

# 杆式折叠结构的设计与受力性能分析

刘俊锋<sup>1</sup>, 刘艳芝<sup>1\*</sup>, 朱德举<sup>1,2</sup>, 王涛<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 山东天意高科技有限公司, 山东 济宁 272114)

**摘要:** 为了实现房屋的折叠与展开并满足其受力需求, 在传统剪支铰折叠结构的基础上, 提出一种新型杆式折叠结构。首先, 对新型杆式折叠结构进行设计和优化, 采用螺旋理论对其进行自由度分析。同时, 建立高度为2.2 m的ABAQUS有限元模型, 对其施加平面内竖向荷载, 获得不同铰接约束次数、钢材强度等级、销轴孔径、槽钢立柱壁厚、杆件宽度条件下折叠结构的初始刚度、极限承载力和破坏模式。最后, 对折叠结构进行稳定性分析, 提出了设计建议。结果表明: 当折叠结构展开后高宽比为 $1/\sqrt{2}$ 时, 可以达到最大折叠率; 折叠结构展开过程中机构自由度为1, 当折叠结构完全展开并施加一定铰接约束后结构自由度为负值; 次要受力杆件、销轴孔径对结构初始刚度和极限承载力影响不大; 提高钢材强度等级、槽钢立柱壁厚、主要受力构件宽度可提高结构初始刚度和极限承载力, 但是其值过高时会导致结构发生失稳破坏; 为避免结构失稳, 可通过促进塑性铰形成和将特定杆件改为箱形截面两种途径来实现。

**关键词:** 折叠结构; 有限元模拟; 螺旋理论; 荷载-位移曲线; 稳定性分析

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)02-0064-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20230829001

## Design and Mechanical Performance Analysis of Rod Folding Structure

LIU Junfeng<sup>1</sup>, LIU Yanzhi<sup>1\*</sup>, ZHU Deju<sup>1,2</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Shandong Tianyi High-Technology Co., Ltd., Jining 272114, China)

\*Corresponding author: liuyanzhi@hnu.edu.cn

**Abstract:** In order to realize the folding and unfolding of the house and meet its bearing capacity requirement, a new type of rod folding structure was proposed based on traditional scissor hinged folding structure. Firstly, a new rod folding structure was designed and optimized, and the spiral theory was used to analyze the degree of freedom of the new rod folding structure. At the same time, an ABAQUS finite element model with a height of 2.2 m was established, and vertical load in plane was applied to obtain the initial stiffness, ultimate bearing capacity and failure mode of the folding structure under different hinge constraint conditions, steel strength grades, apertures of pin shaft, wall thicknesses of channel steel column and rod widths. Finally, stability analysis of the folding structure was carried out and design suggestions were proposed. The results show that when the height-to-width ratio of the folding structure after unfolding is  $1/\sqrt{2}$ , the maximum folding rate of the structure can be achieved. The degree of freedom of the

收稿日期: 2023-08-29

基金项目: 湖南省自然科学基金(2023JJ30142), 长沙市自然科学基金(kq2208033), 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2021TSGC1175), 湖湘高层次人才聚集工程-创新人才(2021RC5005)

作者简介:

刘俊锋(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事折叠结构方面的研究。E-mail: liujunfeng@hnu.edu.cn。

通信作者:

刘艳芝(1982—), 女, 博士, 副教授, 主要从事新型钢结构与组合结构节点性能方面的研究。E-mail: liuyanzhi@hnu.edu.cn。

mechanism during the unfolding process of the folding structure is 1, and when it is fully expanded, the degree of freedom of the structure is negative after applying certain articulation constraints. The secondary stressed members and apertures of pin shaft have little effect on the initial stiffness and ultimate bearing capacity of the structure. Increasing the steel strength grade, the wall thickness of channel steel columns, and width of the main stressed members can enhance the initial stiffness and ultimate bearing capacity of the structure, but excessive increase leads to structural instability failure. To avoid structural instability, this can be achieved by promoting plastic hinge formation and changing specific members to box sections.

**Keywords:** folding structure; finite element simulation; spiral theory; load-displacement curve; stability analysis

折叠结构由于折叠后占用空间小、机动性强等特点,在建筑领域有着广泛的应用,包括折叠桥梁<sup>[1]</sup>、折叠楼梯<sup>[2]</sup>、折叠屋盖<sup>[3]</sup>等。采用折叠结构的折叠房屋相比于传统房屋,具有可移动、快速折叠展开、施工周期短、建造成本低等优势。1995年我国就开始了折叠式宿营房的研究<sup>[4]</sup>。近年来国内外学者相继提出了多种折叠结构房屋并已投入使用<sup>[5-7]</sup>。

关于折叠结构的研究,2021年ŠLJIVIĆ等<sup>[8]</sup>根据其基本元素的几何形状,提出了一种新的折叠结构分类方法,将现有折叠结构分为4类:杆、板、空间和组合元素。建筑领域常用的折叠结构以折叠单元形状为分类依据,可划分为X形折叠结构<sup>[9]</sup>、V形折叠结构<sup>[10]</sup>和Z形折叠结构<sup>[11]</sup>。为研究折叠结构的运动状态,ESCRIG<sup>[12]</sup>引入并提出了运动学公式的概念,在这一概念基础上,其采用纯几何方法推导出可折叠性方程<sup>[13]</sup>,后续学者又提出了曲面运动方程<sup>[14]</sup>和收敛曲面<sup>[15]</sup>等运动学公式。在力学性能方面,RASKIN等<sup>[16-18]</sup>在1996年将可展开柱等效为由具有无限弯曲和有限轴向刚度的剪支铰单元组成的复合柱,并给出了可展开柱屈曲荷载的计算方法,1998年其研究了可展开柱在横向、轴向和弯矩作用下的力学性能,并在1999年采用迭代法求解平衡和非线性变形方程组,发现在轴向荷载下可展开柱的高度和展开程度保持不变,柱中剪支铰单元数量的变化仅导致平衡路径的微小差异,如果在特定单元的两个节点之间添加水平连接,则可展开柱的轴向刚度将大幅度增加,屈曲会被推迟。近年来,国内外多名学者采用静力学平衡法<sup>[19]</sup>、刚度迭代法<sup>[20]</sup>、有限元法<sup>[21]</sup>、非线性分析<sup>[22]</sup>、能量法<sup>[23]</sup>和绝对节点坐标公式<sup>[24]</sup>对各种折叠结构进行了研究,以确定折叠结构的静力和动力性能。对于需要加固的折叠结构,当前主流的加固方法是支撑结构增强<sup>[25]</sup>和索增强<sup>[26]</sup>。

