

# 优化技术在波音787设计中的应用

Application of Optimization Technology in Boeing 787 Design

澳汰尔工程软件(上海)有限公司 邬旭辉 洪清泉



邬旭辉

毕业于浙江大学工程力学系。毕业后加入上海飞机设计研究所，从事ARJ21飞机的强度分析工作。随后加入Altair公司，从事汽车结构安全分析、航空行业优化应用支持等工作，现为Altair公司航空行业应用专家。

随着全球航空运输业的发展，飞机设计面临着激烈的竞争。为满足现代飞机更高的燃油效率的要求，飞机设计制造公司引入了大量复合材料，并对飞机结构进行优化设计。

波音公司787 Dreamliner项目面临着两大挑战，一是非常紧迫的开发时间；二是更高效的结构设计。

优化技术以其天生的优势改变了传统的设计流程，这种全新的产品设计过程就是优化驱动的产品设计过程。Altair公司OptiStruct产品为工程师在概念设计这一产品开发流程中的关键阶段提供了先进的技术支持，从而真正帮助设计师设计出创新和可靠的产品。

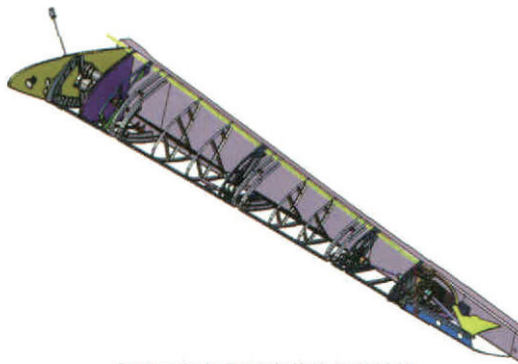
传统的设计显然已经没有办法满足这种需求，为此，波音公司考虑把优化设计技术集成到飞机设计流程中，以期在较短的时间内开发出高效的机构。

2003年，波音公司开始评估各大商用的优化软件，并最终选择了Altair公司的优化软件产品OptiStruct。Altair公司的优化软件产品OptiStruct是基于有限元的拓扑优化、形貌优化、尺寸优化和形状优化工具。针对飞机部件的设计，一般采用2阶段设计流程。第一阶段，用拓扑优化工具获得一个最佳结构布局设计方案。第二阶段，通过拓扑结构布局方案形成工程设计方案，用尺寸优化和形状优化工具，以稳定性和应力为约束得到细节设计方案。

## 优化技术在金属零件中的应用

Altair公司的优化技术大量应用在波音787的金属结构中，主要应用结构包括各个翼面的翼肋结构、龙骨梁结构以及各种接头等部位。

在787飞机机翼固定前缘翼肋结构中，首先应用拓扑优化找出最佳结构布局方案。为保证翼肋有相似的结构模式，在拓扑优化中要添加模式重复约束。每个翼肋进行拓扑优化时单独定义体积分数约束，并且设

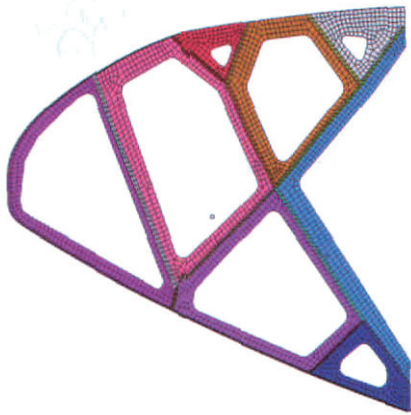


B787飞机机翼固定前缘翼肋结构

置最小结构尺寸约束。

经过拓扑优化后的结构重新进行工程设计,再进行尺寸和形状优化,以屈曲、拉伸极限和压缩屈服为约束。

通过 2 个流程的优化,最终得



重新工程设计后的尺寸和形状优化模型

出了翼肋的详细设计方案。以其中一个翼肋为例,其最终设计重量为 2.72kg,而相对应的波音 777 飞机翼肋重量为 4.54kg。通过统计得出,经过优化设计,各个翼肋结构相比波音 777 飞机相应翼肋的重量减少了 25% ~ 45%。

