

# 可展开折叠式空间结构 的研究现状与展望

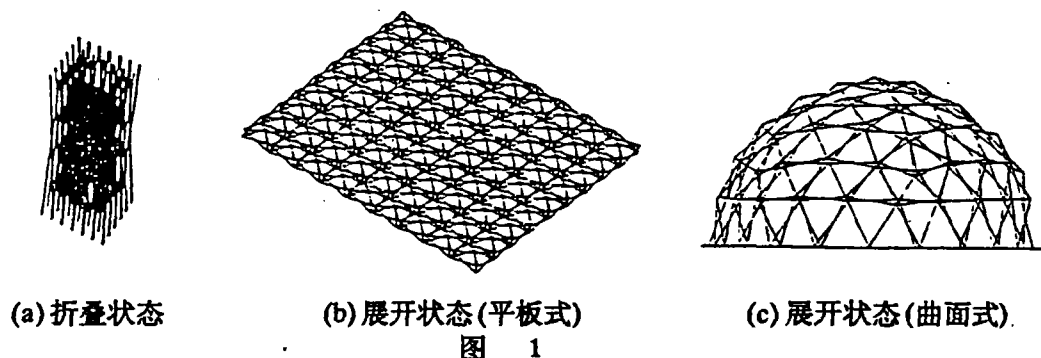
薛素铎 刘景园  
(北京工业大学土木系)

**提要** 本文在大量收集国内外文献资料的基础上, 对可展开折叠式空间结构的研究成果给予总结, 分别从结构组成、构型设计、节点构造、墨面作法及理论分析方法等方面阐述了这类结构的研究现状, 并对今后研究提出展望。

**关键词:** 展开; 折叠; 空间结构

## 一、引言

可展开折叠式空间结构是近些年发展起来的一种新型空间结构体系, 其研究在国际上刚开始起步, 处于小规模探索阶段。该体系的基本特点可概述为: 结构在未使用时可收缩折叠成捆状或其它形状储存或运输, 使用时可方便地在现场展开成型, 迅速构成整体结构 (如图 1 所示)。通常, 结构的整体或部分可在工厂预先装配完成, 然后折叠储存, 备以后展开使用。该体系一般多用于临时性或半永久性结构, 安装、拆除方便迅速, 可重复使用。



可展开折叠结构的基本概念可用图 2 的简例说明。图 2 (a) 由交叉杆系构成, 各杆两端铰接, 中间枢轴连接, 通过改变长度  $L$  或高度  $H$ , 可实现相应的折叠—展开过程。图 2 (a) 为机构体, 不能承受荷载, 为使其具有承载能力, 需附加约束, 如图 2 (b) (c) 所示。

• 国家自然科学基金资助项目

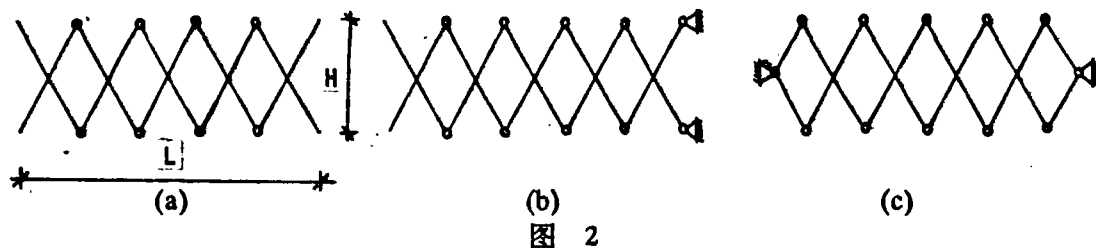


图 2

在日常生活及航空航天工业常可遇到可展开折叠的简单结构, 如雨伞、折叠三角架、折叠式天线、雷达接收器等。最早在建筑上成功地应用可展开折叠概念的是西班牙建筑师 E. P. Pinero, 他曾将可展开折叠的概念应用于“可移动剧院”的设计<sup>[1]</sup>。E. P. Pinero 提出的三维网格可展开折叠结构体系 1965 年获得美国专利<sup>[2]</sup>。之后, T. R. Zeigler 提出了一种自锁式的可展开折叠结构体系并获得美国专利<sup>[3,4]</sup>。近年来, 国际上对可展开折叠结构的研究逐渐增多, 表明国际上已开始注意到这类结构的应用前景。

## 二、研究概况

可展开折叠结构可分为多种结构形式。从目前国际上研究状况看, 研究焦点主要基于由杆系构成的空间网格型结构。因此, 本文首先对由杆系构成的可展开折叠结构的研究成果给予总结, 最后简要介绍其它结构形式。