基于以上研究背景,本文将杆式折叠结构用于房屋中,将其作为主要的折叠展开构件,提出如图1所示的折叠房屋。对折叠房屋使用的杆式折叠结构进行设计、优化和自由度分析,采用ABAQUS有限元软件建立折叠结构模型,针对不利工况,对折叠结构进行平面内竖向荷载作用下受力性能分析,分析钢材强度等级、销轴

孔径、杆件宽度、槽钢立柱壁厚对折叠结构初始刚度、极限承载力和破坏模式的影响,研究其稳定性并提出相应的设计建议,为折叠结构和折叠房屋的研究提供参考。

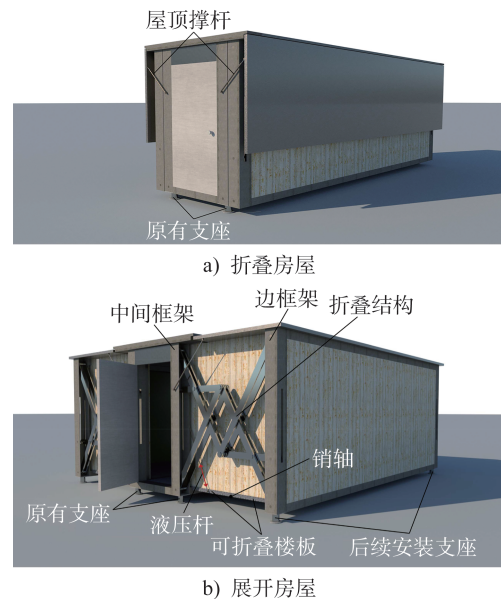


图1 折叠房屋概念图

Fig. 1 Conceptual diagram of a folding house

## 1 折叠结构设计 with 自由度分析

### 1.1 折叠结构设计

折叠房屋采用液压驱动,如图1b)所示,通过在折叠房屋立柱上安装长行程液压杆提供展开或折叠动力,其中液压杆缸体外壳端部和活塞杆端部分别与折叠房屋中间框架槽钢立柱和内侧折叠地板铰接。由液压系统驱动液压杆伸缩带动可折叠地板围绕销轴转动,继而完成折叠结构的展开和折叠。液压杆仅用于驱动折叠房屋的展开或折叠,并不参与展开后的结构受力,故液压杆并不影响折叠结构后续的受力分析。

根据房屋折叠打开方式,在剪支铰折叠结构的基础上,提出如图2所示的新型杆式折叠结构。图中除M、N两点为剪支铰节点外,其余节点均为普通铰接节点,I、J两点可解除铰接,解除后整个结构变为可动机构,可进行折叠,其完全折叠后的状态如图3所示。

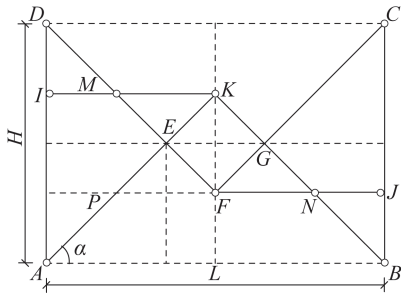


图2 折叠结构展开示意图

Fig. 2 Schematic diagram of folding structure after deployment

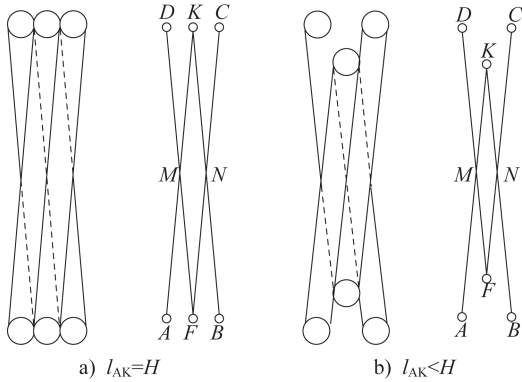


图3 折叠结构折叠后示意图

Fig. 3 Schematic diagram of folding structure after folding

图3a)对应于折叠后K、D、C三点位于同一水平高度,由于杆件宽度远小于杆件长度,此时可近似认为杆件AK长度和结构高度H相等,即 $l_{AK}=H$ 。图3b)对应于折叠后K点在水平高度上低于D、C两点,此时杆件AK长度小于结构高度H,即 $l_{AK}<H$ 。对比图3a)、b)可以发现,当 $l_{AK}<H$ 时,杆件AK长度越长,折叠后所占空间越小。为使得整个结构的折叠率更高,杆件AK长度应较长,以下将分别分析上述两种情况。

(1)  $l_{AK}=H$

根据图2和图3a),当 $l_{AK}=H$ 时,折叠结构需要满足以下两个条件。

$$\text{折叠条件: } \begin{cases} l_{DM} = l_{MK} \\ l_{MK} = l_{MF} = \frac{l_{AK}}{2} \end{cases}$$

$$\text{展开条件: } \begin{cases} \text{杆件IK、FJ位于水平位置} \\ BC \text{ 平行于 } AD \\ A、B \text{ 两点水平高度相同} \end{cases}$$

图2中MK和MF分别作为直角 $\triangle MFK$ 的直角边和斜边,折叠条件中 $l_{MK}=l_{MF}=l_{AK}/2$ 恒不成立,即在所有杆件宽度相等的前提下,结构无法做到完全折叠。鉴于此,可舍弃该条件,由此导致的结构无法完全折叠,后续可通

过构造措施,改变某些特定杆件的宽度来解决。

此时,杆件AK与水平面之间夹角为 $\alpha$ :

$$l_{AE} = \frac{H}{2 \sin \alpha} \quad (1)$$

$$l_{AK} = \frac{L}{2 \cos \alpha} \quad (2)$$

$$l_{MK} = 2l_{EK} \cos \alpha = 2(l_{AK} - l_{AE}) \cos \alpha \quad (3)$$

$$l_{DM} = l_{AP} = l_{AK} - l_{PK} = l_{AK} - 2l_{EK} = 2l_{AE} - l_{AK} \quad (4)$$

式中:L为结构宽度。

将式(1)、式(2)代入式(3)、式(4)可得:

$$l_{MK} = 2\left(\frac{L}{2 \cos \alpha} - \frac{H}{2 \sin \alpha}\right) \cos \alpha = L - \frac{H \cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (5)$$

$$l_{DM} = \frac{H}{\sin \alpha} - \frac{L}{2 \cos \alpha} \quad (6)$$

将条件 $l_{AK}=H$ 和 $l_{DM}=l_{MK}$ 代入式(5)、式(6)可得:

$$L - \frac{H \cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{H}{\sin \alpha} - \frac{L}{2 \cos \alpha} \quad (7)$$