## 优化技术在复合材料中的应用

复合材料因其突出的材料性能,在波音 787 飞机上的应用总重量超过了 50%。为波音 787 飞机及其衍生型的系列化发展,波音公司利用 Altair 公司 OptiStruct 软件的复合材料优化技术对水平尾翼安定面盒段进行优化,开发各种设计方案。

理想的优化流程是一个从设计到分析到制造的循环过程。这个设计流程要求能够处理各种复杂情况,并最终提供一个精确、高效和鲁棒性理想的解决方案。波音公司对水平尾翼安定面盒段的复合材料优化流程主要包括优化和最终定义 2 个阶段。

### 1 优化阶段

(1) 根据制造约束对结构进行

分组。

(2) 优化 PCOMP 板壳单元的特性。

- 每个铺层方向(0°, 45°, -45°, 90°)不同的厚度;
- 设定层板特性与堆积次序无关。

(3) 层板中每个铺层方向百分比定义。

### 2 最终定义阶段

(1) 铺层层叠定义。

(2) 全部铺层的 PCOMP (G) 卡的定义。

• 每个铺层方向(0°, 45°, -45°, 90°)的铺层数。

• 按照单个铺层定义的整个层压板。

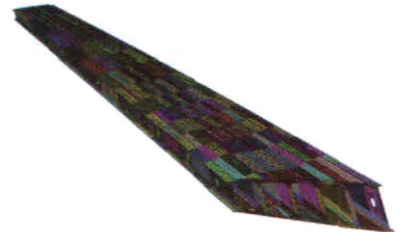
(3) 制造铺层的定义。

水平尾翼安定面盒段蒙皮和翼梁都是碳纤维复合材料,必须综合测试和制造的风险与成本,并考虑减重。安定面盒段优化设计目标为最小化重量,设计约束为层压板单层应变和层压板的屈曲。

在添加新翼梁模型到原水平尾翼盒段有限元模型的建模过程中,波音公司利用 Altair 公司功能强大的前后处理软件 HyperMesh 进行方便的操作。首先用 HyperMesh 强大的几何接口导入 CATIA V5 三维模型,对导入的几何抽取中面。为蒙皮和翼梁创建 Morph 约束,接着用 HyperMorph 功能移动所有中间翼梁为新翼梁腾出空间,复制翼梁并 Morph 到新的位置。对模型进行清理,重新组织部件和特性,重新划分新翼梁上下蒙皮的网格,然后把新翼梁连接到蒙皮,检查 Morph 边界所有连接,建立附近结构的有限元网格。最后创建新的载荷 RBE3 单元。

复合材料水平尾翼盒段优化计算的有限元模型包括 2 个静态载荷工况,4 个屈曲工况,共 10 万个单元。优化参数有 2200 个设计变量,40 个屈曲响应,50 万个应变响应(其中

400 个用于输出和监控)。屈曲包括蒙皮的屈曲和翼梁腹板的屈曲。设计变量是每个 PCOMP 卡片 4 个方向(0°, 45°, -45°, 90°)铺层厚度。



添加翼梁后的有限元模型

从计算结果观察得知,优化设计在屈曲和应变控制之间取得平衡。水平安定面盒段翼梁的增加可以减少蒙皮尺寸,从而达到总重量减少的效果。在设计约束范围内的弹性屈曲为复合材料提供了一个巨大的减重机会。Altair 公司 HyperWorks 软件为更快捷、更精确的优化设计方案提供了一个卓越的平台。

## 结束语

优化技术自问世以来,在航空航天、机械、船舶、微电子和新型材料设计等领域得到了广泛的应用,各种产品实现了前所未有的创新设计。面对飞机部件的大尺寸以及飞机设计中非常复杂的边界和载荷条件,以应变能为基础的拓扑优化技术结合尺寸优化和形状优化技术起到了非常好的效果。在波音 787 飞机项目中,波音公司成功应用 Altair 公司 OptiStruct 软件优化技术,大大缩短了设计周期,并且其设计优化方案高效稳定。

更关键的是,优化技术以其天生的优势改变了传统的设计流程,这种全新的产品设计过程就是优化驱动的产品设计过程。Altair 公司 OptiStruct 产品为工程师在概念设计这一产品开发流程中的关键阶段提供了先进的技术支持,从而真正帮助设计师设计出创新和可靠的产品。

(责编 依然)