



**北京航空航天大学**  
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

**基于平行四边形机构原理的  
高伸缩比基础舱体结构**

## 摘要

目前, 大量的大型桁架结构是许多空间飞行器的结构主体。在航天领域, 众所周知, 一克重量一克黄金, 而 1 立方厘米的体积所带来的价值又要多于一克质量的价值。构建空间站时每次送往太空的组件的体积是航天发展的一个重要的限制条件。因此, 合理设计一些可折叠的结构, 使得运载过程中组件所占的体积尽量的小是在航天以及相关领域中一项极其重要的工作。

本项目通过对平行四边形机构原理及其结构变换特性等多方面的研究, 以该机构作为基本单元, 化平面为立体, 组成一种具有连续性、整体收缩性的结构。因此, 欲通过以自主设计并构建模型的方式完成一种高压缩比、多维度缩放的可折叠的舱体基础结构的设计, 以解决当下航天领域常用的折叠机构方案只能实现轴向缩放而无法实现径向缩放的问题。在径向的伸缩比达到 1:6, 在轴向上伸缩比与盘压杆相当。

此结构通过加入扭簧的设计能够快速成型, 可用于空间站的基础结构、部分舱段支撑、移动服务系统设施及站外暴露试验, 甚至可用于太阳能电池阵的支撑结构、机械臂等。在降低质量、保证刚度的情况下, 最大程度的减小体积, 使飞行器单次搭载的效率提高。

关键词: 平行四边形机构原理, 三维缩放, 高伸缩比, 基础舱体结构

# 目录

一. 引言 .....	1
1.1 项目背景 .....	1
1.2 国内外研究现状分析 .....	1
1.2.1 平行四边形机构应用现状 .....	1
1.2.2 空间可展机构分类与分析 .....	1
二. 核心创意 .....	3
2.1 总体设计 .....	3
2.2 径向设计 .....	3
2.2.1 结构设计思路 .....	3
2.2.2 建模成果展示 .....	3
2.3 轴向设计 .....	7
2.3.1 扭簧设计 .....	7
2.3.2 节点设计 .....	9
三. 创意可行性分析 .....	10
3.1 创意先进性 .....	10
3.2 可行性分析 .....	10
3.3 技术难点 .....	10
四. 应用前景 .....	11
4.1 应用场景 .....	11
结论 .....	11
参考文献 .....	11

# 一. 引言

## 1.1 项目背景

目前国内外对宇宙空间站的建设都在紧锣密鼓的进行中,空间站的建设 and 组装都需要很大的人力和物力。空间站的构成组件都是通过运载火箭运送到轨道上再进行组装。美国和前苏联建设的空间站都以长达几十米或上百米,由许多舱段构成,其中包含大量的大型桁架结构。众所周知,构建空间站时每次运送组件的体积是一个重要的限制条件。因此,合理设计一些可折叠的结构,使得运载过程中所占的体积尽量的小是一项极其重要的工作。

平行四边形机构是一种常见的铰链四杆机构,这种机构的特点之一是相对杆始终保持平行,且两连杆的角位移、角速度和角加速度也始终相等;另一特点是当多个平行四边形机构叠加起来使用时,能起放大位移作用。该机构常应用于机车车轮驱动机构、铰链拉门、缩放仪等。如果用于更大型的结构,将会更凸显自身特点。

## 1.2 国内外研究现状分析

### 1.2.1 平行四边形机构应用现状

目前,在国外,平行四边形机构原理的应用主要体现在以下方面:

1. 建筑设计方面: 包括一些折叠雨篷、通风设备表面、可操作的房顶和天蓬等;
2. 婴幼儿玩具方面: 包括一些伸缩玩具球、玩具棒等;
3. 其他方面: 包括一些折叠帐篷、小型医疗器械、多用空间(盒子)的表面、伸缩大门等.

