



同济大学本科教材出版基金资助

复合材料结构CAE教程

袁国青 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济大学本科教材出版基金资助

复合材料结构 CAE 教程

袁国青 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书第1章着重介绍了复合材料结构和CAE的概念,并就复合材料结构CAE的任务、内容、研究方法以及课程的地位和作用进行了阐述;第2到第6章从介绍有限元法基础知识入手,结合大型通用有限元软件ANSYS,阐述了利用通用软件进行结构分析的基本过程和方法,在此基础上详细介绍了分析复合材料结构的若干单元类型和进行复合材料结构分析的前后处理知识,并给出了若干算例,初学者可以通过模仿和完成课后练习来理解和掌握复合材料结构数值分析的基础知识,培养自己对复合材料结构的仿真分析能力;第7和第8章介绍的参数化设计语言和基于CAD数模的有限元建模方法是开展复杂结构问题分析的有效途径;第9章介绍的专业设计分析软件则很好地将宏观复合材料力学的知识工具化了,对用户更自如地进行复合材料结构设计会大有帮助;第10章集中介绍了若干有特色的软件并就复合材料结构CAE发展趋势和面临的挑战进行了探讨。

本书的主要读者为初涉复合材料结构有限元分析的本科生、研究生和其他工程技术人员。第7~10章的内容则对中高级用户也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料结构 CAE 教程 / 袁国青编著. —上海:
同济大学出版社, 2018. 8
ISBN 978-7-5608-7772-3

I. ①复… II. ①袁… III. ①复合材料结构—有限元
分析—应用软件—教材 IV. ①TB33-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 045545 号

复合材料结构 CAE 教程

袁国青 编著

责任编辑 李小敏 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
印 刷 上海同济印刷厂有限公司
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 27
字 数 674 000
版 次 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-7772-3

定 价 78.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前言

由于复合材料及其结构所具备的优越性能,其在航空航天、交通设施、新能源、石油化工、土木工程、基础设施、体育用品等国民经济的广泛领域得到了越来越多的应用。比如,复合材料已成为现代大型民机和军机首选的结构材料,结束了以铝合金为主的机体结构选材时代;在交通运输领域,能源和环境的约束使复合材料的应用也越来越多地受到重视,当前汽车轻量化研究已成为世界范围的一个热点,而汽车轻量化最主要的措施之一就是大量使用先进复合材料;风电作为世界能源中发展最快的一种清洁环保可再生的能源,其核心部件叶片几乎都是用复合材料制备的。

目前我国复合材料在航空航天、汽车、新能源等领域的应用跟国外先进水平相比还有较大差距,要迎头赶上甚至超越,培养与发展要求相适应的复合材料结构设计、制造、检测、维护、修理及适航认证等方面的人才才是关键,尤其是复合材料结构设计人才。

复合材料结构作为由或主要由增强纤维和树脂基体按设计确定的结构方案和预先制定的工艺路线制备而成的、能承受一定荷载作用的复合材料物体或物体系统,其设计少不了对各种工况下结构的强度、刚度和稳定性等的定量分析。而结构的定量分析方法一般可分为解析法、数值法和半解析半数值法三大类。由于复合材料的各向异性、损伤和破坏机理复杂、复合材料结构设计参数众多、性能对工艺的依赖性强等,真实的复合材料结构有解析解的情形并不多,即使有解析解,其分析计算工作量往往也很大,因此在复合材料结构设计的过程中能使用的定量分析手段往往以数值分析方法为主。

复合材料结构 CAE(Computer Aided Engineering)正是以有限元数值方法为主的、在电脑上通过以有限元技术为主要内容的 CAE 软件,对复合材料结构的力学性能、工艺参数进行模拟、预测、分析和评价的一项技术,其可以辅助复合材料结构的设计、制造、验证及修理等工作。因此,CAE 的应用对于复合材料结构的设计具有特别重要的意义。

相比较复合材料结构研究的早期,现在关于复合材料结构的分析软件已比较多,如 ANSYS, ABAQUS, HyperWorks, LS-DYNA, StressCheck, Genoa/MCQ, ESAComp, Digimat, FiberSim, PAM-RTM 等。应该说利用这些仿真分析工具已可以代替相当多的试验研究工作,甚至可以做大量试验无法企及的工作。这些软件或属于大型通用软件,或属于专用软件,内容丰富、功能强大,我们要充分享用其妙处,使之有力地支撑我国未来复合材料事业的创新发展,就必须重视对有关知识的传授和技能的训练。同济大学在 2007 年设立复合材料结构(设计与制造)本科专业方向伊始,便设立了“复合材料结构 CAE”这门课。经过 8 年的教学实践,积累了较为丰富的经验,本书就是在已试用 8 年的讲义的基础上采纳各方建议做出全面修订后的一个成果。在此也一并向曾经提出过不少中肯意见和改进建议的老师和学生,帮助整理算例的胡宗文、白艳洁等研究生表示由衷的谢意。

