

文章编号:1673-2049(2006)04-0070-04

折叠结构体系及类型

颜卫亨¹, 计飞翔¹, 张茂功²

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 中国人民解放军总后勤部
建筑工程研究所, 陕西 西安 710033)

摘要:基于广义分类学理论,对折叠结构体系进行了分类研究,建立了一套适合于折叠结构特点的分类体系,并分别对折叠结构体系中的杆系折叠结构、索杆系折叠结构和板式折叠结构的构成进行了分析。在此基础上,运用结构拓扑学原理对折叠结构体系进行了结构拓扑分析,建立了杆系折叠结构、索杆系折叠结构和板式折叠结构 3 种不同类型的结构几何稳定性的判别标准。结果表明,按照所提出的方法,解决了在进行折叠结构设计时靠经验来判别其几何稳定性的局限性,保证了折叠结构设计的安全性和合理性。

关键词:折叠结构;结构体系;结构分类;结构拓扑

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Folding Structure System and Type

YAN Wei-heng¹, JI Fei-xiang¹, ZHANG Mao-gong²

(1. School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. Institute of Building Construction, General Rear Service Department of PLA, Xi'an 710033, Shaanxi, China)

Abstract: Based on generalized taxonomy theory and aimed at folding structure system, authors proposed a theory about classification system that could be fit for the characteristic of the folding structure system. At the same time, the constitutions of bar folding structure, bar-cable folding structure and flat folding structure were analyzed. On the basis of the constitution and structural topology analysis of the folding structure system, authors put forward a theory about the geometric stability criterions of the bar folding structure, bar-cable folding structure and flat folding structure. The results show that the geometric stability criterions can resolve the limitation of experience design and ensure safety and rationality of folding structure design.

Key words: folding structure; structure system; structure classification; structure topology

0 引言

折叠结构(Folding Structure)具有两种稳定状态:完全折叠状态和完全展开状态。折叠时,折叠结构一般呈捆状,体积较小,便于储存和运输;需要时,折叠结构可以展开到工作状态。在展开(折叠)过程中,折叠结构为可变体系,是机构;在完全展开状态,

折叠结构是几何不变体系,可以承受荷载。折叠结构在航天领域也被称为可展结构(Deployable Structure),其主要是利用结构的可展开特性,制成在微重力或失重状态下使用的航天器,如可展天空天线、太空电池板、空间伸展臂等^[1-2]。

人类运用折叠的工作机理已有悠久的历史,早在春秋时期,中国就已发明了雨伞。文艺复兴时期

收稿日期:2004-12-27

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2004E204)

作者简介:颜卫亨(1958-),男,贵州毕节人,教授,E-mail:yanwh@chd.edu.cn。

意大利的达芬奇曾对折叠结构做过研究,并在他的《马德里纪事》(Codex Madrid)一书中概略地阐述了平面可展开、折叠结构的工作机理^[3]。其实日常生活中也都有极普通的可折叠、展开的结构物,如折叠式升降梯等。

随着折叠结构体系的推广使用和应用范围的不断扩大,在结构形式和几何构造等方面涌现出了很多形式多样、有别于以往结构形式的新型折叠结构,用经验来对不同折叠结构形式进行区分和判别其几何稳定性就显得不合时宜。为了保证折叠结构设计的合理性和使用的安全性,笔者基于广义结构分类学理论,运用结构拓扑学的基本原理对折叠结构进行了结构体系分类及其拓扑研究,针对整个折叠结构体系提出了一套判别方法。

1 折叠结构体系及结构拓扑分析

分类的目的在于区分,其主要意义在于利用折叠结构区别于其他结构的本质,提出新的原理、理论和公式,使人们对折叠结构的认识不断深入。根据广义分类学原则——认识、反映事物的本质和内在联系,并结合其特点(普遍性、实践性、重复性、主从性),根据结构拓扑关系的不同可把折叠结构分为杆系折叠结构、索杆系折叠结构和板式折叠结构。

