QJ

中华人民共和国航天行业标准

FL 1610

QJ 20714－2018

航天器结构力学分析指南
模型建立及检验

Spacecraft structural analysis guidance—

Structure modeling and checkout

2018－01－18 发布

2018－05－01 实施

国家国防科技工业局 发 布

目　　次

前言 II
1　范围 1
2　规范性引用文件 1
3　术语和定义 1
4　建模依据 1
4.1　航天器结构设计状态 1
4.2　航天器构型和布局 1
4.3　航天器质量特性 1
4.4　航天器主要单机设备机械接口参数 2
4.5　用于装配的外部模型 2
4.6　载荷条件 2
4.7　边界条件 2
5　建模流程 2
6　模型建立 4
6.1　分析软件选择 4
6.2　单位制和坐标系选择 4
6.3　几何模型简化 4
6.4　单元类型选择 4
6.5　单元网格划分 4
6.6　单元拓扑检验 5
6.7　材料定义 5
6.8　单元属性定义 5
6.9　外部模型检验 5
6.10　模型装配 5
6.11　载荷和边界施加 7
7　模型检验 8
7.1　设计信息检查 8
7.2　数学有效性检验 8
8　模型修正 11
8.1　修正内容 11
8.2　修正方法 12
附录 A（资料性附录）　刚体运动相关矩阵计算公式 13
附录 B（资料性附录）　模型修正目标函数计算公式 14

前　　言

本标准的附录A和附录B为资料性附录。

本标准由中国航天科技集团有限公司提出。

本标准由中国航天标准化研究所归口。

本标准起草单位：中国航天科技集团有限公司第五研究院总体部。

本标准主要起草人：盛　聪、刘国青、钱志英、王晓宇、梁东平、高行素。

航天器结构力学分析指南　模型建立及检验

1　范围

本标准规定了航天器结构力学分析的建模依据，建模流程，以及模型建立、模型检验与模型修正方法。

本标准适用于采用有限元方法进行航天器结构力学分析及大型部件力学分析的有限元建模。

2　规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包含勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 29081－2012　航天器模态计算方法

