DOI: 10.3901/JME.2020.05.013

大型空间薄膜遮阳罩折展构型设计与分析*

林秋红¹ 张 骞² 贾文文¹ 邱 慧¹ 王馨玉² 蔡建国²

(1. 北京空间飞行器总体设计部 北京 100094;

2. 东南大学国家预应力工程技术中心 南京 211100)

摘要: 将折纸技术应用于空间薄膜结构构型设计并在展开全过程进行应力优化, 设计折纸型充气管结构组合使用, 完成大型空间薄膜遮阳罩折展构型设计。基于光学系统遮阳需求, 采用杆系等效方法分析了两种薄膜折痕方案折展过程中的应力改变水平, 并进行了遮阳罩薄膜结构的参数设计。考虑到充气管与薄膜结构的点连接和同步折展问题, 采用单顶点六折痕模式改进了传统的 Z 字型充气管设计方案并进行了通气性能分析。采用 ANSYS/LS-DYNA 仿真计算了薄膜结构和充气管结构的展开全过程, 并进行了应力水平和气压分析, 最终通过样机模型进行了展开试验验证。结果表明, 组合采用改进薄膜折痕方案和改进 Z 字型充气管方案, 大型空间薄膜遮阳罩的展开路径明确, 收纳比高且不会造成遮阳薄膜损伤。

关键词: 薄膜遮阳罩; 折纸; 杆系等效方法; 展开过程; 样机

中图分类号: V445

Deployable Configuration Design and Analysis of Large Space Membrane Sunshield Structures

LIN QiuHong¹ ZHANG Qian² JIA Wenwen¹ QIU Hui¹ WANG Xinyu² CAI Jianguo²

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094;

2. National Prestress Engineering Research Center, Southeast University, Nanjing 211100)

Abstract: Origami technology is applied to the configuration design of space membrane structures and the stress optimization is conducted in the whole deployment process. Combined with origami-type inflatable tube, configuration of large space deployable membrane sunshield structure is designed. The stress level in whole deployment process of two kinds of configuration design scheme is analyzed by using truss equivalent method. The parameters of membrane sunshield structures are identified based on the sunshade demand of optical systems. Considering the point junction and synchronous deployment between inflatable tube and membrane, a novel design scheme of inflatable tube is proposed inspired by single-vertex six-creases origami pattern and the ventilation characteristic of which is analyzed. ANSYS/LS-DYNA is used to simulate the whole deployment process of the membrane structure and the inflatable tube, and the configuration, the stress level and pressure are monitored and analyzed. Finally, the prototype is made to conduct the deployment experiment verification. The results show the large space membrane sunshield structure composed of the improved crease design scheme of membrane structures and inflatable tubes has clear deployment path and high storage ratio and there is no damage in the membrane structure.

Key words: membrane sunshield structures; origami; truss equivalent method; deployable process; prototype

0 前言

随着各种新型成像技术的出现, 高轨光学成像技术开始蓬勃发展, 世界各国相应纷纷提出高轨光学遥感发展计划, 但是阳光入侵问题会导致系统的

温度场剧烈变化损伤光机结构本身性能, 还会引入杂散光及热辐射干扰, 导致系统无法实现连续观测和监视。在通光口处布置高效的空间遮阳结构, 是解决阳光入侵问题的有效手段。目前, 高轨光学卫星的技术发展对空间遮阳结构提出了大尺度、大收纳比和轻量化的需求, 而薄膜结构由于质量轻、折叠收纳效率高的突出优势, 开始应用于大型可展开式空间遮阳结构, 目前可展开尺寸达到 3~20 m。

根据需求不同, 遮阳罩的结构形式多样, 有圆

* 国家自然科学基金优秀青年基金(51822805)、江苏省自然科学基金优秀青年基金(BK20170083)和“十三五”民用航天预研项目(D020205)资助项目。20190103 收到初稿, 20191009 收到修改稿

柱形^[1]、菱形^[2-3]、平面形^[4]、圆形^[5-6]和锥形^[7-10]等,可展开结构支撑有套筒、剪式铰、充气管、可展桁架等多种形式,主要的驱动方式有电机驱动^[1,3,5]、充气驱动^[2,7]、旋转自展开^[6]和大变形结构弹性驱动等^[4,8-10]。