1.1 杆系折叠结构

杆系折叠结构是由刚性杆按照一定的构成原理组合而成的折叠结构,荷载作用在节点上,节点既可以是铰接节点,也可以是刚接节点。

对于杆系折叠结构的拓扑分析,可以基于 Maxwell 准则^[4-5]

$$b = 3j - k \quad (1)$$

式中: b 为结构杆单元的总数; j 为结构的节点总数; k 为结构的约束总数。

根据 Maxwell 准则,可以推导出 3 种结构几何稳定性的算法。

1.1.1 整体法

整体法是把杆系折叠结构体系看作许多杆件(刚片)由铰接、刚接和链杆的约束而组成的,则

$$T_1 = 3b - (3k_1 + 2k_2 + k_3) \quad (2)$$

$$T_2 = m + k' \quad (3)$$

式中: T_1 为杆系折叠结构体系的计算自由度; T_2 为杆系折叠结构体系的自由度; k_1 、 k_2 、 k_3 分别为结构的铰接点、刚接点和链杆总数; m 为折叠结构体系的机构模态数; k' 为结构多余约束数。

1.1.2 简化法

简化法是把结构体系看作由许多受链杆约束的节点组成的,复链杆先折合成单链杆,则

$$T_1 = 2j - k_3 \quad (4)$$

1.1.3 混合法

混合法是采用杆件和节点作为计算单元,改变了整体法只能选取杆件或刚片和简化法只能选取节点作为计算单元的缺陷,使得结构的拓扑分析得到简化

$$T_1 = 3b + 2j - (3k_1 + 2k_2 + k_3) \quad (5)$$

T_1 、 T_2 分别为节点数、杆件数、杆件拓扑关系的函数,反映结构行为特性。由此,可根据 T_1 、 T_2 对结构进行体系分类和深入研究。

当 $T_1 > 0$ 时,则 $T_2 > 0$,杆系折叠结构体系是几何不变体, $k' = 0$ 时为静定结构体系, $k' > 0$ 时为超静定结构体系。

当 $T_1 = 0$ 时,则 $T_2 = k'$,杆系折叠结构体系在 $k' = 0$ 时为静定结构体系, $k' > 0$ 时为静不定结构体系。

当 $T_1 < 0$ 时,则 $k' > 0$,体系有多余约束。

Maxwell 准则是折叠结构几何稳定性的必要条件,但对于折叠结构的几何稳定性的充分条件却无法数定分析,这给折叠结构的几何稳定性分析带来了相当大的困难,尤其是对于复杂的杆系折叠结构,其几何稳定的充分条件几乎是无法估计的,因此,基于有限元法理论及对折叠结构的研究,对于结构的拓扑分析可以根据结构的刚度矩阵来判断。

对于不稳定的杆系折叠结构,其几何失稳属于“奇异”性问题^[6],因此,在结构失稳的临界状态下,其刚度矩阵的行列式必为 0,即

$$\det \mathbf{K} = 0 \quad (6)$$

若 $\det \mathbf{K} > 0$,则杆系折叠结构为几何稳定体系;若 $\det \mathbf{K} < 0$,则杆系折叠结构为几何不稳定体系;若 $\det \mathbf{K} = 0$,则杆系折叠结构为结构失稳的临界状态。

式(6)即为折叠结构几何稳定问题的统一判断依据,是结构稳定性的充分必要条件。

1.2 索杆系折叠结构

结构由刚性杆和柔性索组成,分析索杆系折叠结构的关键是处理其中的拉索。由于拉索的存在,使得必须考虑结构体系的布置、几何外形、预应力过程、自平衡体系、稳定系统、结构的刚度、索的自重等一系列问题。这些问题是现实存在的,如果忽略其中某些因素,那必将导致结构分析的错误,或者使设

计显得极不合理。

索杆系折叠结构体系内由于有柔性索的存在,因而多为变拓扑结构,在展开过程中为机构,展开完成尚无预应力时,为静定机构或低阶无穷小机构,在一定的预应力作用下,变为超静定机构。体系分析与构成展开单元、形态解析、展开运动规律、展开終了状态的受力分析紧密相连,因此可采用矩阵分析法对结构进行几何稳定性分析。