编写中把本书的主要读者定位于那些初涉复合材料结构有限元分析的本科生、研究生和其他工程技术人员,因此在内容编排上将之限定为复合材料结构 CAE 的初级教程,旨在为那些初学者指引一条有效的学习路径,他们通常是连有限元也未接触过的新人,当然他们应有复合材料力学的基础,若修读过复合材料工艺学则更好。全书共分 10 章,第 1 章为绪论;第 2 章为有限元法基础;第 3 章则主要结合 ANSYS 软件介绍大型通用有限元软件分析结构力学行为的过程和方法;第 4 章重点介绍复合材料结构有限元分析的单元种类及其特性等;第 5 章主要是阐述复合材料结构分析的前后处理技术;第 6 章给出了复合材料结构分析的若干算例;第 7 章为参数化设计语言及其应用;第 8 章讲解了基于既有的 CAD 数模完成有限元建模的方法;第 9 章介绍的是复合材料专业设计分析软件在 CAE 中的应用;第 10 章对复合材料结构 CAE 技术的一些最新进展进行了概述。期望通过以上内容教学,学生能掌握一般复合材料结构基于首层失效的强度分析、应力应变状态分析、刚度分析、稳定分析、振动特性分析等的能力,以有力支撑复合材料结构的定量设计工作,同时也可为进一步进行极限载荷、损伤过程、冲击行为、断裂与疲劳、固化变形等复杂的结构力学行为分析及设计优化等奠定一定的基础。

考虑 CAE 技术强的实践特性,作者还编写了与本书配套的《复合材料结构 CAE 实践指导》,可以方便学生课上和课下的练习。

以上阐述了编写本书的必要性和基本思路,但回顾教材编写的全历程,我还特别想感谢我的同事们,是他们的热情鼓励和大力支持才使我下了编写此教材的决心,薛元德教授、黄争鸣教授还给出版社写了推荐信,学院教学院长陈硕教授、飞行器专业责任教授朱延娟老师、李军老师等更是从自己承担的“设计/制造一体化航空卓越工程师培养体系”校教改特色项目、“实践教学体系改革及联合设计中心建设”院教改重点项目中,拿出了一定金额的经费给予了赞助。当然我作为负责人承担的“复合材料结构专业方向教学团队”建设项目和专业核心课“复合材料结构 CAE”建设项目等也是我解除出版经费之忧的基础。很幸运的是在初稿交出版社排版期间得知申请的同济大学本科教材出版基金获批。从这个角度讲,是学校在教改项目上的持续投入为本教程的编写创造出了必要的条件!谢谢我的母校!

限于时间和笔者水平,书中难免存在不当之处,恳请各位读者不吝指正。

袁国青
于同济大学

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 复合材料结构概述	1
1.2 CAE 的基本概念及其发展沿革	4
1.2.1 CAE 的基本概念	4
1.2.2 CAE 在产品研制中的作用	6
1.2.3 CAE 技术的发展沿革	7
1.2.4 CAE 技术的实际工程应用	8
1.3 复合材料结构 CAE 的任务、内容和研究方法	9
1.4 复合材料结构 CAE 课程的地位和作用	9
习题	10
第 2 章 有限元法基础	11
2.1 有限元法概念	11
2.2 有限元法的一般步骤	13
2.3 有限元法示例	13
2.4 有限元法解结构强度、刚度、振动及稳定性问题的概念	23
2.4.1 应用有限元法分析静力强度、刚度问题的概念	23
2.4.2 应用有限元法求解结构振动问题的概念	23
2.4.3 应用有限元法求解结构稳定问题的概念	24
2.5 非线性问题及其有限元法	26
2.6 有限元法的收敛性准则	27
2.7 有限元法与其他分析方法的比较	28
2.7.1 梁振动的运动方程	29
2.7.2 准确的解析解(分离变量法)	29
2.7.3 近似的解析解	30
2.7.4 数值解之有限差分法	31
2.7.5 数值解之有限元法	32
习题	35

