

ESAComp 复合材料结构设计的专用软件

Markku Palanters, Compponeering 公司, 芬兰, 赫尔辛基

CAEDA 编译

简介:

复合材料层合板的设计过程存在着同传统金属结构设计不同的阶段。例如, 复合材料的结构设计有许多种可能的材料组合, 而且, 材料的各向异性力学行为在设计阶段是能通过选择特定的纤维方向和叠层次序就确定了的。虽然有限元程序能够用来对复合材料进行分析, 但是却不能够涵盖所有涉及复合材料具体设计和分析方面。因此, 还需要专业化的复合材料设计工具来对复合材料进行设计。一些比较先进的设计工具, 如本文中涉及的 ESAComp 软件, 同有限元软件包结合起来, 组成了复合材料结构设计过程的整个部分。

关键词:

复合材料, 复合材料结构, 层合板, 夹层结构, 分析, 设计, 软件, ESAComp

1. 复合材料的设计需要软件工具

在很多方面, 复合材料的结构设计同金属材料结构设计都存在着差异。在设计阶段纤维增强复合材料结构和夹层结构的力学性能就已经被确定下来。通过选择不同的材料、铺层角和叠层次序可以无限设计出具有不同力学性能特征的复合材料来。要充分利用复合材料优异的比刚度、比强度就需要非常强调复合材料的设计工作。

通过使用各向异性壳单元, 所有的主流有限元软件对复合材料结构分析都提供了很大的帮助。但是, 在复合材料的初始设计阶段对整个结构进行有限元分析的起始准备工作, 包括材料种类的选择、层合和夹层结构的设计以及层合板铺层方式设计, 有限元软件的实用性不大。当在层合板结构的不同层的级别上来对复合材料行为进行细节研究时, 有限元软件包提供的后处理能力尤其有限。这也再次说明了专业复合材料分析工具的必要性。

从文件输入\输出的内部代码方式到电子数据表格的应用和完全交互式视窗程序, 许多的软件工具被开发出来对层合板进行分析。当前一些比较高级的软件工具已经从基本的层合板分析发展到了对类似梁、板和夹层面板中复合材料层板的连接等这样的结构单元进行分析。一些层合板分析工具可以为商用的有限元软件提供界面。

本篇文章的基础是在开发 ESAComp 软件过程中获得的经验。接下来的章节中, 将 ESAComp 软件作为先进复合材料设计软件中的一个典型, 对其所具有的设计能力进行介绍。并在最后部分讨论了复合材料设计工具同有限元程序的系统问题。

2. ESAComp 软件

2.1 背景

ESAComp 软件作为欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的一个资助项目在 1992 年开始运行。该课题的目标是实现一个统一界面下可以包括所有必需的层合板分析、设计能力的软件工具。该软件系统同样也应该能够被终端用户进行扩展来满足在基本系统中不能够预见或者包括的某些特殊需要。它的最终目的是推出一个标准工具来取代许多被航空\航天公司使用的内部代码软件。

ESAComp 软件的最初开发工作在赫尔辛基技术大学的轻型结构实验室中进行。2000 年, Componeering 公司接管负责 ESAComp 软件的进一步开发和维护, 并成为该软件的商业发行商, 欧洲太空宇航局继续对该软件中航空航天工业所关注的设计能力的开发工作进行资助。

EASComp 软件起初开发了针对微软 Windows 和 Unix/X 两种系统平台的软件工具, 但是目前该软件仅支持微软 Windows 系统, ESAComp 软件的 Linux 操作系统版本将在 2003 年发布。

由于具有欧洲航天局的背景, 欧洲航空航天公司最早采用了 EASComp 软件(图 1)。一些研究院所和大学也是该软件的主要用户。EASComp 软件被开发为一个通用工具以来, 也增加了一些其他工业领域内使用到高性能复合材料的新客户(图 2)。



图 1 ESAComp 软件支持设计的
Ariane 5 复合材料整流罩
(照片来源: ESA)