总体来说,这些应用都是在较为小型的结构上,生产制造及使用都比较简单。虽然它们所使用的都是平行四边形机构原理,但却都没有深入挖掘这种原理更多的用途。

### 1.2.2 空间可展机构分类与分析

(1) 铰接可展机构。铰接可展机构的展开过程由铰链活动实现,包括简单的旋转和平移。其特点在于展开过程中机构扫过的空间要大于机构最终占据的空间。铰接可展机构是最早发展的空间可展机构之一,目前已作为成熟技术广泛应用于各类航天器中。

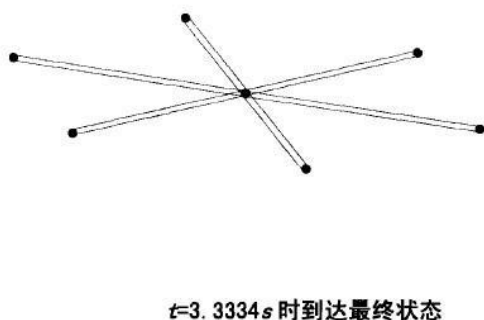
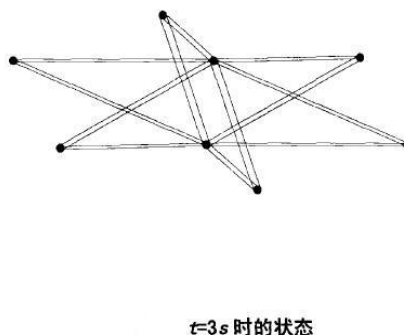
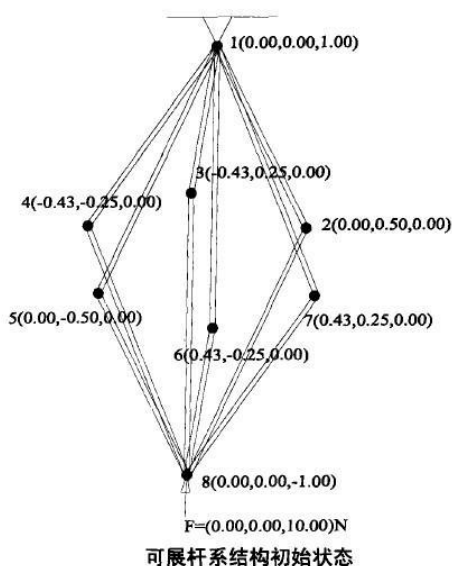
(2) 杆状可展机构。杆状可展机构是目前应用最广的一类展开机构,其机构形式多种多样,在展开后通常形成细长管或单向构架,主要作用是实现空间定位,以及提供结构支撑。可用于杆状天线、磁强计、重力梯度杆、半刚性或柔性折叠式太阳能电池阵、太阳帆等大型空间可展结构。

(3) 面状可展机构。面状可展机构包括平面展开机构和曲面展开机构，主要用于空间反射器及大面积天线，是目前国际上研究热点之一。

(4) 体可展机构。体可展机构展开后形成三维几何体。目前这种展开机构的实际应用还较少，但一些相关概念已通过了可行性论证，并进行了地面演示试验，还有的进行了在轨试验。其中包括1996年在 Spartan 可重复使用卫星上进行的14m 宽碟形天线的展开试验。

如下面三幅图即体现了一个杆状可展机构的展开过程。

该机构由12根刚性杆组成，各杆之间用球铰进行连接。节点1处只能转动，不能移动（初始状态时各节点后的数字为初始时刻各节点的空间坐标，单位为 m）。杆件的截面积均为5平方厘米，杆件密度均为7801千克每立方米。在不考虑空间重力效应下，在节点8处作用一个沿 Z 轴正向大小为10N 的力，则经验证可达到最终状态效果。



当前，我们国家在航天上所使用的伸缩结构较少，最常见的是看过各种飞船升天的人都知道的太阳能帆板的展开，其实这也只是一种简单的折叠机构，并且无太多复杂的原理。

其次便是盘压杆，盘压杆的原理并不复杂，只是利用了材料的一些特殊的性质使其能达到轴向伸缩的效果。但即使如此，它也暂时做不到径向伸缩。而盘压杆一般并不应用在火箭飞船等之上，而多用于着陆于其他星球的探测器上。又因其所能承受的载荷不大（因为它是靠材料的柔韧性质得以伸缩，故能承受的载荷必然不大），在大型的设备上使用仍然是受到限制。

