复合材料整体异形构件的 CAD 技术研究

段红杰 阎德元
(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院)

摘 要 对于多分支整体异形空心薄壁断面复合材料支架这种整体异形构件,由于复杂的空间曲面构形和纤维铺设连续性要求成为其 CAD 技术难题. 为此,采用分块建模和网格细化技术以控制曲面走向,生成等距网格,解决了有限元网格划分难题,利用试验及有限元软件完成了改变层压板铺层方向及顺序,对异形构件进行了力学性能分析和构件的优化设计. 经验证及产品质量检测,缝纫预形件树脂转移成形整体异形赛车架达到了设计要求,证明上述方法的可行性,可供航空航天及民用产品同类构件设计参考.

关键词 复合材料; 支架; 网格分析; 计算机辅助设计
分类号 TP 391.73

由于复合材料比强度和比刚度大,重量轻,可剪裁设计与优良的工艺性能,使复杂曲面构件成形成为可能. 因此,当前一些领域,特别是航天航空领域都在致力于研究复合材料异形整体构件的 CAD 技术研究. 然而,复合材料整体异形构件复杂曲面构形和纤维铺设连续性要求给 CAD 技术造成了困难. 为此以复合材料赛车架这种整体异形构件(下称异形构件)即典型的多分支整体异形空心薄壁断面复合材料支架为对象,对其进行 CAD 技术研究[1].

1 分块建模与网格细化

CAD 网格生成流程为:首先利用 AutoCADR$_{13}$ 软件绘制异形构件结构图,生成 DXF 图形交换文件,然后利用 ALGOR 软件接口技术将 DXF 文件读入有限元前处理模块即形成等距网格的 Super Draw 模块中.

由于异形构件为流线型自由曲面,具有不规则性特征,因此有限元网格划分十分困难,为解决此难点,采用了截面法分块建模,相邻两截面之间为一较规则形体,这样根据构件几何特征和层内碳纤维铺设方式,将整个异形构件分成 13 块,如图 1 所示. 每块截面形状由取点坐标决定,建模时即要保证每块模型与真实构件形状相贴近,又要保证块与块之间连接准确即相邻模块的共用截面各节点坐标必须相同,否则将成为无效单元,使前面的工作成为无效功.

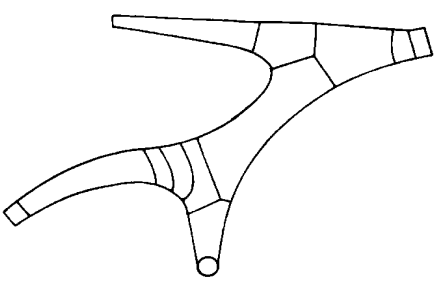


图 1 分块建模图

利用 Super Draw 模块将异形构件的每一块生成网格,然后将各块连成一整体,然后通过计算机预览,对局部图形进行再处理,预览后注意到曲线过渡不够光滑处,且引起后续应力计算值异常偏大,为了解决这一问题,有必要对曲线不光滑处进行局部网格细化处理. 细化时,在曲线不光滑处再取一截面,利用 Super Surf 模块生成光滑曲面,由于 Super Surf 中生成的网格大小是由样条曲线型值点控制,不是等距的,而在 Super Draw 中生成网格是等距的,故而曲线不光滑这一块与邻块不能正确相连,为此在 Super Surf 生成基础上,捕捉各节点,生成多个截面,然后转到 Super Draw 中的这多个截面所控制的曲面走向,重新生成(等距)网格,这样就解决了以上问题,得到完整的有限元网格,网格采用复合材料薄板四边形单元.

2 复合材料异形构件力学性能分析

2.1 异形构件材料的选择

根据异形构件的使用场合受力状态,经分析

收稿日期: 1998-10-29 第一作者 女 31 岁 硕士生 100083 北京

对比,增强材料要用法国 AMOCOT300 聚丙烯腈基碳纤维,基体材料选用与碳纤维亲合力强的 J153 环氧树脂体系,实践证明它与 T300 碳纤维相配套,可满足树脂传递模压 RTM (Resin Transfer Molding) 成形工艺成形的异形构件在 80 ℃以下的温度使用要求. T300/J153 力学性能见表 1.

