

# 团体标准

T/CCIASD 10013—2024

## 台架式集装箱结构有限元分析指南

Guidance for finite element analysis of platform-based container structures

2024-08-06 发布

2024-08-10 实施

中国集装箱行业协会

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 纳入有限元模型的零部件范围.....	1
5 建立有限元模型.....	3
6 工况设置、求解及结果判读.....	6
附录 A（资料性） 有限元模型加载位置图示.....	14
附录 B（资料性） 有限元模型约束位置图示.....	17
参考文献.....	26

## 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集装箱生产分会提出并归口。

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、寰宇东方国际集装箱（青岛）有限公司、南通中集特种运输设备制造有限公司、大连中集特种物流装备有限公司、广东新会中集特种运输设备有限公司。

本文件主要起草人：沈彦杰、许小敏、臧传文、陆宏、陈健昭、李怀良、黄红珍、刘先一、伍国权、刘佳琦、沙宇程。

本文件为首次发布。

# 台架式集装箱结构有限元分析指南

## 1 范围

本文件提供了台架式集装箱结构静强度有限元分析的零部件范围、建立有限元模型的方法、工况设置、求解及结果判读等内容。

本文件适用于台架式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。

T/CCIASD 10005—2023 集装箱结构有限元分析指南

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**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]

### 3.2

**板/壳 plane/shell**

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]

### 3.3

**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 纳入有限元模型的零部件范围

### 4.1 角柱组件

角柱组件的下列必要零件宜纳入有限元模型：

a) 角柱；

- b) 角柱加强板；
- c) 角柱端部封板。

#### 4.2 角柱间连接件

角柱间若存在连接件，则连接件中的下列零件宜纳入有限元模型：

- a) 固定式及可拆卸式横梁；
- b) 固定式及可拆卸式纵梁；
- c) 墙板；
- d) 以上三类零件的加强板。

#### 4.3 底侧梁组件

底侧梁组件的下列必要零件宜纳入有限元模型：

- a) 底侧梁；
- b) 底侧梁加强板；
- c) 底侧梁端部封板；
- d) 底侧梁上端面插桩口圆棒。

#### 4.4 底架横梁组件

宜将底架上全部横梁及其加强板纳入有限元模型，这里的横梁指除底架端梁外连接左右底侧梁的直梁或斜梁，如果横梁间存在连接板或连接梁等连接件，宜将这些连接件也纳入有限元模型。

#### 4.5 底架端梁组件

底架端梁组件的下列必要零件宜纳入有限元模型：

- a) 底端梁；
- b) 底端梁加强板；
- c) 底端梁端部封板；
- d) 底端梁与底架侧梁、横梁之间的连接板或连接梁等连接件；
- e) 底端梁上翼板插桩口圆棒。

#### 4.6 叉槽组件

叉槽组件的下列必要零件宜纳入有限元模型：

- a) 叉槽；
- b) 叉槽底板。

#### 4.7 鹅颈组件

鹅颈组件的下列必要零件宜纳入有限元模型：

- a) 鹅颈；
- b) 鹅颈横梁，指鹅颈与底侧梁之间的连接梁；
- c) 鹅颈竖梁，指鹅颈与底架横梁之间的连接梁；
- d) 鹅颈封板，指鹅颈端部的封板。

#### 4.8 外铰链组件

外铰链组件的下列必要零件宜纳入有限元模型：

- a) 角件板，指外铰链顶部模拟角件的厚板；
- b) 内侧板及其加强板；
- c) 外侧板及其加强板；
- d) 方销、圆销的衬套；
- e) 连接角件板、内外侧板的背板；
- f) 内、外侧板底部的连接板。

#### 4.9 内铰链组件

内铰链组件的下列必要零件宜纳入有限元模型：

- a) 内铰链；
- b) 堆码块。

#### 4.10 角件组件

宜将所有顶角件、底角件纳入有限元模型。

#### 4.11 底板组件

宜将地板纳入有限元模型，而不论其材质为木质还是钢制，从而方便分析时加载。

#### 4.12 方销、圆销组件

连接内、外铰链的方销、圆销是否纳入有限元模型宜根据不同情况分别处理，以使分析过程得到简化，宜按照以下原则进行处理：

- a) 当方销在分析工况中不受力时，方销无需纳入有限元模型；
- b) 当不关心内、外铰链销孔区域局部应力时，圆销无需纳入有限元模型。

#### 4.13 补充说明

台架式集装箱有多种箱型，不同箱型具有不同的结构特征，第4章列举的宜纳入有限元模型的必要零件，如果在待分析箱型中不存在，则予以忽略。

### 5 建立有限元模型

#### 5.1 单位制

宜符合T/CCIASD 10005—2023中7.1。

#### 5.2 坐标系

宜符合T/CCIASD 10005—2023中7.2。

#### 5.3 单元长度

全局单元长度宜符合T/CCIASD 10005—2023中7.3。

方销、圆销、内铰链组件中的必要零件、外铰链组件中的必要零件的单元长度不宜大于5mm，以满足零件厚度方向上不少于3层实体单元。

## 5.4 单元类型

### 5.4.1 实体单元

如下零件推荐采用一阶四面体实体单元模拟，若欲观察小特征区域的精确力学响应，可采用二阶以上等参单元：

- a) 角件；
- b) 方销、圆销；
- c) 内铰链组件中的必要零件；
- d) 外铰链组件中的必要零件。

### 5.4.2 梁单元

底侧梁上端面插桩口圆棒推荐采用一阶三维铁木辛柯梁单元模拟。

### 5.4.3 壳单元

其它必要零件均可视为薄壁型零件，推荐采用一阶四边形薄壳单元模拟，若欲观察小特征区域的精确力学响应，可采用二阶以上等参单元。

## 5.5 三维数模预处理

宜符合T/CCIASD 10005—2023中7.5。底侧梁预拱量可不在有限元模型中考虑，预拱量并不影响底侧梁刚度。

## 5.6 零件属性配置

宜符合T/CCIASD 10005—2023中7.6。

## 5.7 弹塑性材料模型及参数

### 5.7.1 弹塑性材料模型

当要了解结构卸载后的塑性变形时，需采用弹塑性材料模型，但很多情况下受客观条件限制，无法获得材料的应力-应变曲线，故本文件提供一种基于双线性弹塑性本构的材料模型参数估算方法，便于弹塑性有限元分析的开展，基本步骤如下：

- a) 通过材料手册及材料技术要求查询材料的弹性模量（记为 $E$ ）、屈服强度<sup>1)</sup>（记为 $S_y$ ）、抗拉强度（记为 $S_t$ ）及延伸率（记为 $\delta$ ），这四个参数通常易于获得；
- b) 估算抗拉强度对应的真实应变（也称自然应变）；
- c) 估算抗拉强度对应的真实应力（也称自然应力）；
- d) 估算屈服强度对应的真实应变；
- e) 估算屈服强度对应的真实应力；
- f) 估算切线模量，即在塑性变形发生后的应力-应变曲线斜率。

### 5.7.2 估算抗拉强度对应的真实应变

通过公式（1）可估算抗拉强度对应的真实应变：

$$\varepsilon_{t1} = \ln(1 + \delta) \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- $\varepsilon_{t1}$ —抗拉强度对应的真实应变；
- $\delta$ —延伸率。

### 5.7.3 估算抗拉强度对应的真实应力

通过公式（2）可估算抗拉强度对应的真实应力：

$$\sigma_{t1} = S_t(1 + \delta) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- $\sigma_{t1}$ —抗拉强度对应的真实应力；
- $S_t$ —抗拉强度；
- $\delta$ —延伸率。

### 5.7.4 估算屈服强度对应的真实应变

通过公式（3）可估算屈服强度对应的真实应变：

$$\varepsilon_{t2} = S_y/E + 0.002 \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- $\varepsilon_{t2}$ —屈服强度对应的真实应变的数值，无量纲；
- $S_y$ —屈服强度的数值，单位为兆帕（MPa）；
- $E$ —弹性模量的数值，单位为兆帕（MPa）。