可见，无论国内还是国外，常用的伸缩结构都有着不少的缺点，这在介绍各种伸缩结构时已提到，在此不在赘述；而从平行四边形机构原理在国外的应用可以看出它有着不少自己特有的优势如伸缩比大、多维度伸缩、使用方便、所能承受的载荷较大等，但是国内外平行四边形机构原理都未用在航天领域，去探索它在这个领域的应用前景可观。

## 二. 核心创意

### 2.1 总体设计

本设计目标是自主构思并建立一种轴向伸缩比为 1:6，径向伸缩比与盘压杆相近的圆柱形可伸缩结构。径向由多个平行四边形交错相连构成平面圆盘，轴向由 X 型结构组成，可随径向展开而伸展。

### 2.2 径向设计

#### 2.2.1 结构设计思路

一个平行四边形的四条边分别由四根不同的杆件组成，这样，许多并排连接的小四边形就能够连续地展开。因此，一个四边形的展开就能够控制同一个圆盘面内所有平行四边形的展开。此外，我们还自创了一种“错位设计”，通过不同尺寸杆件的相互交错、不同角度的排列，在收缩时，杆件能够排列得更加紧密，进一步节省横向空间。

#### 2.2.2 建模成果展示

如“Figure 1 径向基本结构单元示意图”所示，红色标注处为一个基本结构单元（径向一周由十个基本结构单元组成），每个单元含四种尺寸不同的杆件，“Figure 2 杆件示意图”所示杆为其中一种杆件，“Figure 3 杆件工程图”展示了我们设计的具体尺寸要求。