图 2 FY-Composites Oy 设计和生
T-2000 气垫船的复合材料结构
(来源: 芬兰海军)

2. 数据库

EASComp 软件具有用来存储有关材料性能(纤维, 树脂材料, 单层)、层合

板、结构单元（梁横截面，板，机械和胶接接头）以及载荷工况的数据库。

在这里，**单层**（Ply）是一个用来形成层合板的通用材料术语。单层可以进一步被划分为增强层、均质层以及芯层（均质或者蜂窝芯）。该信息的必要性在于，定义于某一种单层方式上的部分数据内容同另外一种单层方式是不同的。某些分析也同单层的属性相适应。根据材料的本构关系，单层可以被划分为正交各向异性、横观各向异性以及各向同性，这样就最小化了用户所必须给出的数据量。对层的定义包括：质量数据（体积密度，面密度），力学性能（模量，泊松比，湿胀和热胀系数，强度），工艺数据（不同加工技术的适用性，固化温度和压力）以及产品参考数据（生产商和价格）等。

层合板（Laminate）是由给定叠层次序的层通过给定层铺层角（层坐标系统同相应的层合板坐标系统之间的夹角）的方式来组合形成的。如果没有定义单层厚度，在这里还可以对单层进行厚度定义。**EASComp** 软件将夹层结构作为一种特殊的层合板情况来进行处理。系统自动将由芯部材料分开的实体面板作为夹层结构处理并进行相应的有关分析。**EASComp** 软件可以通过几种方式来对层合板进行定义，包括子层倍增的表格形式或者定义层合板的对称或者反对称特性。在 **EASComp** 中同样可以通过对选定层给出待铺层角或者定义选定层的待厚度比例作为参数来定义层合板。

在 **ESAComp** 软件中，通过选择梁截面、板和胶接接头或机械接头所包含的层以及进一步给出所必需的数据设置（如尺寸）来形成结构单元。

在 **ESAComp** 中，一组结构单元的设置被称作一种**项目**（Case），该项目代表了一种典型的设计/研究方案。在一个项目中，相关材料、单层、层合板以及结构单元的变化相互关联。例如，单层性能的变化影响了所有使用该层的层合板，并进一步影响到了所有使用该层板的所有梁结构。

ESAComp 数据库被划分为三种级别：用户水平，企业共享数据的水平和包含了当前所使用的通用复合材料材料数据的 **ESAComp** 数据银行，该数据银行数据库从材料供应商提供的数据表格和其他公开资料中收集数据。

2.3 分析能力

微观力学分析允许在材料组分、纤维和基体材料的基础上来预测复合材料的力学行为。这些分析可以用来研究纤维含量对复合材料单层力学性能的影响，并为初期的设计考虑生成数据。一般的微观力学关系在精确模拟复合材料行为时有很多缺陷，因此在实际的设计工作中，需要使用更可靠的单层的试验测试数据。**ESAComp** 提供了基体的混合率公式来预测工程常数和各种膨胀系数。而且，用户还可以定义专门的微观力学分析模型。

经典层合板理论（Classical laminate Theory, CLT）组成了层合板复合材料结构的分析基础，而且是 **ESAComp** 软件中大多数分析的基础。在 **ESAComp** 软件的层合板 2.5D 行为分析中，层合板本构关系用工程常数和刚度/柔度矩阵表示。

在该软件中,可以使用湿热膨胀系数,并且可以使用耦合系数来描述非对称层合板的复杂行为。

层合板载荷响应分析允许在层合板级别上来研究层合板的响应(相应应力、力矩、应变)也可以在每一单层的级别上来研究(材料和层合板坐标系统下的应力、应变)。载荷工况可以定义为力和力矩,正则应力或应变以及耦合。当涉及到湿热载荷时,系统给出了这些内部载荷在层合板不同层上产生的残余应力。

