

# 团 体 标 准

T/CCIASD 10005—2023

## 集装箱结构有限元分析指南

Guide for finite element analysis of container structures

2023-02-21 发布

2023-03-01 实施

中国集装箱行业协会

发布

## 目 次

前言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 概述 .....	2
4.1 有限元分析目的 .....	2
4.2 有限元分析类型 .....	2
5 有限元分析流程 .....	2
6 建立分析档案及有限元分析规划 .....	3
6.1 建立分析档案 .....	3
6.2 有限元分析规划 .....	4
7 建立有限元模型 .....	4
7.1 单位制 .....	4
7.2 坐标系 .....	4
7.3 全局单元长度 .....	5
7.4 单元类型 .....	5
7.5 三维数模预处理 .....	6
7.6 零件属性配置 .....	6
7.7 总体结构分级 .....	7
7.8 零部件连接 .....	7
7.9 网格划分 .....	11
8 有限元模型检查及试算 .....	11
8.1 检查有限元模型自重 .....	11
8.2 检查零部件焊接 .....	12
8.3 检查零部件活动连接 .....	12
8.4 检查网格质量 .....	12
8.5 有限元模型试算 .....	12
9 工况设置、求解及分析结果检查 .....	12
9.1 工况设置及求解 .....	12
9.2 分析结果检查 .....	13
10 分析报告编制及数据归档 .....	14

T/CCIASD 10005—2023

10.1 编制分析报告 .....	14
10.2 数据归档 .....	14
附录 A (资料性) 有限元分析单位制系统及网格质量控制指标 .....	16
附录 B (资料性) 有限元模型壳-壳焊接方法图示 .....	18
附录 C (资料性) 有限元模型特殊连接方法图示 .....	20
参考文献 .....	21

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国集装箱行业协会标准管理委员会提出并归口。

本文件起草单位：寰宇东方国际集装箱（启东）有限公司、上海寰宇物流科技有限公司、南通中集特种运输设备制造有限公司。

本文件主要起草人：沈彦杰、许小敏、陆宏、陈健昭、黄红珍、谢韵。

本文件为首次发布。

# 集装箱结构有限元分析指南

## 1 范围

本文件提供了集装箱结构静强度有限元分析的分析依据、分析流程、分析要求、分析类型、建模原则、结果评估、模型修正、结果输出、数据处理、报告编写等内容。

本文件适用于通用集装箱产品研制过程中的总装结构静力有限元分析。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 31054 机械产品计算机辅助工程有限元数值计算术语

GB/T 33582 机械产品结构有限元力学分析通用规则

## 3 术语和定义

GB/T 31054和GB/T 33582界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用，以下重复列出了GB/T 33582的某些术语和定义。

### 3.1

**有限元建模 finite element modeling**

构建有限元模型的过程，包括几何模型构建和（或）处理、材料属性定义、网格划分、边界条件施加等步骤。

[来源：GB/T 33582-2017，3.1]

### 3.2

**单元 element**

具有几何、物理属性的最小求解域。

[来源：GB/T 33582-2017，3.6]

### 3.3

**质量单元 mass element**

表征只具备质量属性的单元。

[来源：GB/T 33582-2017，3.11]

### 3.4

**板/壳 plane/shell**

T/CCIASD 10005—2023

一类厚度方向尺寸远小于长度和宽度方向尺寸的结构。

[来源：GB/T 33582-2017，3.15]

### 3.5

实体 solid body

由面或棱边构成封闭体积的三维几何体。

[来源：GB/T 33582-2017，3.16]

## 4 概述

### 4.1 有限元分析目的

集装箱结构有限元分析的主要目的是：预测结构在载荷下的力学响应，并为优化设计提供方向，通常有如下应用场景：

- a) 在概念设计阶段，支持集装箱结构空间布局、零件选型和材料选择；
- b) 在详细设计阶段，评估集装箱结构在设计标准规定工况下的强度、刚度；
- c) 在设计变更阶段，提供变更前后结构设计力学性能对比，评估设计变更的合理性与安全性；
- d) 在施工部署阶段，评估施工工艺对集装箱结构影响，支持工艺优化和工装设计；
- e) 优化设计，通过定量分析提供结构优化设计方案，实现材料、加工成本、结构力学性能、使用功能的平衡；
- f) 极限分析，计算给定集装箱结构在特定场景下可承受的极限载荷；
- g) 失效诊断，对实际使用中发生结构失效的集装箱进行诊断，分析失效原因。

### 4.2 有限元分析类型

#### 4.2.1 按力学类型分

按力学类型，可将有限元分析分为：

- a) 静力学分析，包含线性静力学和非线性静力学分析；
- b) 动力学分析，包含线性动力学和非线性动力学分析。

#### 4.2.2 按结构层级分

根据集装箱结构组成层级，可将有限元分析分为：

- a) 零件级分析；
- b) 部装或模块级分析；
- c) 总装或系统级分析。

## 5 有限元分析流程

集装箱结构有限元分析流程如下：

- a) 建立分析档案；
- b) 有限元分析规划；

- c) 建立有限元模型；
- d) 有限元模型检查；
- e) 有限元模型试算；
- f) 工况设置及求解；
- g) 分析结果检查；
- h) 编制分析报告；
- i) 数据归档。

## 6 建立分析档案及有限元分析规划

### 6.1 建立分析档案

#### 6.1.1 基础信息归集

开始有限元分析工作前宜梳理、归集所需的基础信息并建立分析档案，包括：

- a) 任务目标，包括：
  - 1) 任务要求完成时间，其决定了采用的分析方法；
  - 2) 分析报告形式，用于内部设计评审宜采用简单报告，用于外发客户或第三方审查宜采用正式报告；
  - 3) 分析报告语言，宜根据报告阅读人员实际需求，采用中文或外文。
- b) 产品结构设计标准中对产品结构刚度、强度相关要求；
- c) 产品结构图纸和三维数模，注意下列要点：
  - 1) 如采用三维设计，可直接归档三维数模；
  - 2) 如采用CAD软件建立图纸再用三维建模软件建立数模，宜先校对三维数模与图纸的一致性，确认无误后再归档。
- d) 产品额定重量，包括：
  - 1) 产品理论总重、自重、载重；
  - 2) 对于设备箱等载重分布明显不连续的集装箱，补充采集箱内载重具体分布。
- e) 零件材料清单，包括：
  - 1) 零件与材料的对应关系；
  - 2) 金属材料的弹性模量、泊松比、屈服强度、抗拉强度、延伸率等参数；
  - 3) 非金属材料一般作为各向同性材料简化处理，列出密度、等效弹性模量、等效泊松比；
  - 4) 非金属材料如要精确处理的，宜根据其材料本构，通过查询材料手册或进行材料试验来获取相关力学参数。
- f) 满焊以外的间断焊、塞焊、铰接、螺栓、螺钉、铆钉、卡扣等特殊连接清单；
- g) 产品结构设计标准规定的测试工况，以及根据特殊使用需求定义的非标测试工况。