借助于矩阵理论,对索杆系折叠结构建立力法平衡方程^[7]

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\sigma}=\mathbf{p} \quad (7)$$

式中: \mathbf{A} 为平衡方程的系数矩阵,又称为平衡矩阵,是 $n_1 \times n_2$ 维长方阵; $\boldsymbol{\sigma}$ 为 $b+6$ 维内力系数列向量; \mathbf{p} 为 $3j-k$ 维节点荷载列向量。

由矩阵运算关系可得

$$n_1=3j \quad (8)$$

$$n_2=b+6 \quad (9)$$

同理,基于小位移的假设,可建立折叠结构体系的变形协调方程

$$\mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}=\boldsymbol{\Delta} \quad (10)$$

式中: \mathbf{B} 为协调方程的系数矩阵,又称为协调矩阵,是 $n_2 \times n_1$ 维长方阵; $\hat{\mathbf{u}}$ 为 $3j$ 维的节点位移列向量; $\boldsymbol{\Delta}$ 为折叠结构体系的 $b+6$ 维变形列向量。

运用虚功原理,可以推导出平衡矩阵和协调矩阵的关系

$$\mathbf{A}=\mathbf{B}^T \quad (11)$$

矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 分别为结构的节点数、杆件数、支座约束数及杆件拓扑关系的函数,包含了结构几何关系的完整描述,反映了结构的几何稳定特性。

由矩阵分析理论得

$$\text{rank}(\mathbf{A})=\text{rank}(\mathbf{A}^T)=\text{rank}(\mathbf{B})=r \quad (12)$$

$$m=n_1-r \quad (13)$$

$$s=n_2-r \quad (14)$$

式中: s 为折叠结构体系的自应力状态数。

在小位移假设的前提下,折叠结构体系受到外部任意微小干扰的作用时,如果体系能够在初始态下保持平衡,则体系为几何稳定的;如果体系在初始态下不能保持平衡,则体系为几何不稳定的。显然体系的几何稳定性是由体系的拓扑、几何和约束条件决定的。

当折叠结构体系的自应力状态数 $s=0$ 时,则体系在外部任意微小、假设的扰动作用下,体系的内力为0,即体系不存在自平衡的内力,体系的内力态(自应力态)与平衡荷载惟一对应,因此折叠结构体

系为静定体系。

当体系的自应力状态数 $s>0$ 时,则平衡矩阵存在线性相关的列,体系在外荷载为0时,依然可能存在非0的内力态。此时体系的内力态并不与平衡荷载惟一对应,理论上存在无穷多个解;而内力态与非平衡荷载态惟一对应,因此,折叠结构体系为静不定体系。

当体系机构模态数 $m=0$ 时,则平衡矩阵为行满秩矩阵,协调矩阵为列满秩矩阵,此时机构与协调矩阵的列向量线性无关。由于体系的应变为0,则体系的协调方程为

$$\mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}=0 \quad (15)$$

因此在外部任意微小、假设的干扰作用下,折叠结构体系不产生机构位移,体系为几何稳定的动定体系。

当体系的机构模态数 $m>0$ 时,则平衡矩阵存在线性相关的行,协调矩阵存在线性相关的列,因此体系在外部任意微小的干扰作用下,可以产生机构位移。

1.3 板式折叠结构

板式折叠结构是折叠板与杆系折叠结构、索杆系折叠结构或折叠板与折叠板通过特定方式组合而成的一种新型折叠结构体系。杆板的组合开拓了金属杆系折叠结构、索杆系折叠结构与金属薄板、木板、塑料板和玻璃板等平面构件组合的使用范围。

与现有各种体系的折叠结构相比,由于采用折叠薄板作为结构的围护结构,因此板式折叠结构体系具有质量轻、保温、隔热、造型灵活,并可集承重、围护和装饰于一体等诸多优点,是一种很有发展前景的新型折叠结构体系。

对于板式折叠结构的结构拓扑分析;当折叠板在展开后不承受外荷载作用的板式折叠结构,可按照结构骨架的特点,分别采用杆系折叠结构和索杆系折叠结构的结构拓扑分析方法进行结构几何稳定性的分析。