### 5.7.5 估算屈服强度对应的真实应力

通过公式（4）可估算屈服强度对应的真实应力：

$$\sigma_{t2} = S_y \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- $\sigma_{t2}$ —屈服强度对应的真实应力；
- $S_y$ —屈服强度。

### 5.7.6 估算切线模量

通过公式（5）可估算切线模量：

$$T = (\sigma_{t2} - \sigma_{t1}) / (\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- $T$ —切线模量；
- $\sigma_{t1}$ —抗拉强度对应的真实应力；
- $\sigma_{t2}$ —屈服强度对应的真实应力；

---

1) 本文件中的屈服强度、抗拉强度及延伸率均指材料技术要求中规定的最小屈服强度、最小抗拉强度及最小延伸率，而不是指材料通过实验得到的实际屈服强度、抗拉强度及延伸率。



$\varepsilon_{t1}$ —抗拉强度对应的真实应变；

$\varepsilon_{t2}$ —屈服强度对应的真实应变。

### 5.7.7 适用范围

本文件提供的基于双线性弹塑性本构的材料模型参数估算方法，适用于各向同性金属塑性材料的保守有限元分析。

### 5.8 零部件连接

宜符合T/CCIASD 10005—2023中7.8。

### 5.9 网格划分

宜符合T/CCIASD 10005—2023中7.9。

## 6 工况设置、求解及结果判读

### 6.1 堆码试验

#### 6.1.1 总则

台架式集装箱没有侧壁，底架承载时弯曲变形较大，有限元法模拟堆码试验时，边界条件、加载方式决定了底架变形预测的准确性。若简单地固定约束底角件，并对顶角件、底架同时加载，则预测数据与实测数据的误差会较大。推荐将底架和角柱的力学响应分开评估，各自单独计算，以达到满意的计算精度。

对折叠式台架箱单独计算底架力学响应时，宜在有限元模型中去除折叠角柱组件或折叠端墙组件，以减小计算规模。

#### 6.1.2 单独计算底架力学响应

##### 6.1.2.1 加载方式

宜采用如下加载方式：

- 底架承载面均布总重为 $1.8R-T$ 的载荷， $R$ 指集装箱额定质量， $T$ 指箱体自身质量，底架承载面指底侧梁上表面、底板上表面及底端梁上表面沿纵向未超越底侧梁的面积（见A.1）；
- 顶角件不加载；
- 全局施加重力加速度 $9.8m/s^2$ 。

##### 6.1.2.2 边界条件

宜采用如下边界条件：

- 对前端和后端底角件下边缘靠内的横向直边（见B.1）约束垂向位移自由度；
- 对前端底角件下边缘靠内的横向直边取外端点（见B.2）约束纵向位移自由度；
- 对前端左侧底角件下边缘靠内的横向直边取外端点（见B.3）约束横向位移自由度。

##### 6.1.2.3 求解结果提取及判读

宜提取如下求解结果并进行判读：

- a) 提取底侧梁下表面的最大垂向位移  $\delta_1$ ，记底侧梁端部下边缘与底角件下表面距离为  $h_1$ ，记底侧梁预拱量为  $h_2$ ，记  $h_3=6\text{mm}$ ， $\delta_1$  不宜超过  $h_1+h_2+h_3$ ；
- b) 提取底架横梁下表面的最大垂向位移  $\delta_2$ ，记底架横梁下表面与底角件下表面距离为  $h_4$ ， $\delta_2$  不宜超过  $h_3+h_4$ 。

### 6.1.3 单独计算角柱力学响应

#### 6.1.3.1 加载方式

宜采用如下加载方式：

- a) 以节点力形式对端部顶角件上表面承压区域加载，每个端部顶角件沿相同方向进行加载区域的偏置，沿横向偏置25.4mm、沿纵向偏置38mm（见A.2），每个端部顶角件承压942KN，有时客户对堆码载荷的定义异于ISO标准，此时宜参考客户的载荷定义；
- b) 底架不加载；
- c) 全局施加重力加速度  $9.8\text{m/s}^2$ 。

#### 6.1.3.2 边界条件

宜采用如下边界条件：

- a) 对底角件底孔下边缘（见B.4）约束横向、纵向、垂向位移自由度；
- b) 对顶角件顶孔上边缘（见B.5）约束横向、纵向位移自由度；
- c) 作为补充，对于折叠式台架箱，宜在内铰链堆码块与外铰链角件板接触面上建立接触单元。

#### 6.1.3.3 求解结果提取及判读

宜提取如下求解结果并进行判读：

- a) 提取角柱最大横向位移  $\delta_3$ ；
- b) 提取角柱最大纵向位移  $\delta_4$ ；
- c) 提取角柱最大垂向位移  $\delta_5$ ；
- d)  $\delta_3$ 、 $\delta_4$ 、 $\delta_5$  均不宜超过6mm；
- e) 当申请的船级社对  $\delta_3$ 、 $\delta_4$ 、 $\delta_5$  有特殊规定时，宜遵从船级社的内部文件要求；
- f) 提取角柱应力分布，角柱任意表面的米塞思应力超出材料屈服强度的区域不宜贯穿该表面。

## 6.2 由四个顶角件起吊试验

### 6.2.1 刚强度分析

#### 6.2.1.1 加载方式

宜采用如下加载方式：

- a) 底架承载面均布总重为2R-T的载荷，底架承载面与堆码试验相同；
- b) 全局施加重力加速度  $9.8\text{m/s}^2$ 。

#### 6.2.1.2 边界条件

宜使箱体在横向、纵向均处于简支状态，方法如下：

- a) 对前端顶角件顶孔下边缘两条直边的中点（见B.6）施加垂向、纵向位移自由度约束；

- b) 对后端顶角件顶孔下边缘两条直边的中点（见B.7）施加垂向位移自由度约束；
- c) 对左侧前端顶角件顶孔下边缘靠外的直边中点（见B.8）施加横向位移自由度约束。

### 6.2.1.3 求解结果提取及判读

宜提取如下求解结果并进行判读：

- a) 提取底侧梁下表面的最大垂向位移，判读方法与堆码试验相同；
- b) 提取底架横梁下表面的最大垂向位移，判读方法与堆码试验相同；
- c) 提取底侧梁下表面在跨中的最大米塞思应力，该应力不宜超过该处材料的屈服强度；
- d) 提取底侧梁腹板下部在跨中的最大米塞思应力，该应力不宜超过该处材料的屈服强度；
- e) 提取底横梁下表面在跨中的最大米塞思应力，该应力不宜超过该处材料的屈服强度；
- f) 对于底侧梁腹板上部开槽的情况，例如配置了鞍马槽等，则补充提取底侧梁腹板在变截面区域的应力分布，如果这些区域的米塞思应力远超出了材料屈服强度，宜进一步对这些区域进行稳定性分析，以评估是否会发生失稳。

### 6.2.2 底侧梁腹板上部开槽的稳定性分析

#### 6.2.2.1 加载方式

与6.2.1.1相同。

#### 6.2.2.2 边界条件

与6.1.2.2相同。

#### 6.2.2.3 求解设置及稳定性判断

宜采用如下方法进行底侧梁的稳定性求解设置及判断：

- a) 将底侧梁腹板开槽区域的四边形壳单元劈分成三角形单元；
- b) 打开有限元分析求解器的几何非线性开关，使有限元模型的构型及刚度矩阵随着迭代计算而不断更新；
- c) 设置有限元分析求解器，写出每一个迭代计算收敛后的子步的结果；
- d) 如果载荷加至100%时计算收敛，则底侧梁腹板开槽区域不会发生失稳；
- e) 如果载荷未加至100%计算就已不收敛，则查看最后一个迭代收敛的子步结果，观察底侧梁腹板开槽区域是否有横向变形呈凹凸相间的变形模式，如果有则判断产生了失稳。