#### 6.1.2 补充信息搜集

除上述信息外，可补充搜集下列信息：

## T/CCIASD 10005—2023

- a) 产品实际用途，有时客户对产品有着超常规的使用方式，了解客户实际如何使用产品有助于定义非标测试工况；
- b) 产品特殊工作场景，了解产品在建造、运输、部署、维护等全生命周期内存在的特殊工作场景，以确定特殊载荷条件；
- c) 产品历史失效记录，了解产品曾经出现过的失效形式，搜集相关照片、视频及失效前使用状态等信息；
- d) 产品历史测试记录，搜集产品以前的相关测试数据，如样箱试验数据等。

### 6.2 有限元分析规划

有限元分析规划是为了制定总体分析方案，包括：

- a) 确定有限元分析类型，包括下列要点：
  - 1) 判断测试大纲中的工况需要采用静力线性还是非线性分析；
  - 2) 大平板受面压，其法向刚度随变形加大而增加，宜打开几何非线性开关；
  - 3) 梁在轴心受压，弯曲变形较大时要考虑失稳，宜打开几何非线性开关；
  - 4) 考察零部件塑性变形时，宜采用非线性材料本构；
  - 5) 零部件之间变形后互相接触和分离，宜采用状态非线性分析。
- b) 确定计算规模和模型精度，根据任务目标规定的时间要求和可用的人力、硬件算力评估有限元模型允许的计算规模和模型精度；
- c) 定义有限元模型，包括下列要点：
  - 1) 确定纳入有限元模型的零部件范围，对整体结构强度、刚度没有贡献的零件无需纳入有限元模型，如卷帘门、逃生门、活动盖板等覆盖件，通风器、门把手、胶条、绳环、拉棒等附属件；
  - 2) 若产品设计标准已明确对有限元模型的零部件范围进行了定义，则遵循设计标准进行有限元模型的建立，如DNV2.7-1中对近海集装箱需要参与结构计算的零部件进行了明确定义。
- d) 定义有限元分析判定准则，根据产品结构标准以及非标工况的结构力学性能要求进行制定；
- e) 定义有限元分析结果合理性和准确性的校验方法，如通过产品历史样机测试数据或相近产品的分析数据、测试数据等。

## 7 建立有限元模型

### 7.1 单位制

有限元模型单位制宜统一且简洁，可采用国际单位制（SI）（见附录A.1）。但对集装箱的结构有限元分析推荐采用常用单位制（见附录A.2），因其变形、应力等单位与行业常用单位保持了一致。

### 7.2 坐标系

#### 7.2.1 全局坐标系

##### 7.2.1.1 坐标轴定义

全局坐标系一般选择右手笛卡尔直角坐标系。

推荐将直角坐标系的X轴对应箱体纵向，Y轴对应箱体垂向，Z轴对应箱体横向。箱体纵向与底架侧梁长度方向一致，箱体横向与底架横梁长度方向一致，箱体垂向与箱体高度方向一致。

### 7.2.1.2 坐标轴正方向定义

集装箱行业对箱体有前、后、左、右的定义。以20英尺标准集装箱为例，沿箱体纵向有门的一端为后端，与之相对的一端为前端；站在后端面朝前端，左手一侧为箱体左侧，右手一侧为箱体右侧。

推荐坐标轴正方向为：X轴正方向由箱体前端指向后端，Y轴正方向由箱底指向箱顶，Z轴正方向由箱体右侧指向左侧，这与集装箱图纸常见的绘图坐标系也保持了一致。

### 7.2.1.3 坐标系原点位置

推荐将全局坐标系原点放置在箱体八个角件包络空间的中心，便于利用集装箱结构对称性进行有限元模型前处理和计算。

### 7.2.2 局部坐标系

局部坐标系用于处理局部有限元分析模型的建立和结果的显示。例如当载荷的方向与全局坐标系的坐标轴方向不一致时，可以建立局部坐标系，使局部坐标系的坐标轴方向和要施加的载荷方向保持一致，便于加载。

## 7.3 全局单元长度

宜根据有限元分析类型、有限元模型允许的计算规模及模型精度综合确定全局单元长度，也即网格划分的长度。推荐采用均匀的单元长度来进行集装箱结构有限元分析，全局单元长度一般为10mm~30mm。如果硬件算力足够，单元长度也可小于10mm，以得到更为精细的计算结果。

不推荐采用过小的单元长度，容易引起几何不连续区域的应力噪点，干扰有限元分析的结果判读。采用合适的单元长度，能平衡计算精度与求解效率，也能过滤有限元法分析结果中的部分数值噪点。

## 7.4 单元类型

### 7.4.1 单元类型选择

集装箱主要的几类零件，单元类型选择如下：

- a) 薄壁型零件，如墙板、管材、钣金件等，宜采用一阶薄壳单元模拟；
- b) 块体型零件，如角件、锁头、锁座、铰链等，宜采用一阶实体单元模拟；
- c) 腿厚不均匀的型钢，如槽钢、工字钢等，采用一阶实体单元、一阶薄壳单元模拟均可；如采用壳单元模拟，注意在三维数模中将型钢厚度不均匀的腿部处理为等厚，其厚度为对应型钢参数表中的“平均腿厚”；
- d) 细条型零件，如钢丝网、吊索等，承受弯矩的宜采用一阶三维铁木辛哥梁单元模拟，只承受拉压的宜采用一阶三维杆单元模拟。

