 国内一些航空主机公司及研究院所也已经将这些技术应用于型号项目上。

### 复合材料建模技术

在现代飞机研发过程中, 有限元

模型规模越来越大,网格越来越精细,模型管理越来越复杂,特别是复合材料在飞机上的大规模应用使得建模复杂度大大增加。HyperMesh 是一个高质量高效率的有限元前处理器,提供了高度交互的可视化环境,帮助用户建立产品的有限元模型。HyperMesh 快速、高质量的有限元建模功能,在各行业受到众多用户欢迎。在航空领域,HyperMesh 用于整机建模、局部细节模型、振动模型、鸟撞模型等方面,可以大大提高效率,得到了众多航空企业的认可。

复合材料建模是 CAE 仿真分析之前重要的一步。根据分析的对象不同,建模方式有所不同。细节分析,例如重要的连接接头强度、钉孔强度等分析,通常需要建立三维实体网格。整体分析,例如机身、机翼蒙皮分析,需要建立二维板壳单元。复合材料 CAE 仿真还有很多其他特点。HyperMesh 如下这些优点,保证了航空复合材料快速、直观建模的需要。

### 1 直接的复合材料 CAD 接口

HyperMesh 直接支持目前全球通用的各类主流的三维 CAD 平台,用户可以直接读取 CAD 模型文件而不需要任何其他数据转换,从而尽可能避免数据丢失或者几何缺陷。直接支持的各类主流三维 CAD 格式包括: CATIA、UG、Pro/E、Parasolid、FiberSim、STEP、STL、PDGS、VDAFS、DXF、ACIS、IGES。

HyperMesh 不仅可以直接读取 CAD 数模,还直接支持航空企业常用的复合材料建模工具 CATIA CPD 和 FiberSim 所建立的复合材料模型,可以直接导入其所建立的复合材料相关数据,包括铺层形状、铺层顺序、铺层主坐标系、铺层角度、铺层厚度、纤维方向、材料数据等。能够读取设计师所设计的复合材料数据对 CAE 仿真建模来讲,是很重要的,这不仅决定了仿真工程师可以大量减少复合材料有限元建模的工作量,还大大

提高了建模的准确性,尤其是面对大型飞机常常几十甚至上百层的复合材料铺层的建模工作的时候。对于管理人员而言,软件的直接接口对于将设计、制造通过一体化的信息技术平台管理起来,并形成信息化的研发流程是非常重要的功能。HyperMesh 在这个方向领先业界其他软件,形成了独特的优势。

### 2 几何简化

航空企业建立的机身机翼等 CAD 数模,往往是用体的方式进行建模,但进行有限元仿真的时候,又是用板壳单元来模拟。所以必须将实体几何简化为曲面几何,然后才能进行有限元网格划分。HyperMesh 在几何简化方面,具有非常强大的功能,例如图 1 (a) 所示的实体 CAD 表示的加筋框,在 HyperMesh 几秒钟内就可以得到图 1 (b) 所示的简化几何。这对于航空建模而言,是非常方便和重要的功能。

### 3 复合材料的三维显示

复合材料,尤其是纤维增强铺层复合材料,在进行有限元建模时,更需要直观的建模界面。因为铺层本身是各向异性的,铺层形状、铺层角度、铺层厚度等等都会严重影响实际铺层的力学性能,如果建模稍有错

误,仿真结果可能完全不同。

HyperMesh 提供了专业的复合材料前处理模块 HyperLaminate。利用这个模块可以便捷地对复合材料模型进行创建、检查和编辑,直观定义每一铺层的厚度、角度及材料属性(纤维及基体),定义各种复合材料失效准则等。

HyperMesh 支持考虑铺层及其叠层顺序的定义方式,也就是 ply+stack 的复合材料铺层定义方式,把各个铺层按次序层叠起来,形成完整的层合板。采用铺层+叠层顺序的建模技术,可以方便地对复合材料层合板进行建模和编辑、三维显示和铺层方向显示等。Altair 独有的基于铺层的复合材料建模方式,可以直观地显示复合材料的铺层形状、顺序、方向等,所见即所得,和实际铺层完全一样,如图 2 所示。