### 6.3 由四个底角件起吊试验

#### 6.3.1 刚强度分析

##### 6.3.1.1 加载方式

宜采用如下加载方式：

- a) 底架加载与由四个顶角件起吊试验的刚强度分析一致；
- b) 在每个后端底角件侧孔外边缘的上部圆弧中点各加载 $0.5R\cot\theta$ 的纵向水平力，该力指向箱体内部， $\theta$ 根据箱体长度取值，1AAA、1AA、1A和1AX型集装箱 $\theta$ 取 $30^\circ$ ，1BBB、1BB、1B和1BX型集装箱 $\theta$ 取 $37^\circ$ ，1CC、1C和1CX型集装箱 $\theta$ 取 $45^\circ$ ；

- c) 全局施加重力加速度 $9.8\text{m/s}^2$ 。

### 6.3.1.2 边界条件

宜使箱体在横向、纵向均处于简支状态，方法如下：

- a) 对前端底角件侧孔外边缘的上部圆弧中点（见B.9）施加垂向、纵向位移自由度约束；
- b) 对后端底角件侧孔外边缘的上部圆弧中点（见B.10）施加垂向位移自由度约束；
- c) 对左侧前端底角件侧孔外边缘的上部圆弧中点（见B.11）施加横向位移自由度约束。

### 6.3.1.3 求解结果提取及判读

求解结果提取及判读同6.2.1.3。

## 6.3.2 底侧梁腹板上部开槽的稳定性分析

### 6.3.2.1 加载方式

与6.3.1.1相同。

### 6.3.2.2 边界条件

与6.3.1.2相同。

### 6.3.2.3 求解设置及稳定性判断

与6.2.2.3相同。

## 6.4 外部纵向栓固试验

### 6.4.1 加载方式

分析从两端底角件底孔拉伸底架的情况即可，宜采用如下加载方式：

- a) 底架承载面均布总重为R-T的载荷，底架承载面与堆码试验相同；
- b) 对每个后端底角件的底孔下边缘后部圆弧中点（见A.3）各加载 $1R$ 的纵向水平力，方向指向箱体外部；
- c) 全局施加重力加速度 $9.8\text{m/s}^2$ 。

### 6.4.2 边界条件

宜使箱体在横向、纵向均处于简支状态，方法如下：

- a) 对前端底角件的底孔下边缘前部圆弧中点（见B.12）施加垂向、纵向位移自由度约束；
- b) 对后端底角件的底孔下边缘后部圆弧中点施加垂向位移自由度约束；
- c) 对左侧前端底角件的底孔下边缘前部圆弧中点（见B.13）施加横向位移自由度约束。

### 6.4.3 求解结果提取及判读

宜提取如下求解结果并进行判读：

- a) 提取底侧梁下表面在端部和跨中的最大米塞思应力，该应力不宜超过该处材料的屈服强度；
- b) 提取底侧梁腹板下部在端部和跨中的最大米塞思应力，该应力不宜超过该处材料的屈服强度。

## 6.5 端壁试验

### 6.5.1 加载方式

宜采用如下加载方式：

- a) 在端部墙板及与其连接的横梁立面上（见A.4）均布0.4P的总载， $P=R-T$ ；
- b) 全局施加重力加速度 $9.8\text{m/s}^2$ 。

### 6.5.2 边界条件

宜对底角件的底孔下边缘施加横向、纵向、垂向位移自由度约束。

### 6.5.3 求解设置、求解结果提取及判读

宜在求解前打开求解器的几何非线性开关，求解后宜提取如下求解结果并进行判读：

- a) 提取端部墙板最大纵向位移，该位移不宜超过60mm；
- b) 当申请的船级社对端部墙板最大纵向位移有特殊规定时，宜遵从船级社的内部文件要求；
- c) 提取端部墙板中心最大米塞思应力，该应力不宜超过该处材料的屈服强度；
- d) 提取端部墙板在与角柱及横梁的焊缝附近最大米塞思应力，该应力不宜超过2倍的该处材料的屈服强度；
- e) 提取与端部墙板连接的横梁的腹板跨中最大米塞思应力，该应力不宜超过该处材料的屈服强度。

## 6.6 顶部试验

### 6.6.1 加载方式

宜采用如下加载方式：

- a) 在顶板最薄弱处的 $600\text{mm} \times 300\text{mm}$ 矩形面积上均布300kg的载荷，该矩形面积宜沿着横向和纵向分别布置和加载；
- b) 如果无法判断顶板最薄弱处，则宜对顶板所有薄弱区域都进行加载试验；
- c) 全局施加重力加速度 $9.8\text{m/s}^2$ 。

### 6.6.2 边界条件

宜对底角件的底孔下边缘施加横向、纵向、垂向位移自由度约束。

### 6.6.3 求解设置、求解结果提取及判读

若顶板结构形式为薄壁平板，则宜在求解前打开求解器的几何非线性开关，求解后宜提取如下求解结果并进行判读：

- a) 提取顶板的最大米塞思应力，该应力不宜超过该处材料的屈服强度；
- b) 若顶板设有背梁，提取背梁的最大米塞思应力，该应力不宜超过该处材料的屈服强度。

## 6.7 小车试验

### 6.7.1 加载方式

宜采用如下加载方式：

- a) 小车为两个轮胎，轮距为760mm，单个轮胎与底板的接触面为 $180\text{mm} \times 78.8\text{mm}$ 的矩形，其中180mm为矩形横向尺寸，每个接触面上载荷为3630kg；

- b) 考察横梁强度时，小车的两个轮胎宜置于横梁的正上方，并沿着横向居中；
- c) 考察钢制底板<sup>2)</sup>强度时，小车的两个轮胎宜置于间距最大的两根横梁之间，并沿着横向和纵向居中。

### 6.7.2 边界条件

与6.1.2.2相同。

### 6.7.3 求解设置、求解结果提取及判读

当考察钢制底板强度时，宜在求解前打开求解器的几何非线性开关，求解后宜提取如下求解结果并进行判读：

- a) 提取横梁下翼板的最大米塞思应力，该应力不宜超过该处材料的屈服强度；
- b) 提取钢制底板在轮胎正下方的最大米塞思应力，该应力不宜超过该处材料的屈服强度；

## 6.8 横向刚性试验

### 6.8.1 加载方式

宜采用如下加载方式：

- a) 在集装箱的左侧，对前端和后端顶角件侧孔外圆（见A.5）各施加150KN的横向力，力的方向指向箱体内部；
- b) 全局施加重力加速度 $9.8\text{m/s}^2$ 。

### 6.8.2 边界条件

宜采用如下约束方式：

- a) 对独立角柱的集装箱，宜对同一端的顶角件顶孔上边缘用一阶三维杆单元进行连接；
- b) 对左侧底角件底孔下边缘靠外的直边中点（见B.14）施加垂向位移自由度约束；
- c) 对右侧底角件底孔下边缘靠内的直边中点（见B.15）施加垂向位移自由度约束及横向位移自由度约束；
- d) 对右侧前端底角件底孔下边缘靠内的直边中点（见B.16）施加纵向位移自由度约束。

### 6.8.3 求解设置、求解结果提取及判读

求解后宜采用如下方法提取求解结果并进行判读：

- a) 以求解得到的节点位移为基础更新有限元模型几何外形，使有限元模型的几何外形为变形后的构型；
- b) 在更新几何外形后的有限元模型上测量端部两条对角线的长度，这两条对角线长度与原始对角线长度差值之和不宜超过60mm。

## 6.9 纵向刚性试验

### 6.9.1 加载方式

---

2) 对于木质底板强度的考察，宜通过物理试验的方式进行。

宜采用如下加载方式：

- a) 对上部结构完整的集装箱，宜对同一端的顶角件端孔外圆（见A.6）各施加75KN的纵向力，力的方向指向箱体内部；
- b) 对上部结构不完整的集装箱，宜对同一端的顶角件端孔外圆各施加50KN的纵向力，力的方向指向箱体内部；
- c) 全局施加重力加速度 $9.8\text{m/s}^2$ 。

