

民用飞机有限元模型质量检查探讨

Discussion of Quality Check on the Finite Element Model for Civil Aircraft

刘国方 孙惠敏 李 真 朱森虎 / Liu Guofang Sun Huimin Li Zhen Zhu Senhu
(上海飞机设计研究院, 上海 201210)
(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘 要:

介绍了民用飞机有限元模型质量检查内容,提出了网格质量检查项目及方法,给出了有限元单元几何检查建议值,介绍了刚度检查、静平衡检查、自由振动检查、热膨胀检查、“接地”检查等模型质量检查方法。

关键词:有限元分析;模型质量;几何检查

[Abstract] The contents of quality check of the finite element model(FEM) for civil aircraft are introduced in this paper. The items and methods used to verify the mesh quality of the FEM are proposed. The recommended check values of finite element geometries are illustrated. The methods used to do quality check of the FEM, such as stiffness check, static equilibrium check, free-free vibration check, free thermal expansion check, ground check, and etc, are introduced.

[Key words] Finite Element Analysis; Model Quality; Geometry Check

0 引言

民用飞机在国内外有巨大的市场需求,对国民经济发展和科技进步有重大带动作用^[1],中国民用航空规章第 25 部《运输类飞机适航标准》中对其安全性、功能性有严格要求^[2]。航空工业界普遍采用有限元法进行飞机结构的静、动、疲劳强度和刚度的分析^[3]。有限元模型的合理建立是有限元分析的关键之一,模型质量将直接影响计算结果的精度。实际工作中,很需要一套系统的对有限元模型质量进行检查的方法,本文介绍了民用飞机有限元模型质量的检查内容,给出了多种有限元模型质量检查方法,为模型质量检查提供依据。

1 软件环境

本文涉及的有限元建模和有限元分析软件分别为国际通用并经各国适航当局认可的 MSC. PATRAN 和 NASTRAN V2005 以上。

2 有限元网格质量检查

2.1 节点

2.1.1 重复节点(Duplicate Grid)检查

使用 patran 中 equivalence 工具,设置容差为 0.001,然后检查命令栏中运行信息。

2.1.2 空点检查

空点在模型中无任何单元与之连接,分为冗余节点和参考节点两类,在 NASTRAN 输入文件中加参数卡“param,gpect,1”(若用超单元,则需在 case control 中加“seall=all”卡片),再在 F06 文件中找出空点,去除冗余节点,保留参考节点。

2.2 单元

2.2.1 重复单元检查

使用 PATRAN 中 VERIFY 工具,检查是否存在重复单元。

2.2.2 单元数量及编号

在提交 NASTRAN 计算的数据文件中加参数卡“PARAM,PROUT,1”,输出各类单元个数、相应单元的 begin id 号和 end id 号,从中检查如下事项:

(1)某些单元数目是否占比例过大(如三角形板元占比过大会增加模型刚度);

