DOI: 10.3901/JME.2020.05.123

基于正棱锥可展单元的球形雷达校准机构的设计方法及研究*

李端玲^{1,2} 董凯捷^{1,2} 刘利捷^{1,2} 王兴泽³ 张问采⁴ 葛正浩⁴

(1. 北京邮电大学自动化学院 北京 100876;

2. 北京市邮政智能装备工程技术研究中心 北京 100096;

3. 北京空间飞行器总体设计部 北京 100094;

4. 陕西科技大学机电工程学院 西安 712000)

摘要: 地面雷达监测是目前对空间碎片最为有效的监测方法之一, 为了保证地面雷达测量精度, 需要对其进行鉴定、校准。校准装置需要具有恒定的外形, 尽可能接近球形, 同时为满足发射时体积包络要求, 亟需一种具有小折展比的可展开球形雷达校准机构。通过对成角杆剪式单元进行分析, 提出了一种成角杆正棱锥剪式单元, 该单元能够实现空间放缩; 通过对空间多面体的研究, 分析了球形多面体的构造方法; 根据所构造的球面构型, 通过模块化的正棱锥可展单元组合的方法构成球形可展机构。总结了一种用于设计球形可展机构的理论方法, 并通过原理样机验证了方法的可行性, 将为我国第一颗雷达校准卫星研制打下良好的基础, 具有很好的应用前景。

关键词: 校准机构; 剪式单元; 可展单元; 球形展开机构

中图分类号: V423

Design Method and Research of Spherical Radar Calibration Mechanism Based on Positive Pyramid Expandable Unit

LI Duanling^{1,2} DONG Kaijie^{1,2} LIU Lijie^{1,2} WANG Xingze³ ZHANG Wencai⁴ GE Zhenghao⁴

(1. College of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876;

2. Beijing Post Intelligent Equipment Engineering Technology Research Center, Beijing 100096;

3. Beijing Space Vehicle General Design Department, Beijing 100094;

4. College of Mechanical & Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 712000)

Abstract: Ground-based radar monitoring is one of the most effective monitoring methods for space debris. In order to ensure the accuracy of ground radar measurement, it needs to be identified and calibrated. The calibration device is usually a constant spherical shape. To meet the requirement of envelope at time of launch, an expandable spherical radar calibration mechanism with a small folding ratio is needed. A kind of angled rod regular pyramid unit is proposed by analyzing the angled scissor unit. Through the study of spatial polyhedron, the construction method of spherical polyhedron is analyzed. According to the constructed the spherical configuration, a spherical scaling mechanism is combined by modular positive pyramid expandable units. This research summarizes a set of theoretical methods for designing spherical scaling mechanisms, and verifies the feasibility of the method through the prototype. It will lay a good foundation for the development of China's first radar calibration satellite and will have a good application prospect.

Key words: calibration mechanism; scissor unit; expandable unit; spherical expansion mechanism

0 前言

从 1957 年前苏联成功地发射了第一颗人造地

球卫星至今, 全球共有 12 个国家具备航天发射能力, 50 多个国家拥有自己的卫星。目前可在地面观测并测定其轨道的太空间物体超过 8 000 个, 但其中只有 6% 是仍在工作的航天器, 其余均为空间碎片。日趋频繁的人类空间活动产生越来越多的空间碎片, 对航天器的危害越来越大。由此, 对空间碎片的系统监测和回收, 扭转空间环境的

* 国家自然科学基金(51775052)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JM-181)、天地互联与融合北京市重点实验室和北京邮电大学博士研究生短期出国(境)学习交流资助项目。20190325 收到初稿, 20191011 收到修改稿

恶化趋势,成为了现今科学界和航天界的一个研究方向^[1-4]。

地面雷达监测是我国目前对空间碎片最为有效的监测方法之一。为了保证雷达测量精度,需要对其进行鉴定、校准。卫星校准法是所有校准方法中拟真度最好、设备校准最充分且同时性价比较好的方法^[4-9]。作为一类特殊的天基空间目标监视设施,雷达校准卫星主要适用于作用距离达数千公里的远程测量雷达系统^[10-11],如图 1 所示。其主要功能包括两个方面:定位系统的校准和雷达反射截面(Radar cross section, RCS)测量的校准。雷达校准卫星属于地面雷达的配套设施,对地面雷达起校准作用,能够提高地面雷达的测量精度,最大限度地发挥地面雷达的设计能力,本身并不执行对空间目标的监视任务。