#### 6.9.2 边界条件

宜采用如下约束方式：

- a) 对加载一端的底角件底孔下边缘两条直边的中点（见B.17）施加垂向位移自由度约束；
- b) 对未加载一端的底角件底孔下边缘两条直边的中点（见B.18）施加垂向位移自由度约束及纵向位移自由度约束；
- c) 对未加载一端的一侧底角件底孔下边缘靠外直边的中点（见B.19）施加横向位移自由度约束。

#### 6.9.3 求解结果提取及判读

求解后宜提取加载一端顶角件的最大纵向位移，其值不宜超过42mm。

### 6.10 重箱叉举试验

#### 6.10.1 加载方式

宜采用如下加载方式：

- a) 底架承载面均布总重为 $1.6R-T$ 的载荷，底架承载面与堆码试验相同；
- b) 全局施加重力加速度 $9.8\text{m/s}^2$ 。

#### 6.10.2 边界条件

宜采用如下约束方式：

- a) 在箱体一侧从叉槽口开始在两个叉槽顶板上分别向内切割出 $1828\text{mm}\times 200\text{mm}$ 的矩形面，矩形面沿着叉槽断面居中布置，其中 $1828\text{mm}$ 沿着箱体横向（见B.20）；
- b) 对两个 $1828\text{mm}\times 200\text{mm}$ 的矩形面施加垂直方向的位移自由度约束；
- c) 对其中一个矩形面的一条 $1828\text{mm}$ 的边（见B.21）施加纵向位移自由度约束，并对该条边在叉槽口上的端点（见B.22）施加横向位移自由度约束。

#### 6.10.3 求解设置、求解结果提取及判读

宜在求解前打开求解器的几何非线性开关，求解后宜提取如下求解结果并进行判读：

- a) 提取叉槽顶板应力分布，应力超出材料屈服强度的区域不宜超越 $1828\text{mm}\times 200\text{mm}$ 的矩形面边界向外40mm内的环形区域；
- b) 提取叉槽侧壁最大应力，该应力不宜超过该处材料的屈服强度；
- c) 提取底侧梁上表面及下表面在跨中的最大米塞思应力，该应力不宜超过该处材料的屈服强度；
- d) 提取底侧梁腹板在跨中的最大米塞思应力，该应力不宜超过该处材料的屈服强度。

### 6.11 开度试验

### 6.11.1 加载方式

宜采用如下加载方式：

- a) 底架承载面均布总重为R-T的载荷，底架承载面与堆码试验相同；
- b) 全局施加重力加速度 $9.8\text{m/s}^2$ 。

### 6.11.2 边界条件

宜采用如下约束方式：

- a) 对于非折叠式台架箱，边界条件与6.1.2.2相同；
- b) 对于折叠式台架箱，宜在6.1.2.2基础上对内铰链堆码块与外铰链角件板接触面补充建立粘接接触单元。

### 6.11.3 求解结果提取及判读

求解后宜提取前端顶角件与后端顶角件的最大纵向位移量之和 $\delta_6$ ，并按如下准则进行判读：

- a) 对1AAA、1AA、1A和1AX型集装箱， $\delta_6$ 不宜超过30mm；
- b) 对1BBB、1BB、1B和1BX型集装箱， $\delta_6$ 不宜超过30mm；
- c) 对1CC、1C和1CX型集装箱， $\delta_6$ 不宜超过26mm；
- d) 当 $\delta_6$ 无法满足a)、b)、c)准则时，宜实地确认吊装设备与台架箱的匹配情况，避免吊运不畅。