### 7.4.2 单元类型选择示例

基于前述方法，以20英尺标准集装箱为例，单元类型可选择如下：

- a) 前墙板、侧板、顶板、地板、门板、叉槽底板等板件采用一阶薄壳单元模拟；
- b) 顶侧梁、底侧梁、前顶梁、前底梁、门楣、门槛，前角柱、后端外角柱、底横梁、叉槽、门横梁、门竖梁、锁杆等薄壁梁采用一阶薄壳单元模拟；
- c) 角件、后端内角柱（槽钢）、防撞槽钢、锁头、锁座、铰链板、铰链销采用一阶实体单元模拟；
- d) 如要考察木地板与底横梁锁钉区域的局部应力分布，则推荐采用一阶实体单元模拟木地板。

## 7.5 三维数模预处理

### 7.5.1 几何模型简化

对三维数模中的几何进行必要的简化处理可减少一定的计算量，几何简化有下列注意点：

- a) 几何简化不宜对有限元分析精度产生明显影响；
- b) 对应力集中区域或者应力梯度变化剧烈区域，宜忠于原模型，不宜进行几何简化；
- c) 可简化对分析精度影响很小的几何特征，如零件上的小圆角、小倒角、小孔、小凸台、小压筋等特征；
- d) 可采用有限元前处理工具自带的各类特征简化工具，批量自动去除小特征，尽量避免手动操作；
- e) 几何简化后，质心坐标及质量与原三维数模相比，误差宜在合理范围内。

### 7.5.2 抽取零件中面

抽取零件中面有下列注意点：

- a) 对于采用壳单元模拟的零部件，用零件的中面替代实体进行计算，中面由零件外表面或内表面沿零件厚度方向，向零件厚度中心偏置一半的厚度得到；
- b) 尽量避免通过手动面偏置来得到零件的中面，主流的有限元前处理软件均能对三维数模各零件的自动扫描分析，识别零件的内外表面、厚度，并通过自动面偏置，批量实现零件的中面抽取，并自动为中面赋予相应零件的厚度；
- c) 如果采用的有限元前处理软件，在抽中面功能中还包含自动延伸开关，注意将这些开关打开，并设置合适的容差，使得间距在容差范围内的两个零件中面，能通过自动延伸处于相接状态，这会显著提高有限元模型处理阶段零部件之间的连接效率；
- d) 在零件中面抽取完毕后，删除原零件的所有几何面，避免对后续有限元模型处理形成干扰；
- e) 采用实体单元模拟的零部件，维持原几何不变。

## 7.6 零件属性配置

零件属性配置一般包括下列信息：

- a) 零件编号，是零件唯一的ID号，可用于零件的快速选择；
- b) 零件名称，可参考三维数模中零件的命名，用于零件的识别；
- c) 零件单元公式，通用有限元分析软件对各类单元都有多种单元公式供选择，根据实际情况选择合适的单元公式；
- d) 零件截面信息，如壳单元的厚度、梁单元的截面形状与尺寸、杆单元的截面积等；
- e) 零件材料属性，如密度、弹性模量、泊松比等。

## 7.7 总体结构分级

### 7.7.1 分级方式

总体结构基本分级方式如下：

- a) 一级结构，包括与角件连接的主梁构成的主框架，通常为前后角柱、顶底侧梁、前楣前槛、门楣门槛等；
- b) 二级结构，包括与一级结构连接的梁，通常为顶底框横梁、纵梁与斜梁，前后框立柱、横梁与斜梁，侧框立柱、纵梁与斜梁，叉槽组件等；
- c) 三级结构，包括与二级结构连接的梁，通常为短梁；
- d) 四级结构，包括墙板、顶板、地板、隔板、加强板等板件；
- e) 五级结构，包括门、窗等开闭件；百叶窗，排风口等局部开孔结构；
- f) 六级结构，包括铰链、销、锁头、锁座等运动副有关的连接件。

### 7.7.2 连接顺序

零部件连接以总体结构的分级为基础，按一级结构至六级结构依次连接。同时根据零部件实际的连接关系，采用相适应的有限元模型连接方法。

## 7.8 零部件连接

### 7.8.1 焊接

#### 7.8.1.1 壳-壳焊接

##### 7.8.1.1.1 壳-壳对接焊

壳-壳对接焊可参考如下方法：

- a) 若对接焊的两个零件无拼缝且板厚相等，对接焊的两个零件中面在焊缝处共享几何边界，即在焊缝处共节点；
- b) 若对接焊的两个零件无拼缝且板厚不同，则对接焊的两个零件中面接头处存在阶梯差，可以原焊缝中心线为参考线在零件中面各自切除一半单元长度，构建一个窄面连接两个零件，窄面的厚度为两个零件厚度之和的一半，窄面材料属性跟随两个零件中材料强度较弱一方（见附录B.1）；
- c) 若对接焊的两个零件有拼缝，连接方法同b)。

##### 7.8.1.1.2 壳-壳角焊

壳-壳角焊可参考如下方法：

- a) 若两个零件呈正交或斜交，斜交夹角不小于 $45^\circ$ ，通过延伸零件中面的方法填补缝隙，并在延伸后的交界处共享几何边界，即在焊缝处共节点，因延伸而增加的面域视为和原零件具有相同属性（见附录B.2）；
- b) 若两个零件呈正交或斜交，斜交夹角小于 $45^\circ$ ，通过一个零件向另一个零件构建垂直投影面，并在投影后的交界处共享几何边界，即在焊缝处共节点，因垂直投影增加的面域视为原零件的延伸，与原零件具有相同属性（见附录B.2）。

### 7.8.1.1.3 壳-壳搭接焊

壳-壳搭接焊可参考方法：通过一个零件向另一个零件构建垂直投影面，并在投影后的交界处共享几何边界，即在焊缝处共节点，因垂直投影增加的面域视为焊缝，其厚度为实际焊缝宽度的一半，其材料属性跟随两个零件中材料强度较弱一方（见附录B.3）。