第 3 章 大型通用有限元软件结构分析基本过程和方法	36
3.1 概述	36
3.1.1 利用有限元法进行结构分析的过程	36
3.1.2 有限元模型的概念	36
3.1.3 CAE 软件 ANSYS 的使用环境、图形用户界面和输出文件简介	37
3.2 基于 ANSYS 的有限元建模方法	42
3.2.1 设置工作目录	42
3.2.2 指定作业名和分析标题	43
3.2.3 定义图形界面过滤参数	44
3.2.4 ANSYS 的单位制	45
3.2.5 定义单元类型	45
3.2.6 定义单元实常数	47
3.2.7 定义单元截面参数	48
3.2.8 定义材料属性	54
3.2.9 几何建模和有限元建模概述	55
3.2.10 坐标系	56
3.2.11 实体建模	63
3.2.12 耦合和约束	91
3.2.13 模型的合并和归档	94
3.3 ANSYS 分析的加载与求解	95
3.3.1 加载	96
3.3.2 ANSYS 的求解	103
3.4 ANSYS 分析的结果后处理	108
3.4.1 通用后处理器(POST1)	109
3.4.2 单元表	115
3.4.3 路径	121
3.4.4 时间历程后处理器(POST26)	125
3.5 ANSYS 分析算例	131
习题	140
第 4 章 复合材料结构有限元分析的单元	143
4.1 概述	143
4.2 复合材料层合板壳理论的若干基础知识	144
4.3 复合材料层合板壳单元	146
4.3.1 SHELL181 单元	146
4.3.2 SHELL281 单元	154
4.3.3 SHELL208 单元	159
4.3.4 SHELL209 单元	164
4.4 复合材料层合实体单元	169

4.4.1	SOLID185 层合实体单元	169
4.4.2	SOLID186 层合实体单元	173
4.4.3	SOLID278 层合实体热传导分析单元	178
4.4.4	SOLID279 层合实体热传导分析单元	181
4.5	实体壳单元 SOLSH190	183
4.5.1	SOLSH190 单元的基本属性	183
4.5.2	SOLSH190 单元的选项	184
4.5.3	SOLSH190 的数据输入	185
4.5.4	SOLSH190 单元的输出数据	185
4.5.5	SOLSH190 单元的假定和限定条件	188
4.6	Cohesive 单元	189
4.6.1	界面单元	189
4.6.2	接触单元	193
4.6.3	INTER202 单元	197
4.6.4	INTER203 界面单元	198
4.6.5	INTER204 单元	199
4.6.6	INTER205 单元	201
4.6.7	分析脱粘的接触单元 CONTA174	202
习题		204

第5章 复合材料结构有限元分析的前处理与后处理

5.1	复合材料结构有限元分析的前处理	206
5.1.1	复合材料结构有限元建模的特点	206
5.1.2	层合复合材料单元的选项设置	207
5.1.3	铺层材料性能数据的输入	210
5.1.4	截面铺层方案的定义	212
5.1.5	层合壳单元中节点偏置的设定	213
5.1.6	本构矩阵的直接输入	215
5.1.7	逻辑选择	216
5.1.8	输入 CAD 软件中创建好的几何模型	218
5.1.9	划分网格	218
5.1.10	复合材料结构分析中应遵循的建模规则	223
5.2	复合材料失效准则及相关参数的输入	226
5.2.1	复合材料失效准则	226
5.2.2	在 ANSYS 中失效准则值的含义	231
5.2.3	在 ANSYS 中指定失效准则中材料性能的命令	233
5.2.4	定义失效准则的一些注意事项	234
5.3	复合材料结构分析的后处理	235
5.3.1	复合材料结构分析的目的与输出结果	235