### 6.12 空箱叉举试验

当集装箱设有空箱叉槽时，有限元分析方法与重箱叉举试验一致，修改底架承载面均布载荷值为 $0.625R$ 并将约束施加在空箱叉槽上即可。



附录 A  
(资料性)  
有限元模型加载位置图示

A.1 底架承载面

底架承载面见图A.1中深蓝色面域。

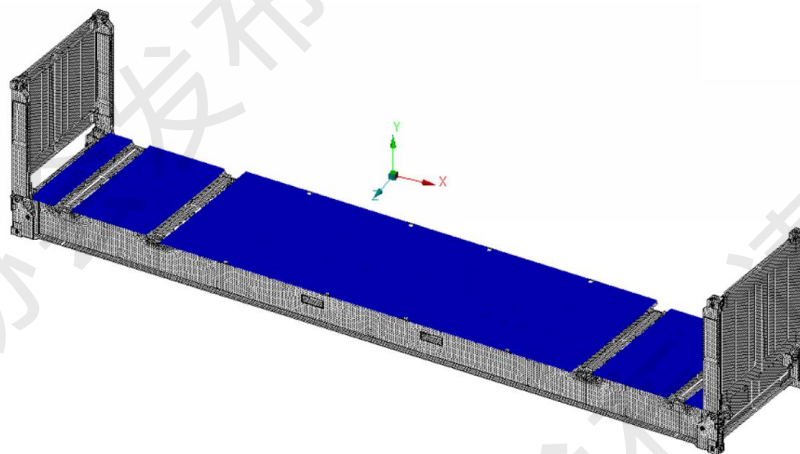


图 A.1 底架承载面

A.2 顶角件加载区域偏置

顶角件偏置后的加载区域见图A.2中墨绿色面域。

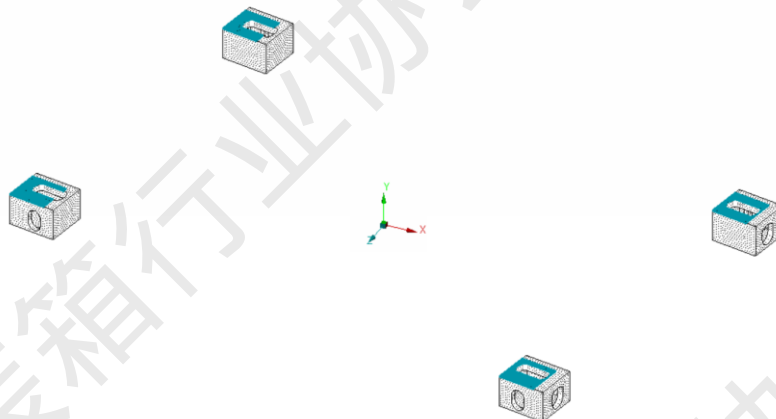


图 A.2 顶角件加载区域偏置

A.3 后端底角件的底孔下边缘后部圆弧中点

后端底角件的底孔下边缘后部圆弧中点见图A.3中的2个洋红色中点。



图 A.3 后端底角件的底孔下边缘后部圆弧中点

## A.4 端部墙板及与其连接的横梁立面

端部墙板及与其连接的横梁立面见图A.4中的青色面域。

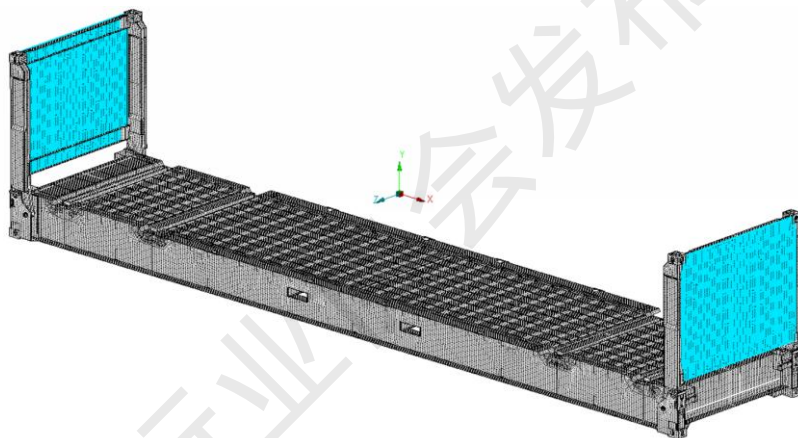


图 A.4 端部墙板及与其连接的横梁立面

## A.5 集装箱左侧前端和后端顶角件侧孔外圆

集装箱左侧前端和后端顶角件侧孔外圆见图A.5中的红色环形线。

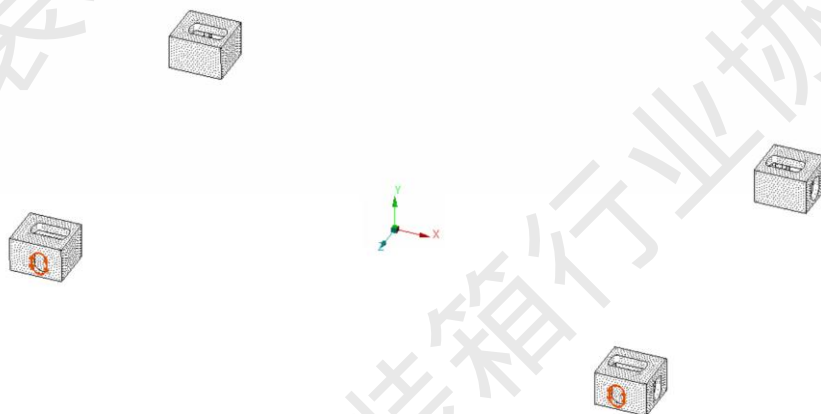


图 A.5 集装箱左侧前端和后端顶角件侧孔外圆

A.6 同一端的顶角件端孔外圆（以后端加载为例）

后端的顶角件端孔外圆见图A.6中的青色环形线。

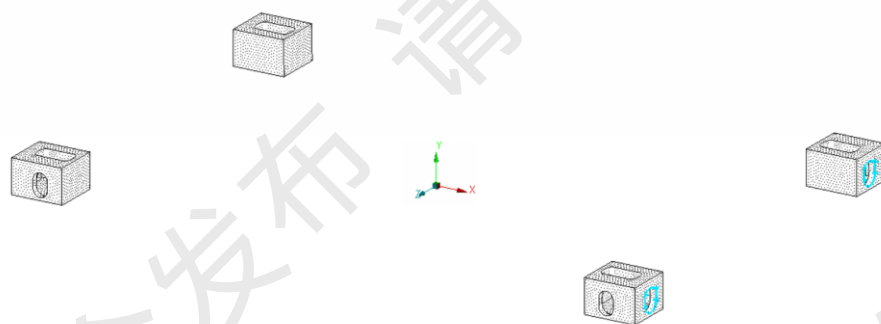


图 A.6 同一端的顶角件端孔外圆（以后端加载为例）

附录 B  
(资料性)  
有限元模型约束位置图示

B.1 前端和后端底角件下边缘靠内的横向直边

前端和后端底角件下边缘靠内的横向直边见图B.1中的4条棕红色边线。

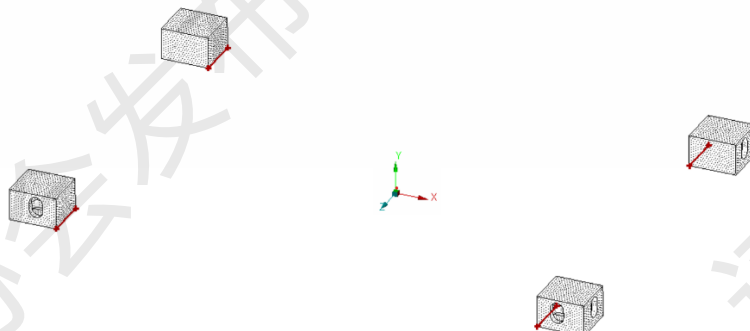


图 B.1 前端和后端底角件下边缘靠内的横向直边

B.2 前端底角件下边缘靠内的横向直边外端点

前端底角件下边缘靠内的横向直边外端点见图B.2中的2个绿色端点。