目前我国尚未出现薄膜遮阳结构的在轨应用。薄膜结构虽然具备轻质、易收纳等优点,但柔软的薄膜材料不易控制,展开过程易出现无序、应力集中甚至撕裂等问题^[11],且现在尚未有针对薄膜展开运动过程问题的具备普适性的分析方法。光学系统遮阳罩的设计边界也很特殊,不仅要求收拢状态与整流罩保持安全距离、展开状态达到指定的结构构型,还需要在展开全过程中有序可控、严格保持与精密光学载荷的安全距离,因此可展开式遮阳结构设计阶段必须要进行低应力折展构型设计和展开全过程的模拟仿真。

本文尝试将低应力折纸技术和杆系等效分析方法应用于薄膜遮阳罩结构的构型设计和运动路径规划中,以获取最大的空间收纳比和最小的折展阻力,同时保证不损伤遮阳薄膜。折纸技术最早作为一种艺术形式产生于东亚,在 21 世纪以来作为新型的工程技术得到快速发展,已广泛应用于超材料^[12]、机器人^[13]、生物医学^[14]、微电子^[15]、声学^[16]和光学^[17]等不同领域中。WILSON 等^[18]为 IXO 望远镜的遮阳罩提出了两种折纸型收纳方案,分别为 Kresling 折展模式和 Miura-Tachi 折展模式,并利用 Kapton 薄膜制作了 1:10 缩尺样机。

基于结构设计需求,本文采用折纸技术进行了正多边形柱体形式的空间遮阳罩结构的构型优化设计,并通过对薄膜结构的展开过程仿真进行了轨迹检查、应力水平监测和充气管气压分析,最终通过样机模型进行了展开试验验证。

1 遮阳罩结构设计

1.1 总体设计方案

根据光学系统遮阳需求分析,设计的薄膜遮阳罩结构的构型方案为顶部斜切的正六边形柱体,如图 1 所示,主要由三层刚性框、四个充气管和表面多层镀铝聚酰亚胺薄膜组成。正六边形薄膜结构被刚性框分割成不等高的上下两部分。刚性框与薄膜结构边缘固定连接,充气管结构在薄膜结构内部支撑刚性框,采用点连接方式约束薄膜结构和充气管。

1.2 薄膜结构折叠方案设计分析

遮阳罩的薄膜结构折叠前为平面,展开后为正六边形柱状结构,折叠方案需综合考虑收拢包络尺寸

图 1 薄膜遮阳罩结构总体方案示意图

约束、折展过程的应力水平。根据总体方案需求,要求设计的薄膜折叠方案对应的内外半径在展开过程中改变较小,展开过程中基本不发生旋转,同一高度处的薄膜结构同步展开。

经过初步设计,薄膜结构采用的折叠方案见图 2,为单顶点六折痕模式^[19-20],基本单元的折痕布置和折纸模型如图 3 所示,其中虚线代表谷线,实线代表峰线。薄膜基本单元几何由单元长度 L 、单元高度 H 和角度 φ 决定。

图 2 薄膜初始折叠方案折痕分布

(a) 折痕布置 (b) 折叠模型

图 3 六折痕基本单元

定义基本单元的折叠角度为 α ,如图 4a 所示,当单排 N 个基本单元依据设计的折痕布置方案经过折叠,可以形成闭合正多边形管,此时水平虚折痕形成的正多边形的内角 β 需要满足的约束条件为

$$N\beta = (N-2)\pi \quad (1)$$

且根据球面三角形公式,正多边形的内角 β 可以表示为

$$\beta = \pi - 4\arctan\left(\cos\frac{\alpha}{2} \times \tan\varphi\right) \quad (2)$$

结合式(1)和式(2), 可以计算得到闭合正多边形管的几何参数需要满足的约束条件为

$$\cos\frac{\alpha}{2} \times \tan\varphi = \tan\frac{\pi}{2N} \quad (3)$$

基本单元和多排闭合正多边形管模型如图 4b 所示。

(a) 单排闭合圆管几何示意图 ($N=6$)

(b) 三排闭合圆管模型 ($N=4$)