(2)单元编号是否符合有限元建模规定中单元编号规定。

2.2.3 单元属性检查

在提交 NASTRAN 计算的数据文件中加参数卡“param,est,1”,输出各类单元的长度(或面积、体积

信息),检查其是否存在异常。

2.2.4 单元几何形态检查

单元几何形态检查如表 1 所示^[4]。

表 1 单元几何形态检查项目

单元类型	检查项目	意见		备注
		建议	警告或致命	
梁元(cbar/cbeam)	“1”平面定义方向			
	偏心量	≤ 0.15		$(L_{\text{offset}} - L)/L$
三角板元(ctria3)	歪斜度(skew)	$\geq 10^\circ$	$< 10^\circ$	
	a/b(aspect)	≤ 5		
	内角 IA(max)	$\leq 160^\circ$	$> 160^\circ$	
	tangent offset	≤ 0.15	> 0.15	
	normal offset	≤ 0.15	> 0.15	
四边形板(cquad4/cquad8)	Jacobian Ratio	> 0.5		
	歪斜角(skew angle)	$\geq 30^\circ$	$< 150^\circ$	
	a/b(aspect)	≤ 5		
	翘曲度(warp)	$\leq 10^\circ$		
	锥度(Taper ratio)	≤ 0.5	> 0.5	
	内角 IA(min)	$\geq 30^\circ$	$< 30^\circ$	
	内角 IA(max)	$\leq 150^\circ$	$> 150^\circ$	
	Jacobian Ratio	> 0.5		
四面体	tangent offset	≤ 0.15	> 0.15	
	normal offset	≤ 0.15	> 0.15	
	aspect	≤ 5		
	相邻面最大偏差角(edge angle)	$\leq 30^\circ$		
	每个面的歪斜角(face skew)	$\geq 30^\circ$		
	体积最小值(collapse)	≥ 0.01		
五面体	tangent offset	≤ 0.87		
	normal offset	≤ 0.15		
	Jacobian Ratio	> 0.5		
	aspect	≤ 5		
	相邻面最大偏差角(edge angle)	$\leq 30^\circ$	$> 120^\circ$	
	每个面的歪斜角(face skew angle)	$\geq 30^\circ$		
	每个四边形的翘曲度(face warp cosine)	< 0.71		
	两个相对的三角形表面的扭转角(twist angle)	$\leq 45^\circ$		
六面体	五面体锥度(face Taper)	≤ 0.8		
	tangent offset	≤ 0.87		
	normal offset	≤ 0.15		
	Jacobian Ratio	> 0.5		
	Aspect(a/b)	≤ 5		
	相邻面最大偏差角(edge angle)	$\leq 30^\circ$		
	每个面的歪斜角(face skew angle)	$\leq 30^\circ$		
	每个四边形的翘曲度(face warp cosine)	≤ 0.71		
中间节点位置(中间节点到所在边中心的距离 $<L/6$)	两个相对的六面体表面的扭转角(twist angle)	$\leq 45^\circ$		
	六面体锥度(face Taper)	≤ 0.8		
中间节点位置(中间节点到所在边中心的距离 $<L/6$)	tangent offset	≤ 0.5		
	normal offset	> 0.87		

3 模型质量检查方法

3.1 奇异节点检查

NASTRAN 分析结果文件 F06 中如有 grid point singularity table 输出,须检查其是否合理。

3.2 刚度检查

刚度方阵 KOO 或 KLL 被分解后($K = LDL^T$),需检查其向量对角元是否存在负值,即:

Number of negative terms on factor diagonal = N
(N 为矩阵中负值个数,应为零)

3.3 静平衡检查

施加载荷及约束,通过理论分析和 NASTRAN 分析结果的比较,判断有限元模型中载荷传递路径和应力分布的合理性,检查求解精度(一般要求小于 10^{-9}),以及外载荷和约束力是否平衡。

3.4 自由振动检查

模态一般主要检查自由模态、6 个刚体模态和固有频率,共分为 3 种检查,模型中应不存在集中质量点。在 NASTRAN 中使用 SOL 103 求解器,选用 LANCZOS 方法,按 NASTRAN 软件输入格式第 1 种频率范围设为 $[-1, 1]$,第 2 种频率范围设为 $[0, 1]$,第 3 种频率范围设为 $[1, \infty]$,其中 $[-1, 1]$ 对应的模型设为自由边界且无外力作用,连有活动面的驱动器件; $[0, 1]$ 对应的模型设为自由边界且无外力作用,未连上活动面的驱动器件; $[1, \infty]$ 对应的模型设为自由边界且无外力作用,连有活动面的驱动器件。需在模型文件 MATX 卡片中填写材料密度,第 1、2 种检查设定为输出前 6 阶模态,第 3 种检查设定为计算前 15 阶柔体模态。

对于第 1 种检查,其输出的 6 阶模态频率必须小于 0.01Hz。

对于第 2 种检查,其输出的 6 阶模态频率必须全部为刚体模态,且活动部件的转动频率为 0Hz。

对于第 3 种检查,其标准频率范围为 $[1, 40]$ Hz,用于检出模型的局部和伪模态,以及柔体模态。

进行这 3 种检查需遵循以下原则:

(1) 必须在材料卡上设置材料密度,验证目的是确认该模型不会得到“失真”柔体模态;

(2) 必须取消自动单点约束, NASTRAN 中应设定参数:PARAM AUTOSPC NO;

(3) 平移自由度的奇异性必须通过正确使用刚性元 RBE 予以排除;未运用 PARAM, K6ROT, 1 和 PARAM, SNORM, 20 予以约束的转动自由度奇异性通常须运用单点约束 SPC 或刚性元 RBE 予以排除。不能在 GRID 和 GRIDSET 卡片中设置永久性单点位移约束,以免无意中造成动态分析时质量“接地”(若该节点用作质量点),或静力分析时产生载荷(若该节点用作加载点);应使用 SPC 或 SPC1 卡片消除节点奇异性;

(4) 对任何模型形状的偏离,需在基本坐标系下绘制图形进行评估;凡位移坐标系与基本坐标系不一致的部位,应予具体标识,并尽可能绘图显示。

3.5 热膨胀检查

零应力检验。将整个模型赋以相同的材料属

性,刚性元(RBAR/RBE1/RBE2/RBE3)的热膨胀系数(ALPHA)设为由 LAGRANGE 方法确定(RIGID=LAGR),使用 tempd 卡片设置参考温度及工作温度,运用 NASTRAN 求解,检查模型应力水平。

进行自由热膨胀分析时为满足“零应力”检验,力学上有效的模型须按下述规则予以修正:

(1) ROD 单元:无使用限制;

(2) BAR/BEAM 单元:剪心轴的偏置不能改变定义梁元两节点之间的距离;BEAM 元中性轴的偏置对分析结果没有影响;

(3) QUAD/TRIA 单元:如果使用了偏置量 ZOFFS 参数或 Z0,受 MSC. Nastran 限制,参数 SNORM 必须设为 0.5,代替缺省值 20.0;受 NASTRAN 限制,单元的翘曲会产生非零应力,但其结果一般都在可接受范围内;

(4) CELAS 单元:如该单元的两个节点重合,则不影响结果;若存在非零长度,则无效;

(5) RBE2 单元:在两个重合节点之间的单元,并关联 6 个自由度(DOF),不影响结果;

(6) RBE3 单元:如果从属节点未和其他刚体单元相连,不影响结果;

(7) MPC 单元:如果从属节点位于两个带有相同加权系数的主节点的重心处时,不影响结果。

需注意的是,TEMP(INIT)参数设置会覆盖 MAT 卡片和 PCOMP 卡片中的 TREF 参数。

为了便于检查结果,在 CASE CONTROL 语句中加入 ESE=ALL 语句,借以输出检查测试失败的单元及其应力。计算完成后需检查以下项目,以确保模型的准确性:

(1) 如果计算结果中有单元的应力高于 1MPa,则需检查模型;

(2) 外载荷(OLOAD)与约束力(SPCFORCE),正常情况下,其值应为小量;

(3) 刚度矩阵的奇异性检查;

(4) 求解精度和应变能检查。

3.6 刚性运动“接地”检查

以刚体运动对刚度矩阵进行“接地”检查,借以揭示建模时不小心形成的约束,诸如不正确连接的弹簧元,不适当的多点约束(MPC),以及太差的单元形态等。它们的存在导致结构刚体运动时产生内力和应变,犹如“接地”(即给予了基础支持)一样。

(下转第 45 页)