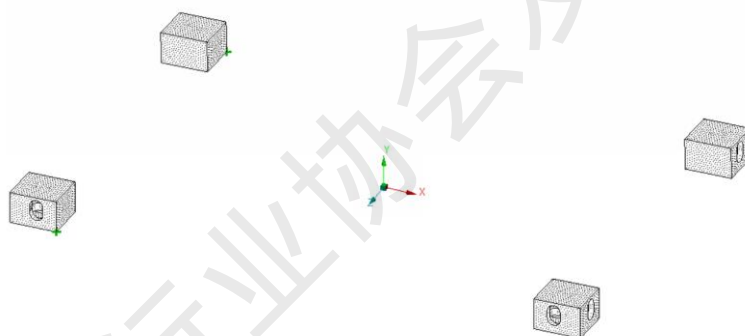


图 B.2 前端底角件下边缘靠内的横向直边外端点

B.3 前端左侧底角件下边缘靠内的横向直边外端点

前端左侧底角件下边缘靠内的横向直边外端点见图B.3中的1个深蓝色端点。

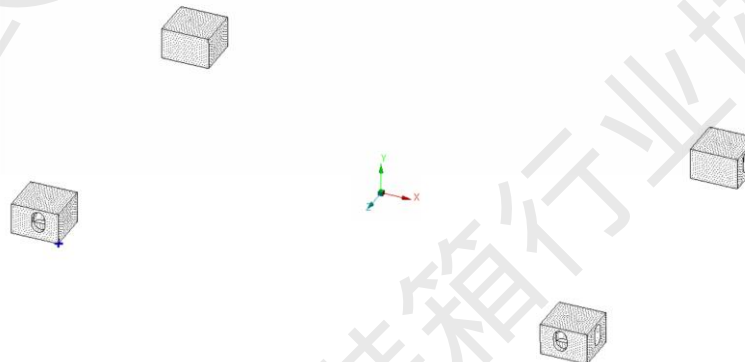


图 B.3 前端左侧底角件下边缘靠内的横向直边外端点

B.4 底角件底孔下边缘

底角件底孔下边缘见图B.4中的4条墨绿色环形线。



图 B.4 底角件底孔下边缘

#### B.5 顶角件顶孔上边缘

顶角件顶孔上边缘见图B.5中的4条红色环形线。

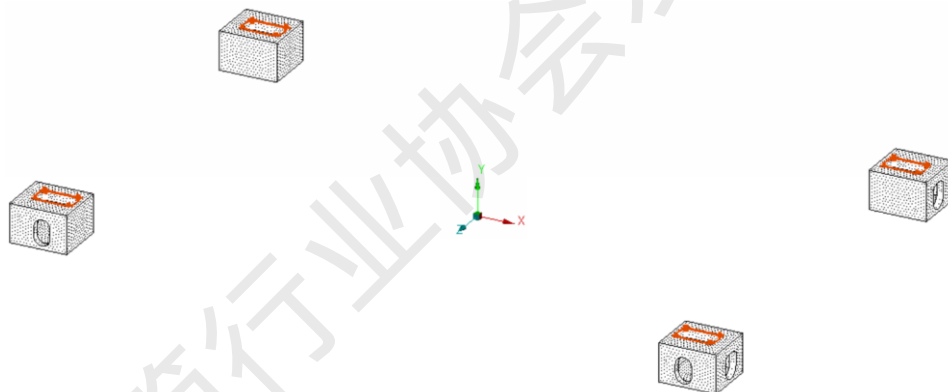


图 B.5 顶角件顶孔上边缘

#### B.6 前端顶角件顶孔下边缘两条直边的中点

前端顶角件顶孔下边缘两条直边的中点见图B.6中的4个橙色中点。

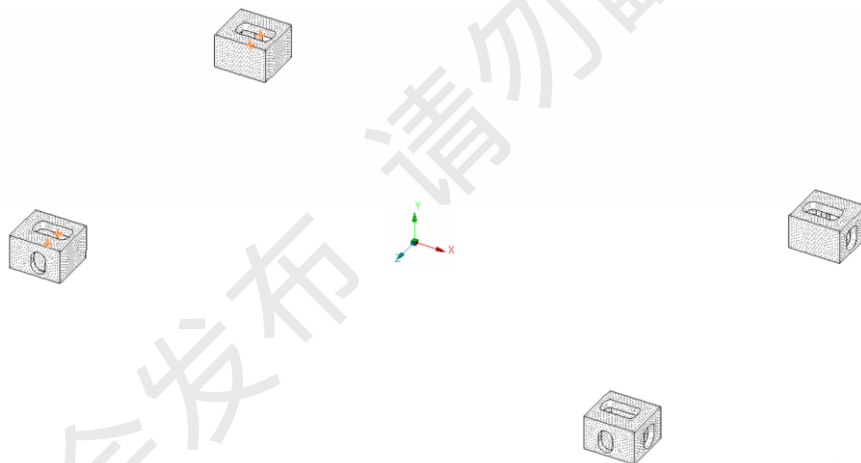


图 B.6 前端顶角件顶孔下边缘两条直边的中点

## B.7 后端顶角件顶孔下边缘两条直边的中点

后端顶角件顶孔下边缘两条直边的中点见图B.7中的4个蓝色中点。

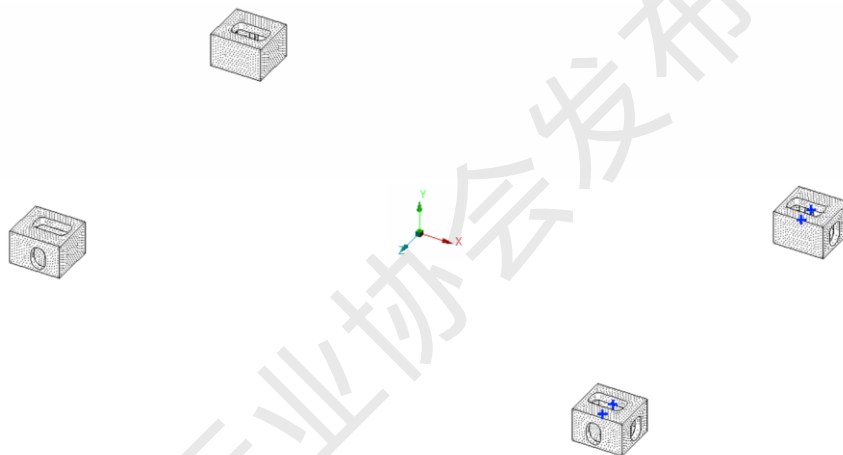


图 B.7 后端顶角件顶孔下边缘两条直边的中点

## B.8 左侧前端顶角件顶孔下边缘靠外的直边中点

左侧前端顶角件顶孔下边缘靠外的直边中点见图B.8中的1个绿色中点。

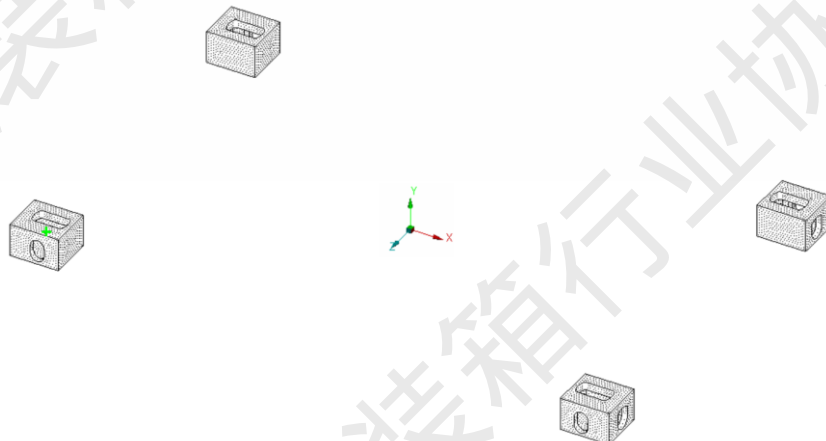


图 B.8 左侧前端顶角件顶孔下边缘靠外的直边中点

### B.9 前端底角件侧孔外边缘的上部圆弧中点

前端底角件侧孔外边缘的上部圆弧中点见图B.9中的2个青色中点。

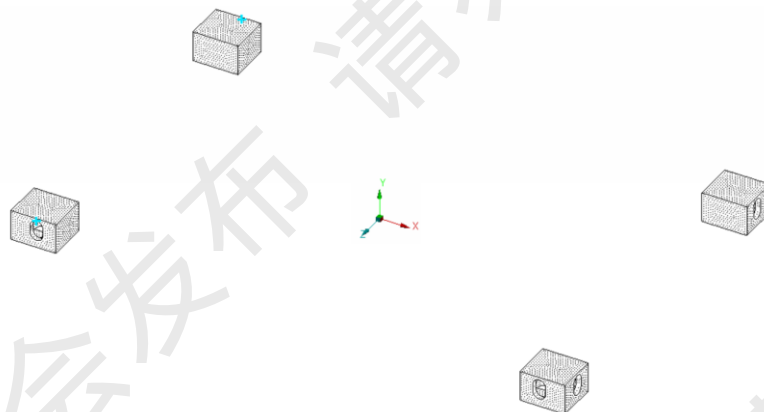


图 B.9 前端底角件侧孔外边缘的上部圆弧中点

### B.10 后端底角件侧孔外边缘的上部圆弧中点

后端底角件侧孔外边缘的上部圆弧中点见图B.10中的2个红色中点。