图 4 初步折叠方案模型

采用几何约束条件初步分析闭合六边形柱状结构在折叠展开过程中的内力变化情况。由于薄膜结构受力时不考虑薄膜面外刚度, 可以忽略折痕转动产生的内力影响, 而只考虑薄膜面内撕扯和褶皱对薄膜的影响。因此, 可以将薄膜结构进行杆系化^[21], 即在图 3 所示的薄膜构型的折痕位置布置二力杆单元作为薄膜闭合管的等效分析模型, 由此采用折展过程中杆件的相对内力变化近似表示薄膜结构在折展过程的应力变化。为简化二力杆件等效截面面积对模型分析的影响, 假定整个折展过程中只有图 3 所示的虚线折痕对应的杆件发生长度改变, 其他折痕对应的杆件设定为刚性杆件, 不发生伸长或者缩短。此时, 可以采用折展过程中虚线折痕对应杆件的长度的相对变化表征薄膜结构在折展过程中的应力相对水平。

假定闭合无应力状态时薄膜基本单元的初始折叠角为 α_0 , 保持闭合状态进行展开, 折展过程的部分典型单元如图 5 所示, 其中 O_1 和 O_2 分别为闭合圆管底边和中间虚线围成的正多边形中心, $\triangle O_1AC$ 为

等腰三角形, AC 长度为 L , 面 ABC 和面 O_1AC 的夹角为 $\alpha/2$, BE 长度为 $H/2$, $\angle AO_1E$ 和 $\angle BO_2D$ 均为 π/N 。 BG 初始长度为 L , 则 BG 长度的相对变化 ε_1 为

$$\varepsilon_1 = BG/L = 1 + \sin\frac{\pi}{N} \tan\varphi \left(\cos\frac{\alpha}{2} - \cos\frac{\alpha_0}{2} \right) \quad (4)$$

图 5 初步折叠方案折展过程中的部分单元

根据式(4)可知, 随着基本单元的折叠角逐渐增大, BG 长度单调减小, 反映薄膜结构的整体应力水平逐渐增大, 在末状态薄膜并不能完全被拉平。考虑到薄膜遮阳罩结构的实际使用, 在完全展开后需形成正六边形柱体, 由此在初始折痕布置中额外增加竖向折痕, 为薄膜改进折叠方案, 如图 6 所示。

图 6 薄膜改进折叠方案折痕分布

改进折叠方案薄膜模型闭合状态形成正多边形管需要满足的几何条件和初始折叠方案一致, 仍然采用杆系化分析模式讨论折展过程中的薄膜结构应力水平变化的情况, 基本单元如图 7 所示。

建立空间坐标系, 则点 B 和点 D 的空间坐标分别可以表示为

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L}{2} \cot\frac{\pi}{N} + \frac{H}{2} \cos\frac{\alpha}{2} \\ 0 \\ \frac{H}{2} \sin\frac{\alpha}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{L}{2} \csc\frac{\pi}{N} - \frac{H}{2} \cos\frac{\alpha}{2} \right) \cos\frac{\pi}{N} \\ \left(\frac{L}{2} \csc\frac{\pi}{N} - \frac{H}{2} \cos\frac{\alpha}{2} \right) \sin\frac{\pi}{N} \\ \frac{H}{2} \sin\frac{\alpha}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

则 BD 长度的相对变化 ε_2 为

$$\varepsilon_2 = \sqrt{1 + 2 \left(1 + \cos \frac{\pi}{N}\right) \left(\tan \varphi \cos \frac{\alpha}{2}\right)^2 - 2 \sin \frac{\pi}{N} \tan \varphi \cos \frac{\alpha}{2}} \quad (7)$$

图7 改进折叠方案折展过程中的基本单元

根据式(7)可知,随着折叠角的增大, BD 长度先减小后增大,当折叠角为 180° 时, BD 长度恢复到初始状态,如图8所示。

图8 改进折叠方案单层薄膜结构完全展开($N=6$)