### 7.8.1.1.4 壳-壳塞焊

壳-壳塞焊可参考如下方法：

- a) 若塞焊孔直径小于单元长度，采用下列步骤：
  - 1) 将塞焊孔简化为方孔，方孔边长等于塞焊孔直径；
  - 2) 沿塞焊孔边缘向被连接零件构建垂直投影面，并在投影后的交界处共享几何边界，即在焊缝处共节点；
  - 3) 因垂直投影增加的面域视为焊缝，其厚度为塞焊孔所在零件厚度的一半，其材料属性跟随两个零件中材料强度较弱一方；
  - 4) 将零件塞焊孔处填充，填充的面其厚度、材料属性与塞焊孔所在零件厚度一致。
- b) 若塞焊孔直径 $\geq$ 单元长度。则不对塞焊孔进行简化，保留其原始几何形态，其余处理方法同a)。

### 7.8.1.1.5 型腔式组合梁壳-壳焊接

对于由开口型材通过间断焊拼接而成的型腔式组合梁，其壳-壳焊接可采用如下方法：

- a) 若拼接接头为对接焊，可在间断焊焊缝处参考上述壳-壳对接焊方法进行连接；
- b) 若拼接接头为角焊，可在间断焊焊缝处参考上述壳-壳角焊方法进行连接；
- c) 若拼接接头为搭接焊，可在间断焊焊缝处参考上述壳-壳搭接焊方法进行连接，如果组合梁弯曲变形较大，在搭接面处建立接触单元，以考虑搭接面处的相互作用。

### 7.8.1.2 实体-实体焊接

实体-实体焊接可参考如下方法：

- a) 两个零件完全渗透焊接的，在结合面采用共享面形式连接，即两个零件在共享面上共节点；
- b) 两个零件不完全渗透焊接的，在焊缝处以共享边形式连接，即两个零件在共享边上共节点；
- c) 开坡口的零件，连接时将坡口填充。

### 7.8.1.3 壳-实体焊接

#### 7.8.1.3.1 壳-实体焊接注意点

壳与实体的焊接有下列注意点：

- a) 不能简单采用在焊缝处共享边的形式，因为壳单元和实体单元的节点自由度不一致，壳单元每个节点有6个自由度，包含3个平动自由度与3个旋转自由度，而实体单元每个节点只有3个平动自由度，两者节点自由度不协调；
- b) 若直接采用共享边形式进行壳-实体焊接，某些情况下会导致两个零件在焊接接头处无法传递弯矩，引起载荷传递错误，甚至可能引起焊接零件之间出现运动副，使结构在载荷下无法保持静定；

- c) 假设一个平面壳体与实体焊接，如果在焊缝处直接共享几何边，由于壳单元与实体单元在节点自由度上的不协调，焊缝处只传递力不传递弯矩，平面壳体与实体会以焊缝处的共享几何边为转轴形成转动副。

#### 7.8.1.3.2 壳-实体焊接方法

壳-实体焊接可参考如下方法：

- 多点约束法（MPC），在壳单元与实体单元连接处建立约束方程，从而实现节点自由度耦合；
- 补充焊缝法，先在壳-实体焊缝处共享几何边，再从壳体上靠近共享几何边处引出一个窄面与实体再次构建共享几何边；
- 穿透法，将壳延伸并穿入实体内一小段距离，在壳-实体相交处共享几何边，控制实体在生成体网格时与穿入实体内的壳单元共节点。

### 7.8.2 铰接

#### 7.8.2.1 模拟方法

集装箱发生相对转动的零部件之间多采用铰接，典型的如门页与门框上的支耳、活动门楣与角件、折叠箱端墙与底架，钢卷箱活动V形支撑与底架等，铰接的本质是通过孔、轴配合，形成转动副。

铰接在有限元模型中可以参考如下方法模拟：

- 接触单元法，可采用下列步骤：
  - 建立转动副上的全部零件有限元模型，如销轴、带孔铰链板等；
  - 在销轴表面与相应配合孔表面建立接触，通常以销轴表面为接触主面，孔表面为接触从面；
  - 如轴孔之间存在间隙，则需为从面指定偏移量，保证主、从接触面处于初始接触状态，避免加载后主、从接触面之间产生刚体位移。
- 多点约束法（MPC），可采用如下步骤：
  - 建立转动副上的全部零件有限元模型；
  - 在孔端部建立多点约束形成的刚性区域，可先在孔端部中心建立一个空质量单元，以质量单元节点为主节点，以孔端部环形线上所有节点为从节点，建立单节点对多节点的刚性连接，即耦合所有自由度；
  - 在轴的两端建立多点约束形成的刚性区域参考上步；
  - 采用约束方程，耦合轴、孔端部对应空质量点的三个平动自由度（见附录C.1）。

#### 7.8.2.2 推荐方法

接触单元法对模型的处理更贴近实际，缺点是属于非线性计算，在有限元模型规模较大时，容易引起计算时间过长以及不收敛的问题；多点约束法对轴、孔接触实施了简化，在接触面上不能得到精确的应力，优点是属于线性计算，对有限元模型规模大小不敏感，也不存在收敛性问题。

推荐在整机有限元分析模型中采用多点约束法模拟铰接。如果对铰接转动副零件本身进行评估，可以采用子模型技术结合接触单元法单独提取相关零件进行分析。

### 7.8.3 螺栓连接

## 7.8.3.1 模拟方法

设备与箱体的连接以及可拆卸活动零部件与箱体的连接一般采用螺栓连接。如冷机与冷箱箱体的连接、电气柜与电气箱箱体的连接、检修口盖板与箱体的连接、临时支撑与箱体的连接等。