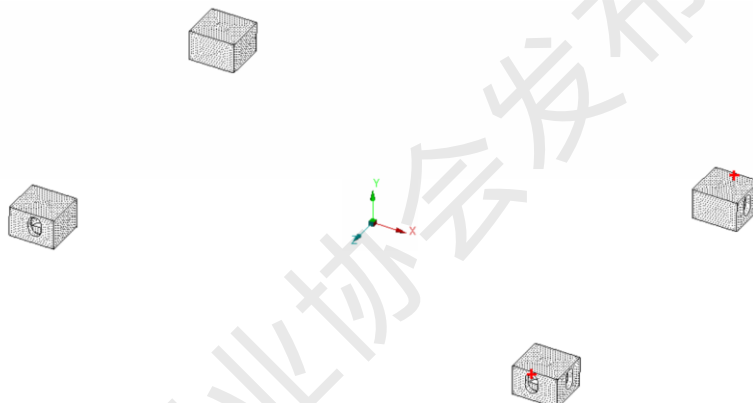


图 B.10 后端底角件侧孔外边缘的上部圆弧中点

### B.11 左侧前端底角件侧孔外边缘的上部圆弧中点

左侧前端底角件侧孔外边缘的上部圆弧中点见图B.11中的1个洋红色中点。

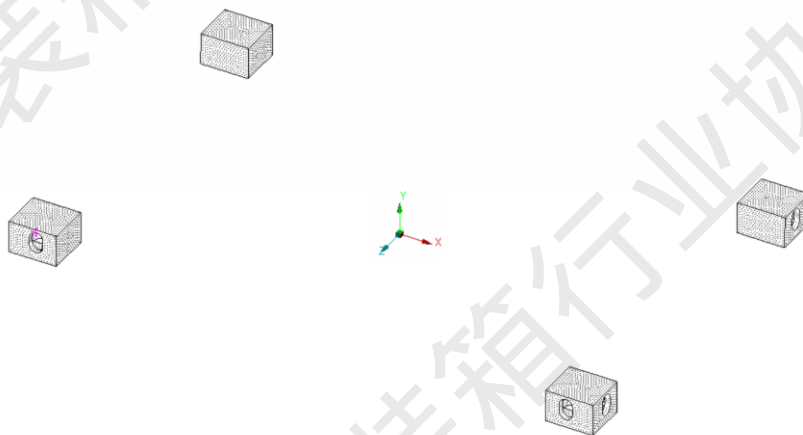


图 B.11 左侧前端底角件侧孔外边缘的上部圆弧中点

### B.12 前端底角件的底孔下边缘前部圆弧中点

前端底角件的底孔下边缘前部圆弧中点见图B.12中的2个深红色中点。



图 B.12 前端底角件的底孔下边缘前部圆弧中点

#### B.13 左侧前端底角件的底孔下边缘前部圆弧中点

左侧前端底角件的底孔下边缘前部圆弧中点见图B.13中的1个深蓝色中点。

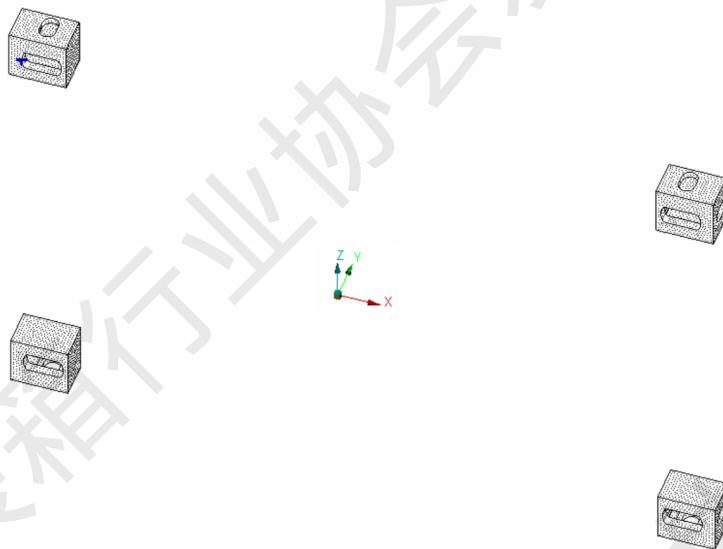


图 B.13 左侧前端底角件的底孔下边缘前部圆弧中点

#### B.14 左侧底角件底孔下边缘靠外的直边中点

左侧底角件底孔下边缘靠外的直边中点见图B.14中的2个橙色中点。



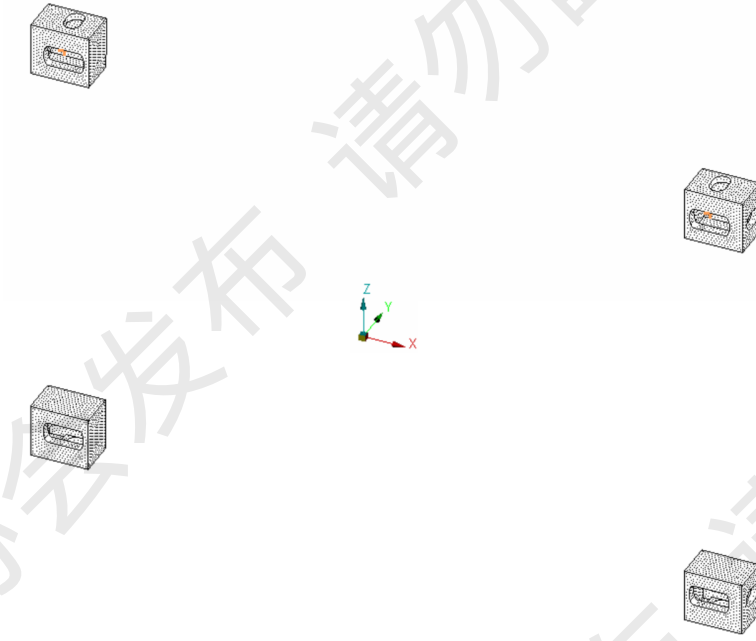


图 B.14 左侧底角件底孔下边缘靠外的直边中点

B.15 右侧底角件底孔下边缘靠内的直边中点

右侧底角件底孔下边缘靠内的直边中点见图B.15中的2个深蓝色中点。

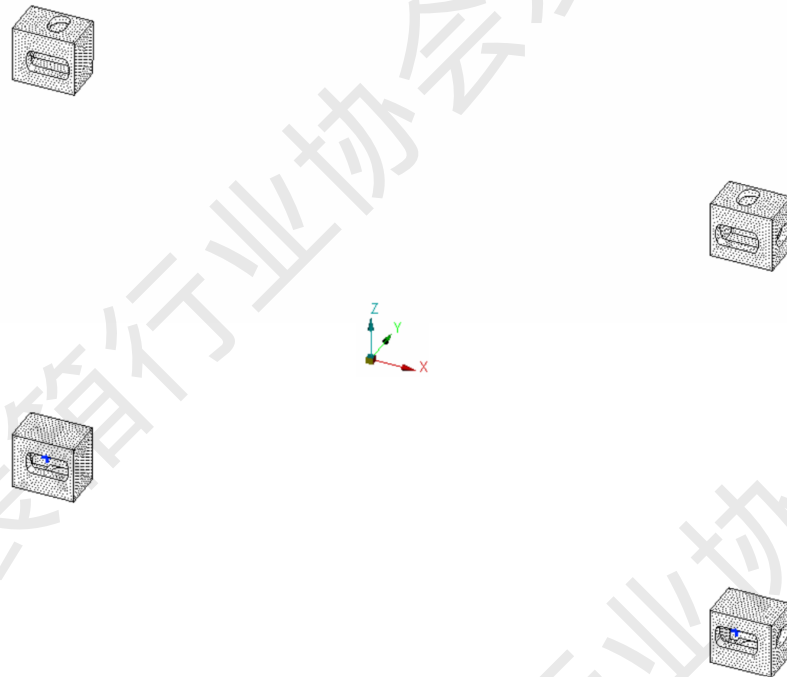


图 B.15 左侧底角件底孔下边缘靠外的直边中点

B.16 右侧前端底角件底孔下边缘靠内的直边中点

右侧前端底角件底孔下边缘靠内的直边中点见图B.16中的1个青色中点。

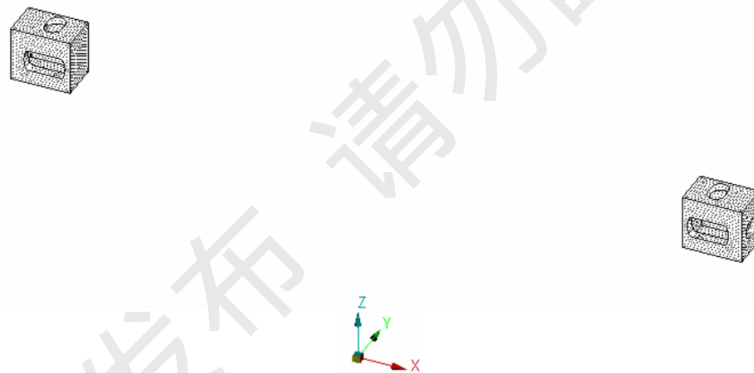


图 B.16 左侧底角件底孔下边缘靠外的直边中点

B.17 加载一端的底角件底孔下边缘两条直边的中点（以后端加载为例）

后端的底角件底孔下边缘两条直边的中点见图B.17中的4个红色中点。



图 B.17 加载一端的底角件底孔下边缘两条直边的中点（以后端加载为例）