表 1 T300/ J153 力学性能表

参数名称	参数值
铺层数	8
每层的铺设方向 θ/(°)	0
单向层压板纵向拉伸模量 E_{1t}/ GPa	141
单向层压板横向拉伸模量 E_{2t}/ GPa	133
单向层压板纵向剪切模量 G_{12}/ GPa	4.9
单向层压板纵向压缩强度 X_c/ MPa	1075
单向层压板横向压缩强底 Y_c/ MPa	166.1
主泊松比 γ_1	0.31
每层材料的厚度 h/ mm	0.15
质量密度 ρ/ (kg·m^{-3})	1560
单向层压板纵向压缩模量 E_{1c}/ GPa	8.8
单向层压板横向压缩模量 E_{2c}/ GPa	8.8
单向层压板纵向拉伸强度 X_t/ GPa	1956
单向层压板横向拉伸强度 Y_t/ MPa	58.1
单向层压板平面剪切强度 S/ MPa	99.6
次泊松比 γ_2	0.3

2.2 异形构件的静强度计算

异形构件层压板设计是根据层压板所受载荷确定其各铺层方向、层数及顺序,在满足强度、刚度、振动、冲击及工艺等条件下重量最轻. 采用 $\frac{\pi}{4}$ 对称层压板,取 0°、45°、-45°、90°铺层方向,其中 0°、90°铺层主要承受拉压应力,增加 45°铺层可承受剪切应力. 异形构件属薄壁结构,因此采用平面应力状态层压板理论,不考虑三维应力和层间应力影响,在 ALGOR 软件中,复合材料静强度分析采用蔡胡准则进行判别,失效因子大于 1 失效,否则不失效. 对于最危险点可从计算出的应力分布图中看出. 复合材料由于抗疲劳性能好,故当静强度满足要求,则疲劳强度一定满足要求.

根据初步计算铺设 8 层缝纫预形件,但采取如何铺层顺序尚需计算决定,为此设计了 B、C、D 3 种铺层顺序,分别代表[45°/0°/-45°/90°]$_s$、[45°/90°/-45°/0°]$_s$、[0°/45°/90°/-45°]$_s$ 铺层. 分别进行最危险层应力和失效因子的计算,其结果见表 2.

表 2 铺层顺序方案比较

铺层顺序	第一方向主应力 σ_1/ MPa		第二方向主应力 σ_2/ MPa		剪应力 σ_6/ MPa		失效因子	变形 δ/mm
	max	min	max	min	max	min		
B	206.775	-207.891	14.112	-16.618	12.035	-16.322	0.125	1.127
C	256.488	-202.323	19.018	-17.912	18.832	-24.018	0.139	1.168
D	263.489	-217.524	19.772	-25.532	18.832	-24.018	0.162	1.205

从表 2 中可以看出,[45°/0°/-45°/90°]$_s$ 铺层最危险处的主应力、失效因子及变形均最小,故采用此种铺层缝纫预形件.

2.3 异形构件的抗冲击试验

对于 T300/J153 铺层顺序采用 A = [0°]层压板刚度好,但抗冲击性能差,当采用不同的铺层顺序,则层压板的抗冲击性可明显提高. 本文采用了试验方法进行比较,对于 A、B、C、D 4 种不同铺层顺序,试样宽度为 1.492 cm、厚度为 0.149 cm,其 4 种不同顺序铺层的冲击韧性 a_k 试验结果见表 3.

表 3 碳纤维层压板冲击韧性

铺层顺序	A	B	C	D
a_k/ (kJ/ m^2)	110	290	270	230

从表中可看出,[45°/0°/-45°/90°]$_s$ 铺层的层压板抗冲击性能最好.

2.4 异形构件的振动计算

复合材料异形构件的振动分析包括各阶的振形和固有频率计算,对于 B、C、D 3 种不同铺层顺序和厚度的层压板各阶振动固有频率影响是不同的,经有限元计算结果见表 4 和表 5.

振动设计原则是要求各阶振动固有频率避开干扰频率的共振区,保证有足够频率储备. 当干扰频率 ω_f = 4.14 Hz 时,从表 4 及表 5 中可得整体铺层厚度为 8 层缝纫预形件,其铺层顺序为[45°/0°/-45°/90°]$_s$ 时,异形构件固有频率 ω_0 最高,频率比 $\beta=\frac{\omega_f}{\omega_0}\leq 0.528$,故可保证在各阶振形下均能避开共振区.

从以上分析和试验表明,铺层顺序为[45°/0°/-45°/90°]$_s$ 的层压板对异形构件的强度、刚度、抗冲击、振动均是最佳方案,这为异形构件优化设计提供了条件.