5.3.2 结果的图形显示	240
5.3.3 结果的数据列表	243
5.3.4 特定量沿指定路径的变化规律	244
习题	246
第 6 章 复合材料结构分析实例	247
6.1 悬臂复合材料工字梁的静强度分析	247
6.1.1 采用层合壳单元分析	247
6.1.2 采用层合实体单元分析	254
6.2 加筋壁板的特征值屈曲分析	260
6.2.1 定义单元类型、材料参数和截面	261
6.2.2 建立有限元模型	262
6.2.3 添加约束和载荷并求解	264
6.2.4 观察结果	265
6.3 复合材料层合板拉伸的层间应力分析	266
6.3.1 定义单元类型、材料参数和截面	266
6.3.2 建立有限元模型	267
6.3.3 添加约束和载荷并求解	268
6.3.4 观察结果	269
6.4 单钉连接破坏载荷分析	270
6.4.1 定义单元类型、材料特性	270
6.4.2 建立几何模型	271
6.4.3 划分单元网络	274
6.4.4 定义接触对	276
6.4.5 加载求解	278
6.4.6 后处理	279
6.5 阶梯形胶接连接分析	279
6.5.1 定义单元	280
6.5.2 定义失效准则	280
6.5.3 建立有限元模型	281
6.5.4 添加约束和载荷并求解	283
6.5.5 观察结果	283
6.6 复合材料梁热-力耦合弯曲问题分析	285
6.6.1 定义工作文件名与工作标题	285
6.6.2 定义单元类型、材料参数	286
6.6.3 建立有限元模型	287
6.6.4 加载与求解	288
6.6.5 查看结果	289
习题	241

第 7 章 参数化设计语言及其应用	293
7.1 APDL 简介	293
7.1.1 参数化建模实例	294
7.1.2 用 APDL 命令进行流程控制实例	295
7.1.3 用 APDL 命令流进行结构响应分析的全过程实例	295
7.2 APDL 参数类型及其应用	297
7.2.1 APDL 参数类型	297
7.2.2 参数的命名	297
7.2.3 标量参数及其用法	298
7.2.4 数组参数及其用法	305
7.2.5 ANSYS 内部函数	312
7.3 APDL 常用命令	313
7.4 APDL 宏	314
7.4.1 宏的生成	314
7.4.2 宏文件命名规则	314
7.4.3 宏的搜索路径	315
7.4.4 在 ANSYS 中生成宏	315
7.4.5 用文本编辑器生成宏	315
7.4.6 使用宏库文件	315
7.4.7 运行宏和宏库文件	316
7.4.8 程序流的控制	317
7.5 APDL 应用示例	320
7.5.1 悬臂梁分析的命令流文件	320
7.5.2 加筋壁板稳定分析的命令流文件	323
习题	327
第 8 章 基于 CAD 数模的有限元建模方法	328
8.1 概述	328
8.2 AutoCAD 的几何模型与 ANSYS 的交互	328
8.2.1 将工字梁的 CAD 线模型导入 ANSYS 的示例	329
8.2.2 将一垂尾的 CAD 点线模型导入 ANSYS 的示例	331
8.3 CATIA 几何模型导入 ANSYS 的方法	332
8.3.1 基于 iges 格式文件实施导入	332
8.3.2 直接基于 CATIA 图形文件实施导入	333
8.3.3 基于 CATIA 建立的加筋壁板模型的导入示例	334
8.4 HyperMesh 的数模转换及有限元建模示例	335
8.4.1 HyperMesh 软件简介	335
8.4.2 将 CATIA 几何模型导入 Hypermesh	337
8.4.3 HyperMesh 的有限元模型与 ANSYS 的交互	339

8.4.4 使用 Hypermesh 和 ANSYS 联合求解叶片静强度的示例	339
习题	346
第 9 章 复合材料专业设计分析软件在 CAE 中的应用	348
9.1 概述	348
9.2 复合材料专业设计分析软件 ESAComp 简介	348
9.3 单层板的创建和细观力学分析	349
9.3.1 单层板的创建	350
9.3.2 单层板的细观力学分析	353
9.4 单层板的宏观力学分析	354
9.4.1 单层板的应力-应变关系	354
9.4.2 Carpet 曲线	355
9.5 层合板的创建和性能分析	357
9.5.1 层合板的创建	357
9.5.2 层合板的性能分析	358
9.6 板分析	367
9.7 梁分析	369
9.7.1 创建梁	369
9.7.2 轴向载荷分析	370
9.7.3 横向载荷分析	371
9.7.4 梁的固有频率分析	372
9.8 胶接接头分析	372
9.8.1 添加粘合材料	372
9.8.2 创建胶接接头	373
9.8.3 创建边界条件与载荷	373
9.8.4 载荷响应和失效分析	374
9.9 机械连接接头分析	375
9.9.1 创建机械连接接头	375
9.9.2 载荷响应分析	375
9.10 ESAComp 与 ANSYS 的有限元接口	376
9.11 后处理模块 CompoLyX	378
习题	379
第 10 章 复合材料结构 CAE 的发展	380
10.1 概述	380
10.2 可用于二、三次复合材料结构分析的特色软件	380
10.2.1 p 型自适应有限元软件 StressCheck 简介	380
10.2.2 多尺度复合材料渐进失效/耐久性/损伤容限分析软件 Genoa 简介	386