“Figure 4 展开过程中的 8 个截图”展示了径向一周结构的伸缩过程，“Figure 5 最终展

开与初始状态对比图”直观地展示了我们自主设计结构的径向伸缩比之大（达到 1:6）。



Figure 1 径向基本结构单元示意图

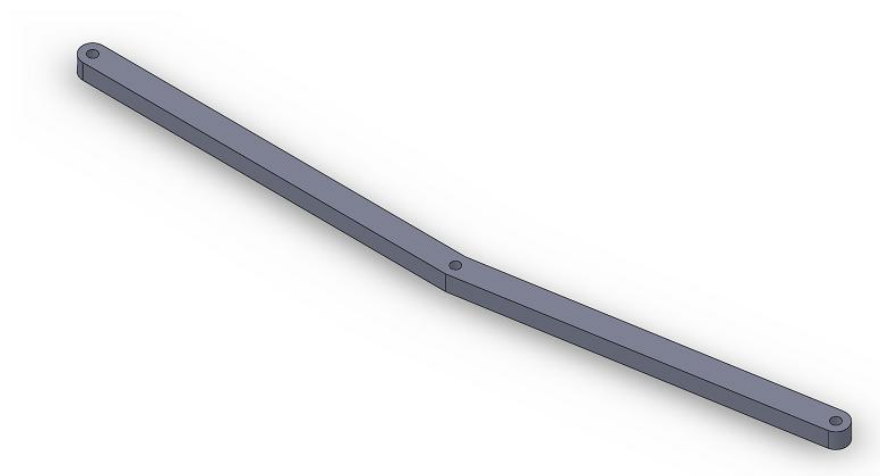


Figure 2 杆件示意图

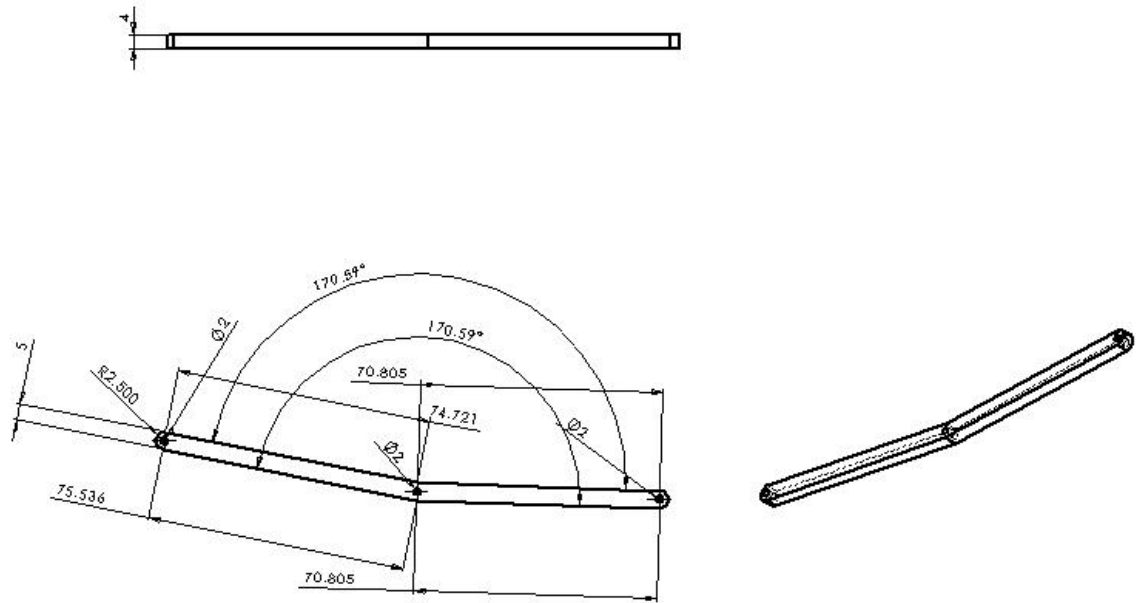
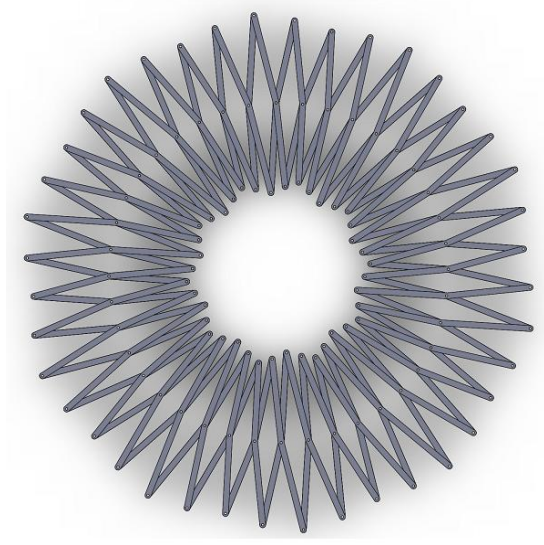
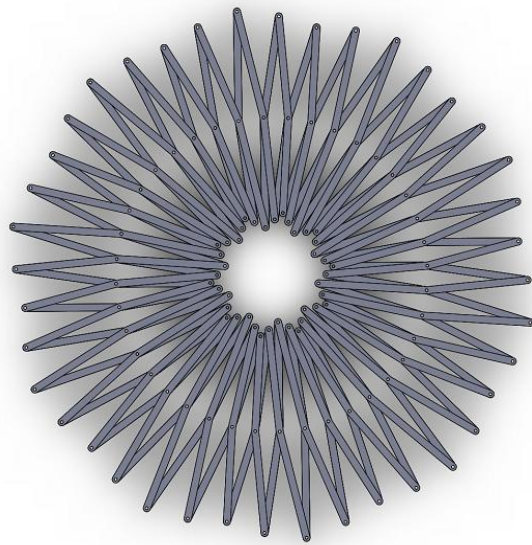