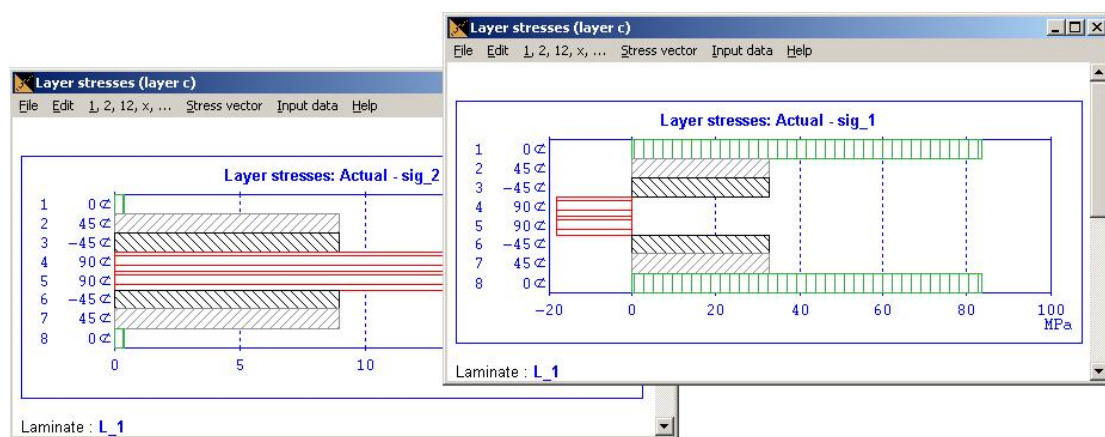


图 3. 可以在不同的坐标系统下来研究层合板单层的应力或应变

对于基于单层的层合板载荷响应,可以使用首层失效方法(First Ply Failure, FPF)。该理论假定复合材料层合板的失效行为首先发生在层合板中最先到达失效临界值的单层上。由于层合板内的多轴应力-应变状态,需要使用几个失效准则来进行分析。复合材料具有许多可用失效准则,除了几个 ESAComp 内部提供的常用失效判据外,用户可以定义自己的失效准则,ESAComp 用安全裕度系数或安全系数的形式给出了结构的失效包线,很清楚地说明了载荷还可以增加多少或者必须减少多少。程序还给出了包括单层可能失效模式等其它参考信息。在分析夹层板时,系统自动考虑面板的屈曲失效和芯材的剪切失效。层合板的最终承载标准可以由层合板逐层失效分析(Degraded Laminate Failure, DLF)来预测。该分析方法假定基体材料的失效裂纹沿着层板扩展,并在各层之间重新进行应力分配。

ESAComp 的层合板分析同样包括了材料性能和铺层方向的敏感性分析;具有圆孔和椭圆孔的层合板孔板分析;复合材料在给定环境历史下的吸湿计算以及层合板三维有限元分析时的自由边效应。

ESAComp 板分析考虑的是一个用户指定四边约束支撑情况(固定、简支或自由边)的带加强筋矩形板问题,加强筋形式包括 T 型、工型、C 型以及 Z 型等多种形式。在横向载荷分析中,可以施加点载荷、压力及线载荷,分析结果包括板的变形、失效裕度以及板整个面积上的可能失效形式;可以定义板的面内载荷来进行屈曲分析;也可以确定板的第一固频。ESAComp 板分析使用内嵌的有限元求解器中的 Mindlin 板单元来对板进行求解。尤其是在夹层板中起主要作用的面外剪切变形也都加以考虑。ESAComp 程序的梁分析能力同板分析能力相似。可以处理的梁截面类型包括层合板/夹层板,圆形、椭圆形、矩形和工形等横截

面。

ESAComp 程序的胶接和机械连接分析可以预测连接处的载荷分布以及预测连接的承载能力。尤其其胶接分析十分先进，它允许许多类型的载荷和边界条件组合以及用非线性本构模型的粘胶建模。