10.2.3 复合材料结构优化设计 HyperWorks 平台的 OptiStruct 模块 功能简介.....	388
10.3 可用于一、二次复合材料结构分析的特色软件	395
10.3.1 复合材料性能表征和鉴定分析软件 MCQ 简介	395
10.3.2 复合材料与结构多尺度建模分析软件 Digimat 简介	396
10.4 复合材料结构工艺仿真软件.....	397
10.4.1 FiberSIM 软件简介	397
10.4.2 PAM-RTM 树脂模注工艺仿真软件简介	413
10.5 复合材料结构分析面临的问题与挑战.....	416
参考文献.....	417

第1章 绪论

1.1 复合材料结构概述

我们常常讲飞机结构、汽车结构、建筑结构,这里的“结构”是指由材料加工成的构件按照合理方式组合在一起,能承受一定荷载作用的物体或物体系统,其一般是由多个构件联结在一起而形成的系统,如机翼结构、车辆结构、房屋结构等,最简单的结构则是单个构件,如梁、柱等。

所谓复合材料结构则是指由或主要由增强相(如纤维)和基体相(如树脂)按设计确定的结构方案和预先制定的工艺路线制备而成的、能承受一定荷载作用的复合材料物体或物体系统,其可以是直接整体化成型的复杂结构,也可以是由若干已制备好的相对简单的复合材料构件再采用某种连接方式连接在一起的物体系统。如图 1-1—图 1-3 所示为三个典型的复合材料结构。