Figure 3 杆件工程图

径向展开过程截图展示：





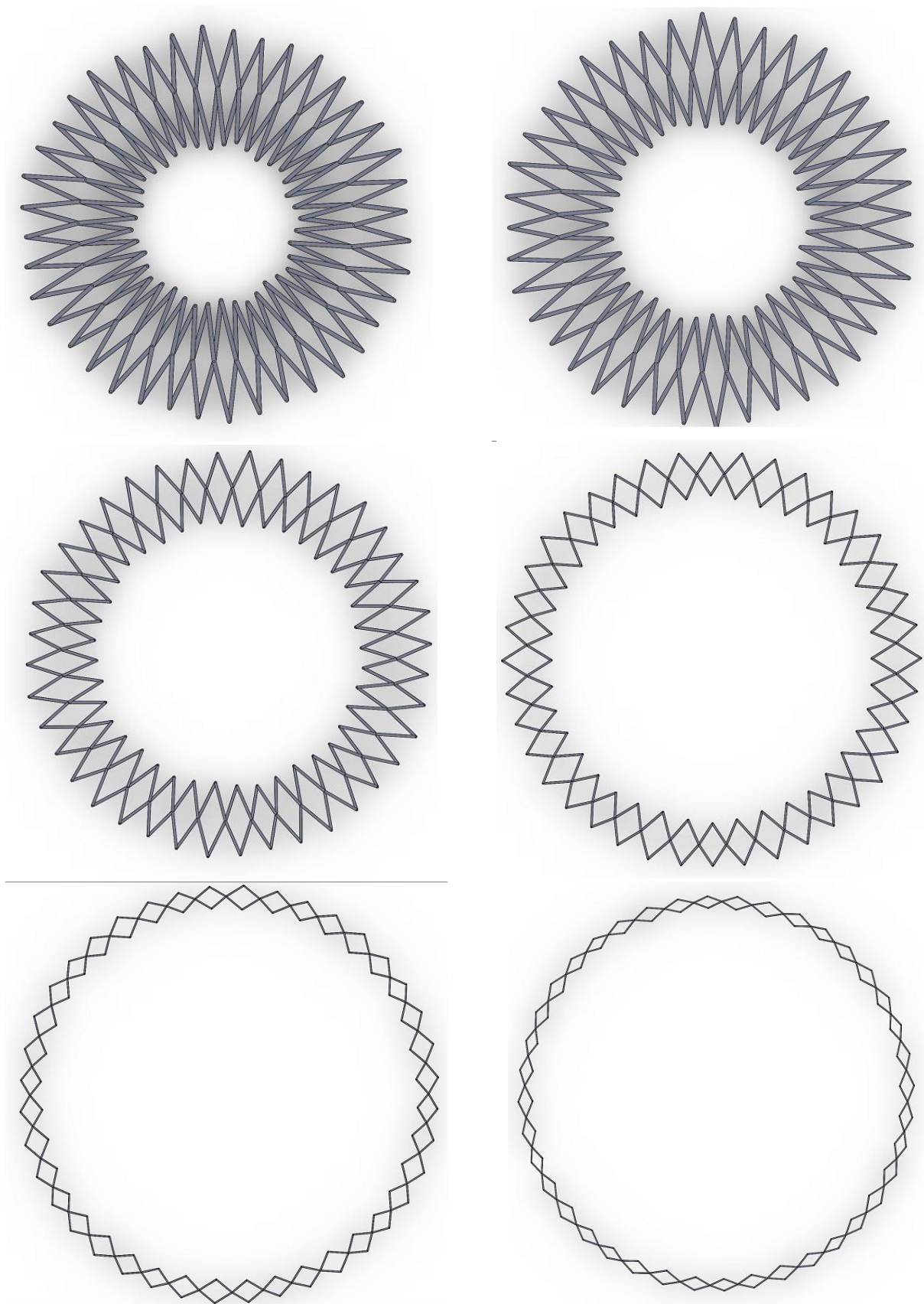


Figure 4 展开过程中的 8 个截图

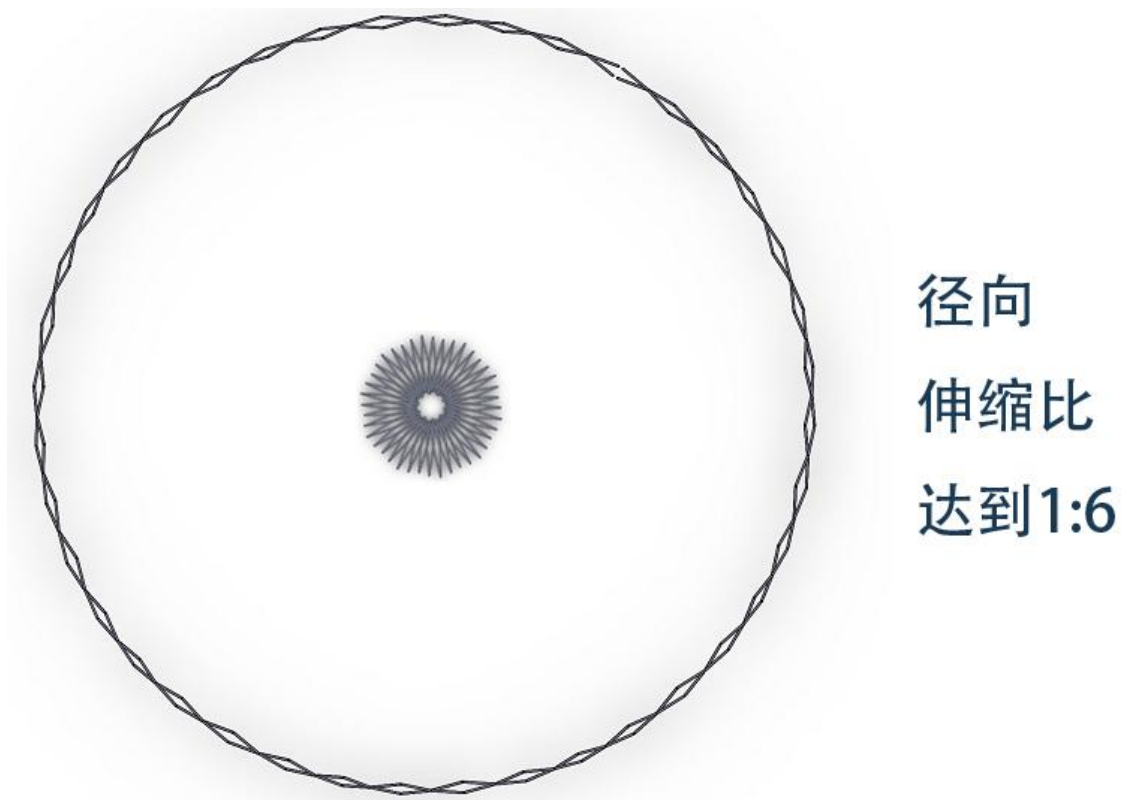


Figure 5 最终展开与初始状态对比图

## 2.3 轴向设计

### 2.3.1 扭簧设计

在一对轴向展开杆件的同一个转动副处嵌入扭簧（Figure 6 轴向杆件图）。释放过程中，通过各扭簧中存储的扭矩使机构轴向展开，同时通过特意设计的节点带动径向展开。

“Figure 7 轴向展开过程示意图”为轴向展开侧面视图（展开过程视频见“附加材料”），红色标注处为扭簧工作位置，轴向伸缩比接近 30:1。

“Figure 8 单层展开示意图”为其中一层的展开前后对比图（径向、轴向同时展开），  
“Figure 9 整体展开前后对比图”则为整体的展开前后对比图（径向、轴向同时展开）。