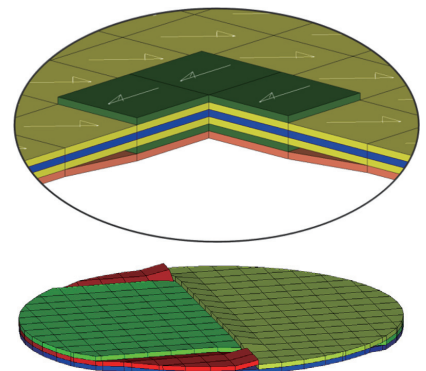
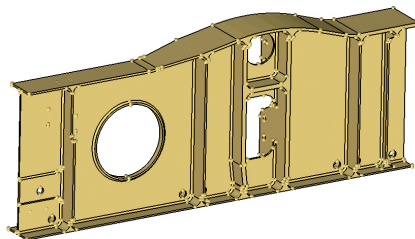
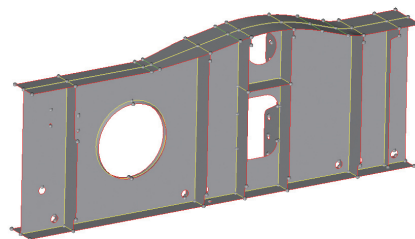


图2 关于铺层建模的复合材料层合板的三维显示



(a) 实体 CAD 加筋框



(b) 简化几何模型

图1 实体几何简化为曲面几何

### 4 复合材料二维模型到三维模型的转换

根据项目的进展,从方案阶段到初步设计通常是针对全机模型进行仿真,需要建立的是板壳梁模型,根据上述的铺层方式建立板壳单元的复合材料即可。到了详细设计阶段,需要对复合材料部件的主要接头部位、钉孔部位等做详细的研究,这时候板壳单元就无法体现复合材料铺层细节,需要建立实体网格进行细节研究。HyperMesh 可以将板壳单元

的复合材料模型转换为实体单元的复合材料模型,如图3所示,直接用于细节分析,方便了模型重用,减少了模型准备的时间。

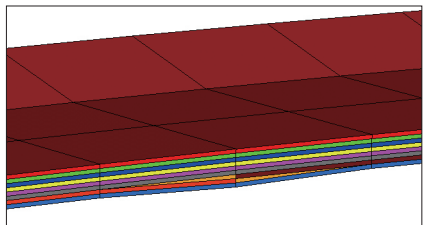


图3 板壳单元转换后的实体单元复合材料模型

## 复合材料分析求解技术

### 1 层合板 ABD 矩阵计算

HyperMesh 提供的专业复合材料前处理模块 HyperLaminate,不仅可以用于复合材料建模,还可以根据复合材料铺层情况,根据经典层合板理论,自动计算出层合板的  $[A]$   $[B]$   $[C]$  矩阵,以及等效的材料  $[G1]$ 、 $[G2]$ 、 $[G3]$ 、 $[G4]$  矩阵,可以将复杂的三维各项异性的复合材料层合板等效转换成简单的二维各向异性材料平板,实现模型信息保密,方便采用 PSHELL 单元建模。

### 2 复合材料冲击问题

HyperWorks 中的 RADIOSS 是功能强大的显式有限元求解器,拥有拉格朗日、欧拉、ALE、SPH 等算法,可用于结构的材料、接触、大变形等非线性问题和流固耦合问题的求解。RADIOSS 支持铺层复合材料定义和求解,提供多种单元和材料格式,可以精确地模拟各种非线性现象,如分层、失效、撞击破坏等;提供全面的失效准则,如 Tsai-Wu、Chang-Chang、Hashin、Puck、Yamada Sun & Ladeveze-Allix 准则,并且可以在一种材料中应用多种失效准则。

复合材料与航空常用的金属材料不同,金属材料会发生变形和屈服,但复合材料在破坏前基本都是线弹性变形,所以复合材料主要是脆性破坏,因此在设计上与工程师现

有的经验有很大不同。通过应用软件仿真,设计师可以对复合材料有更好的选择和设计。本节介绍利用 RADIOSS 计算的翼身整流罩的鸟撞分析。同样的分析方法也适用于前缘鸟撞、坠撞分析、水上迫降等高非线性冲击问题。

翼身整流罩为蜂窝夹芯复合材料。分析的目的在于理解鸟撞如何导致整流罩复合材料的损伤。RADIOSS 的鸟体模型用 SPH 方法建模,通过试验对标。鸟体模型以 180m/s 的速度和 30° 的攻角撞击整流罩。图4是鸟撞后复合材料结构沿铺层 0° 方向的应力应变分布及 Tsai-Wu 失效图,可以评价复合材料的损伤。