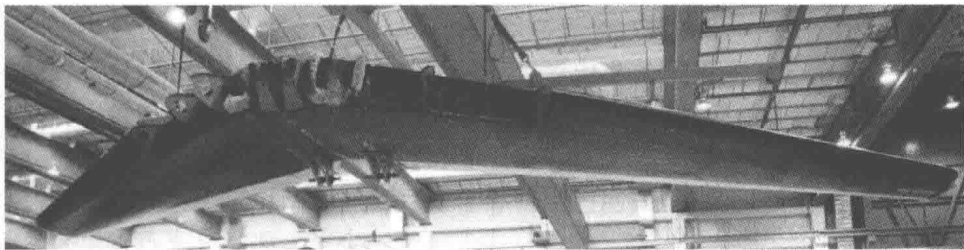


图 1-1 复合材料水平尾翼

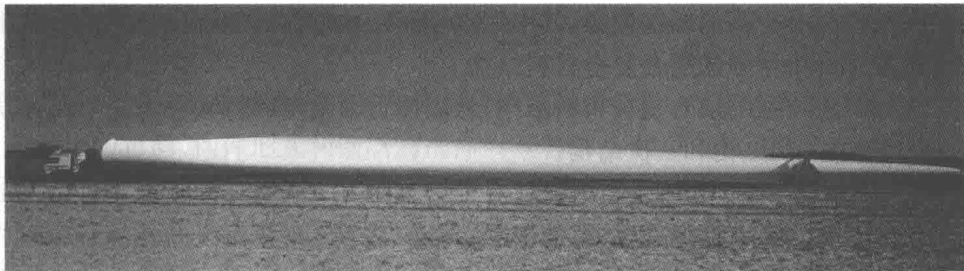


图 1-2 LM 公司生产的长 60 m 的风电叶片

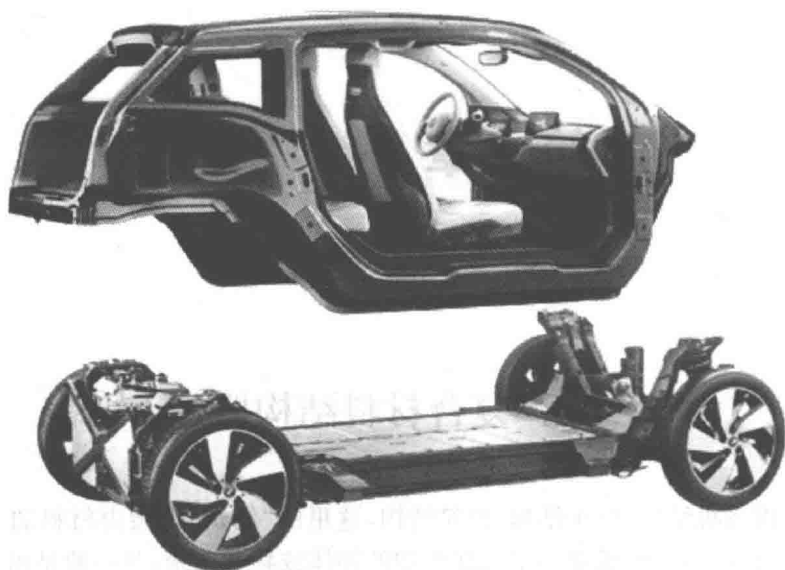


图 1-3 BMW i3 电动车碳纤维复合材料车身

从上述概念可知,不论是相对简单的复合材料构件,还是十分复杂的复合材料结构,其都不是由复合材料加工而成的,而是由复合材料的组分材料按一定的工艺方法直接加工而成的。可见,复合材料和结构是同步诞生的,这当是复合材料结构的特点之一。

复合材料依不同的分类标准有不同的种类划分。以增强相的形态来划分复合材料的话,其可分为纤维增强复合材料、晶须增强复合材料和颗粒增强复合材料。其进一步的划分如图 1-4 所示。

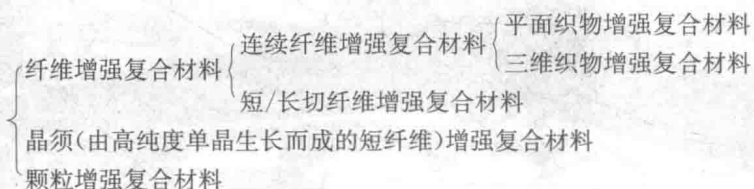


图 1-4 复合材料按增强相形态的划分

现在所讲的复合材料结构多指连续纤维增强的复合材料结构,因为其相比较其他种类的复合材料结构具有更高的结构效益,其中尤以平面织物增强的复合材料结构居多,因此本书主要讨论连续纤维增强的层合复合材料结构。

关于连续纤维增强的层合复合材料结构,从固体力学角度可将其分为三个“结构层次”,分别为一次结构、二次结构和三次结构。

所谓“一次结构”是指由基体和增强材料复合而成的单层材料,其力学性能决定于组分材料的力学性能、相几何(各相材料的形状、分布、含量)和界面区的性能;所谓“二次结构”是指由单层材料复合而成的层合体,其力学性能决定于单层材料的力学性能和铺层几何(各单层的厚度、铺设方向、铺层序列);所谓“三次结构”是指通常所说的工程结构或产品结构,其力学性能决定于层合体的力学性能和结构几何。图 1-5(a)(b)(c)分别是三

个结构层次的示意图。

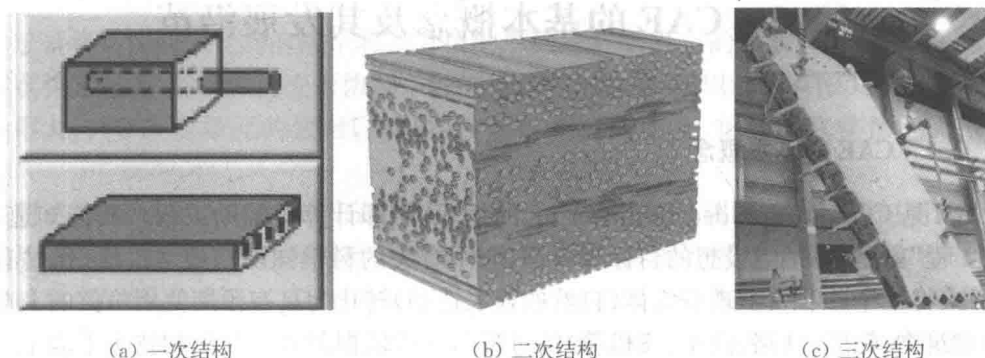


图 1-5 连续纤维增强的层合复合材料结构的三个层次示意图

正像在上述复合材料结构的观念中讲的那样,复合材料结构是由或主要由增强相(如纤维)和基体相(如树脂)按设计确定的结构方案和预先制定的工艺路线制备而成的,“设计”是复合材料结构应用的先导。相应于复合材料结构的三个层次,其设计也可分为三个层次:单层材料设计、铺层设计和结构设计。