由式(7)可得: $\alpha = 45^\circ$ 。

折叠结构高宽比 $H/L = 1/\sqrt{2}$ 。图4为采用工业设计软件Solidworks对折叠结构进行展开、折叠过程模拟验证。根据图4a),优化前的结构由于不满足折叠条件中的第2条 $l_{MK}=l_{MF}=l_{AK}/2$ ,故无法实现完全折叠。

图4a)中结构折叠时杆件AK、FC率先接触,而杆件KB、DF尚未接触,但整个结构已无法继续折叠。因此可以通过减小杆件AK和FC的宽度,转而增大其厚度来确保杆件强度,延迟折叠过程中杆件AK和FC的接触,实现在杆件AK、FC接触的同时,杆件KB、DF也接触,从而使结构达到最大折叠率。图4b)为通过此方法优化后的折叠结构。

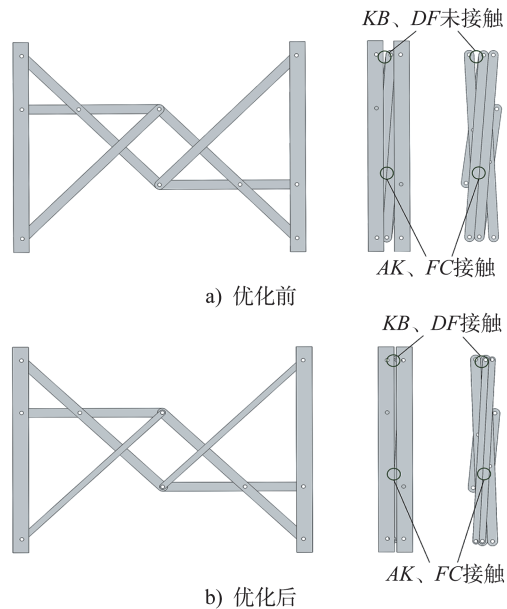


图4 折叠结构

Fig. 4 Folding structure

(2)  $l_{AK} < H$

当  $l_{AK} < H$  时, 折叠结构需满足以下条件。

折叠条件:  $l_{DM} = l_{MK}$

展开条件:  $\begin{cases} \text{杆件} IK、FJ \text{ 位于水平位置} \\ BC \text{ 平行于} AD \\ A、B \text{ 两点水平高度相同} \end{cases}$

根据图 3b), 在  $l_{AK} < H$  的前提下, 折叠条件无法满足, 该方案被舍弃。

综上, 采用  $l_{AK} = H$  方案的折叠结构优化后可以达到最大折叠率, 且经过 Solidworks 模拟验证, 该方案可实现最初设计时预想的展开和折叠形状, 故为较佳方案, 后续研究均在其基础上进行。

### 1.2 折叠结构自由度分析

机构的自由度数为所有运动构件的总自由度减去所有约束数量的总和。引入螺旋理论, 修正后的 Kutzbach-Grübler 自由度计算公式<sup>[27]</sup>为:

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - \zeta \quad (8)$$

式中:  $d$  为机构的阶数;  $n$  为包括机架的构件数量;  $g$  为运动副数量;  $f_i$  为第  $i$  个运动副的自由度;  $v$  为多环并联机构去除公共约束因素后的冗余约束数量;  $\zeta$  为机构中存在的局部自由度。

本文提出的折叠结构螺旋系统如图 5 所示, 所有节点均为铰接节点 (转动副 R), 活动度为 1, 约束螺旋约束力与转动副共面, 约束力偶必须与转动副轴线互相垂直, 螺旋表示为  $\$_{R1} = (1, 0, 0; 0, 0, 0)$ 。当坐标系如图 5 所示时, 12 个转动副表示为螺旋, 螺旋系为:

- $\$_1 = (0, 0, 1; 0, 0, 0)$
- $\$_2 = (0, 0, 1; 0, b_2, 0)$
- $\$_3 = (0, 0, 1; a_3, b_3, 0)$
- $\$_4 = (0, 0, 1; a_4, 0, 0)$
- $\$_5 = (0, 0, 1; a_5, b_5, 0)$
- $\$_6 = (0, 0, 1; a_6, b_6, 0)$
- $\$_7 = (0, 0, 1; a_7, b_7, 0)$
- $\$_8 = (0, 0, 1; a_8, b_8, 0)$
- $\$_9 = (0, 0, 1; a_9, b_9, 0)$
- $\$_{10} = (0, 0, 1; a_{10}, b_{10}, 0)$
- $\$_{11} = (0, 0, 1; 0, b_{11}, 0)$
- $\$_{12} = (0, 0, 1; a_{12}, b_{12}, 0)$

12 个螺旋的 Plucker 坐标中第 1、第 2 及第 6 元素恒为 0, 与结构变化无关, 因此可直接确定 12 个螺旋的 3 个反螺旋:

$$\begin{aligned} \$_1^r &= (0, 0, 1; 0, 0, 0) \\ \$_2^r &= (0, 0, 0; 1, 0, 0) \\ \$_3^r &= (0, 0, 0; 0, 1, 0) \end{aligned}$$

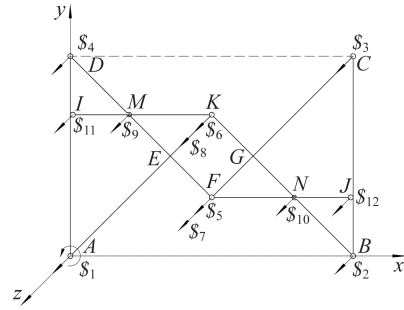


图 5 折叠结构螺旋系

Fig. 5 Spiral system of folding structure

螺旋系有 3 个反螺旋, 机构有 3 个公共约束 (即公共约束数量  $\lambda = 3$ ), 机构阶数  $d = 6 - 3 = 3$ ,  $v$  和  $\zeta$  均为 0。采用修正后的 Kutzbach-Grübler 自由度公式计算折叠结构在折叠和展开过程中 (未铰接约束 I、J 两点) 的自由度:

$$M = 3 \times (8 - 10 - 1) + 1 \times 10 = 1$$

同理, 折叠结构展开之后只对 I 点铰接和同时对 I、J 两点铰接的结构自由度分别为:

$$M_I = 3 \times (8 - 11 - 1) + 1 \times 11 = -1$$

$$M_{I,J} = 3 \times (8 - 12 - 1) + 1 \times 12 = -3$$

机构学中认为机构输入的数量要与机构的自由度数量相等, 这样机构就能实现确定的运动。折叠结构在折叠或者展开过程中自由度为 1, 只需 1 个驱动即可实现结构展开, 而在结构完全展开并对 I、J 两点同时铰接后, 结构自由度为负值, 可承受荷载, 满足折叠房屋的展开和受力需求。