当折叠板展开后与结构骨架组成一个整体的结构体系时,可采用式(6)或矩阵分析的方法对板式折叠结构进行结构拓扑分析;同时也可按结构的基本构成单元、成形稳定方式、结构展开方式和结构的用材等方面对折叠结构进行分类。

2 折叠结构类型

2.1 按基本构成单元划分

折叠结构种类多,用途各异,从其基本结构构成单元分析,折叠结构有:一维剪式铰结构、二维剪式

铰结构、剪铰式结构、锁铰式折叠结构、混合式折叠结构。

2.2 按成形稳定方式划分

折叠结构因其有从完全折叠状态到完全展开状态的过程,结构需从可展开的机构过渡到可承受外荷载的结构,根据结构成形稳定的方式,折叠结构有:几何自锁式折叠结构、构件自锁式折叠结构、人工外加锁式折叠结构。

2.3 按展开方式划分

在结构展开的过程中,根据不同的展开方式,折叠结构有:人工手动式折叠结构、液压或气压传动式折叠结构、电机驱动折叠结构、惯性力驱动折叠结构、自伸展驱动折叠结构、弹簧驱动式折叠结构。

2.4 按所用材料划分

折叠结构所使用的材料种类很多并逐渐向轻质、高强方向发展,从其所用材料的不同,折叠结构有:钢折叠结构、铝合金折叠结构、木折叠结构、塑料折叠结构、碳纤维折叠结构。

3 折叠结构节点类型

折叠结构形式多样,所用的节点也千差万别,但从结构节点传力机理来分,可以把折叠结构节点分为偏心与非偏心两大类。目前应用的折叠结构节点类型有:毂盘节点、螺栓球节点、螺栓圆柱节点、焊接钢板节点、井字形焊接钢板节点。

4 结语

(1)运用广义分类学理论,对折叠结构体系进行分类,得到的折叠结构可按照结构拓扑的差异分为杆系折叠结构、索杆系折叠结构和板式折叠结构。

(2)基于结构分类研究成果,运用结构拓扑学基本原理,提出一套完整的针对不同折叠结构形式的结构几何稳定性的判别方法。

(3)折叠结构是一种具有展、叠方便迅速,重复利用率高,机动性强,可利用空间大及高度自洁和节能等优点,其推广使用对于提高中国抵抗突发性灾害的能力有着极其重要而又深远的意义。

参考文献:

References:

- [1] 陈务军,关富玲,陈向阳,等. 正八面体单元空间伸展臂研究[J]. 宇航学报,1997,20(2):18-24.
CHEN Wu-jun, GUAN Fu-ling, CHEN Xiang-yang, et al. Study on Space Mast of Octahedral Module[J]. Journal of Astronautics, 1997, 20(2): 18-24.
- [2] 张淑杰,关富玲,张京街. 大型空间可展网状天线的形面分析[J]. 空间结构,2001,7(2):44-48.
ZHANG Shu-jie, GUAN Fu-ling, ZHANG Jing-jie. Form Analysis of Large Space Deployable Mesh Antenna[J]. Spatial Structures, 2001, 7(2): 44-48.
- [3] CHILTON J. Space Grid Structures [M]. London: Elsevier Science Ltd, 2003.
- [4] KUZNETSOV E N. Underconstrained Structural Systems[J]. Int J Solids & Structures, 1988, 24(2): 153-163.
- [5] PELLEGRINO S. Matrix Analysis of Statically and Kinetically Indeterminate Frameworks[J]. Int J Solids & Structures, 1998, 34(4): 409-418.
- [6] 杨克劼. 矩阵分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1995.
YANG Ke-shao. Matrix Analysis [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1995.
- [7] 钱若军,董明,杨联萍,等. 张力集成体系[J]. 空间结构,2002,8(3):3-13.
QIAN Ruo-jun, DONG Ming, YANG Lian-ping, et al. Tensegrity System[J]. Spatial Structures, 2002, 8(3): 3-13.