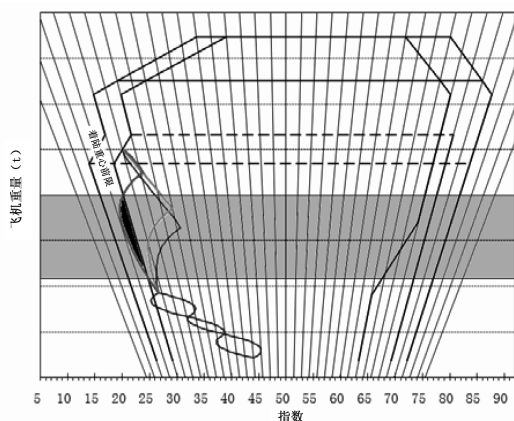


图7 超出重心前限的典型装载示意图

中灰色区域,且在此重量状态下进行着陆时,可以看出采用A型油箱的飞机重心超出了重心包线中着陆前重心限制(如图中黑色区域所示),而采用B型和C型油箱的飞机重心没有超出着陆前重心限制。那么就需要对采用A型油箱的飞机在装载时进行限制,避免此种装载情况的出现。

从以上两种典型装载的分析可以看出:

采用C型油箱的飞机在装载一的情况下,着陆重心超出了后重心包线限制,采用A型油箱的飞机在装载二的情况下,着陆重心超出了前重心包线限制,而采用B型油箱的飞机在两种装载情况下重心均没有超出重心包线限制,这主要是由于C型油箱的燃油重心向后的变化范围较大,而A型油箱的燃油重心向前的变化范围较大导致的。由此可见,采用燃油重心向前向后变化范围小的油箱时,飞机在装载过程中受到重心包线的限制会比较少。

本文只列举了两种典型装载情况进行分析,而飞机在实际运营过程中各种装载情况均有可能出

(上接第30页)

4 结论

有限元模型是结构强度分析中应力、稳定性、振动、颤振等工程数值计算的基础,模型质量检查流程可以保证有限元模型在数值上的正确性,并避免设计者粗心造成的错误^[4]。介绍了民用飞机有限元模型质量检查内容,提出了网格质量检查项目及方法,给出了有限元单元几何检查建议值,介绍了刚度检查、静平衡检查、自由振动检查、热膨胀检查、接地检查等模型质量检查方法。

现,因此在制定重心限制时就需要将装载限制作为一个因素进行分析,合理确定起飞、着陆和巡航状态的重心前后限制,制定完重心包线后还需要对各种可能出现的典型装载情况进行分析,对超出重心包线的情况进行限制,只有这样才能保证飞机的运营安全。

4 结论

本文分析了民用飞机选取不同油箱分离面的主要考虑因素,并着重分析了采用不同的油箱分离面对飞机重量重心的影响。从本文的分析可以得出,民用飞机采用不同的油箱分离面对飞机的重量重心会产生较大影响,但是对重量和重心的影响只是一方面因素。燃油箱的布置和设计需要综合考虑多重因素,并针对型号飞机的特点、适航规章的要求等进行必要的权衡,只有综合好各种影响因素才能做出最好的油箱设计。

参考文献:

- [1] 陈俊章,等. 重量平衡与控制[M]. 第1版. 北京:航空工业出版社,1999:92-98.
- [2] 中国民用航空局. CCAR-25-R3 中国民用航空规章第25部 运输类飞机适航标准[S]. 北京:中国民用航空局,2001.
- [3] 张欲晓,樊尚春. 民用飞机燃油油箱的防爆方法[C]. 中国航空学会2007年学术年会,1997.
- [4] 杨朋涛,牛量,蒋军昌. 基于飞机油箱模型形状特征的油量测量切片步长选择方法研究[J]. 航空学报,2008,29(3):657-663.

参考文献:

- [1] 刘国方,等. 大型飞机机身结构的特点与选材[C]. 大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会,2007.
- [2] 中国民用航空总局. CCAR-25-R3 中国民用航空规章第25部运输类飞机适航标准[S]. 中国:中国民用航空局,2001.
- [3] 吴存利. 浅谈民机强度有限元分析适航认证技术[J]. 航空科学技术,2011,2:36-39.
- [4] MSC. Nastran 2010 Quick Reference Guide.
- [5] Alan E. Stockwell, A Verification Procedure for MSC/NASTRAN Finite Element Models [R]. NASA CR - 4675, May 1995.