## 2 折叠结构有限元模型

### 2.1 有限元模型描述

为方便说明, 对折叠结构中所有构件进行编号, 如图 6a) 所示, 后文中均以编号代指各构件。如图 1 所示的折叠房屋, 其在使用阶段需要 8 个支座, 在完全展开后需安装两侧边框架底部的 4 个支座。当折叠房屋完全展开但未安装支座时, 折叠结构可近似为以中间框架为基础的悬挑结构, 相比于两侧支座安装完成后的情况, 此时为杆式折叠结构的不利荷载工况。针对该不利工况, 使用 ABAQUS 有限元软件对折叠结构进行平面内竖向荷载作用下的模拟。模拟时折叠结构受力状态如图 6b) 所示, 槽钢立柱①上下端为固定约束, 槽钢立柱②顶面耦合于一点, 在该点施加竖向荷载  $P$ , 由于折叠房屋地板横向刚度较大, 需要限制槽钢立柱②的平面外位移。

参数分析基于基础模型展开, 其构件尺寸如表 1 所示, ①、②为槽钢, ⑦、⑧为单杆, ③、④、⑤、⑥为双杆。为便于折叠结构的展开和折叠, 所用杆件的本质均为板件, 只是其长度远大于宽度和厚度 (图 6b)), 以⑧号单杆和⑤号双杆为例, 对杆件长度、宽度和厚度做了详细定义。

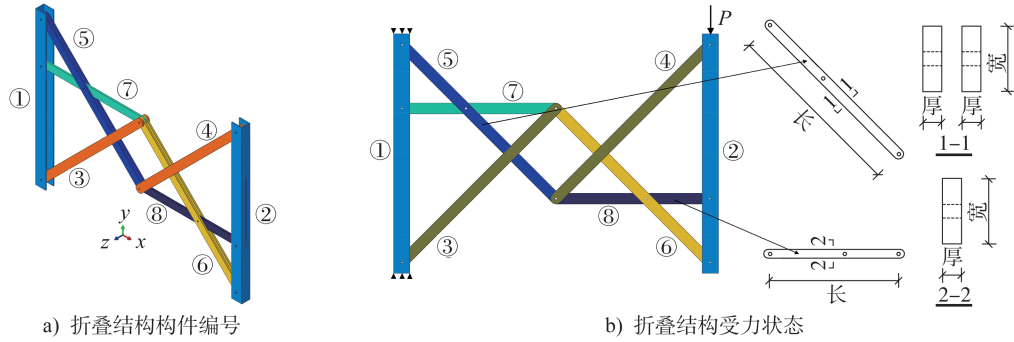


图6 折叠结构构件编号及其受力状态

Fig. 6 Numbering of folding structure components and their stress states

表1 折叠结构基础模型构件尺寸

Table 1 Component dimensions of fundamental model of folding structure

构件编号	单杆/双杆	尺寸/mm	截面尺寸/mm
①、②	—		
③、④	双杆		
⑤、⑥	双杆		
⑦、⑧	单杆		

基础模型所有构件的销轴孔径均为 20 mm, 采用 Q355B 钢材加工制作, 钢材本构取自《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)<sup>[28]</sup>, 采用理想弹塑性模型, 泊松比  $\mu=0.3$ , 弹性模量  $E=210 \text{ GPa}$ , 破坏准则为 Mises 屈服准则。

ABAQUS 有限元软件模拟时遵循以下假定:

(1) 销轴处杆件间垫片的厚度和构件间摩擦力的影响忽略不计;

(2) 铰链销轴不会发生破坏。

模拟时使用静力隐式分析方法, 为避免出现收敛问题, 对模型进行简化处理, 使用 Connector 铰单元模拟铰链销轴, 其余构件采用 C3D8R 实体单元模拟, 划分结构化网格,  $E$ 、 $G$  两点位置处杆件间存在一定间隙, 未设置接触属性。

## 2.2 有限元模型验证

为验证采用 Connector 铰单元模拟铰链销轴以及有限元模型的正确性, 分别基于文献[23]和文献[1]建立相应的有限元模型, 并将模拟结果与文献结果进行对比。

### (1) 有限元模型一

文献[23]推导的由  $n$  个剪支铰单元组成的可展开柱在平面内横向力  $P$  作用下的位移为:

$$U = P \frac{4}{3} a n^3 \sin^2 \gamma \left( \frac{\tan^2 \gamma}{EA} + \frac{a^2}{3EI} \right) \quad (9)$$

式中:  $EA$ 、 $EI$  分别为剪支铰单元杆件平面内的轴向刚度和弯曲刚度; 其余参数含义如图 7 所示。

分别建立  $n=5 \sim 10$  的可展开柱有限元模型, 剪支铰单元  $a=50 \text{ mm}$ , 杆件为矩形截面, 宽度  $b=10 \text{ mm}$ , 厚度  $t=2 \text{ mm}$ , 材料选用 Q355B 钢材。

图7为5剪支铰单元可展开柱,其底端为固定铰支座,顶部剪支铰单元两端点耦合于一点,于该点施加平面内横向力 $P$ ,计算得到水平位移 $U$ 。可展开柱在平面内顶端横向荷载作用下的刚度可表示为:

$$K = P/U \quad (10)$$

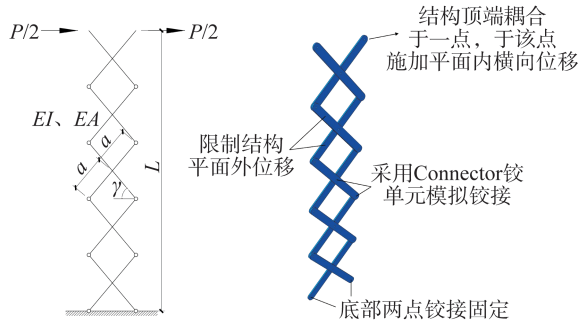


图7 剪支铰单元可展开柱

Fig. 7 Scissor hinge unit deployable column

图8为文献[23]中可展开柱刚度的公式计算值与有限元模拟值的对比。可以看出,有限元模拟值和文献公式计算值具有相同的变化趋势,都是随着剪支铰单元个数的增加,可展开柱横向刚度逐渐降低。但是有限元模拟值略低于文献公式计算值,二者有5%左右的误差,推测可能是因为公式推导采用了极限条件,未考虑平面外效应和铰接点开孔对杆件截面的削弱作用。