当折叠角满足下述公式(8)时, BD 长度取最小值,定义此时薄膜临界折叠角为 α_m ,则薄膜临界折叠角 α_m 与薄膜初始折叠角 α_0 之间的关系如图9所示

$$\cos \frac{\alpha_m}{2} = \frac{1}{2} \cos \frac{\alpha_0}{2} \quad (8)$$

图9 薄膜临界折叠角与初始折叠角之间关系图

考虑到实际的遮阳罩储存状态下薄膜结构完全折叠压紧,选择初始折叠角为 0° ,此时两种折痕模式采用杆系化模式分析的内力变化情况如图10所示,可知随着边数 N 的增大,两种折痕模式下展开过程的应力均逐渐减小;在给定边数的情况时,改进后的折痕模式展开过程中应力始终比初始折痕模式对应的应力小,随着遮阳罩逐渐展开,改进后的折痕方案在应力水平上的优势越来越明显。

图10 遮阳罩展开过程中两种折痕方式对应的应力水平

按照遮阳罩顶部斜切角度,修正薄膜折痕分布如图11所示。

图11 修正后的薄膜折痕分布

修正后薄膜折痕分布形式的各几何参数的具体数值如表1所示。

表1 薄膜遮阳罩结构设计参数

参数	数值
基本单元高度 H/mm	200.0
基本单元长度 L/mm	746.4
单排单元数量 N	6
基本单元角度 $\varphi/(\circ)$	15.0
薄膜下部裁切角度 $\theta/(\circ)$	31.9
薄膜上部裁切角度 $\gamma/(\circ)$	43.0

1.3 充气管折展设计

充气管作为整个结构的展开驱动,应与薄膜建立可靠的连接,同时应具有较好的通气性,保证良好的可展开性能。结合薄膜的折叠特点,选用改进的Z型折叠方式对充气管进行折叠,并在薄膜角点

处设置连接点，折叠时充气管可随薄膜一并折叠。充气管折叠采用和膜折叠类似的方式，如图 12 所示，其中参数 H 和 φ 与薄膜结构中相应参数一致，分别为 200 mm 和 15° 。

图 12 充气管基本单元折痕方案

未充气时充气管的空间形式如图 13 所示，其中结合单顶点六折痕折纸模式改进的 Z 型折叠细节如图 14 所示，此时初始折叠夹角为 ρ ，根据几何关系，边长 a 可以由公式计算得到

$$a = \frac{1}{4} \pi D \left(1 + \tan^2 \varphi \cos^2 \frac{\rho}{2} \right) \quad (9)$$

图 13 充气管未充气状态

图 14 充气管基本单元细部构造

充气管通气截面为等效三角形，其中侧边边长为 a ，夹角为 λ ，底边边长为 $2c$ ，则通气截面的面积 S 可以表示为

$$S = ac \sin \lambda \quad (10)$$

$$c = \frac{1}{4} \pi D \left(1 - \tan^2 \varphi \cos^2 \frac{\rho}{2} \right)$$

$$\lambda = 2 \arctan \left(\tan \varphi \cos \frac{\rho}{2} \right) \quad (11)$$

入气口和出气口之间的距离定义为 d ，可以表示为

$$d = \frac{1}{2} \pi D \tan \varphi \sin \frac{\rho}{2} \quad (12)$$

通气截面相对面积 S/S_0 与入气口和出气口之间的相对距离 d/d_0 的关系如图 15 所示，其中 S_0 对应充气管的折叠夹角为 0° ， d_0 对应充气管的折叠夹角为 180° 。据图可知，在参数 φ 不大于 30° 时，随着相对距离的增大，通气截面相对面积逐渐减小，当参数 φ 大于 30° 时，通气截面相对面积随着相对距离的增大先增大后减小。

图 15 充气管相对通气截面面积和相对距离之间的关系

对于传统的 Z 字型折叠充气管，通气截面面积可以认为是 0，而改进的 Z 字型充气管的通气面积与折叠几何参数有关，且始终大于 0，从而说明改进的 Z 字型充气管的通气性能远优于传统的 Z 字型充气管。