螺栓连接在有限元模型中可以参考如下方法模拟：

- a) 接触单元法，适用于被连接零件为实体模型情况，可采用如下步骤：
  - 1) 螺栓、螺母及其连接的零件采用实体单元建模，螺栓上的螺纹无需建立，螺栓与螺母之间视为焊接，采用共享几何边界方式连接；
  - 2) 在螺栓、螺母与连接零件的接触面上建立接触单元，螺栓、螺母表面作为接触主面，零件内孔表面以及零件与螺帽、螺母接触表面作为接触从面，通常螺栓螺杆表面与被连接零件的内孔表面存在间隙，可通过为接触从面指定偏移量的方法保证主、从接触面处于初始接触状态，如果螺栓预紧力有明确定义，则在计算模型中对螺栓增加预紧单元，或者在螺帽与零件接触面上进行预穿透来实现预紧力的施加；
  - 3) 在被连接的两个零件接触面上建立接触单元，接触主面与接触从面的选择没有特殊要求。
- b) 梁单元法，适用于被连接零件为壳体模型，可采用如下步骤：
  - 1) 在被连接零件孔中心建立一个节点，以此节点为主节点，以零件孔环形线上的所有节点为从节点，建立单节点对多节点的刚性连接；
  - 2) 用梁单元模拟螺栓，在被连接零件孔中心的节点之间创建梁单元，梁单元的截面参数与螺栓螺杆截面属性保持一致；
  - 3) 如考虑螺栓预紧力，通过对梁单元施加预紧力实现（见附录C.2）。
- c) 刚性区域法，对实体模型和壳体模型均适用，无需建立螺栓模型，可采用如下步骤：
  - 1) 在被连接零件形成的螺栓孔道中心建立一个节点；
  - 2) 以此节点为主节点，以零件螺栓孔道面上所有节点为从节点，建立单节点对多节点的刚性连接（见附录C.3）。
- d) 焊接法，对实体模型和壳体模型均适用，无需建立螺栓模型，可采用如下步骤：
  - 1) 被连接零件为实体模型，采用孔边缘共享几何边界的方法进行局部焊接；
  - 2) 被连接零件为壳体模型，在不同零件的孔之间建立圆柱形焊缝。

## 7.8.3.2 推荐方法

如果关心被连接件在螺栓连接区域相对准确的变形与应力，推荐方法a)与方法b)。其中方法a)求解精度最高，但属于非线性计算，存在计算效率与收敛性问题。方法b)属于线性计算，求解效率高，但因为存在模型简化，计算精度不如方法a)。

如果仅仅将螺栓连接用于传力，则推荐方法c)与方法d)，两者均属于线性计算、求解效率较高，将螺栓连接简化成被连接零件螺栓孔间的全刚性或半刚性连接。

## 7.8.4 锁头锁座卡接

准确模拟锁头锁座间的卡接，原则上采用接触单元法，但由于两者接触面均为不规则形状，采用接触单元法也会存在不收敛或求解时间过长的问題。

由于锁头锁座间的卡接，其连接行为介于铰接和刚接之间，也可参考7.8.2.1节b)进行连接简化，采用铰接的方法模拟锁头和锁座间的连接，可得到保守的计算结果。

## 7.9 网格划分

### 7.9.1 网格尺寸

#### 7.9.1.1 全局网格尺寸

有限元模型网格划分的尺寸也即单元的尺寸，全局网格尺寸的选择参考7.3。

#### 7.9.1.2 特殊区域网格尺寸

集装箱中存在一些特殊区域，如果这些区域的网格尺寸也采用全局尺寸，则很难在这些区域得到准确的力学响应，宜在下列区域进行网格细化：

- a) 零件尺寸变化剧烈的区域；
- b) 零件曲率变化剧烈的区域；
- c) 零件载荷变化剧烈的区域；
- d) 集中载荷附近区域；
- e) 弹性模量差异较大的材料连接的区域。

#### 7.9.1.3 网格划分要点

网格的划分注意以下要点：

- a) 网格与几何轮廓严格贴合；
- b) 实体单元网格，在厚度方向上，体网格不少于三层；
- c) 梁类零件的壳单元网格，在横截面的任何一条边线上网格不少于三层；
- d) 面网格尽量以四边形为主，三角形面网格不超过有限元模型面网格总量的1%；
- e) 对于关注零件的体网格，尽量划分为六面体；其它零件体网格，划分为四面体即可；
- f) 粗细网格之间有足够数量的单元进行过渡，避免相邻单元间存在过大的质量差和刚度差；
- g) 对于壳体上直径较小的孔，沿着孔径向划分至少1层呈环形的全四边形网格；
- h) 保持网格的总体走向与载荷方向一致或正交。

### 7.9.2 网格质量

网格划分时，要控制网格质量参数在合理范围内，避免产生畸变网格。网格检查的主要参数包括：长宽比、翘曲度、偏斜度、内角等；在结构重点关注区域的网格宜维持较高质量，非关注区域的网格质量要求可适当放宽。网格质量控制指标见附录A.3。

## 8 有限元模型检查及试算

### 8.1 检查有限元模型自重

有限元模型自重检查能帮助发现一些零件配置的错误，可采用如下方法：

- a) 通过前处理工具，测量有限元模型自重，与理论自重相比误差不超过5%；

- b) 如果有限元模型自重与理论自重出现较大误差,则检查壳单元厚度是否正确、实体单元是否正常生成、材料属性是否配置正确;
- c) 如果零件及材料相关属性配置均正确,是因结构简化等原因引起了有限元模型与理论质量有较大误差,推荐采用附加质量单元在结构简化区域进行配重;
- d) 模态分析等计算对模型质量及分布准确性要求很高,需特别注意模型自重校核。

## 8.2 检查零部件焊接

检查每一道焊缝是否都按实际工艺要求进行了准确焊接,确认是否有漏焊、多焊等情况,可采用如下方法:

- a) 主流的有限元前处理器均有几何边线上色检查的功能,将自由边、两个面几何共享边、三个面几何共享边等边线,用不同颜色表示;
- b) 检查漏焊时重点查看自由边,零件应焊边线上不出现自由边;
- c) 检查多焊时重点关注对称剖面线区域及面面交叠区域,零部件上不出现多余的两面或三面几何共享边;
- d) 检查焊缝合理性,一些区域操作空间过小,焊枪无法伸入,则不进行焊接。

## 8.3 检查零部件活动连接

检查活动连接是否准确反映了实际连接情况,可采用如下方法:

- a) 对于螺栓、铰接等转动副类的连接注意约束是否合理,约束不足会引起刚体位移导致后续静力计算无法进行,过约束会引起旋转自由度丢失变成刚性连接;
- b) 对于采用接触技术的连接,确认是否已经正确生成了接触单元,如果接触缺失,零件之间在加载后穿透,也会引起自由度过大导致静力计算无法进行。