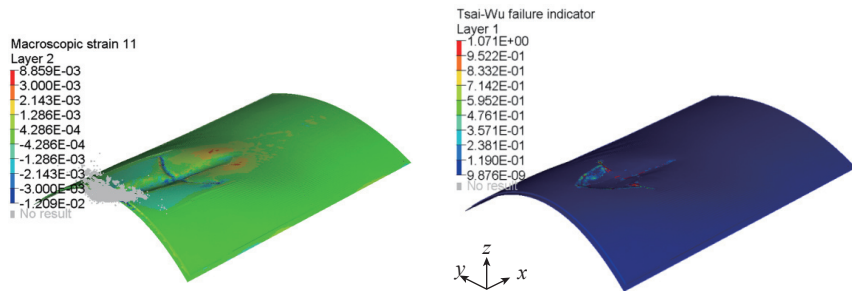


图4 鸟撞后复合材料结构的  $\epsilon_{11}$ (X方向)应力应变及 Tsai-Wu 失效因子分布

## 复合材料剪裁优化技术

在现代航空工业中,减轻设计重量和缩短设计周期是 2 个非常突出的问题。结构优化技术被证明在这 2 个方面是非常有效的工具。HyperWorks 中的 OptiStruct 在结构优化领域受到了众多航空企业的认可并大量应用。例如 2003 年,空中客车公司的供应商 BAE SYSTEMS 应用 OptiStruct 优化技术来设计 A380 机翼前缘翼肋,该项目优化结果让每架飞机减重 500kg<sup>[3-4]</sup>。该技术随后也应用于波音 787 机翼前缘翼肋项目。

针对金属结构,周明等开发的 OptiStruct 通常是通过两步法进行优化设计<sup>[1]</sup>。第一步,通过拓扑优化方

法得到概念设计;第二步,用参数优化和形状优化方法对设计细节进行进一步优化。复合材料给设计带来了许多可变因素,所以优化也更为复杂。针对纤维增强复合材料层合板,周明等发展了复合材料三步法优化方法<sup>[5-6]</sup>。第一步,运用自由尺寸优化,考虑到铺层方向,给出材料的总体分布,得到每个角度铺层的厚度分布;第二步,考虑到所有的制造加工约束和工况载荷,对每个角度铺层进行尺寸优化,得到每个角度铺层的精确厚度分布和没有角度的铺层数量;第三步,进行铺层顺序优化,得到满足制造工艺要求的铺层顺序。这种方法已经在 OptiStruct 中实现并为众多航空企业所应用。

### 1 复合材料机翼剪裁优化

本文用复合材料三步法优化方法对某宽体客机机翼碳纤维复合材料上下蒙皮进行了优化,如图5所示。共考虑了 10 个最严重工况,约束翼尖位移和转动,铺层方向为 0°、+45° / -45°、90°。

#### 1.1 第一步:概念设计——自由尺寸优化

考虑的制造工艺约束包括:

- 每个纤维方向总厚度  $\leq 10\text{mm}$ ;
- +45° / -45° 度均衡铺层;
- $8\text{mm} \leq \text{层合板总厚度} \leq 32\text{mm}$ ;
- 每一个纤维方向铺层的最小百分比  $\geq 10\%$ 。