3　术语和定义

GB/T 29081－2012确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

惯性释放　inertia relief

对于无约束的结构，用结构的惯性力平衡外力，假设其处于一种“静态”的平衡状态。

3.2

缩聚模型　reduced models

对与物理模型对应的方程进行数学变换，如静态或动态缩聚，从而降低方程维数（自由度），且主要特性不变，由保留节点或缩聚矩阵表示的模型。

4　建模依据

4.1　航天器结构设计状态

航天器结构设计状态包括：

a）　结构的构型、尺寸和材料；

b）　结构部件之间的连接形式。

4.2　航天器构型和布局

航天器构型和布局包括：

a）　航天器总体布局；

b）　各仪器设备安装位置。

4.3　航天器质量特性

航天器质量特性包括：

a）　航天器的质量、质心和惯量；

b）　关键设备的质量、质心和惯量；

c）　结构组件（如：单块结构板）及其上布置的仪器设备（包括电缆、热控措施等）的总质量。

4.4 航天器主要单机设备机械接口参数

航天器主要单机设备机械接口参数包括：

a） 接口位置；

b） 接口形式。

4.5 用于装配的外部模型

用于装配的外部模型包括：

a） 单机设备的有限元模型；

b） 其他次级结构的有限元模型。

4.6 载荷条件

载荷条件是航天器结构在生产、总装、试验、运输、发射、在轨运行、返回及着陆过程中承受的各种载荷，包括：

a） 静载荷（准静态惯性载荷、内压载荷、热载荷、起吊载荷等）；

b） 正弦振动载荷；

c） 随机振动载荷；

d） 其他载荷，如：对接载荷、开伞载荷、着陆载荷等。

4.7 边界条件

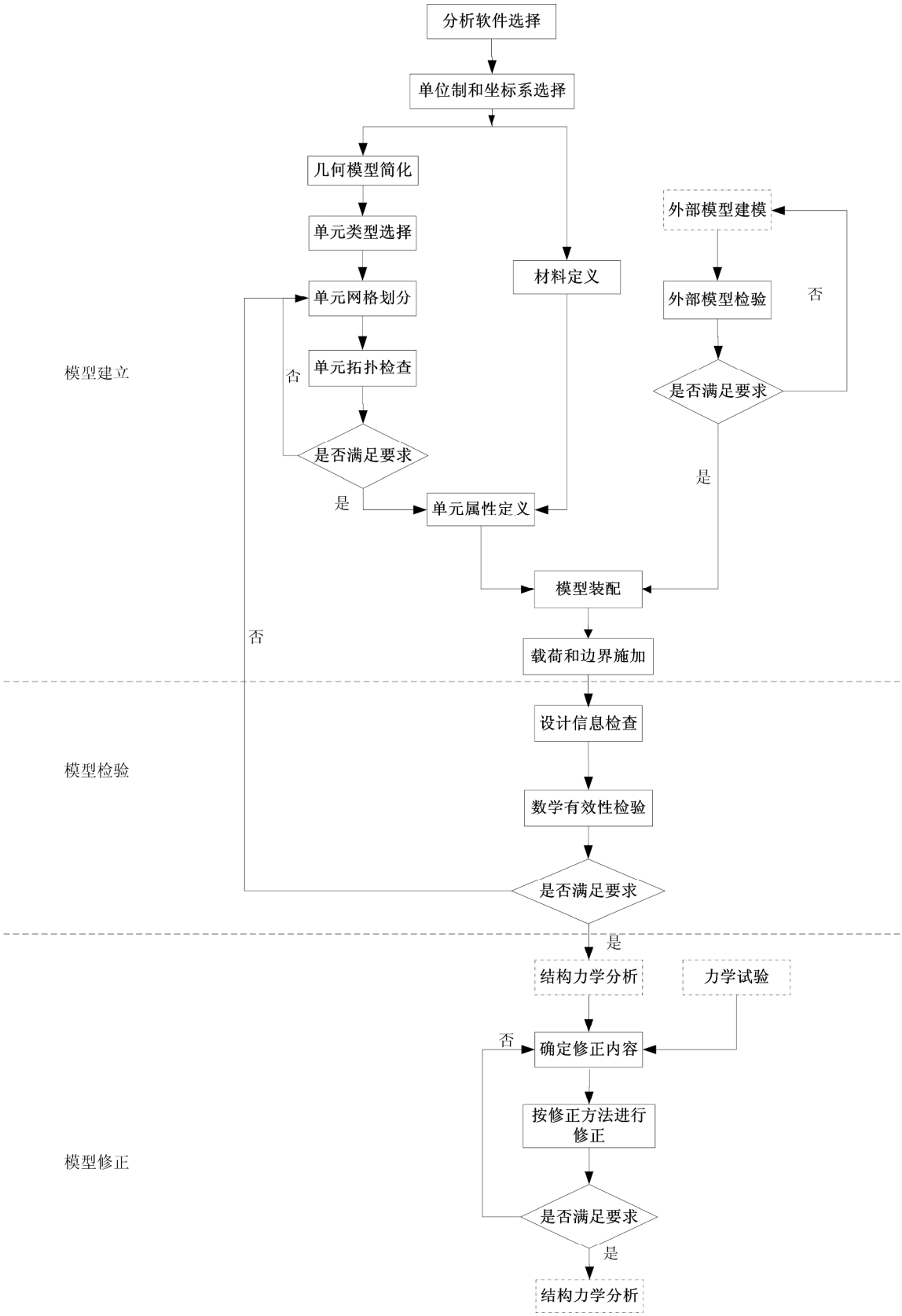
边界条件包括内容如下：

a） 航天器结构与运载火箭之间的接口形式；

b） 航天器结构与其他支撑设备（如：支架车、吊具、试验工装等）的接口形式。

5 建模流程

航天器结构力学分析有限元建模的一般流程见图1。



注：虚框表示该工作不属于有限元建模，但与有限元建模存在迭代关系。

图1　航天器结构力学分析有限元建模一般流程

6 模型建立

6.1 分析软件选择

分析软件选择的要求如下：

a） 应与分析类型、分析对象的物理特性、需提供的分析结果类型等因素相适应；

b） 应在航天器工程中经过验证；

c） 有较好的前后处理能力。

6.2 单位制和坐标系选择

6.2.1 单位制选择

单位制选择应采用国际单位制，如：kg、m、s、K。

6.2.2 坐标系选择

分析模型的整体坐标系应优先选用航天器机械坐标系。

6.3 几何模型简化

几何模型简化的一般要求如下：

a） 应根据结构的几何与受力特征，将其抽象为点、线、面或体；

b） 对于采用质量元模拟的集中质量，几何模型取位于质心处的点；

c） 对于截面规则的梁杆结构，几何模型取中心线或惯性主轴等其他特征线；

d） 当板壳结构的厚度方向尺寸远小于另两个方向时，几何模型取板壳结构的中面或上下表面；

e） 对于三个方向尺寸量级相当的结构，应采用实体进行几何建模；

f） 导入 CAD 模型前，应对分析结果影响不大或远离分析关键部位的几何细节（如：螺纹孔、倒圆角等）进行简化。

6.4 单元类型选择

单元类型选择的一般要求如下：

a） 在能满足分析要求的前提下，优先选用形状规则、精度高、计算效率快的单元类型；

b） 框架、桁架、轴等结构一个方向的尺寸远大于另两个方向时，若只承受轴力或扭矩，采用杆单元模拟；若承受横向力和弯矩，采用梁单元模拟；

c） 板壳结构的两个方向尺寸均大于第三个方向，且为 10 倍以上时，采用板壳元模拟；

d） 结构部件的三个方向尺寸量级相当时，采用实体单元模拟；

e） 对于结构部件之间的接头或特殊连接处，采用弹簧单元或多点约束单元模拟；

f） 连接结构刚度很高且不需要详细建模时，采用刚性单元模拟；

g） 进行应力集中区域的强度校核时，宜采用规则的四边形单元或六面体单元模拟应力集中区域。

6.5 单元网格划分

6.5.1 单元几何形状

单元应具有良好的几何形状，如：正三角形单元、正四边形单元等，具体单元形状检验方法见第7章。

6.5.2 网格密度确定

应选择合适的网格密度，一般要求如下：

a） 应力梯度大的区域网格应加密，或选择高阶次的单元；