图 1 雷达校准卫星高频信号校准

美、俄等国已开始广泛应用雷达校准卫星,但我国却尚未开始对其进行系统地研究和应用,目前所有已建成和仍在建的远程雷达仍需依赖他国在轨运行的校准卫星进行鉴定和校准。伴随我国地基脉冲雷达远程跟踪、精密测量性能不断加强,新研地基空间监视雷达产生鉴定、校准的迫切需求。为结束一直以来只能依赖他国雷达校准卫星的受限局面,开展地基脉冲测量雷达的校准卫星的系统研究,研制雷达校准技术验证卫星,具有重要的工程价值和实际意义。

地面雷达进行测量的校准依据是雷达校准卫星的恒定外形,即其卫星平台外形应尽可能接近球形。美国曾多次将多种尺寸规格的金属圆球送入近地轨道,对地面雷达和光学观测望远镜进行校准,如 1962 年至 1971 年之间发射的 Calsphere 系列、Lincoln Calibration Sphere 系列及 Gridsphere 系列等,均为球形^[12],如图 2 所示。

图 2 球形卫星

本文将研制的球形雷达校准机构收缩比可达 1:10,其最大展开状态直径可达 10 m,在拥有较小重量的同时节省大量的安装空间,如图 3 所示。开放性的框架设计可使卫星在轨运行时只受到较小的空气阻力,从而延长在轨寿命^[7]。球形展开机构的众多顶点安装有角形反射器,大部分顶点都分散在球体的球面上,这样不仅能够实现多方位信号接收及反射,并且能提供卫星本体精确的方位和自转速率。由于具有上述特点和优势,研究及验证基于多面体的空间球形可展机构的需求十分迫切。

图 3 球形雷达校准机构

本文所研究的空间球形可展机构的研究基础是成角杆剪式单元,由美国工程师 HOBERMAN 对传统剪式单元进行改进而来^[13]。关于成角杆剪式单元国内外学者均对其做了广泛深入的研究。国外的研究主要有:YOU 等^[14]对两种不同类型的成角杆单元进行了研究,对多个成角杆单元构造径向放缩机构的方式进行了分析;PATEL 等^[15]提出了基于成角杆单元的平面径向放缩机构的运动学理论,对多种径向可展机构的性质进行了研究,为径向放缩机构的设计提供了理论依据;KIPER 等^[16]分别对平面多边形径向放缩机构和空间多面体放缩机构进行研究,为空间放缩机构的设计提供了一种新的思路。国内的研究主要有:李端玲等^[17]提出了 HOBERMAN 球的自由度分析的基本理论,由分析得到此种机构的自由度及结构特点;WEI 等^[18]提出一种应用平行四边形组成可展立方体并且可扩展的空间可展机构;廖启征等^[19-20]提出一种基于成角杆剪式单元的平面图形放缩机构的构造方法,能够实现任意平面图形的放缩;魏国武等^[21]研究了 HOBERMAN 的变色球机构,并对其几何学、拓扑学及运动学进行分析;孙远涛等通过旋量理论对剪式单元可展机构进行了运动学及动力学分析等。以上这些研究分析了成角

杆单元及以 HOBBERMAN 球为代表的各类成角杆单元所组成的放缩机构的特性, 以及平面和空间可展机构的构造方法, 但是所涉及的构造方法中, 缺乏基于成角杆单元以球形为代表的空间多面体模块化设计方法。

本文通过对成角杆剪式单元进行分析, 提出了一种成角杆正棱锥剪式单元, 该单元能够实现空间放缩; 通过对空间多面体的研究, 分析了球形多面体的构造方法, 并根据所构造的球面构型, 通过模块化的正棱锥可展单元组合成球形可展机构; 本文总结了一种用于设计球形可展机构的理论方法, 并通过原理样机验证了方法的可行性, 将为我国第一颗雷达校准卫星研制打下一个良好的基础, 具有很好的应用前景。