2.4 设计能力

层合板结构的设计通常是对不同材质、层厚度和铺层方式的组合进行试选找到合适的结构构造。虽然材质组合和层合板铺层方式有无限多种可能，但是实际考虑通常局限在设计空间的范围之内。例如，设计人员可以限制铺层角为 0° , $\pm 45^\circ$, 90° 度，因为从生产加工的观点来说，这是最佳选择而且往往产生接近于最优的设计方案。因此，设计的任务局限为从一些材料备选方案中选择材料并确定每层厚度以及不同方向层的比例。ESAComp 程序分析同数据银行以及许多结果数据估计的方法一起支持该种类型的交互式设计方法（图 4）。

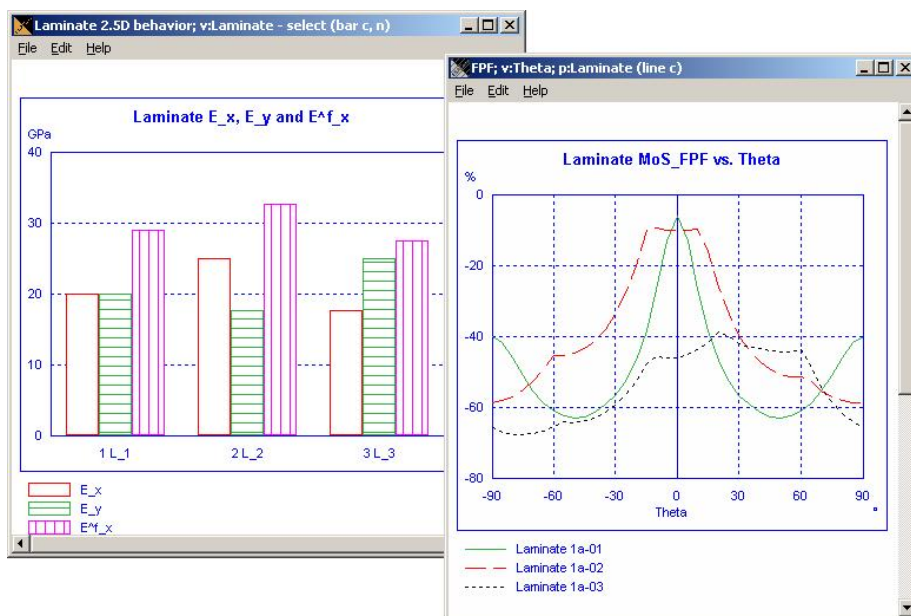


图 4 ESAComp 可以用来比较备选层合板设计方案的图形结果显示

ESAComp 软件中也包括针对层合板设计的被称作“设计工具”的更严格方法。它们是相逆的问题求解器，对用户所定义的设计问题寻找一个答案。设计目标通过对某个层合板的重要设计属性的约束和目标进行设计说明来定义。“层合板评估工具”在被选层合板中间搜索满足具体约束的层合板，该评估工具还会进一步评估可用层合板对约束条件的满足程度并对它们按级别排序。“层合板的生成工具”从用户选择的层中生成满足具体约束的层合板并尽可能满足设计属性的目标和权函数确定的全面目标。

3 同有限元软件结合使用的层合板分析工具

3.1 有限元软件的局限

尽管在层合板复合材料结构分析中大量使用有限元程序，但是它们在层合结构的结果后处理中存在着不足。例如，在层合板层的级别上来查看应力、应变的分布十分困难。对于复合材料的失效分析，有限元软件包提供的可选失效标准非常有限而且忽略了像夹层板面屈曲这样的具体失效模式。在评价层合板的应力-应变状态时，有限元程序通常不考虑可能的内部载荷。复合材料概念设计阶段需要进行的有限元分析要比金属材料复杂得多，一般的有限元软件很难满足该阶段的设计需求。

3.2 设计开发周期

在对复合材料层合板结构进行有限元分析之前，必须有初始层合板设计。专业化的复合材料分析工具能够有效地来设计这些层合板构造。在进行了第一轮有限元分析之后，需要对层合板设计进行修正。同样，在进行下一轮整体有限元模型分析之前，层合板分析和设计工具可以用来有效地研究层合板铺层方式的变化如何改变它们的性能。同时，还可以考虑有限元软件所没有考虑的失效模式问题。