## 8.4 检查网格质量

对全局网格质量进行检查,网格质量准则参考7.9.2。主流有限元前处理器均能在用户设定网格质量准则后,自动将不符合准则要求的网格用不同颜色分类标记,可对这些不符合质量要求的网格进行优化。可通过有限元前处理器提供的网格质量改善工具,进行局部网格质量自动调整;当通过调参方式无法再改善网格质量时,可采用微调局部几何的方法。

## 8.5 有限元模型试算

有限元模型试算能检验有限元模型的完备性,可参考下面的方法:

- a) 进行集装箱静置于地面、纯自重工况下的分析,测试求解能否正常完成,对求解器的求解日志进行检查,查看警告和错误信息,定位有限元模型存在的问题并进行模型修正;
- b) 进行集装箱的模态分析,在底角件固定、纯自重工况下计算前六阶模态,检查各阶模态下的结构应力和变形是否连续,可将结构变形放大以便于再次校验零件连接完备性。

## 9 工况设置、求解及分析结果检查

### 9.1 工况设置及求解

### 9.1.1 载荷

集装箱通常有如下几类载荷：

- a) 均布压力，如地板载重、墙板气袋压力、顶板积雪压力等；
- b) 梯度压力，如储液集装箱内腔液体压力，集装箱建筑表面风压，散货箱散体介质压力等；
- c) 体积力，通常由集装箱沿着横向、纵向和垂向的加速度形成；
- d) 集中力，如栓固工况的底角件拉压力、横纵刚工况的顶角件拉压力等；
- e) 质量点，通常是设备箱内安装的大质量设备，以质量点形式加载；
- f) 活动载荷，如下列载荷：
  - 1) 小车厢内行走载荷，小车在地板上的作用位置是活动的，静力分析时可将小车置于底架的弯曲中心来考察底架的强度和刚性，并将小车分别置于不同规格的横梁弯曲中心处考察横梁自身的强度和刚性；
  - 2) 顶板上方作业载荷，操作员携带工具在顶板上方作业时站立位置不固定，宜将作业载荷置于顶板弯曲中心处考察顶板强度，如顶板下方有横梁支撑，则将作业载荷置于间距最大的两根横梁之间的顶板弯曲中心处。

### 9.1.2 约束

集装箱各工况下的约束施加是关键，对有限元分析精度影响很大，常规工况可参考如下方法施加约束：

- a) 堆码工况、气袋工况、顶板强度工况、小车试验工况。在底角件底孔施加约束，并使箱体沿纵向呈简支状态；
- b) 吊顶工况，考虑吊具扭锁与顶角件顶孔为线接触，在接触线施加约束，并使箱体沿纵向呈简支状态；
- c) 吊底工况，考虑吊具扭锁与底角件侧孔为线接触，在接触线施加约束，并使箱体沿纵向呈简支状态；
- d) 横向刚性工况，考虑扭锁与底角件底孔为点接触，在接触点施加约束，并使箱体沿横向呈简支状态；
- e) 纵向刚性工况，考虑扭锁与底角件底孔为点接触，在接触点施加约束，并使箱体沿纵向呈简支状态；
- f) 栓固工况，考虑扭锁与底角件底孔为线接触，在接触线施加约束，并使箱体沿纵向呈简支状态；
- g) 叉举工况，考虑叉齿与叉槽为面接触，在接触面施加约束，并使箱体沿纵向呈简支状态。

### 9.2 分析结果检查

完成分析后仔细判读分析结果，确认结果无异常后才可用于分析报告，检查内容如下：

- a) 检查网格无关性，即网格大小是否合适，可将网格加密一倍，如果结构连续区域的应力与加密前差异小于5%，则可判定网格大小满足分析要求；
- b) 用后处理器输出约束处的反作用力，沿坐标轴三方向的反作用力要和输入的载荷大小一致，如有明显偏差则分析无效；
- c) 在后处理器中将变形放大并观察变形方向是否和载荷方向一致，如发现变形和载荷方向相反，则要修正载荷正负号；

- d) 检查初始接触的两个零件接触面上是否存在接触压力,对于初始有较大间隙的两个零件的接触注意观察变形后两个零件间的接触状态,如果零件未接触且互相穿透,则要减小求解时的迭代步长;
- e) 检查主变形方向的力学响应量级,如最大变形值和最大应力值,校核其量级是否偏离历史测试数据量级或违反物理常识,如果量级异常,一般需检查载荷单位制、材料的力学性能参数以及零件截面属性是否正确。

## 10 分析报告编制及数据归档

### 10.1 编制分析报告

确认分析结果无异常,则可编制分析报告,分析报告至少包含如下内容:

- a) 分析对象,列出产品二维图纸或三维模型的图号及版本号,如果是面向设计变更的有限元分析,要列出设计变更的内容;
- b) 分析目的,陈述本次分析是为了评估什么问题;
- c) 参考标准,列出分析参考的产品结构设计标准;
- d) 分析工具,列出有限元分析采用的软件和版本号;
- e) 假设及简化,列出关键的理论假设以及几何简化;
- f) 分析方法,通常为线弹性静力分析,如果涉及非线性等特殊分析,要陈述采用的算法模型;
- g) 工况、载荷及约束;
- h) 材料清单,列出有限元模型中采用的所有材料及其力学性能参数、密度等信息;
- i) 结构在各种工况下的变形、应力等力学响应数据及云图,或力学响应随时间变化的视频;
- j) 结论及优化建议,包括下列要点:
  - 1) 基于结果数据结合判定准则,判定结构是否满足设计标准以及一些标准以外的工作要求;
  - 2) 对于几何不连续区域的应力集中,一般很难采用第四强度理论去判定,可采用对标分析法,即与同尺寸规格、同工况下的标准集装箱的相同区域应力进行对比判定;
  - 3) 对于几何不连续区域的应力集中,无法采用对标分析的,可采用压力容器行业的应力线性化评定方法,对应力进行分类评价;
  - 4) 如结构不满足强度、刚度要求,则提供结构加强建议;
  - 5) 如结构满足力学性能要求但存在较多设计冗余,则提供结构轻量化建议。