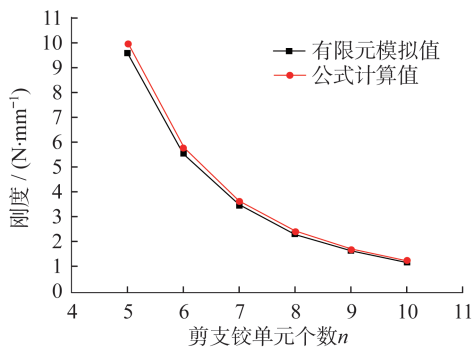


图8 刚度模拟值与计算值

Fig. 8 Stiffness simulation and calculated results

(2) 有限元模型二

文献[1]提出一种3剪支铰单元可展开桥梁,并进行了1:1足尺模型加载试验。基于试验结果,建立如图9所示的有限元模型,由于文献[1]中并未给出铝合金构件的具体截面尺寸,通过试验现场图片可知杆件截面形式为“目”字形,故设计图9(1-1截面)所示杆件截面,计算得截面惯性矩 $I=1147\text{ cm}^4$ ,满足试验杆件截面 $I=1146.3\text{ cm}^4$ 的条件。剪支铰单元材料选用铝合金,弹性模量 $E=62.5\text{ GPa}$ ,屈服强度 $f_y=180.0\text{ MPa}$ ,泊松比 $\mu=0.33$ 。

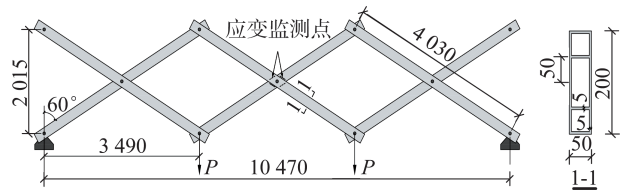
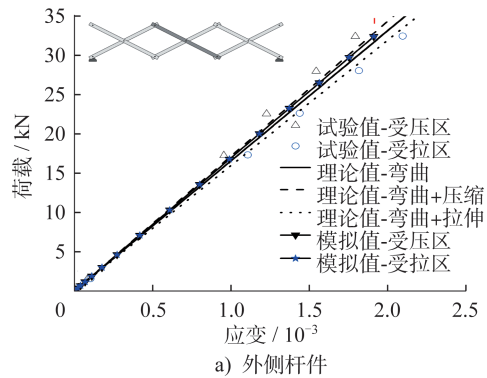


图9 可展开桥梁有限元模型(单位:mm)

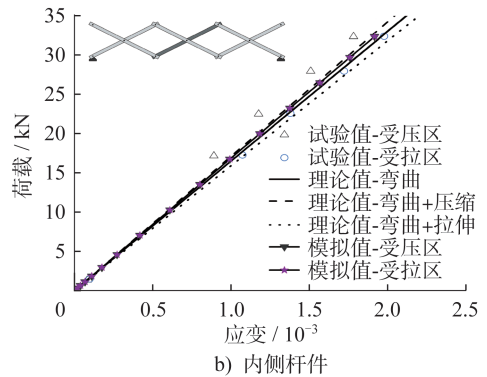
Fig. 9 Finite element model of deployable bridge (unit:mm)

模拟时建立单面3单元剪支铰结构,两端设置固定铰支座,除支座外的所有铰接节点均采用Connector铰单元模拟。约束剪支铰单元所有铰接节点的平面外位移,荷载施加于中间剪支铰单元与两侧剪支铰单元下部连接铰接节点处。试验中通过分配梁总共设置4个加载点,有限元模型中单面剪支铰结构仅有2个加载点,在加荷时每个加载点施加荷载值为试验总堆载的1/4。

图10为应变监测点处微应变模拟值与试验值的对比,可以看出,有限元模拟值与理论计算值更接近;受压区和受拉区的试验值差别较大,有限元模拟值差别不大。这是因为有限元模拟时未定义铰接构件间的摩擦,将荷载直接作用于铰接点轴销处,未考虑加载点与剪支铰单元形心的偏心,故有限元计算值与试验值和理论值之间的误差可以接受。



a) 外侧杆件



b) 内侧杆件

图10 应变监测点微应变的模拟值与试验值对比

Fig. 10 Micro-strain comparison of strain monitoring points between simulation and test results

上述有限元模型的验证结果表明,使用Connector单元模拟折叠结构杆件之间的铰接连接是合理的,同时也验证了本文折叠结构建模方法的可靠性。

### 3 竖向荷载作用下受力性能分析

#### 3.1 基础模型

图11为基础模型在平面内竖向荷载作用下的荷载-位移曲线,Y和S分别表示结构展开后只对I点铰接约束和同时对I、J两点铰接约束。根据荷载-位移曲线,S结构的初始刚度和极限承载力分别比Y结构的相应值高出150.48%和127.48%。

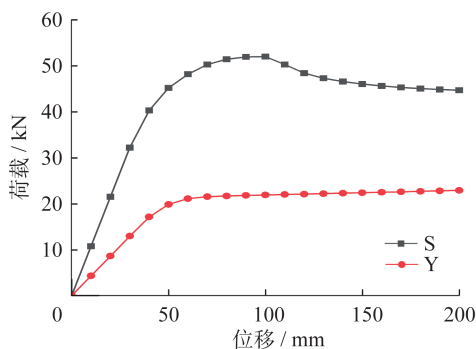


图11 基础模型荷载位移-曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of fundamental model

图12a)、b)分别为Y结构和S结构的失效力云图,Y结构失效时⑤号杆件在M点形成塑性铰;S结构失效时,除⑤号杆件在M点形成塑性铰外,⑧号杆件在N点、②号槽钢立柱在J点也形成了塑性铰。由此表明S结构的力学性能和安全储备均优于Y结构,后续参数分析均在S结构的基础上进行,并集中于结构失效时形成塑性铰的⑤号杆件、⑧号杆件和②号槽钢立柱。

#### 3.2 参数分析

##### (1) 钢材强度等级

图13a)为改变基础模型钢材强度等级时折叠结构的荷载-位移曲线。可以看出结构的初始刚度并不会随着钢材强度的变化而变化,而极限承载力则随着钢材强度的增加而增加,相比于采用Q355钢材,采用Q390、Q420、Q460钢材的折叠结构的极限承载力分别提高了12.06%、20.67%和29.79%,且结构达到极限承载力时的位移相同,约为100 mm。当钢材强度等级提高至Q460时,折叠结构达到极限承载力后,荷载-位移曲线出现一个陡峭的下降段,结构发生整体失稳。由此表明提高钢材强度等级可提高折叠结构的极限承载力,但是钢材强度等级过高时,结构会发生失稳破坏。