### 1. 结构组成及构型设计

由图 2 所示的简单结构可以看出, 由杆系构成的可展开折叠结构的基本组成为剪式单元 (scissor-like element), 见图 3。该剪式单元由交叉杆组成, 每个杆有三个节点, 两个端节点与相邻单元铰接, 中部节点采用枢轴连接, 可自由转动。通过对基本剪式单元的不同组合, 可形成各种基本结构, 进而构成整体结构。

整体结构的形状完全由剪式单元的几何参数决定, 即: 1. 杆件长度, 2. 枢轴连接点位置。F. Escrig<sup>[5]</sup>综合研究了剪式单元的各种组合, 将其归纳为下列四种情况:

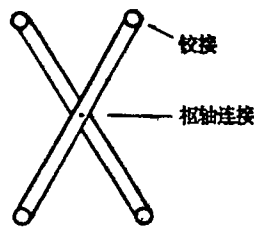


图 3 剪式单元

(1) 各杆长度相同, 枢轴连接点位置在各杆中心点, 展开后形状如图 4(a) 所示。

(2) 各杆长度相同, 但枢轴连接点位置不在杆件中心, 展开后有曲率存在, 如图 4(b)。

(3) 各杆长度不同, 但枢轴连接点位置位于杆件中点, 有两种可能情况: 图 4(c) 一只有两种杆长, 图 4(d) 一各杆件长度不一致。

(4) 各杆长度、枢轴连接点位置均不相同, 展开后形状有多种可能情况, 如图 4(e)、(f)。

对上述各种情况, 可通过正交、斜交等多种连接方式构成二维或三维等多种可展开折叠构体系, 展开后结构形状可为平面或曲面等形式 (见图 1)。

在剪式单元的连接组合中, 必须保证结构的可展开折叠性能。对任一彼此相连的剪式单元, 应满足如下条件: 两个单元由枢轴连接点至各自端部铰接点的长度之和必须相等, 即应满足 (见图 4(f)):

$$\overline{AB} + \overline{BC} = \overline{AD} + \overline{DC}$$

上述条件并不是可展开折叠的充分条件, 在某些情况下, 还需根据结构形式附加其它一些几何限制条件<sup>[6-7]</sup>。

根据结构的构成方法, 可展开折叠结构可分为自锁式 (self-locking) 及外加锁式

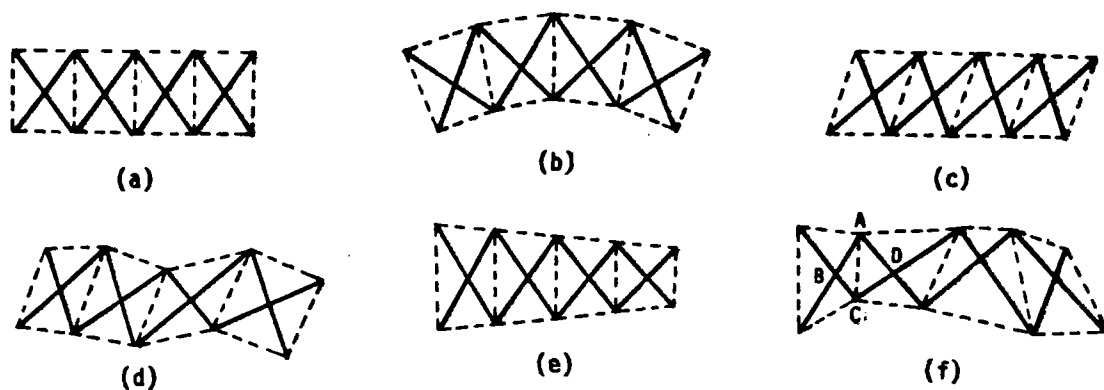


图 4

(manual-locking) 两种类型<sup>[13]</sup>。外加锁式结构在折叠展开过程中, 杆件中不产生应力, 展开后为一机构, 因此需外加锁装置使其成为结构, 才具有承载能力<sup>[9-11]</sup>, 最早由 E. P. Pinero 建立的可展开折叠结构体系即属于外加锁式结构<sup>[12]</sup>。自锁式结构只有在完全折叠及完全展开状态, 杆件才处于零应力状态, 在折叠展开过程中, 杆件会产生不同程度的弯曲, 完全展开后恢复到直杆状态, 这类结构展开后不需外加约束, 本身具有承载能力。自锁式折叠结构的概念是 T. R. Zeigler 首先提出的<sup>[13, 14]</sup>。R. C. Clarke<sup>[15]</sup>充分研究了自锁式结构的展开机理, 将结构的基本组成归并为三个以一定方式相连的剪式单元 "Trissor", 并指出形成自锁的原因主要由结构的几何条件决定。结构只有在完全展开及折叠状态才与结构的几何状态相适应, 杆件应力为零。在折叠展开过程中, 杆件弯曲产生弯曲应力。结构设计中应控制杆件的弯曲程度, 使其不能过大也不能太小。过大则难于使结构展开, 同时杆件弯曲应力可能超过设计强度或进入塑性区; 弯曲太小则结构自锁性不好, 受荷范围小。由此可见, 结构的自锁性不仅与几何条件有关, 还与杆件材料有关。要寻求理想的自锁条件并非易事, 需要反复试算, 制图, 或进行模型试验等, 才能找到与结构相适应的几何限制条件。文献 [6~8, 12~13] 分别对自锁式折叠结构的性能及几何条件等进行了探讨。