b） 对于几何特性（如：尺寸、截面等）或物理特性（如：弹性系数等）有突变的部位，在划分单元时该部位应作为单元的边线，必要时应对该部位的网格进行加密；

c） 进行强度分析建模时，结构网格应加密；进行稳定性分析建模时，在压应力和剪应力相对严重的区域，网格应加密，确保有足够的单元表示失稳波形。

6.5.3 不同类型单元的连接

梁单元与板壳单元、梁单元与体单元以及板壳单元与体单元的连接处应保证单元节点位移相协调。

6.6 单元拓扑检验

单元拓扑检验要求见7.2.1。

6.7 材料定义

应根据所使用的结构材料特性和分析类型定义材料性能参数，要求如下：

a） 金属等线弹性各向同性材料一般定义弹性模量、泊松比及密度；

b） 复合材料单向层及蜂窝芯一般按正交各向异性材料定义，包括各方向的弹性模量、剪切模量、泊松比及密度；

c） 层合复合材料一般定义各层的材料属性、铺层角度、单层厚度、沿单元法向的铺层顺序等；

d） 进行弹塑性分析时，除了定义材料的弹性性能外，还应定义材料的塑性性能，包括应力－应变关系、屈服极限、强度极限等；

e） 进行频率响应、时域响应等动态分析时，应根据分析需要定义材料的阻尼系数；

f） 进行热应力及热变形分析时，应定义热膨胀系数和参考温度。

6.8 单元属性定义

应根据单元特性定义其相应的属性，要求如下：

a） 对于集中质量单元，可根据需要定义其质量、惯量及其相应的参考坐标系等质量特性信息；

b） 对于梁单元，应定义梁截面的参考坐标系、截面面积、抗弯和抗扭刚度、剪切修正系数等；

c） 对于板壳单元，若为各向同性材料结构，只需定义厚度；若为夹芯结构或层合复合材料结构，可按层合复合材料定义，并确认铺层角度零度的方向，也可利用试验结果直接定义层合板的等效刚度特性，且考虑横向剪切修正系数；

d） 当梁或板壳单元的节点与自身中性面不重合时，应定义中性面的偏置；

e） 对梁和板壳单元，可根据其上仪器设备等非结构质量分布，定义合适的非结构质量值，模拟质量特性；

f） 对于实体单元，应定义材料名称和材料方向。

6.9 外部模型检验

外部模型坐标系应采用国际单位制，建模软件应与被装配的结构建模软件一致。

外部模型检验方法见第7章。

6.10 模型装配

6.10.1 结构本体模型装配

航天器结构的连接形式主要有胶接、铆接、焊接和螺接四种，结构本体模型装配要求如下：

a） 应考虑简化程度对分析结果的影响，选择合适的简化连接方式，如：限制六个自由度、限制

五个自由度或限制三个自由度等对结构进行装配；

b） 胶接、铆接和焊接形式一般应简化为刚性连接；

c） 螺接形式应视具体情况简化为刚性连接（限制六个自由度）、限制五个自由度的连接或限制三个平移自由度的铰接。两块结构板采用一个螺钉连接（见图 2），可简化为限制五个自由度的连接；两块结构板采用角盒加螺钉的方式连接（见图 3），可简化为刚性连接。

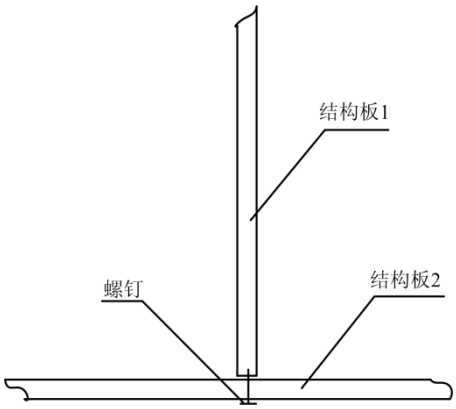


图 2　结构板连接形式 1

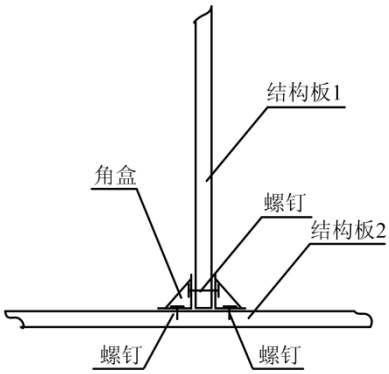


图 3　结构板连接形式 2

6.10.2　仪器设备模型装配

仪器设备模型装配要求如下：

a） 对于安装面小、重量轻、体积小、质心较低的仪器设备，可简化为均布质量，并将均布质量和结构质量总和加到单元上；

b） 对于体积大、安装面较大或重量较重、质心较高的仪器设备，可简化为集中质量，在相应的节点上加上它的质量特性，并用适当的单元模拟仪器设备的支承结构；

c） 某些仪器设备的质量较大或参与结构承力对结构刚度有影响时，应建立能模拟仪器设备结构刚度和质量的简化模型或采用仪器设备的有限元模型进行装配。

6.10.3　外部模型装配

外部模型装配要求如下：

a） 外部模型装配前，应对其进行检查，确认其单位制、坐标位置、网格数量及网格质量满足要求，并通过单机边界下的模态分析确认模型的可用性、状态及传递版本；

b） 导入外部模型时，宜将外部模型独立编组并针对该组可进行平移及旋转等建模操作；

c） 模型的装配与连接应能反映真实的连接状态，便于获取连接载荷并易于进行受力状态评估。对于螺钉或螺栓的连接形式，采用刚性约束单元或刚性短梁单元进行连接；对于压紧释放机构的连接形式，采用等效刚度的弹簧单元进行连接；对于轴承或滑套等连接形式，应注意释放相应的自由度。