自由尺寸优化后的 4 个纤维方

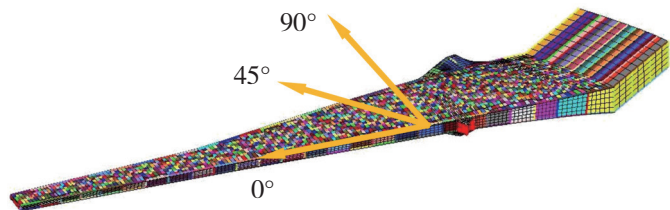


图5 某宽体客机复合材料机翼翼盒有限元模型

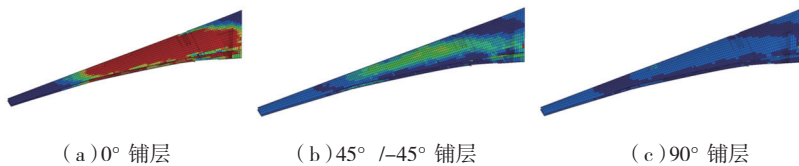


图6 上壁板蒙皮厚度分布

向厚度分布如图 6 所示。根据结果云图来看,0° 铺层最厚,+45° /-45° 厚度相同,满足均衡铺层要求,90° 铺层很薄。

自由尺寸优化之后, OptiStruct 会根据优化结果自动创建下一步优化用的有限元文件,包括优化后的剪裁形状、铺层厚度等信息,每个铺层角度默认自动分为 4 个铺层。如果需要,可以在 HyperMesh 中对剪裁形状进行调整。HyperMesh 还具有 OSSmooth 功能,可以自动光滑复合材料裁剪边界,减少手工调整的工作量。

### 1.2 第二步:详细厚度调整——铺层厚度尺寸优化

在本文中第二步优化约束条件和第一步相同。在实际设计中,这一步还应当考虑强度和稳定性的约束条件。

自由尺寸优化之后, OptiStruct 根据每个真实物理铺层的厚度,自动创建实际的物理铺层数量。本算例中共创建了 341 个物理铺层:

- 0° 铺层 174 层;
- +45° 铺层 57 层;
- -45° 铺层 57 层;
- 90° 铺层 53 层。

### 1.3 第三步:创建铺层表——铺层顺序优化

这一步主要是在保证制造工艺

和性能要求的前提下,创建铺层表。

例如这些要求包括:

- 每个纤维方向的最大连续铺层数量;

- +45° /-45° 均衡铺层;
- 确定夹芯和外层顺序等。

本文中,考虑的要求包括:

- 每个纤维方向的最大连续铺层数量 ≤ 3 层;
- +45° /-45° 均衡铺层。

OptiStruct 在优化后会自动创建铺层表报告。

优化结果满意之后, HyperMesh 可以将优化结果导出到 CATIA CPD 或 FiberSim 中。也就是说, HyperMesh 从 CATIA CPD 或 FiberSim 中导入最初的结构几何及铺层方向进行优化,优化后可以将详细铺层剪裁形状、厚度、顺序等数据

再返回到 CATIA CPD 或 FiberSim 中,对企业的研发、制造流程不造成影响,给设计带来更多价值。

如第一节所说, HyperMesh 可以很直观的三维显示铺层复合材料,并考虑单元偏置。最终优化完毕的下壁板蒙皮的三维显示如图 7 所示。进入详细设计阶段之后,还可以利用第一节介绍的 HyperMesh 功能,将铺层转换为三维实体网格,进行钉孔、接头的细节分析。

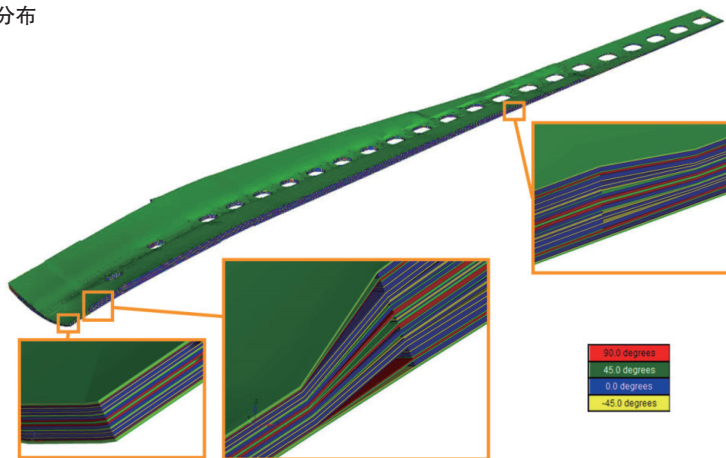


图7 下壁板蒙皮铺层的三维显示(厚度放大5倍)

## 总结

复合材料的大量应用给新一代飞机带来很多好处,也给 CAE 仿真工具带来新的挑战。应用 Altair 公司的 HyperWorks 工程软件平台在复合材料 CAE 建模、分析与优化方面的功能,可以让飞机设计师缩短设计时间,提高结构性能,并降低整体重量。根据航空企业的特点, HyperWorks 还可以通过软件接口,将建模、分析与优化过程嵌入企业现有流程当中,给企业现有飞机设计流程带来更多价值。

本文共有参考文献 6 篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 亦非)