B.18 未加载一端的底角件底孔下边缘两条直边的中点（以后端加载为例）

未加载一端的底角件底孔下边缘两条直边的中点见图B.18中的4个洋红色中点。



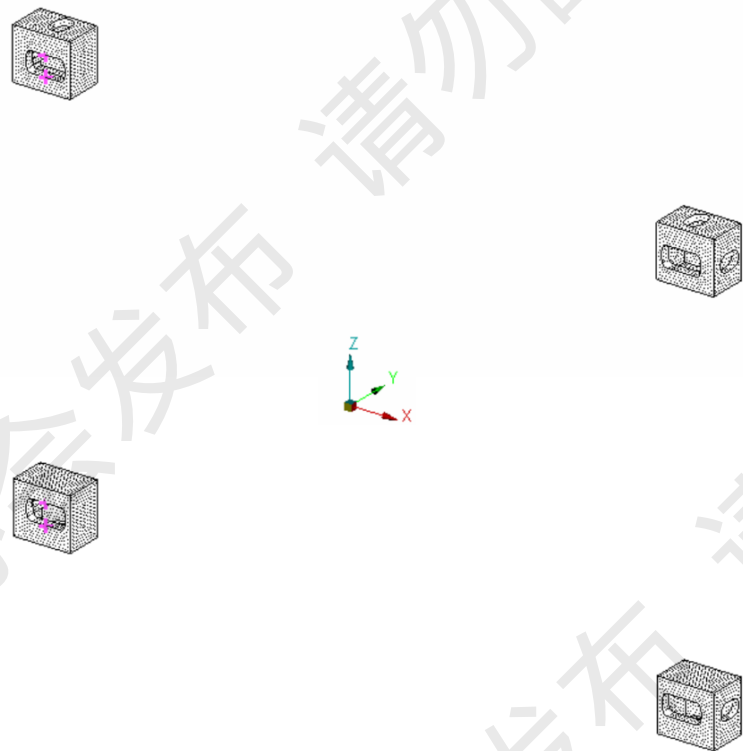


图 B.18 未加载一端的底角件底孔下边缘两条直边的中点（以后端加载为例）

B.19 未加载一端的一侧底角件底孔下边缘靠外直边的中点（以后端加载为例）

未加载一端的底角件底孔下边缘两条直边的中点见图B.19中的1个深红色中点。

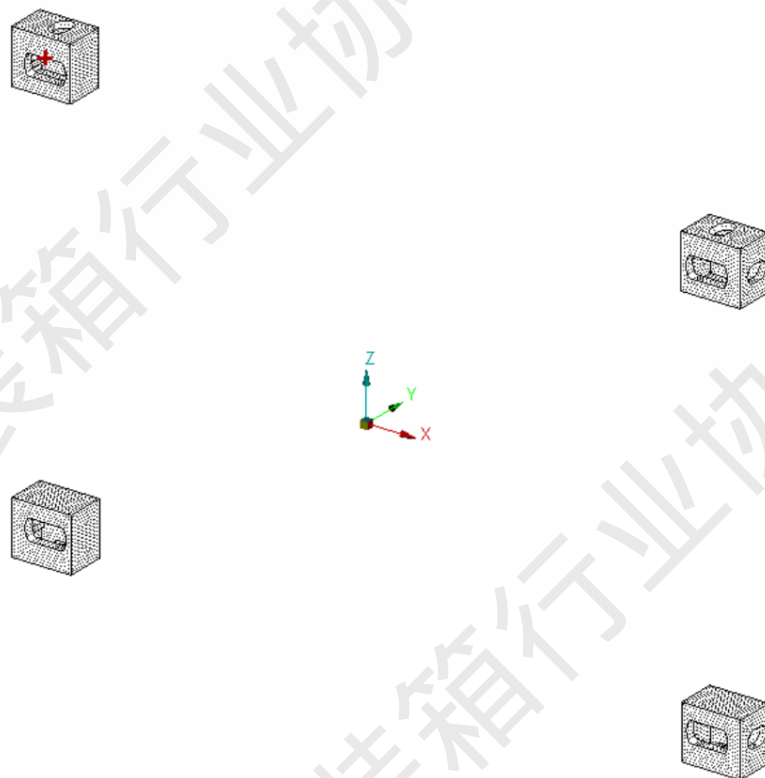


图 B.19 未加载一端的一侧底角件底孔下边缘靠外直边的中点

B.20 1828mm×200mm 的矩形面

1828mm×200mm的矩形面见图B.20中的2个青色面域。

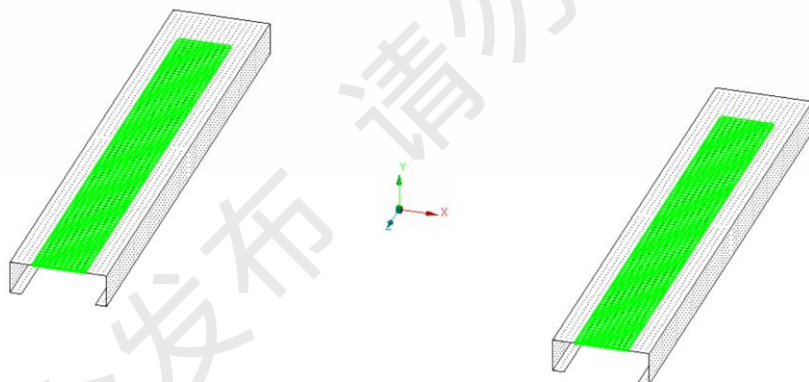


图 B. 20 1828mm×200mm 的矩形面

B.21 矩形面的一条 1828mm 的边

矩形面的一条1828mm的边见图B.21中的1条蓝色边。

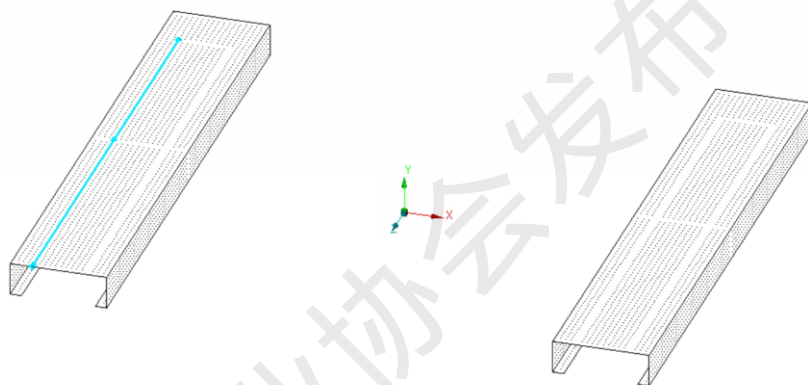


图 B. 21 矩形面的一条 1828mm 的边

B.22 矩形面的一条 1828mm 的边在叉槽口上的端点

矩形面的一条1828mm的边在叉槽口上的端点见图B.22中的1个红色端点。

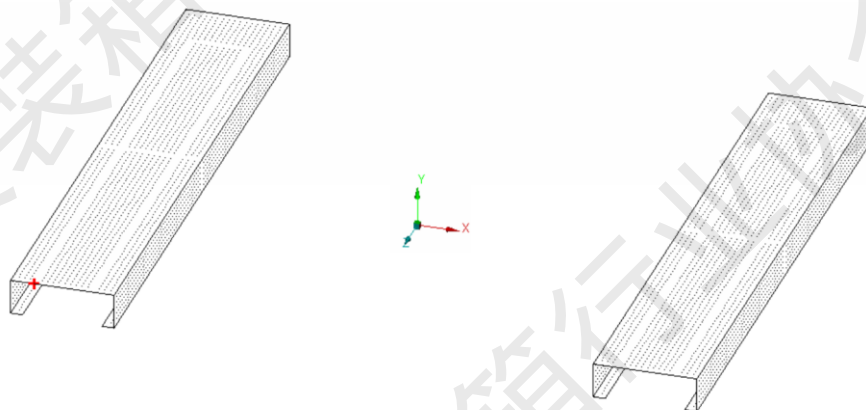


图 B. 22 矩形面的一条 1828mm 的边在叉槽口上的端点

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] GB/T 5338.5 系列1集装箱 技术要求和试验方法 第5部分：平台和台架式集装箱
  - [4] GB/T 31054 机械产品计算机辅助工程有限元数值计算术语
  - [5] GB/T 33582 机械产品结构有限元力学分析通用规则
  - [6] ISO 1496-5 Series 1 freight containers - Specification and testing
-