### 10.2 数据归档

#### 10.2.1 数据类型

有限元分析数据宜进行完整归档,需归档的数据类型包括:

- a) 设计文件,包括图纸、三维模型、材料表、测试大纲等;
- b) 背景资料,如客户对产品用途及工作场景的描述、提供的产品照片视频、历史测试数据、失效记录等;

- c) 有限元分析文件，包含有限元模型文件、模型备注文件、载荷计算表、求解脚本文件及有限元结果文件等；
- d) 试验数据，如分析后进行了试验验证，则将试验数据归集、存档。

### 10.2.2 存档结构

上述数据宜按一定的目录结构进行存档，以使档案具备逻辑性和条理性，可采用如下存档结构：

- a) 一级文件夹采用具体的项目名，项目名要能清晰地描述项目特征，以便和其它项目进行区分；
- b) 一级文件夹下建立三个子文件夹，分别为“设计输入”、“有限元分析”、“试验数据”；
- c) “设计输入”文件下建立两个子文件夹，分别为“设计文件”、“背景资料”；
- d) “有限元分析”文件夹下不设置子文件夹，在有限元分析过程中需要频繁读写各种数据文件，不设置子文件夹能避免频繁切换文件目录带来的效率损失；
- e) “试验数据”文件夹下内容较少，可不设置子文件夹；
- f) 项目涉及多次设计迭代、多轮分析的，可在一级文件夹下建立子文件夹“第X轮”，以准确记录项目历程；
- g) 维护有限元分析项目管理表格，表头包含项目编号、项目名、项目每一轮的起止时间、产品类型等信息，为以后的项目数据查询提供索引。

附录 A  
(资料性)

## 有限元分析单位制系统及网格质量控制指标

## A.1 SI 国际单位制系统

有限元分析中的SI单位制见表A.1

表 A.1 SI 国际单位制 (米制)

物理量名称	基础单位	
	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
温度	开(尔文)	K
导出单位		
力	牛顿	N
应力	帕	Pa
力矩	牛顿·米	N·m
位移	米	m
速度	米每秒	m/s
密度	千克每立方米	kg/m <sup>3</sup>
加速度	米每二次方秒	m/s <sup>2</sup>
频率	赫兹	Hz

## A.2 常用单位制系统

有限元分析中的常用单位制见表A.2

表 A.2 常用单位制 (毫米制)

物理量名称	基础单位	
	单位名称	单位符号
长度	毫米	mm
质量	吨	t
时间	秒	s
温度	开(尔文)、摄氏度	K、°C
导出单位		
力	牛顿	N
应力	兆帕	MPa (N/mm <sup>2</sup> )
力矩	牛顿·毫米	N·mm
位移	毫米	mm
速度	毫米每秒	mm/s
密度	吨每立方毫米	t/mm <sup>3</sup>
加速度	毫米每二次方秒	mm/s <sup>2</sup>
频率	赫兹	Hz

## A.3 网格质量控制指标

有限元分析模型中的网格控制指标见表A.3

表 A. 3 网格质量控制指标

类别	四边形单元	三角形单元	六面体单元	楔形单元	四面体单元
长宽比	$\leq 5.0$				
翘曲度	$\leq 16^\circ$	-	$\leq 18^\circ$	$\leq 18^\circ$	-
偏斜度	$\leq 60^\circ$				
内角	$40^\circ \sim 135^\circ$	$20^\circ \sim 120^\circ$	$40^\circ \sim 135^\circ$	$20^\circ \sim 120^\circ$	$20^\circ \sim 120^\circ$

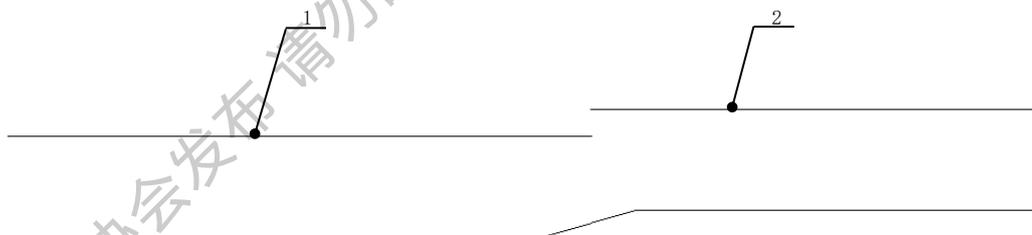
## 附录 B

(资料性)

## 有限元模型壳-壳焊接方法图示

## B.1 有阶梯差的壳-壳对接焊

有阶梯差的壳-壳对接焊方法见图B.1。



标引序号说明:

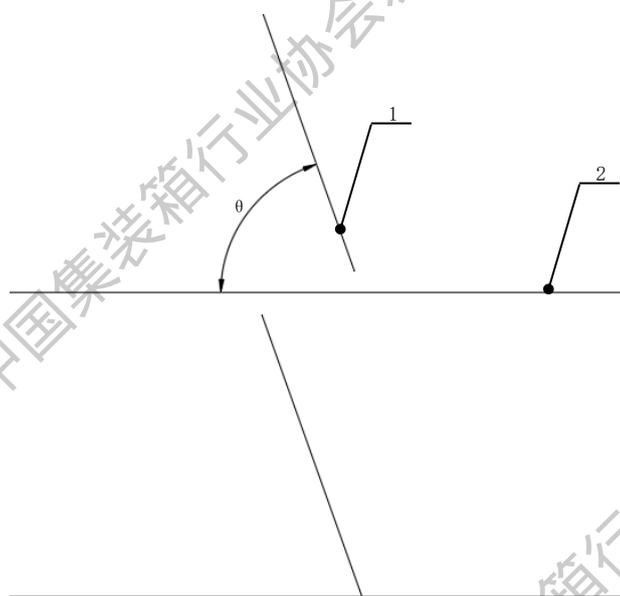
1——零件 1;

2——零件 2。

注: 此图上部为零件焊接前, 下部为零件焊接后。

图 B.1 有阶梯差的壳-壳对接焊

## B.2 壳-壳角焊

斜交夹角不小于 $45^\circ$ 的壳-壳角焊方法见图B.2。

标引序号说明:

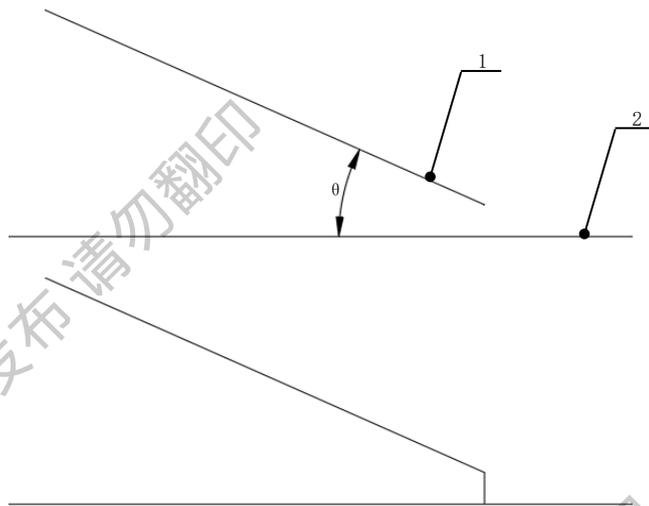
1——零件 1;

2——零件 2。

斜交夹角  $\theta$  不小于  $45^\circ$ 。

注: 此图上部为零件焊接前, 下部为零件焊接后。

图 B.2 斜交夹角不小于  $45^\circ$  的壳-壳角焊斜交夹角小于 $45^\circ$ 的壳-壳角焊方法见图B.3。



标引序号说明：

1——零件 1；

2——零件 2。

斜交夹角  $\theta$  小于  $45^\circ$ 。

注：此图上部为零件焊接前，下部为零件焊接后。

图 B.3 斜交夹角小于  $45^\circ$  的壳-壳角焊

### B.3 壳-壳搭接焊

壳-壳搭接焊方法见图B.4。



标引序号说明：

1——零件 1；

2——零件 2。

注：此图上部为零件焊接前，下部为零件焊接后。

图 B.4 壳-壳搭接焊

附录 C  
(资料性)

有限元模型特殊连接方法图示

C.1 铰接-多点约束法

以门铰链铰接为例，见图C.1。

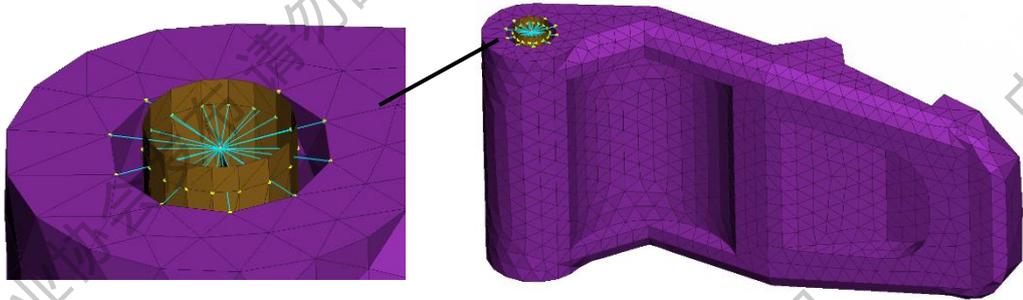


图 C.1 铰接采用多点约束法模拟

C.2 螺栓连接-梁单元法

用梁单元法模拟螺栓，见图C.2。

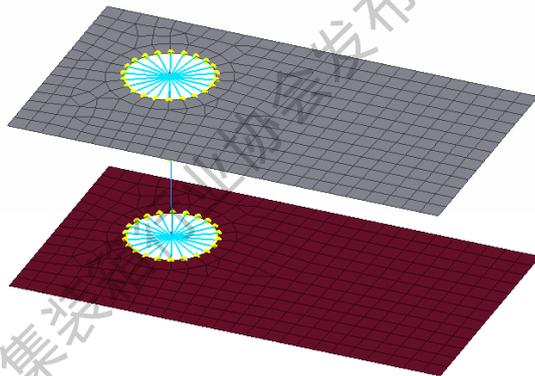


图 C.2 螺栓采用梁单元法模拟

C.3 螺栓连接-刚性区域法

用刚性区域法模拟螺栓，见图C.3和图C.4。

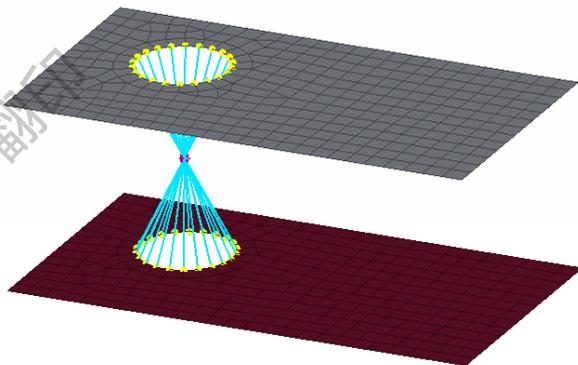


图 C.3 壳-壳螺栓连接刚性区域法模拟

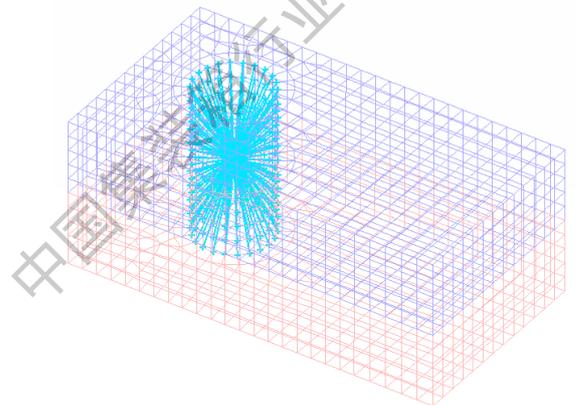


图 C.4 实体-实体螺栓连接刚性区域法模拟

参 考 文 献

- [1] GB 3100 国际单位制及其应用
  - [2] GB 3101 有关量、单位和符号的一般原则
  - [3] ISO 1496-1 Series 1 freight containers - Specification and testing
-