6.11 载荷和边界施加

6.11.1 模态分析

模态分析中载荷和边界施加的要求如下：

a） 在航天器模态分析时，应在模型边界处施加固支或简支边界条件，模型边界一般是运载火箭与航天器之间的界面；

b） 模态分析一般不应施加载荷，但是当载荷对模态有显著影响时，应对分析对象进行含预载的模态分析。

6.11.2 静力（含稳定性）分析

静力（含稳定性）分析中载荷和边界施加的要求如下：

a） 边界条件同 6.11.1 a）；

b） 当位移边界条件处的局部结构为分析关注对象时，应细化该处模型及边界条件，考虑边界处的弹性性能及接触状态变化；

c） 当仅需对航天器模型中的局部结构进行强度分析时，可在距关注对象一定距离的位置施加边界条件，边界条件施加位置的选取不应改变关注对象的传力路径及受力状态；对于航天器模型中的局部结构，由系统分析得到集中载荷或等效过载进行分析，但应注意模型中其他部分受力状态对关注对象分析结果的影响；

d） 进行航天器系统分析时，宜在边界处建立刚性参考面，在参考面控制点施加位移边界及载荷边界，实现加载的一致性，以利于获取边界支撑载荷；

e） 对于准静态过载分析，以惯性载荷的形式施加；

f） 进行起吊分析时，应约束吊点处与重力方向一致的平动自由度，防止出现静不定问题影响计算，应另选取典型点施加另外两个方向的平动自由度及沿起吊轴向的转动自由度，典型点宜选取模型中心线上一点，也可采用惯性释放技术进行起吊分析；

g） 内压分析的边界条件可采用惯性释放约束，或约束典型位置使其成为静定结构。

6.11.3 响应分析

响应分析中载荷和边界施加的要求如下：

a） 进行航天器系统级发射状态下正弦振动和随机振动响应分析时，应约束模型边界处除激励方向以外其他五个方向的自由度；

b） 进行航天器系统级发射状态下正弦振动和随机振动响应分析时，应在运载火箭及航天器之间的界面施加加速度、位移或力载荷激励。

6.11.4 热应力及热变形分析

热应力及热变形分析中载荷和边界施加的要求如下：

a） 进行在轨工况分析时，可采用静定边界约束；进行地面工况分析时，应根据试验实施情况，

采用固支边界或弹性边界；

b） 施加于分析模型的温度载荷应能反映航天器热分析的结果，宜采用温度场空间映射的方法施加温度载荷。

6.11.5 其他

施加载荷和边界的其他要求如下：

a） 应根据分析结果及真实结构特性，评估边界条件施加的有效性以及是否引起不真实的受力状态，如：检查边界条件处支反力大小及分布；

b） 必要时，应进行边界条件对分析结果的灵敏度检查，获取边界状态对分析结果的影响；

c） 必要时，可根据物理试验结果对航天器模型的边界条件进行修正。

7 模型检验

7.1 设计信息检查

7.1.1 检查目的

模型设计信息检查的目的如下：

a） 检查有限元物理模型在几何尺寸和单元属性等方面的设置与设计状态的一致性；

b） 避免因单位制、坐标系、几何尺寸、自由边和重单元、材料属性等因素导致的建模错误。

7.1.2 检查内容

模型设计信息检查内容如下：

a） 单位制：检查模型中单位制的一致性和匹配性；

b） 坐标系：若模型中定义多个坐标系，应对单元、节点和约束的分析参考坐标系进行检查和确认；

c） 几何尺寸：检查有限元模型几何尺寸与设计值的一致性；

d） 自由边和重单元：确认模型中不存在多余的自由边，检查重节点和重单元，消除不必要的节点和单元；

e） 材料属性：检查材料参数赋值是否正确，所采用单位是否与模型尺寸单位相匹配；检查材料属性赋值是否充分，是否能满足分析需要（如：进行热变形分析，应在材料属性中填写参考温度和热膨胀系数等）；检查层合复合材料铺层角度及单向层厚度与设计值的一致性；

f） 单元属性检查：检查梁单元的截面属性、板壳单元厚度与设计参数的一致性；检查梁单元和板壳单元的偏置量与设计参数的一致性；检查梁单元方向与设计参数的一致性；检查板壳单元的单元坐标系和单元法向是否正确；检查复合材料板壳单元的材料方向与设计参数的一致性；检查集中质量元的质量和惯量与设计参数的一致性；

g） 多点约束单元：检查多点约束单元是否正确建立，避免对结构施加过约束或欠约束；

h） 边界约束检查：检查边界约束是否施加在正确的节点和自由度上；

i） 质量特性：检查模型质量特性是否符合设计值或测试值；检查模型质量与设计值的相对误差，误差值一般小于 0.3%；当结构本体尺寸不大于 1m 时，模型与设计质心位置误差应小于 3mm，当结构本体尺寸大于 1m 时，模型与设计质心位置相对误差应小于 0.3%。