当各种工具包之间实现了数据自动传输时，将层合板分析工具同有限元软件包一起使用变得更加合理，至少在某些程度上如此。图 5 描述了 ESAComp 软件是如何实现有限元软件同层合板分析工具之间的交互作用的。

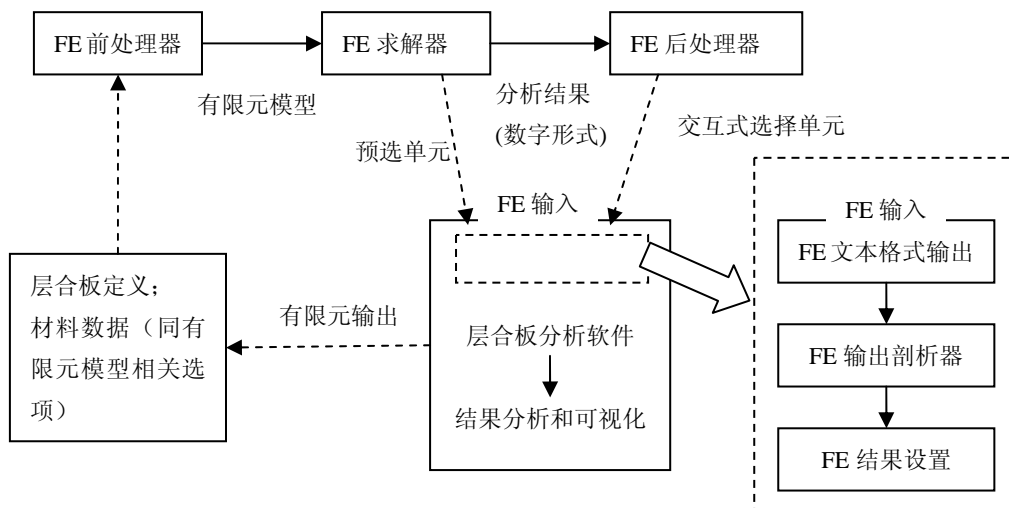


图 5 层合板分析软件作为复合材料结构设计周期中的一部分

3.3 同有限元软件的匹配性问题

当使用层合板分析软件对有限元分析进行后处理时，很重要的一点时，有限

元中单元的定义要同层合板分析中假设相一致。一般来说，这个问题不大，因为对于层合板的面内和弯曲行为，通用壳单元的一阶剪切变形理论 (First-Order Shear Deformation Theory, FSDT) 或 Mindlin 板理论同经典的层合板理论 (Classical Lamination Theory) 等效。经典层合理论不能考虑面外剪切变形问题，但是由于在一阶剪切变形理论中面外剪切变形同的面内和弯曲行为并不耦合，因此并不矛盾。但是，必须注意到不同的有限元代码处理面外剪切刚度的方式变化很大，而且对于何种为最佳方案没有定论。

当在层合板分析工具同有限元软件包之间进行数据交换时，还需要考虑许多其它的问题。坐标系统和层编号规则必须保持一致，否则就需要进行相应转换。同样也需要考虑单位系统的匹配性问题。有限元程序可以在单元坐标系下也可以在材料坐标系下提供单元应力-应变数据。但是对于层合板分析，必须在材料坐标系下输入数据。

3.4 ESAComp-有限元软件交互界面

ESAComp 程序提供了同主流有限元软件 (ABAQUS, ANSYS, I-DEAS, MSC.Nastran 和 NISA) 的双向交互界面。见图 6。

“有限元输出界面”可以将 ESAComp 程序的层合板定义同相关材料数据一起传输到有限元程序中。个别有限元代码支持文本文件格式来进行文件传输。ESAComp 支持有限元程序中的层壳单元。对于一些有限元软件包，ESAComp 同样支持其使用普通的壳单元。在这种情况下，ESAComp 程序输出层合板刚度矩阵而不是材料数据和铺层方式。有时使用有限元软件的实体模型对层合板结构进行非常详细地分析。对此，ESAComp 软件可以向有限元软件输出层材料数据这样的数据。