自锁式结构及外加锁式结构在实际应用中还存在许多问题。自锁式结构展开方便, 不需人为加锁, 施工速度快, 但对结构的几何构型要求高, 对几何条件限制较严, 且承受荷载能力差, 因此不宜在大跨度结构中实现, 适用于较小结构, 如航空航天工业中的空间工作站、折叠式天线、雷达接收器等。外加锁式结构可用于较大跨度结构, 但展开后需外加锁装置, 架设临时支承, 对施工有一定要求, 且外加锁装置可能影响结构的刚度及稳定性。自锁式及外加锁式结构均有待于进一步研究发展, 同时应寻求其它便于应用的更好的结构形式。

## 2. 理论分析方法

可展开折叠结构的分析主要分为两个方面: 第一, 展开过程中的形态分析; 第二, 展开完成后杆件的内力分析。K. Kawaguchi 等人<sup>[14, 15]</sup>利用广义逆矩阵理论及广义增量法等数学方法描述结构从折叠状态到展开状态的最优移行过程, 给出了展开过程的形态分析方法。W. Shan<sup>[16]</sup>利用 Formex 代数分别对自锁式及外加锁式结构的几何构型进行了研究, 给出了相应的 Formex 代数表达式, 从而为利用计算机分析创造了条件。对杆件的内力分析可采用有限元分析方法, 但应注意可展开折叠结构中的杆件不同于一般杆系结构, 每杆有三个节点, 可看作是一个三节点梁式杆单元, 文献 [17~19] 推导出了三节点杆的单元刚度矩阵, 对结构进行了相应的计算机分析。此外, 对杆件的内力分析也可采用实用的近似分析方法<sup>[9]</sup>。

### 3. 节点构造及屋面作法等

节点是可展开折叠结构的重要组成部分,它直接决定结构的展开折叠能力。在结构设计中,应保证节点具有良好的转动能力及承载能力。文献[5]给出了一些节点连接构造情况。

可展开折叠结构的屋面作法与常规结构有很大不同,为保持结构安装、拆除方便迅速的优点,应使屋面与结构一起具有可展开折叠能力,并与结构形成整体,同时安装储存。屋面作法可采用由纺织纤维构成的柔性屋面,也可采用折叠板等特殊作法构成刚性屋面。文献[5, 20, 21]分别对柔性屋面及刚性屋面作法进行了探讨,并研究了其对结构性能的影响。

要充分了解可展开折叠结构的工作性能,还应对结构进行试验研究,包括折叠展开性能、结构刚度、杆件受力、节点构造、屋面构造等。文献[10, 13]通过模型试验对结构的工作性能进行了初步探讨。

### 4. 非杆系可展开折叠结构

除由剪式单元构成的空间杆系结构外,可展开折叠结构还有许多其它形式。例如,文献[22]采用三角板式单元作为结构的基本组成构件,对其构成的可展开折叠体系进行了研究探讨。文献[23]介绍了一种可展开折叠的特殊结构构件,它由特殊材料制成,利用温度效应实现结构的折叠展开过程。这些非杆系折叠结构有待于进一步探讨发展。

## 三、结 语

本文对可展开折叠式空间结构的研究现状进行了总结。与常规的空间结构体系相比,该体系具有造型新颖,易于工厂化生产,折叠后体积小,便于运输和储存,现场展开、安装和拆除速度快,并可重复使用等优点。该类结构特别适用于中小跨度的紧急措施和临时性建筑,如抗震救灾紧急需要的现场指挥部及生活用房,航天空间站,大型比赛集会或旅游区临时工作室,流动展览所,农村暖棚等,具有很好的应用前景。开展对此类结构的研究对我国的经济建设及建筑业的发展具有实际意义。

可展开折叠式空间结构的研究在国际上刚开始起步,各种分析设计理论很不成熟。目前的研究只局限于小型单元,要使其得到实际应用,可在下列方面进行具体研究:

1. 标准单元的组成及设计,应达到标准化、定型化。
2. 节点的连接构造及对结构性能影响。
3. 结构的几何构型研究,可展开折叠所需满足的几何条件等。
4. 结构从折叠到展开状态的分析控制方法。
5. 结构的内力及位移分析,包括展开过程中杆件弯曲、无应力状态、受荷性能等。
6. 运动机理的计算机绘图描述,计算机辅助设计方法。
7. 屋面构造、作法及对结构刚度、折叠能力影响。
8. 结构的动力性能。
9. 结构的可展开折叠能力及重复使用措施。
10. 对构件、节点、标准单元性能的试验研究。
11. 结构的设计、施工方法。
12. 发展其它可展开折叠结构形式。

要使可展开折叠结构得到普遍应用,应保证结构满足如下两点基本要求: 1. 结构是安全可靠的,展开后应具有足够的稳定性和承载能力; 2. 便于实际应用,包括设计、施工方面等。相信经过不断研究及实践,可展开折叠结构定会发展成为一种较为成熟的结构体系。

## 参考文献

- [1] E. P. Pinero, Expandable Space Framing, *Progressive Architecture*, Vol. 43, No. 6, June 1962.
- [2] E. P. Pinero, Three Dimensional Reticular Structure, U. S. Patent No. 3. 185. 164, 1965.
- [3] T. R. Zeigler, Collapsible Self - Supporting Structures, U. S. Patent No. 3. 968. 808, 1976.
- [4] T. R. Zeigler, Collapsible Self - Supporting Structures, U. S. Patent No. 4. 437. 275, 1984.
- [5] F. Escrig, Expandable Space Structures, *Int. J. of Space Structures*, Vol. 1, No. 2, 1985.
- [6] Y. Rosenfeld et al, New Concepts for Deployable - Collapsible Structures, *Int. J. of Space Structures*, Vol. 3, No. 1, 1988.
- [7] C. Gantes, Geometric Constraints in Assembling Polygonal Deployable Units to Form Multi - Unit Structural Systems, 4th Int. Conf. on Space Structures, Guildford, Sept. 1993.
- [8] C. Gantes et al, Geometric and Structural Design Considerations for Deployable Space Frames, *Int. Conf. on Mobile and Rapidly Assembled Structures*, Southampton, April 1991.
- [9] S. Pellegrino et al, Foldable Ring Structures, 4th Int. Conf. on Space Structures, Guildford, Sept. 1993.
- [10] A. S. K. Kwan et al, Design and Performance of the Octahedral Deployable Mast, 4th Int. Conf. on Space Structures, Guildford, Sept. 1993.
- [11] P. Nodskov et al, Collapsible Exhibit Panel, U. S. Patent No. 4. 580. 375, 1986.
- [12] R. C. Clarke, The Kinematics of a Novel Deployable Space Structure System, 3rd Int. Conf. on Space Structures, Guildford, 1984.
- [13] O. McNulty, Foldable Space Structures, *Proc. IASS Symposium*, Vol. 3, Osaka, 1986.
- [14] K. Kawaguchi et al, Numerical Analysis For folding of Space Structures, 4th Int. Conf. on Space Structures, Guildford, Sept. 1993.
- [15] Y. Hangai et al, Analysis for Shape - Finding Process of Unstable Link Structures, *Bulletin of IASS*, Vol. 30, 1990.
- [16] W. Shan, Configuration Studies of Foldable Structures, 4th Int. Conf. on Space Structures, Guildford, Sept. 1993.
- [17] W. Shan, Computer Analysis of Foldable Structures, *Computer and Structures*, Vol. 42, No. 6, 1992.
- [18] F. Escrig et al, Analysis of Expandable Space Bar Structures, *Proc. IASS Symposium*, Vol. 3, Osaka, 1986.
- [19] J. B. Valcarcel et al, Analysis of Curved Expandable Space Bar Structures, *Int. Symp. on 10 Years of Progress in Shell and Spatial Structures*, IASS, Madrid, 1989.
- [20] J. B. Valcarcel et al, Expandable Structures with Self - Folding Textile Cover, *Int. Conf. on Mobile and Rapidly Assembled Structures*, Southampton, 1991.
- [21] J. B. Valcarcel et al, Expandable Domes with Incorporated Roofing Elements, 4th Int. Conf. on Space Structures, Guildford, Sept. 1993.
- [22] C. G. Foster et al, A Class of Transportable Demountable Structures, *Int. J. of Space Structures*, 1986.
- [23] D. Neogi et al, Development of a Self - Deployable Structural Element for Space Truss Applications, 4th Int. Conf. on Space Structures, Guildford, Sept. 1993.