7.2 数学有效性检验

7.2.1 单元拓扑检验

7.2.1.1 检验目的和适用范围

单元拓扑检验的目的是对物理模型的几何特征进行检查，以确保单元质量和求解精度。

单元拓扑检验适用于有限元物理模型的检验。

7.2.1.2 检验内容和指标

一般情况下，板壳单元（包括三角形单元和四边形单元）拓扑检验指标见表1，体单元拓扑检验指标见表2。对于关注程度不高的区域，单元质量要求可适当放宽。

表 1 板壳单元拓扑检验指标

检验指标		指标值	检验指标说明
长宽比		≤5	单元最长特征尺寸和最小特征尺寸的比值
倾斜角	三角形单元	≥10°	三角形单元或四边形单元的倾斜程度
	四边形单元	≥30°	
单元内角	三角形单元	≤160°	单元相邻边的夹角
	四边形单元	≥30°，≤150°	—
四边形单元翘曲度		≤0.05	四边形四个点的不共面程度
四边形单元锥度		≤0.5	四边形单元偏离正方形的倾斜程度

表 2 体单元拓扑检验指标

检验指标	指标值	检验指标说明
长宽比	≤100	见表 1
五面体和六面体单元面翘曲度	≤0.707	

7.2.2 刚体运动检验

7.2.2.1 检验目的和适用范围

刚体运动检验的目的是检查模型中是否存在不合理的约束（包括单点约束和多点约束）。

刚体运动检验适用于有限元物理模型和缩聚模型的检验。

7.2.2.2 检验方法

刚体运动检验又称单位强制位移检验。通过分别在三个平动方向和三个转动方向上，对模型施加单位位移或单位转角，使之产生相应的刚体运动，判别应变能、节点力等输出量是否符合刚体运动规律，进而判断模型中是否存在不合理（多余）的约束。

7.2.2.3 检验内容和指标

刚体运动检验内容和检验指标推荐值见表3，检验物理量计算方法参见附录A。

表 3 刚体运动检验内容和检验指标推荐值

检验内容	指标值		说明
刚体运动应变能	对于 1m 或 1rad 的刚体位移或转角	$<1\times10^{-3}$J	理论值为零
刚体运动残余节点力		<0.1N	理论值为零
刚体运动残余节点力矩		<1.5N·m	理论值为零
刚体运动质量矩阵	模型质量、惯量和质心坐标与期望值是否存在差异		—

7.2.3 1*g* 载荷系数下的力平衡检验

7.2.3.1　检验目的和适用范围

1g载荷系数下的力平衡检验用于对模型质量、刚度和约束边界的检查，通过单元力的分布可以对结构的传力路径进行初步判断。

1g载荷系数下的力平衡检验适用于有限元物理模型和缩聚模型的检验。

7.2.3.2　检验方法

通过对给定边界的有限元模型在各个方向上分别施加1g的惯性载荷，得到约束反力、位移、单元力等信息，进而对模型质量、刚度和约束边界等进行初步校核。

7.2.3.3　检验内容和指标

在1g惯性载荷工况下，约束反力应当仅产生在被约束的节点上，且在加载方向的约束反力相加后等于模型总重量，而其余方向的约束反力之和为零。除被约束节点外，内部节点约束反力的一般允许值见公式（1）。

$$\begin{cases} f_n \leqslant 1\times10^{-5}\times m\times g \\ m_n \leqslant 1\times10^{-5}\times m\times g\times L \end{cases} \quad \cdots\cdots (1)$$

式中：

f_n ——内部节点约束反力的力分量，单位为牛顿（N）；

m ——模型质量的数值，单位为千克（kg）；

g ——重力加速度，取值为9.81米每秒平方（m/s^2）；

m_n ——内部节点约束反力的力矩分量，单位为牛顿米（N·m）；

L ——单位长度的数值，取值为1米（m）。

7.2.4　等温膨胀检验

7.2.4.1　检验目的和适用范围

等温膨胀检验的目的是验证有限元模型在温度载荷下能否输出正确的热变形和热应力，模型内部是否存在不合理约束等。

等温膨胀检验适用于有限元物理模型的检验，尤其适用于热应力和热变形分析有限元物理模型的检验。

7.2.4.2　检验方法

在等温膨胀检验中，对结构模型施加静定边界，将模型中所有单元的材料属性赋为同一种各向同性材料（如：铝合金），均匀给定温度变化值。在此种工况下，模型将不会产生转动，约束反力、单元力和单元应变为零。在等温膨胀检验中，如果模型中出现了较大应力和较大转角，应考虑是否存在刚性单元定义不正确、板壳单元存在翘曲等几何缺陷或存在多余约束等。