2 遮阳罩展开过程仿真分析

2.1 薄膜展开过程分析

对下部两层刚性框之间的薄膜结构进行展开分析，考虑到充气管的折叠厚度，每层薄膜的初始展开高度 8 mm，模型如图 16 所示，完全展开时中间刚性梁框向上位移 1 152 mm。约束底部三向平动 U_X 、 U_Y 和 U_Z 方向自由度，约束顶部 U_X 和 U_Y 两个方向自由度，假定充气管均匀展开，对每层薄膜的驱动作用一致，即对每层薄膜顶部 U_Z 方向施加位移荷载。

图 16 薄膜结构折叠状态图

采用 ANSYS/LS-DYNA 仿真计算下部薄膜结构的准静态展开过程,如图 17 所示。仿真分析结果表明,展开过程平稳有序。

图 17 薄膜结构展开过程图

完全展开状态的应力分布如图 18 所示,应力主要集中于薄膜斜向边缘部分,薄膜平面最大应力约为 19 MPa。

图 18 薄膜结构完全展开状态应力云图

2.2 充气管展开过程分析

充气管的仿真采用软件 ANSYS 及其子模块 LS-DYNA 进行。采用压平-充气的分析建模方式,首先对充气管建立零应力状态模型进行压平分析,然后对压平结果中边界几何参数进行提取,再简化建立改进 Z 字型充气管零压力状态下的折叠模型,和压平结果的条件进行网格连接,如图 19 所示。

充气管两侧端板为刚性材料。设置模型的终止时间为 90 s,输出 k 文件,在 k 文件中定义 Airbag

图 19 充气管结构展开分析初始状态

气囊模型,采用体积控制充气法,并采用罚函数法定义自接触属性。充气过程中,充气管一侧的端板封口通过约束三个平动自由度进行固定,另一侧端板封口仅允许其在轴向移动,将修改后的 k 文件提交 LS-DYNA 求解器计算。

充气管平稳的展开过程如图 20 所示。

图 20 充气管展开过程分析

完全充气后充气管的应力和管内压力如图 21 所示,可知此时的充气管大部分位置的平面应力在 1.8 MPa 到 6.4 MPa 范围内,局部最大平面应力达到 28.0 MPa。管内大部分位置的应力在 0~0.3 MPa 范围内,局部最大压力达到 14.22 MPa。

图 21 充气管的平面应力和管内压力

3 薄膜遮阳罩试验样机展开试验

按照薄膜遮阳罩结构构型设计参数加工制作样机模型,其中完整薄膜采用镀铝聚酰亚胺薄膜拼接而成,完全折叠状态如图 22 所示。将完全折叠后的薄膜与完全折叠后的充气管以及三层刚性框固结在一起,如图 23a 所示。

图 22 镀铝薄膜折叠后样式

(a) 样机折叠状态

(b) 样机展开状态

图 23 遮阳罩样机的折叠与展开

对充气管进行充气, 薄膜随充气管的充气展开而同步有序展开, 完全展开状态如图 23b 所示, 展开过程中薄膜没有发生损伤撕裂的现象, 表明采用设计的薄膜和充气管折叠方案是合理可行的。

4 结论

(1) 在初始单顶点六折痕模式的基础上, 通过附加竖向折痕进行薄膜折叠方案改进, 分析结果表明使用改进后的折叠方案的薄膜在展开过程中的应力水平较低。基于光学系统的遮阳需求, 对薄膜遮阳罩结构进行了参数设计。