单层材料设计包括增强材料、基体材料及其配比的选择等,其设计结果将决定单层板的性能;铺层设计包括对铺层材料的选择及铺层方案的设计,其设计结果将决定层合板的性能;结构设计则最后确定产品结构的结构布局、尺寸和不同部位的铺层方案。这三个设计层次互为前提、互相影响、互相依赖。因此,复合材料及其结构的设计打破了材料研究和结构研究的传统界限,设计人员必须把材料性能和结构性能一起考虑。换言之,材料设计和结构设计必须同时进行,并将它们统一在同一个设计方案中。

另外,在复合材料结构的设计过程中,必须充分考虑准备采用的工艺路线。一方面,不同的工艺制备出的复合材料性能可能会有一定差异,定量设计时需要采用与拟采用工艺相应的材料性能数据;另一方面,设计出的结构必须在工艺上可实现才有意义。所以,从事复合材料结构设计的人员一定要掌握一定的复合材料工艺的知识,同时要能与复合材料工艺方面的技术人员进行充分沟通。

关于连续纤维增强的层合复合材料结构还有一个特点就是大多数以板壳形式呈现,这一方面是由于当承受面内载荷时板壳形式的结构效率高,另一方面是由于连续纤维增强体多为薄的平面织物,由其制备的复合材料在面内具有优越的性能,且由其增强的层合复合材料结构自然呈现板壳形式。

因此,我们讲的连续纤维增强的层合复合材料结构的设计,就是层合复合材料板壳结构的设计,涉及结构布局、构件形式和铺层的选择以及各部位铺层层数、铺层角和铺层顺序的设计。科学的设计应是能定量分析结构性能的设计,即是说应是能根据复合材料的性能特点、强度准则、刚度条件和结构稳定性要求、所设计结构的承载情况等,采用可较准确预测结构力学行为的定量计算方法进行的设计。离开有效的计算方法而采用所谓的“等代设计”(等刚度、等强度)和“准网格设计”等方法来设计复合材料结构,无法充分发挥复合材料的优异性能。

1.2 CAE 的基本概念及其发展沿革

1.2.1 CAE 的基本概念

CAE 是 Computer Aided Engineering 的缩写,意即计算机辅助工程。我们知道,狭义地讲“工程”就是“以某组设想的目标为依据,应用有关的科学知识和技术手段,通过有组织的一群人将某个(或某些)现有实体(自然的或人造的)转化为具有预期使用价值的人造产品(比如建筑物、轮船、铁路、汽车、飞机等)的过程”,其所依据的科学知识和技术手段主要是数学、物理学、化学,以及由此产生的材料科学、固体力学、流体力学、热力学、输运过程和系统分析等方面的知识和技术。在工程实施的过程中,涉及研究、开发、设计、施工、生产、操作和管理等多方面的工作,因此通常是一项需花费较多人力、物力和时间才能完成的较大而又复杂的工作。CAE 就是随着计算机和软件技术的发展而形成的一项可以通过在电脑上做“实验”而辅助上述工程工作有效展开的技术,我们对各类复杂的工程结构和产品结构都有一定的物理、力学性能与安全可靠性等方面的预期,如何在设计阶段即能有效地预测相关性能,显然是高效、低成本地实施工程的关键,CAE 恰恰就是这样一项用计算机对工程结构和产品结构的物理、力学性能与安全可靠性进行分析、评价,并对其未来的工作状态和运行行为进行模拟、预测、仿真的技术,其应用有利于及早发现设计缺陷、开展设计优化工作,并帮助证实其未来功能和性能的可用性和可靠性。

可见,CAE 的工作是在计算机上完成的。开展 CAE 分析不一定要有样品,有数模就可以,即在生产样品之前就可以做仿真;当然有样品了,也可以进行 CAE 分析,对样品进行性能评价、验证等。

开展 CAE 的工作需要有 CAE 软件、具有强大运算能力的计算机,以及具有较强软件操作能力、掌握深厚的理论知识且有丰富经验的 CAE 工程师。

CAE 追求的是算得准,这取决于软硬件质量和 CAE 工程师的水平。

CAE 软件是具备对特定工程和产品或通用工程和产品的物理、力学性能进行分析、模拟、预测、评价和优化功能的计算机软件。其开发需要有力学(结构强度、刚度、稳定性、动力响应;流体力学)、热学(热传导、热辐射、热对流)、电磁学、声学等多学科知识的支持,当然还涉及计算机软硬件、计算数学、相关的工程管理学与现代计算技术等学科的知识。CAE 软件的主体是有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)软件。另外,还有边界元法软件、有限差分法软件等。