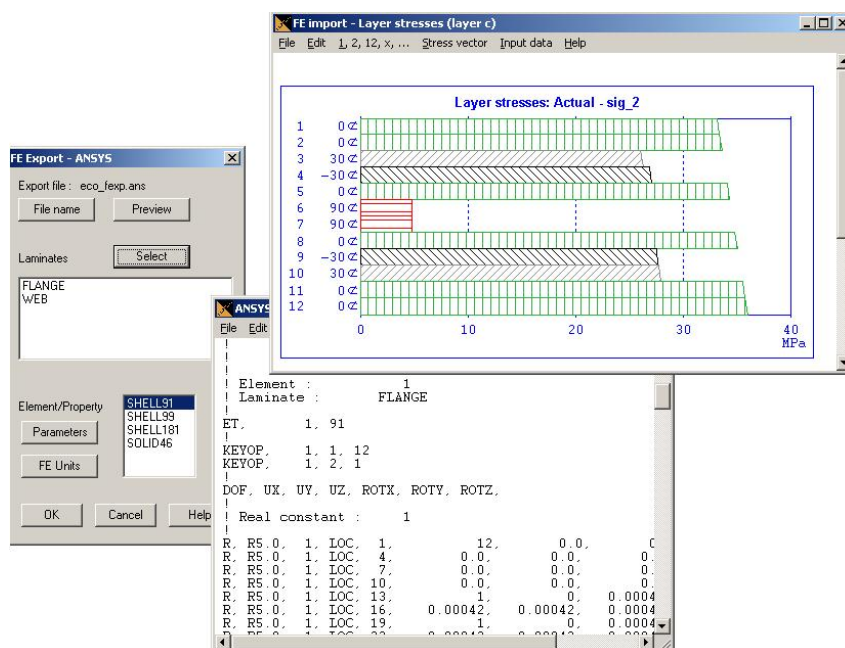


图 6 针对 ANSYS 程序的 ESAComp 交互界面

在 ESAComp 中，可以通过“有限元输入界面”来进行有限元程序的后处理。ESAComp 程序读取其支持的有限元软件包生成的输出文件。ESAComp 程序输入的数据是壳单元的合力/力矩或者相应的应变状态。用户必须从 ESAComp 程序中选择对应于结果的层结构。ESAComp 可以对整套数据进行失效分析，确定数据点的阈值，可能的失效模型和失效层。程序中，这里的数据点是指单元、积分点或节点，依赖于有限元软件提供的输出类型。对于从整套数据中选择的单个数据点，可以在层的级别上进行载荷响应或者失效分析。

在最近发布的交互界面中，针对 MSC.Patran 层合板模型的上述输入界面进行了进一步开发。使用该界面用户不用再需要将相关的层合板结构同结果联系起来，因为材料和层板数据都是由 Patran 程序传输到 ESComp 程序的。而且，每个单元所研究的层结构可以不同。需要研究的单元类型选定之后，可以由 Patran 程序中的用户交互界面直接调用 ESAComp 程序来进行详细的后处理。针对 ANSYS 也开发了相应的交互界面。进一步的开发计划包括可能从 ESAComp 到 ANSYS 或 Patran 进行数据回馈而可以使用向量图来查看数据。

结论

和金属材料相比，复合材料的设计过程需要附加的阶段。有限元软件包对复合材料的分析起重要作用，但是满足不了复合材料设计需要专门的软件工具的需要。层合板分析工具可以用于层合板初期设计阶段的材料选择和设计。在包括了复合材料行为具体细节的后处理阶段和验证阶段，也同样需要这样的软件工具。ESAComp 程序是这类软件的很好典范。