(2) 在传统 Z 字型充气管折叠方案的基础上, 结合单顶点六折痕模式进行改进设计, 改进后的充气管的通气性优于传统的 Z 字型充气管。

(3) 下部薄膜结构展开全过程的仿真分析结果表明, 应力主要集中在薄膜斜向边缘位置, 最大应力约 19 MPa; 充气管充气全过程仿真分析结果表

明, 展开过程高效平稳。

(4) 样机展开试验表明, 采用改进的薄膜折叠方案和改进的 Z 字型充气管折叠方案的薄膜遮阳罩展开过程平稳有序, 且没有发生薄膜撕裂。

参 考 文 献

- [1] JOHNSTON J, ROSS B, BLANDINO J, et al. Development of sunshield structures for large space telescopes [J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 4850: 209-220.
- [2] ADAMS M, CULVER H, KAUFMAN D, et al. Design and flight testing of an inflatable sunshield for the NGST[C]// Proceedings of 41st Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2000: AIAA-2000-1797.
- [3] LILLIE C, DAILEY D, POLIDAN R. Large aperture telescopes for launch with the Ares V launch vehicle[J]. Acta Astronautica, 2010, 66(3/4): 374-381.
- [4] WILLIAMS R, AGNES G, CRUMB D. Lightweight deployable sunshade concepts for passive cooling for space-based telescopes[C]// Proceedings of 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2008: AIAA-2008-1774.
- [5] PEREIRA C, URGOTI E, PINTO I. The structure of the GAIA deployable sunshield assembly[C]// Proceedings of 12th European Conference on Space Structures, Materials and Environmental Testing, SP-691, 2012.
- [6] WEBB D, HIRSCH B, BACH V, et al. Starshade mechanical architecture and technology effort[C]// Proceedings of 3rd AIAA Spacecraft Structures Conference, 2016: AIAA-2016-2165.
- [7] DEW M, ALLWEIN K, KUTTER B, et al. Design and development of an in-space deployable sun shield for the Atlas centaur[C]// Proceedings of AIAA SPACE Conference and Exposition, AIAA-2008-7764, 2008.
- [8] SHIRRON P, KIMBALL M, FIXSEN D, et al. Design of the PIXIE adiabatic demagnetization refrigerators[J]. Cryogenics, 2012, 52(4/5/6): 140-144.
- [9] DIPIRRO M, FIXSEN D, KOGUT A, et al. Design of the PIXIE cryogenic system[J]. Cryogenics, 2012, 52(4/5/6): 134-139.
- [10] DIPIRRO M, TUTTLE J, MATTERN A, et al. Subscale cryo-thermal tests of a large 4K space telescope[J]. Proceedings of the SPIE, 2006, 6275: 1-11.
- [11] 卫剑征, 林秋红, 林国昌, 等. 可展开遮阳罩技术研究进展及其关键科学问题[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(1): 56-66.

WEI Jianzheng, LIN Qiuhong, LIN Guochang, et al. Advances and key scientific problems in deployable sunshield structures[J]. Journal of National University of

- Defense Technology, 2018, 40(1): 56-66.
- [12] BERTOLDI K, VITELLI V, CHRISTENSEN J, et al. Flexible mechanical metamaterials[J]. Nature Reviews Materials, 2017, 2: 17066.
- [13] RUS D, TOLLEY M. Design, fabrication and control of origami robots[J]. Nature Reviews Materials, 2018, 3: 101-112.
- [14] KURIBAYASHI K, TSUCHIYA K, YOU Z, et al. Self-deployable origami stent grafts as a biomedical application of Ni-rich TiNi shape memory alloy foil[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 419(1-2): 131-137.
- [15] HU N, CHEN D, WANG D, et al. Stretchable Kirigami polyvinylidene difluoride thin films for energy harvesting: Design, analysis, and performance[J]. Physical Review Applied, 2018, 9(2): 021002.
- [16] THOTA M, WANG K. Reconfigurable origami sonic barriers with tunable bandgaps for traffic noise mitigation[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(15): 154901.
- [17] WU J. Folding helical triangle tessellations into light art[J]. Journal of Mathematics and the Arts, 2017, 1(12): 19-33.
- [18] WILSON L, PELLEGRINO S, DANNER R. Origami sunshield concepts for space telescopes[C]// Proceedings of 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA-2013-1594, 2013.
- [19] YOSHIMURA Y. On the mechanism of buckling of a circular cylindrical shell under axial compression and bending[R]. NACA-TM-1390, 1951.
- [20] CAI Jianguo, DENG Xiaowei, XU Yixiang, et al. Motion analysis of a foldable barrel vault based on regular and irregular Yoshimura origami[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2016, 8: 021017.
- [21] DE FOCATIIS D, GUEST S. Deployable membranes designed from folding tree leaves[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2002, 360(1791): 227-238.
-
- 作者简介: 林秋红, 女, 1985 年出生, 高级工程师。主要研究方向为空间大型桁架结构和柔性可展开结构技术。
E-mail: 15010362810@163.com
蔡建国(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为新型折叠与展开结构、折纸结构。
E-mail: j.cai@seu.edu.cn