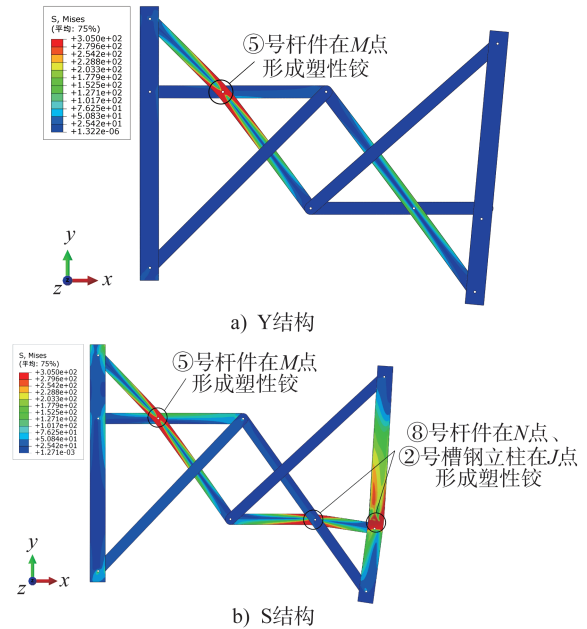


图12 基础模型结构失效力云图(单位:MPa)

Fig. 12 Failure stress contours of fundamental model (unit:MPa)

##### (2) 铰链销轴孔径

图13b)为改变基础模型铰链销轴孔径时折叠结构的荷载-位移曲线。在孔径从15 mm增加至30 mm的过程中,4条荷载-位移曲线在达到最高点之前基本重合,达到最高点之后孔径为30 mm的曲线略低于其他3条曲线,但所有曲线最终重合,说明过大的孔径会加速折叠结构在达到极限承载力之后承载力的下降,但降幅很小。总的来说,销轴孔径对整个结构的影响较小,但考虑到成本、市场上常见销轴直径和结构承载力下降速率,建议采用20 mm左右的销轴孔径。

##### (3) ③、④号杆件宽度

图13c)为减小基础模型③、④号杆件宽度时折叠结构的荷载-位移曲线。在③、④号杆件宽度从100 mm减小至70 mm的过程中,结构的荷载-位移曲线基本重合,同时在图12b)中,结构失效时③、④号杆件始终处于较低的应力水平,表明其在折叠结构中为次要受力构件,不承担主要荷载,同时也证实了在折叠结构设计时,通过减小③、④号杆件宽度来使结构达到更高折叠率的方法是可行的。

##### (4) ⑤号杆件宽度

图13d)为增加基础模型⑤号杆件宽度时折叠结构的荷载-位移曲线,与宽度为100 mm的⑤号杆件相比,当其宽度增加至110 mm、120 mm、130 mm和140 mm时,折叠结构初始刚度分别提高了16.56%、34.59%、53.68%和73.43%,极限承载力分别提高了8.38%、17.52%、27.40%和37.23%。当⑤号杆件宽度增加至140 mm时,

折叠结构达到极限承载力之后,荷载-位移曲线出现一个陡峭的下降段,结构发生整体失稳。由此表明增加⑤号杆件宽度可以提高结构的初始刚度和极限承载力,但是当宽度过大时,结构会发生失稳破坏。

(5) ⑧号杆件宽度

图13e)为增加基础模型⑧号杆件宽度时折叠结构的荷载-位移曲线,⑧号杆件和⑤号杆件类似,作为结构的主要受力构件,增加其宽度可以有效提高结构的初始刚度和极限承载力,只是提高幅度与增加⑤号杆件宽度相比较低。与宽度为100 mm的⑧号杆件相比,当其宽度增加至110 mm、120 mm、130 mm和140 mm时,折叠结构初始刚度分别提高了5.84%、12.09%、18.64%和25.37%,极限承载力分别提高了4.50%、9.39%、14.72%和20.47%。不同的是,当⑧号杆件宽度增加至140 mm时,荷载-位移曲线并没有出现陡峭下降段。由此表明增

加⑧号杆件宽度也可以提高结构的初始刚度和极限承载力,而且不会引起折叠结构的失稳破坏。

(6) ①、②号槽钢立柱壁厚

图13f)为增加基础模型①、②号槽钢立柱壁厚时折叠结构的荷载-位移曲线,可以看出增加立柱槽钢壁厚对结构极限承载力的提高幅度大于对初始刚度的提高幅度。相比于10 mm壁厚,12 mm壁厚时折叠结构的荷载-位移曲线在位移超过100 mm未出现明显的下降段,这是因为增加①、②号槽钢立柱壁厚之后,结构失效时②号槽钢立柱在J点形成塑性铰,翼缘局部失稳现象得到缓解。当①、②号槽钢立柱壁厚增大至14 mm和16 mm时,荷载-位移曲线出现陡峭下降段,结构发生整体失稳。由此表明增加①、②号槽钢立柱壁厚可提高结构的初始刚度和极限承载力,但是当壁厚过大时,折叠结构会发生失稳破坏,且壁厚越厚,失稳时位移越小,失稳后承载力越低。

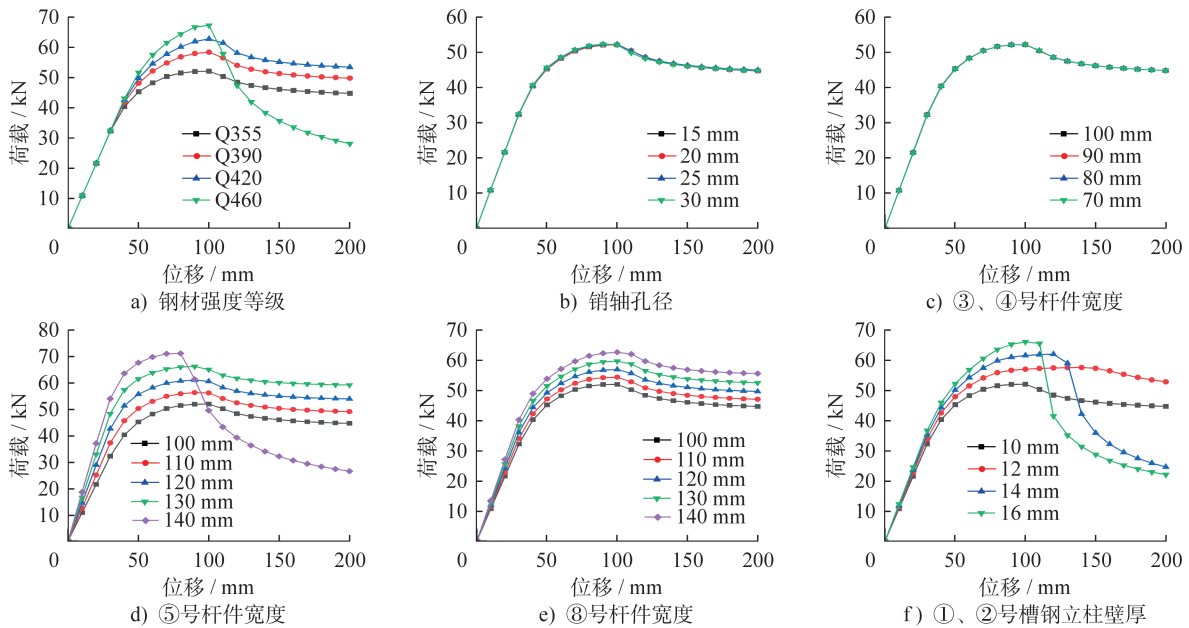


图13 参数分析荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of parametric analysis

