

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。

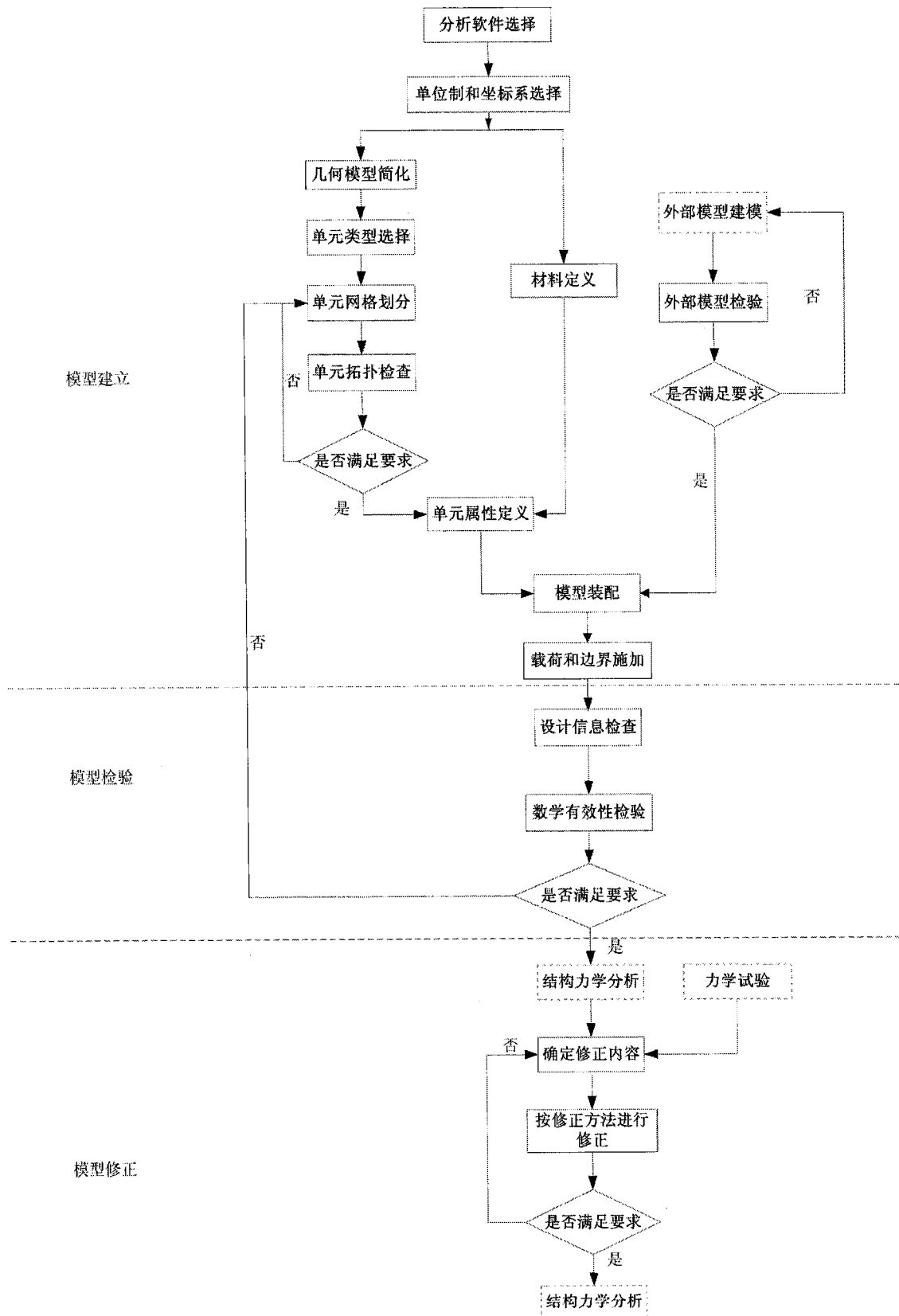
4.7 边界条件

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。

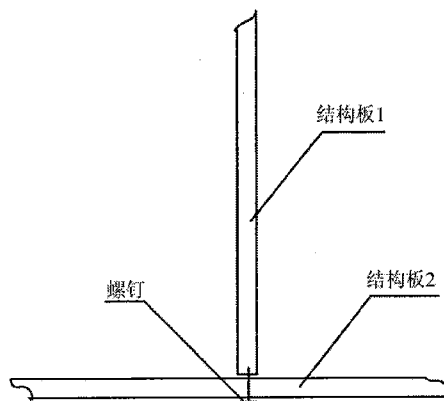


图 2 结构板连接形式 1

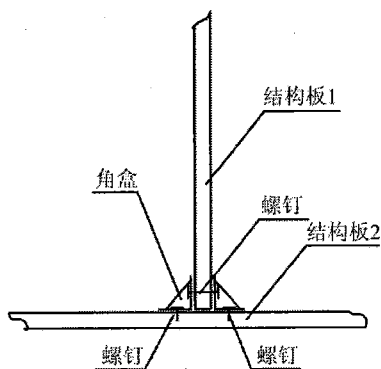


图 3 结构板连接形式 2

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，

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/78714405006006113>