表 4 铺层顺序对各阶振动固有频率的影响

铺层顺序	f_1/ Hz	f_2/ Hz	f_3/ Hz	f_4/ Hz	f_5/ Hz
B	7.58	9.18	15.73	19.83	34.70
C	7.12	8.36	14.67	18.70	32.91
D	6.49	7.94	13.50	17.95	30.01

表 5　铺层厚度对各阶振动固有频率的影响

铺层顺序及厚度	f_1/ Hz	f_2/ Hz	f_3/ Hz	f_4/ Hz	f_5/ Hz
B(6 层)	6.11	8.02	13.05	17.37	26.35
B(8 层)	7.58	9.18	15.73	19.83	34.70

3　异形构件优化设计

异形构件的优化设计[2]是以重量最轻为目标函数,以结构尺寸、铺层厚度及顺序为设计变量,以造型、应力、刚度、失效因子、振动为约束条件,该优化问题是无法写出表达式的非线性优化问题,因此采用枚举法及局部补偿进行优化求解.

在复合材料异形构件力学性能分析基础上,以铺层顺序为 $[45°/0°/-45°/90°]_s$ 的层压板为例,枚举 3 种不同铺层厚度进行强度,失效因子及变形进行有限元计算,其结果见表 6.

表 6　不同铺层计算结果

铺层数	主应力 σ_1/ MPa		失效因子	变形 δ/ mm
	max	min	max	max
8 层	206.775	-207.891	0.125	1.127
6 层	395.319	-301.019	0.645	2.386
4 层	5955.966	-521.940	1.251	5.137

从表 6 中可以看出,整体铺 4 层,失效因子大于 1,不宜采用;整体铺设 8 层,失效因子小于 1,各项力学性能指标均满足要求,但材料消耗多;整体铺设 6 层,从计算结果应力及变形分布图看出,除个别地方出现应力及变形稍大,其余各处应力及变形分布较均匀.因此选用铺设 6 层方案为基础,在局部应力和变形较大处适当增加铺层,作为强度和刚度补偿.经补偿后的计算结果见表 7 及表 8.从表中可以看出,经优化后的异形构件各项机械性能指标有明显提高.

表 7　优化后有限元计算结果

项目	主应力 σ_1/ MPa		剪应力 σ_6/ MPa		失效因子	变形 δ/ mm
	max	min	max	min		
数值	302.385	-83.19	19.837	-16.451	0.136	1.181

表 8　优化后频率

各阶频率	f_1/ Hz	f_2/ Hz	f_3/ Hz	f_4/ Hz	f_5/ Hz
参数值	7.02	8.56	14.52	18.64	28.47

4　结 束 语

分块建模与网格细化相结合成功地解决了复合材料整体异形构件复杂曲面构形和纤维铺设连接性要求的 CAD 技术难题,从而为多分支整体异形支架复合材料构件的设计提供了 CAD 软件,同时也可供复杂曲面 CAD 技术研究参考.这种新材料、新工艺和近代设计方法与 CAD 技术高科技的综合应用,将对民用及航空航天领域正在致力研究的复合材料整体异形构件的设计技术提高和发展起到积极作用.

参 考 文 献

1　段红杰. 复合材料赛车仿生形态车架的 CAD 技术研究:[学位论文]. 北京:北京航空航天大学机电工程系,1998

2　陈立周主编. 机械优化设计方法. 北京:冶金工业出版社,1995

3　蔡为仑(美). 复合材料设计. 北京:科学出版社,1989

4　崔俊芝,梁　俊. 现代有限元软件方法. 北京:国防工业出版社,1995

Investigation on CAD of Composite Materials Entire-Body Special-Shaped Component

Duan Hongjie　Yan Deyuan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, School of Mechanical Engineering and Automation)

Abstract　For entire-body special-shaped component such as multi-branch entire-body special-shaped hollow composite material tressel, the complex curved surface construction and continuity in laying fiber become obstacle in CAD. So block-modeling and grid-refining are used to control the direction of the surface and generate equal-space grids. As a result, it is easier to generate the grids. The order and direction of the board layer are changed, the mechanical properties is analyzed and the design of component is optimized by means of testing and simulating with finite element software. The entire-body special-shaped racing bicycle, shaped by pouring resin into sewing exemplar, is proved to be acceptable after experiment and checking. This means that the method is practicable and can be used to design components of either aerostat and space craft or civil product.

Key words　composite materials; supports; network analysis; CAD