3.3 结构稳定性分析

经上述研究,折叠结构在平面内竖向荷载作用下的理想失效模式如图12b)所示,⑤号杆件在M点、⑧号杆件在N点、②号槽钢立柱在J点形成塑性铰。但是随着钢材强度等级的提高、⑤号杆件宽度的增加以及①、②号槽钢立柱壁厚的增加,可能会导致结构发生整体失稳,这种情况需要在设计时予以避免。

图14为以上3种情况下结构失稳前和失稳后的应力云图。可以看出结构失稳时,②号槽钢立柱在J点未形成塑性铰,⑧号杆件变形受到限制,这是导致结构失稳的直接原因。结构失稳后,F点产生平面外位移,与之相关

的④、⑤、⑧号杆件变形如图14b)所示。由于④号杆件为次要受力构件,设计时宽度被减小,且计算长度较长,对结构影响较小,故未作考虑。

为避免结构失稳,可考虑从以下两个方面出发:一是促进②号槽钢立柱于J点位置塑性铰的形成;二是增大⑤、⑧号杆件的平面外惯性矩,以提高对F点的平面外约束。

(1) 促进②号槽钢立柱于J点位置塑性铰的形成

促进②号槽钢立柱于J点形成塑性铰的方法除前文已研究的限制槽钢立柱壁厚外,还可通过限制钢材强度等级来实现,即限制槽钢立柱的钢材强度等级而增大其

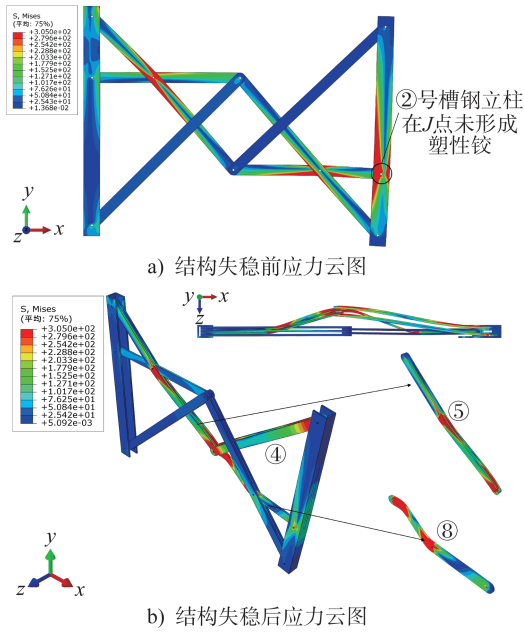


图 14 结构失稳前后应力云图(单位:MPa)

Fig. 14 Stress contours before and after structural instability (unit: MPa)

他构件的钢材强度等级。图 15a)中“Q460-Q390C”曲线为限制槽钢立柱材料强度等级为 Q390,其他构件材料强度等级为 Q460 的折叠结构荷载-位移曲线。在位移达到 70 mm 之前,“Q460-Q390C”与“Q460”两条曲线重合,说明加载前期降低槽钢立柱钢材强度等级对结构初始刚度几乎没有影响,但是前者的极限承载力低于后者,说明降低槽钢立柱钢材强度等级会影响折叠结构的极限承载力,降低幅度约为 3.61%。观察“Q460-Q390C”、“Q420”和“Q390”3 条曲线,发现其具有相同的发展趋势,前者分

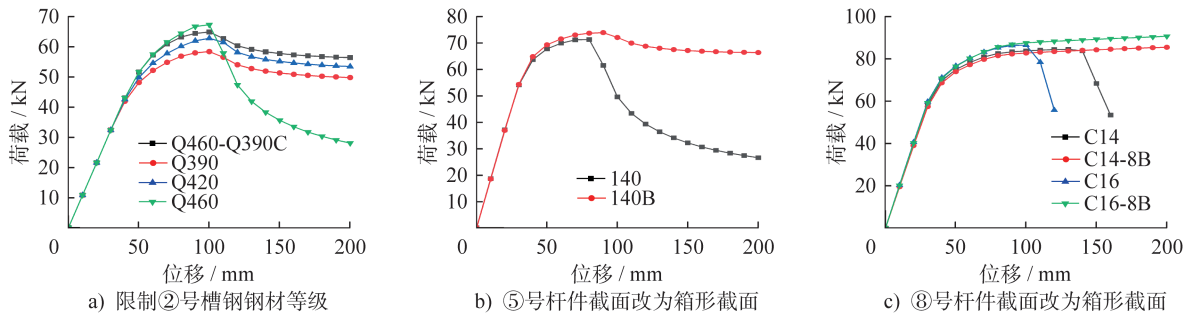


图 15 失稳分析荷载-位移曲线

Fig. 15 Load-displacement curves of instability analysis

#### 4 结论

(1) 当  $l_{AK}=H$ 、完全展开高宽比为  $1/\sqrt{2}$  时,新型折叠结构的折叠率最大,而不满足折叠条件将导致结构无法完全折叠,此时可通过适当减小杆件  $AK,FC$  的宽度来解决。

别比后二者的极限承载力高 3.29% 和 11.13%;三者从达到极限承载力至承载力下降趋于平稳的过程中,承载力下降幅度分别为 13.10%、14.90% 和 14.74%,相差不大。虽然降低槽钢立柱强度会降低结构极限承载力,但是降低幅度不大,且结构初始刚度和失效模式不受影响,有效避免了结构的失稳,因此降低槽钢立柱强度所导致的结构极限承载力降低是可以接受的。

#### (2) ⑤号杆件截面

图 15b)中“140”曲线为参数分析部分⑤号杆件宽度为 140 mm 的折叠结构荷载-位移曲线,“140B”曲线为保持⑤号杆件截面平面内惯性矩不变的情况下,将截面改为箱形截面的折叠结构荷载-位移曲线。可以看出当⑤号杆件截面改为箱型截面后,结构失稳得以避免,且极限承载力略有提升。这可能是由于箱形截面杆件厚度增加,同时两侧槽钢立柱腹板高度也略有增加,相当于加强了两侧立柱。