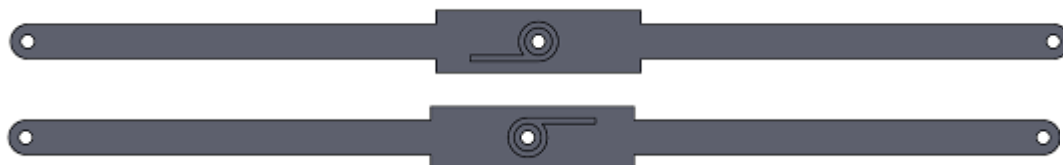


Figure 6 轴向杆件图

展开过程演示：



Figure 7 轴向展开过程示意图

整体展开视图：

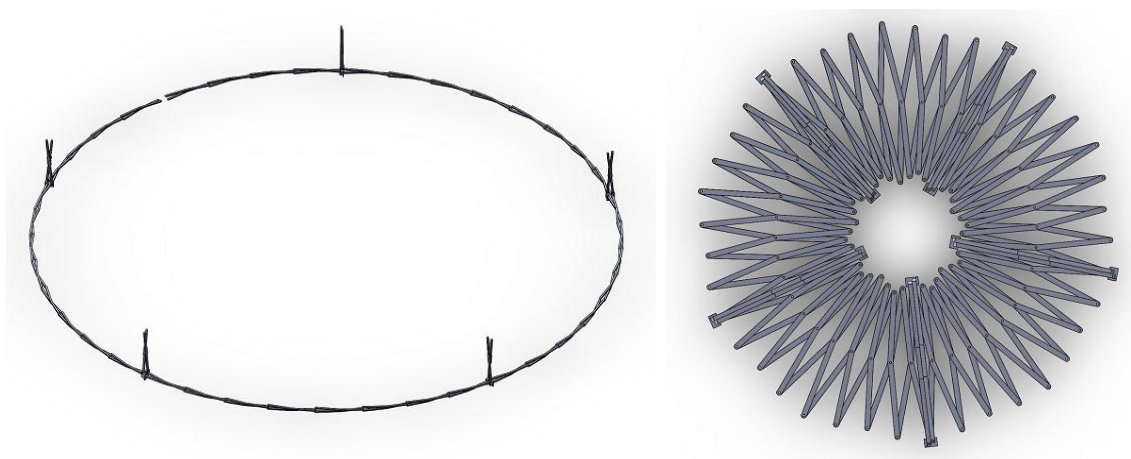


Figure 8 单层展开示意图

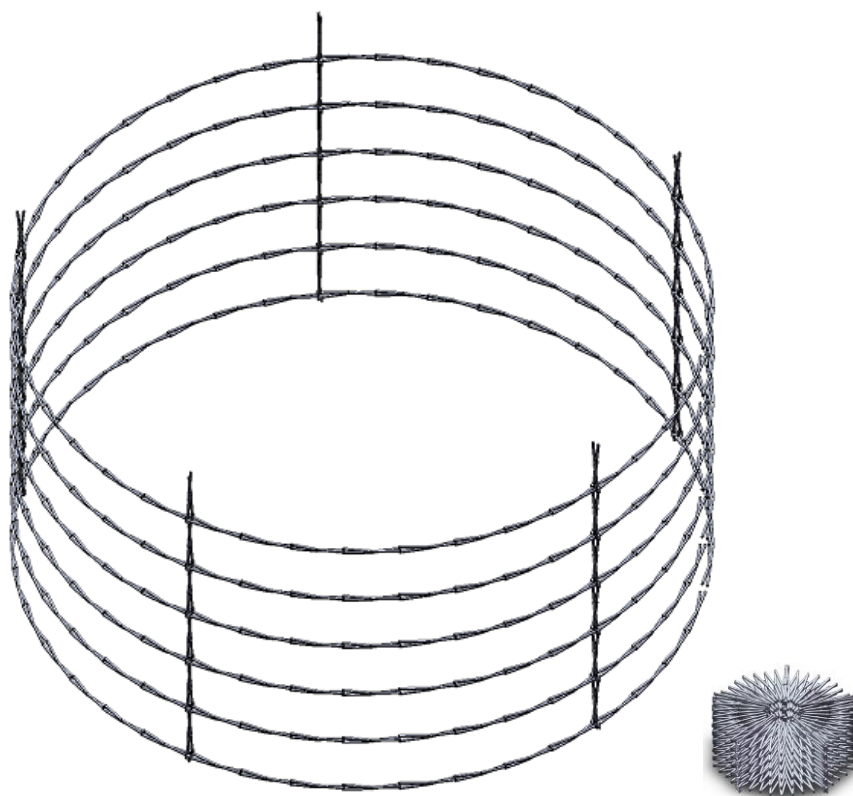


Figure 9 整体展开前后对比图

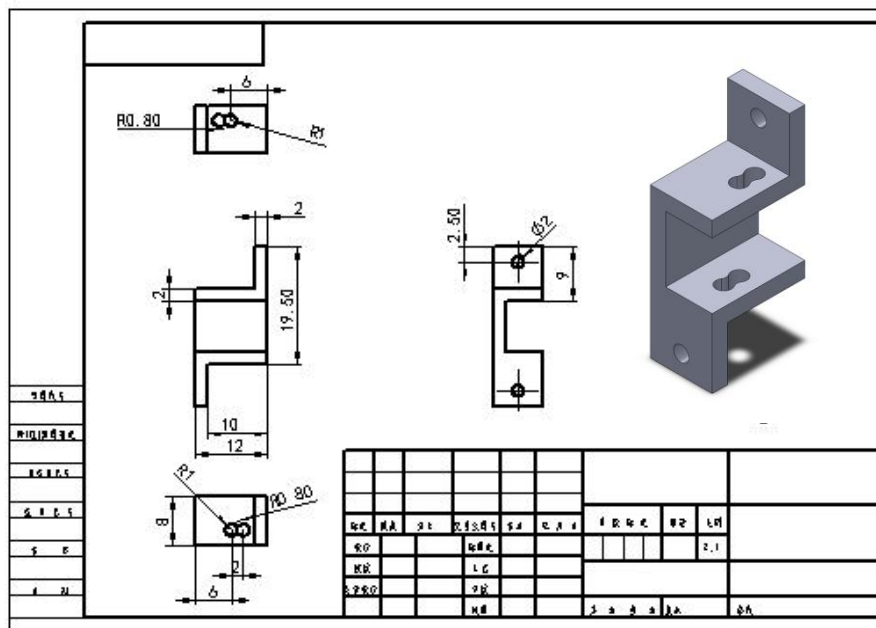
### 2.3.2 节点设计

如“**Figure 10 节点件工程图**”所示，轴径向的连接节点完全是按设定的结构功能自主设计的。具备多个优点：

1.轴径向展开分别划分在不同的高度区域内展开——两个方向零件的运动不会相互干涉到，故不会影响到各方向原有的伸缩比。

2.对于径向零件与节点的连接处，在转动副的基础上增加了移动副——在帮助协调

径向展开的同时, 进一步增大径向伸缩比。



**Figure 10** 节点件工程图

### 三. 创意可行性分析

### 3.1 创意先进性

与普通舱体相比,该基于平行四边形原理的高伸缩比基础舱体结构利用一种常见的平行四边形机构实现了轴向径向等多维度的高伸缩比。并且它的伸缩比还可以根据需要进行杆长等的设计,不仅仅局限于某一特定的伸缩比,大大拓宽了应用市场。而与此同时较之现下常用的不可伸缩舱体,高伸缩比使得舱体的运载及使用更为方便,降低运载成本。

至于展开固定方面，我们最开始的考虑是将这种结构应用于航天，故多为一次性使用，展开固定后没有收回的必要，所以采用了扭簧结构，利用扭簧的扭力矩而无需添加额外的动力即可固定，该设计使得该舱体的航天上的应用极为方便。如果需要使用在其他领域，只需增加使扭簧收缩的动力而无需修改结构，同样使用方便。