7.2.4.3　检验内容和指标

等温膨胀检验时，将模型中所有单元的材料赋为同一种各向同性材料（如：铝合金），施加100K的温度变化值，一般要求结构上产生的最大冯·米塞斯（Von Mises）应力小于0.01MPa，最大转角小于1×10^{-7}rad。

7.2.5　刚体模态检验

7.2.5.1　检验目的和适用范围

刚体模态检验的目的是检查模型中是否存在冗余自由度或多余约束。

刚体模态检验适用于有限元物理模型和缩聚模型的检验。

7.2.5.2　检验方法

通过对自由边界下模型的模态分析获取结构的刚体模态（包括三个方向平动和三个方向转动）。除另有规定外，若出现多于或少于六阶刚体模态的情况，应检查模型中是否存在冗余自由度或多余约束。

7.2.5.3　检验内容和指标

刚体模态检验内容和检验指标推荐值见表4。

表 4　刚体模态检验内容和检验指标推荐值

检验内容	推荐指标值
六阶刚体模态频率	＜0.005 Hz
刚体频率最大值/弹性模态频率最小值	$<1\times10^{-4}$

7.2.6　缩聚模型与物理模型一致性检验

7.2.6.1　检验目的

缩聚模型与物理模型一致性检验的目的是检查缩聚模型是否能够准确的反映物理模型信息。

7.2.6.2　检验方法

缩聚模型与物理模型一致性检验通常采用在相同载荷和边界条件下对物理模型和缩聚模型分析得到的物理量进行比较的方法。

7.2.6.3　检验内容和指标

常用于比较的物理量包括：模型质量和转动惯量、模态特性（包括模态有效质量）和静动载荷下选定参数的响应等。通过以上物理量的比较可以反映缩聚模型质量矩阵、刚度矩阵、阻尼和输出转换矩阵的正确性。缩聚模型与物理模型一致性指标推荐值见表5。

表 5　物理模型与缩聚模型一致性指标推荐值

物理量	一致性相对指标推荐值
固有频率	≤2%
模态有效质量分数	±15%
模态有效惯量分数	±15%
注 1：表中物理量相对指标按（缩聚模型物理量/物理模型物理量-1）百分比（%）计算。 注 2：表中指标推荐值针对模态有效质量大于 10%的频率。	

8　模型修正

8.1　修正内容

有限元模型修正内容一般包括但不限于如下方面：

a）　根据试验件状态修正模型尺寸；

b）　根据试验件实测值修正模型质量；

c）　根据实测材料特性修正金属材料弹性模量、泊松比、密度、热膨胀系数等材料参数；

d）　根据实测材料特性修正复合材料单层板各向弹性模量、泊松比、密度、热膨胀系数、厚度等材料参数，或铺层等效后的材料参数；

e）　模拟试验边界条件；

f） 模拟试验加载方式；

g） 根据试验实测响应（如：位移、频率、振型、加速度响应等），调整连接件属性（如：预紧力、摩擦系数等）或等效连接刚度（如：连接单元自身刚度、模拟刚性连接区域等）；

h） 根据试验实测金属材料、复合材料单层板或层合板、蜂窝夹层板预埋件等强度数据修正模型强度数据；

i） 根据模态试验、频率响应试验等动力学试验结果修正结构阻尼特性。

8.2 修正方法

有限元模型修正方法如下：

a） 根据试验状态、试验结果进行初始模型修正，如：几何尺寸、模型质量、材料参数等；

b） 进行有限元仿真与试验测试匹配性分析，尽可能保证有限元单元节点与测试点位置的一致性及自由度数量的一致性；

c） 开展分析与试验的各类响应数据相关性分析，以此确定分析结果与试验结果的对应关系以及分析结果与试验结果的误差准则；

d） 根据相关性分析结果和工程经验确定初始修正参数；

e） 基于数学方法开展初始修正参数对各类响应的灵敏度分析，并通过灵敏度分析对初始修正参数进行筛选，确定下一步的修正参数和修正权重；

f） 建立模型修正目标函数，目标函数反映了有限元分析结果与试验实测结果的差异性或匹配性，模型修正的目标函数计算方法参见附录 B；

g） 采用优化算法实现目标函数逐步逼近理想值，从而获取最终的修正参数及其具体数值；

h） 迭代修正，逐步逼近目标值；

i） 得到修正后的有限元模型。

附　录　A
（资料性附录）
刚体运动相关矩阵计算公式

A.1　刚体运动质量矩阵

在刚体运动检验中，刚体运动质量矩阵按公式（A.1）计算。

$$M_{\mathrm{R}} = \Phi_{\mathrm{R}}^{\mathrm{T}} M \Phi_{\mathrm{R}} \quad \text{（A.1）}$$