#### (3) ⑧号杆件截面

图 15c)中“C14”曲线为在图 15b)“140B”的基础上将槽钢立柱壁厚由 10 mm 增大至 14 mm 的折叠结构荷载-位移曲线,“C14-8B”曲线为将⑧号杆件也改为箱形截面的折叠结构荷载-位移曲线,“C16”与“C16-8B”曲线同理。可以看出即使将⑤号杆件截面改为箱形截面,当槽钢立柱壁厚过大时,仍会导致结构失稳,而在将⑧号杆件截面也改为箱形截面后,失稳情况得以避免。此原理和将⑤号杆件截面改为箱形截面的原理相同,增大对 F 点的平面外约束,同时⑧号杆件截面改为箱形后增大了其厚度,⑤号杆件两个单杆间距增大,格构式截面的惯性矩随之增大。

(2) 新型折叠结构在折叠或展开过程中机构自由度为 1,当结构完全展开且对 I、J 两点施加铰接约束时,结构自由度为负值,可用于承受荷载。

(3) 平面内竖向荷载作用下,销轴孔径及③、④号杆件宽度变化对新型折叠结构初始刚度和极限承载力的影

响较小,设计时可根据具体使用和构造需求适当改变。结构铰接约束次数、钢材强度等级、⑤号杆件宽度、⑧号杆件宽度以及①、②号槽钢立柱壁厚对结构始刚度和极限承载力的影响较大。其中钢材强度等级、⑤号杆件宽度以及①、②号槽钢立柱壁厚过大会导致结构发生失稳破坏。

(4) 为避免新型折叠结构发生失稳破坏,可从两个方面出发:一是促进塑性铰形成,包括限制槽钢立柱钢材强度等级、限制槽钢立柱壁厚;二是加强对F点的平面外约束,包括⑤、⑧号杆件采用箱形截面,增加其平面外惯性矩。

### 参考文献:

- [ 1 ] YAN C H, AIK T A. Design and analysis of emergency deployable bridge [J]. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2020: 1393-1399. DOI: 10.18178/ijmerr.9.10.1393-1399.
- [ 2 ] RAJASHEKHAR V S, THIRUPATHI K, SENTHIL R. Modelling, simulation and control of a foldable stair mechanism with a linear actuation technique [J]. Procedia Engineering, 2014, 97: 1312-1321. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.411.
- [ 3 ] ESCRIG F, VALCARCEL J P, SANCHEZ J. Deployable cover on a swimming pool in Seville [J]. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 1996, 37(120): 39-70.
- [ 4 ] 王海. 新型折叠式宿营房[J]. 石油工程建设, 1995, 21(5): 57-58. WANG Hai. New folding camping house [J]. Petroleum Engineering Construction, 1995, 21(5): 57-58. (in Chinese)
- [ 5 ] 张东彬, 潘鹏, 李安平. 新型折叠式活动房开发及其力学性能研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(10): 101-106. DOI: 10.19701/j.jzjg.2016.10.018. ZHANG Dongbin, PAN Peng, LI Anping. Development and mechanical property study of a new type folding movable rooms [J]. Building Structure, 2016, 46(10): 101-106. DOI: 10.19701/j.jzjg.2016.10.018. (in Chinese)
- [ 6 ] 徐毅君, 余佳亮, 王震, 等. 模块化轻钢折叠救灾板房力学性能分析[J]. 建筑技术, 2020, 51(1): 89-92. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4726.2020.01.023. XU Yijun, YU Jialiang, WANG Zhen, et al. Analysis of mechanical property of modular light steel folded disaster relief board room [J]. Architecture Technology, 2020, 51(1): 89-92. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4726.2020.01.023. (in Chinese)
- [ 7 ] 李源, 孙艳军, 喻磊. 新型整体折叠框架式帐篷结构足尺试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2011, 13(2): 51-56. LI Yuan, SUN Yanjun, YU Lei. Full-scale experimental study on the whole folding frame tent structure [J]. Progress in Steel Building Structures, 2011, 13(2): 51-56. (in Chinese)
- [ 8 ] ŠLJIVIĆ A, MILJANOVIĆ S, ZLATAR M. A new classification of deployable structures [J]. E3S Web of Conferences, 2021, 244: 05016. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405016.
- [ 9 ] HOBERMAN C. Expanding Sphere 1988-92 and Iris Demo 1990-94 [M]. Archaeology of the Digital. Montreal: Canadian Center for Architecture and Sternberg Press, 2013.
- [ 10 ] Anon. Rolling bridge [J]. New Steel Construction, 2005, 13(7): 23.
- [ 11 ] 吴程辉, 朱竞翔. 折叠结构——肯尼亚 MCEDO 学校的结构设计 with 建造 [J]. 时代建筑, 2015(2): 48-53. DOI: 10.13717/j.cnki.ta.2015.02.010. WU Chenghui, ZHU Jingxiang. Folding structure: the structure design and construction of MCEDO school project in Kenya [J]. Time+Architecture, 2015(2): 48-53. DOI: 10.13717/j.cnki.ta.2015.02.010. (in Chinese)
- [ 12 ] ESCRIG F. Expandable space structures [J]. International Journal of Space Structures, 1985, 1(2): 79-91. DOI: 10.1177/026635118500100203.
- [ 13 ] LANGBECKER T. Kinematic analysis of deployable scissor structures [J]. International Journal of Space Structures, 1999, 14(1): 1-15. DOI: 10.1260/0266351991494650.
- [ 14 ] ZHAO P Y, LIU J G, WU C C, et al. Novel surface design of deployable reflector antenna based on polar scissor structures [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(1): 68. DOI: 10.1186/s10033-020-00488-6.
- [ 15 ] GARCÍA-MORA C J, SÁNCHEZ-SÁNCHEZ J. The convergence surface method for the design of deployable scissor structures [J]. Automation in Construction, 2021, 122: 103488. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103488.
- [ 16 ] RASKIN I, ROORDA J. Buckling force for deployable pantographic columns [J]. WIT Transactions on the Built Environment, 1996, 21: 305-314. DOI: 10.2495/MRS960301.
- [ 17 ] RASKIN I, ROORDA J. Linear behaviour of a uniform pantographic column in bending and compression [J]. International Journal of Space Structures, 1998, 13(4): 187-195. DOI: 10.1177/026635119801300402.
- [ 18 ] RASKIN I, ROORDA J. Nonlinear analysis of uniform pantographic columns in compression [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(12): 1344-1348. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1999)125:12(1344).
- [ 19 ] CHIKAHIRO Y, ARIO I, NAKAZAWA M. Theory and design study of a full-scale scissors-type bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(9): 04016051. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000913.
- [ 20 ] ARIO I, NAKAZAWA M, TANAKA Y, et al. Development of a prototype deployable bridge based on origami skill [J]. Automation in Construction, 2013, 32: 104-111. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.01.012.
- [ 21 ] ARIO I, YAMASHITA T, CHIKAHIRO Y, et al. Structural analysis of a scissor structure [J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 2020, 68(6): 1319-1332. DOI: 10.24425/bpasts.2020.134623.