### 3.2 可行性分析

该舱体利用的平行四边形机构原理以及展开固定所使用的扭簧都是一些常见机构，它们原理都较简单，这样该舱体在原理实现上不会存在太多需要攻克的技术难点，在开发利用上更有优势。而且我们也通过 **solidworks** 进行分析，得到了实体模型，只要加工装配精度能够保证，是完全可以实现的。

### 3.3 技术难点



首先,设计比较复杂.该结构的杆长、杆的角度已经配合螺纹的设计都比较精细,通常需要多次细微的修正才能实现自如的缩放;其次,如上可行性分析所述,该结构的加工相对复杂。从设计的细微即可知加工也比较精细,比如杆的角度等都不是整数,故加工相对难一些。

## 四. 应用前景

### 4.1 应用场景

在航天方面,迄今为止,该种展开方式在航天领域尚未出现,因此该种类型的构件可谓发展前景广阔。例如,该结构可以作为空间站的基础结构、部分舱段的支撑结构、移动服务系统设施及用于站外暴露试验的设备,甚至可用于制作太阳能电池阵的支撑结构、机械臂等。在降低质量、保证刚度的情况下,该结构可以实现最大程度的减小体积,使飞行器单次搭载的效率提高。

此外,这种快速成型的结构在家居、建筑等民用领域也具有广泛的实用价值。在家居方面,可以制成伸缩折叠型的桌椅、家具、自行车等,以达到节省室内空间、方便携带等目的。在建筑方面,可制成平时折叠、遇到紧急情况时迅速展开的遮雨棚、救生通道等。

## 结论

通过以上分析,我们认为,该基于平行四边形机构原理的高伸缩比基础舱体结构较之现在航天上常用的结构有较大优势,这些优势体现在它自由可设计的高压缩比、轴向径向多维度的缩放、结构及固定原理简单易行以及仿真模拟实现容易等优点,为它的应用和发展带来了广阔的前景。

## 参考文献

- [1]项平 吴明儿. 杆系可展结构的展开过程动力学分析. 第九届全国现代结构工程学术研讨会刊物, 2009, (2).
- [2]于登云 孙京 马兴瑞. 大型构件伸展与锁(压)紧释放技术. 航天器工程, 2007, (1).