式中：

M_{R} ——刚体运动质量矩阵，6×6 阶；

Φ_{R} ——刚体位移矩阵，n×6 阶；

M ——质量矩阵，n×n 阶。

刚体运动质量矩阵中给出了模型质量 m、模型惯量（I_{xx}，I_{xy}，I_{xz}，I_{yx}，I_{yy}，I_{yz}，I_{zx}，I_{zy}，I_{zz}）和模型质心坐标（x_{cog}，y_{cog}，z_{cog}），见公式（A.2）。

$$M_{\mathrm{R}} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & -mz_{\mathrm{cog}} & my_{\mathrm{cog}} \\ 0 & m & 0 & mz_{\mathrm{cog}} & 0 & -mx_{\mathrm{cog}} \\ 0 & 0 & m & -my_{\mathrm{cog}} & mx_{\mathrm{cog}} & 0 \\ 0 & mz_{\mathrm{cog}} & -my_{\mathrm{cog}} & I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ -mz_{\mathrm{cog}} & 0 & mx_{\mathrm{cog}} & I_{yx} & I_{\mathrm{yy}} & I_{yz} \\ my_{\mathrm{cog}} & -mx_{\mathrm{cog}} & 0 & I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{（A.2）}$$

式中：

m ——模型质量，单位为千克（kg）；

I_{xx}，I_{xy}，I_{xz}，I_{yx}，I_{yy}，I_{yz}，I_{zx}，I_{zy}，I_{zz} ——模型惯量，单位为千克平方米（kg·m^2）；

x_{cog}，y_{cog}，z_{cog} ——模型质心坐标，单位为米（m）。

A.2　刚体运动应变能

在六个方向的单位刚体位移（包括三个方向平动和三个方向转动）工况下，各自由度的刚体应变能按公式（A.3）计算。

$$E_{\mathrm{R}} = \Phi_{\mathrm{R}}^{\mathrm{T}} K \Phi_{\mathrm{R}} \quad \text{（A.3）}$$

式中：

E_{R} ——刚体运动应变能矩阵，6×6 阶；

K ——刚度矩阵，n×n 阶。

A.3　刚体运动残余节点力

在六个方向的单位刚体位移（包括三个方向平动和三个方向转动）工况下，残余节点力按公式（A.4）计算。

$$F_{\mathrm{R}} = K \Phi_{\mathrm{R}} \quad \text{（A.4）}$$

式中：

F_{R} ——残余节点力矩阵，n×6 阶。

附　录　B
（资料性附录）
模型修正目标函数计算公式

B.1　误差函数

B.1.1　有限元模型修正的目标是使有限元分析与试验值误差最小化，根据测试对象类别、测试值量级，目标函数可基于绝对误差或绝对误差平方的目标函数的模型修正、以及基于相对误差或相对误差平方的目标函数的模型修正。

B.1.2　采用绝对误差目标函数修正时，计算响应与实测响应误差矩阵，见公式（B.1）或公式（B.2）。

$$e(x)=\left\{\delta_{ai}^{c}(x)-\delta_{ai}^{t}\right\},i=1,2,\cdots,n_k \quad \text{（B.1）}$$

$$e(x)=\left\{(\delta_{ai}^{c}(x)-\delta_{ai}^{t})^2\right\},i=1,2,\cdots,n_k \quad \text{（B.2）}$$

式中：

$e(x)$ ——误差矩阵；

δ_{ai}^{c} ——有限元分析值；

x ——修正变量；

δ_{ai}^{t} ——试验测试值；

i ——序数；

n_k ——试验测试点数量。

B.1.3　采用相对误差目标函数修正时，计算响应与实测响应误差矩阵，见公式（B.3）或公式（B.4）。

$$e(x)=\left\{1-\frac{\delta_{ai}^{c}(x)}{\delta_{ai}^{t}}\right\},i=1,2,\cdots,n_k \quad \text{（B.3）}$$

$$e(x)=\left\{(1-\frac{\delta_{ai}^{c}(x)}{\delta_{ai}^{t}})^2\right\},i=1,2,\cdots,n_k \quad \text{（B.4）}$$

注：本附录各类目标函数仅为可选目标函数中的一种，各类目标函数未一一列出。

B.2　基于静力试验的有限元模型修正目标函数选取

B.2.1　对于单工况情况，可采用的目标函数见公式（B.5）。

$$F_1(x)=\sum_{i=1}^{m}\alpha_i(1-\frac{u_i^c}{u_i^t})^2,0\leqslant\alpha_i\leqslant1 \quad \text{（B.5）}$$

式中：

$F_1(x)$ ——目标函数；

m ——位移测点数量；

α_i ——权重系数；

u_i^c ——第i点计算位移；

u_i^t ——第i点基准位移。

B.2.2　对于多工况情况，可采用的目标函数见公式（B.6）。

$$F_2(x)=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\alpha_{ij}(1-\frac{u_{ij}^c}{u_{ij}^t})^2,0\leqslant\alpha_{ij}\leqslant1 \cdots\cdots（B.6）$$

式中：

$F_2(x)$ ——目标函数；

n ——试验工况数量；

j ——序数；

α_{ij} ——第j种工况第i点位移权重系数；

u_{ij}^c ——第j种工况第i点有限元计算位移；

u_{ij}^t ——第j种工况第i点试验测试位移。

B.3 基于动力试验的有限元模型修正目标函数选取

B.3.1 基于模态参数的目标函数

B.3.1.1 基于频率的目标函数

基于频率的目标函数可用公式（B.7）表示。

$$F_3(x)=\sum_{i=1}^{l}\alpha_i(1-\frac{\lambda_i^c}{\lambda_i^t}),0\leqslant\alpha_i\leqslant1 \cdots\cdots（B.7）$$