基于有限元技术的 CAE 系统的核心思想是结构的离散化,即将实际结构离散为有限数目的规则单元组合体,实际结构的物理性能可以通过对离散体进行分析,得出满足工程精度的近似结果来替代对实际结构的分析,这样可以解决很多实际工程需要解决而理论分析又无法解决的复杂问题。其基本过程是将一个形状复杂的连续体的求解区域分解为有限的形状简单的子区域,即将一个连续体简化为由有限个单元组合的等效组合体;通过将连续体离散化,把求解连续体的场变量(应力、位移、压力和温度等)问题简化为求解有限的单元节点上的场变量值。此时得到的基本方程是一个代数方程组,而不是原来描述真实连续体场

变量的微分方程组。求解后得到近似的数值解,其近似程度取决于所采用的单元类型、数量以及对单元的插值函数等。

由于是将结构离散化为有限个容易分析的单元来表示复杂的对象,单元之间是通过有限个节点相互连接,然后根据变形协调条件进行综合求解的,所以称为有限元法。这种方法灵活性很大,只要改变单元的数目,就可以使解的精确度改变,得到与真实情况无限接近的解。

采用 CAD(Computer Aided Drafting /Design,计算机辅助制图/设计,即使用计算机软件直接从事图形的绘制和结构的设计)技术来建立 CAE 分析所需的几何模型和物理模型,完成分析数据的输入,称为 CAE 的前处理。其可以利用 CAE 软件自带的 CAD 功能来完成,也可以应用专业的 CAD 软件(如 Catia, Pro-E, AutoCAD 等)先行建立几何模型,再按有关办法导入 CAE 软件中来实现。还有一些专业的网格划分软件可以帮助 CAE 工程师更好地完成 CAE 的前处理。

同样,CAE 的结果也需要用 CAD 技术生成形象的图形进行输出,如生成位移图,应力、温度、压力分布的等值线图,表示应力、温度、压力分布的彩色明暗图,以及随机机械载荷和温度载荷变化生成位移、应力、温度、压力等分布的动态显示图,通常称此过程为 CAE 的后处理。针对不同的应用,也可用 CAE 仿真模拟零件、部件、装置(整机)乃至生产线、工厂的运动或运行状态。在 CAE 的应用过程中,前、后置处理是最重要的工作。

在用 CAE 技术解决工程实际问题时,需要注意以下两点:

(1) CAE 工作是一项难度较大的工作。一项工作,不会因为有了三维实体模型和载荷就可以马上得出结果。实际上,有了三维实体模型以后,需要做大量的模型转换和修改工作才可能得到正确的分析模型,这项工作通常占到工作量的 70% 以上,情况复杂时可能需要更长的时间。

(2) 一般的 CAE 分析都基于结构材料无缺陷、不存在工艺问题这样一种假设。一个结构如果在使用中偶然出现问题,那可能是结构本身的原因,也可能是材料或工艺方面的原因,但如果问题重复出现,则一定是结构原因,必须进行 CAE 分析。如果材料和工艺方面存在问题,一般的 CAE 分析结论是不适用的,除非进行有关材料和工艺的专项 CAE 分析。实际上已有的 CAE 分析软件很多时候还有局限性,对不少复杂问题的分析还缺乏有效的手段。这也是未来 CAE 软件待发展的方向。

除基于有限元法的 CAE 技术之外,虚拟样机技术、优化设计技术也是 CAE 技术的重要组成部分。

虚拟样机技术又称机械系统动态仿真技术,其研究范围主要是机械系统运动学和动力学分析,其核心是利用计算机辅助分析技术进行机械系统的运动学和动力学分析,以确定系统及其各构件在任意时刻的位置、速度和加速度。同时,通过求解代数方程组确定引起系统及其各构件运动所需要的作用力及其反作用力。它属于计算机辅助工程的一个重要分支,是 20 世纪 80 年代随着计算机技术的发展而出现的一项 CAE 技术。

虚拟样机技术与有限元方法的主要区别在于,它是从系统的层面上分析系统,因此虚拟样机技术对设计方法和过程的影响比有限元技术的影响要大。运用虚拟样机技术,可以大大简化机械产品的设计开发过程,大幅度缩短产品开发周期,大量减少产品开发费用和成