式中：

$F_3(x)$ ——目标函数；

l ——模态数量；

λ_i^c ——计算频率的数值，单位为赫兹（Hz）；

λ_i^t ——测试频率的数值，单位为赫兹（Hz）。

B.3.1.2 基于振型的目标函数

计算数据与基准数据的振型相关性可用模态置信准则（*MAC*）描述，*MAC*等于1时，试验值与分析值相关程度最高。基于*MAC*的目标函数可用公式（B.8）和公式（B.9）表示。

$$F_4(x)=\sum_{i=1}^{l}\alpha_i(\frac{1-\sqrt{MAC_i}}{MAC_i})^2,0\leqslant\alpha_i\leqslant1 \cdots\cdots（B.8）$$

$$MAC_i=\frac{((\phi_i^c)^T\phi_i^t)^2}{(\phi_i^c)^T\phi_i^c(\phi_i^t)^T\phi_i^t} \cdots\cdots（B.9）$$

式中：

$F_4(x)$ ——目标函数；

φ_i^c ——计算振型；

φ_i^t ——测试振型。

B.3.1.3 联合基于频率和振型的目标函数

可将基于频率的目标函数与基于振型的目标函数进行加权，目标函数可用公式（B.10）表示。

$$F_5(x)=\beta_1F_3(x)+\beta_2F_4(x) \cdots\cdots（B.10）$$

式中：

$F_5(x)$ ——目标函数；

β_1 ——基于频率的目标函数权重系数；

β_2 ——基于振型的目标函数权重系数。

B.3.2 基于频响函数的目标函数

B.3.2.1 基于频响函数的模型修正方法可采用模式置信准则（*SAC*）和模式比例因子（*CSF*）来衡量有限元分析频响函数及试验频响函数在选择的频段上的相关程度。*SAC*或*CSF*等于1时，试验值与分析值相关程度最高。

B.3.2.2 基于 *SAC* 的目标函数可用公式（B.11）～公式（B.14）表示。

$$F_6(x)=(\frac{1-\sqrt{SAC}}{SAC})^2 \quad \text{（B.11）}$$

$$SAC=\frac{(\left|\{u\}^T\{w\}\right|)^2}{(\{u\}^T\{u\})(\{w\}^T\{w\})} \quad \text{（B.12）}$$

$$\{u\}^T=\left\{H_{ij}^e(\omega_1),H_{ij}^e(\omega_2),\cdots,H_{ij}^e(\omega_{nf})\right\} \quad \text{（B.13）}$$

$$\{w\}^T=\left\{H_{ij}^a(\omega_1),H_{ij}^a(\omega_2),\cdots,H_{ij}^a(\omega_{nf})\right\} \quad \text{（B.14）}$$

式中：

$F_6(x)$ ——目标函数；

nf ——频率点个数；

ω_k ——频率的数值，单位为赫兹（Hz），k=1，2，……，nf;

$H_{ij}^e(\omega_k)$ ——j点激励、i点响应的频响函数在ω_k处的试验测试值；

$H_{ij}^a(\omega_k)$ ——j点激励、i点响应的频响函数在ω_k处的有限元分析值。

B.3.2.3 基于 *CSF* 的目标函数可用公式（B.15）～公式（B.18）表示。

$$F_7(x)=\sum_{k=1}^{nf}(\frac{1-\sqrt{CSF(\omega_k)}}{CSF(\omega_k)})^2 \quad \text{（B.15）}$$

$$CSF(\omega_k)=\frac{2\left|u^T(\omega_k)w(\omega_k)\right|}{[u^T(\omega_k)u(\omega_k)]+[w^T(\omega_k)w(\omega_k)]} \quad \text{（B.16）}$$

$$u^T(\omega_k)=H_{ij}^e(\omega_k) \quad \text{（B.17）}$$

$$w^T(\omega_k)=H_{ij}^a(\omega_k) \quad \text{（B.18）}$$

式中：

$F_7(x)$——目标函数。

B.4 联合静力试验与动力试验的有限元模型修正目标函数选取

如同时需要基于结构静力试验数据与动力试验数据进行修正时，可将基于静力试验模型修正目标函数与基于动力试验的模型修正目标函数进行加权组合，可采用但不限于公式（B.19）或公式（B.20）的加权组合形式。

$$F_8(x)=\gamma_1F_2(x)+\gamma_2F_5(x) \quad \text{（B.19）}$$

或

$$F_9(x)=\gamma_1 F_2(x)+\gamma_2 F_6(x) \quad \text{（B.20）}$$

式中：

$F_8(x)$、$F_9(x)$ ——目标函数；

γ_1 ——基于静力试验目标函数权重系数；

γ_2 ——基于动力试验目标函数权重系数。

QJ 20714－2018

中华人民共和国航天行业标准

航天器结构力学分析指南
模型建立及检验

QJ 20714－2018

*

中国航天标准化研究所出版
北京市丰台区小屯路 89 号
邮政编码：100071
中国航天标准化研究所
印务发行部印刷、发行

版权专有　不得翻印

*

2018 年 5 月出版
定价：42 元