1 正棱锥可展单元

剪式可展机构, 从几何学角度来考虑, 其基本原理是每对连杆通过一个柱铰相连, 每对连杆仅能绕垂直于该对连杆所在平面的轴线作相对转动, 而其他自由度完全受到了限制; 剪式单元间的连接是通过单元端部节点铰接实现。

目前, 根据剪式单元杆件形状与铰点位置, 可将剪式基本单元分为三类: 当连接两根连杆的柱铰位于杆件的中部时, 形成的是平行剪式单元, 如图 4a 所示; 当连接两根连杆的柱铰不是位于杆件的中部时, 形成的是极线剪式单元, 如图 4b 所示。这两种剪式单元常被用于折叠网架或者折叠网壳中, 以 GANTES 为代表的学者对这类结构进行了详细的分析。美国工程师 HOBBERMAN^[13]对一组剪式单元进行改进, 提出了成角杆剪式单元, 它是由相等的两根成角杆单元通过剪式铰链在中部连接, 当两个成角杆单元绕着中间的剪式铰转动时, 杆端的夹角保持不变, 如图 4c 所示。

(a) 平行剪式单元 (b) 极线剪式单元 (c) 成角杆剪式单元

图 4 剪式单元示意图

本节以成角杆剪式单元为基础, 对成角杆剪式单元进行参数分析, 并将多个成角杆剪式单元组合成为正棱锥可展模块, 对其特征参数进行分析。

1.1 成角杆剪式单元参数分析

对成角杆单元参数进行分析, 主要分析杆件

长度, 杆件折角, 两杆件夹角等基本参数对成角杆单元所构成的等腰三角形顶角、腰长和底边之间的关系。

如图 5 所示, 成角杆剪式单元由成角杆 aeb 和 ced 组成, 二者通过转动副 e 连接, o 点为杆件 a 、 d 连线与 b 、 c 的连线的交点。设杆件 $ae=ce=be=de=l$, $\angle aeb=\angle ced=\alpha$, $\angle bed=\beta$, 两杆夹角为 α , 讨论 $a(c)$ 和 $d(b)$ 的位置情况与剪式单元展开角度 α 的关系, 即 $\gamma(\angle bod)$ 、 oa 和 od 与 α 的关系。建立如图所示直角坐标系。

图 5 成角杆剪式单元

易知 $\triangle aed$ 与 $\triangle ceb$ 全等, 过 e 分别向 ob 和 od 作垂线

$$\because ae=ce=be=de$$

$$\therefore \triangle ged=\triangle hec$$

$$\therefore \angle ged=\angle hec$$

又

$$\because \angle ced=\angle ceg+\angle ged \quad \angle geh=\angle ceg+\angle hec$$

$$\therefore \angle ced=\angle geh=\alpha$$

$$\therefore \angle \gamma=\pi-\alpha \quad \angle aeo=\pi-(\alpha+\beta)/2$$

根据成角杆剪式单元各角度关系, 设成角杆单元构成的三角形底边长 l_s , 易求得

$$l_s = bd = 2 / \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (1)$$

$$ac = 2 / \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \quad (2)$$

过 a 作 bd 垂线于 i , 则

$$ai = -l \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) + l \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (3)$$

在 $\triangle aid$ 中

$$ad \frac{ai}{\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{-l \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) + l \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (4)$$

设成角杆单元构成的三角形腰长 l_e , 则

$$l_e = od = \frac{l \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (5)$$

折展比是可展机构的一个重要指标, 图 6 所示为成角杆剪式单元的展开过程, 以 l_e 作为展开程度的衡量标准, 状态 1 为完全收拢状态, 状态 3 为最大展开状态, 其折展比为

$$\chi = \frac{l_{e1}}{l_{e3}} = \sin \alpha \quad (6)$$

图 6 成角杆单元展开过程

1.2 多级剪式单元参数分析

当顶角 γ 一定时, 根据式(6)可知, 单个成角杆单元折展比确定。为满足可展机构不同折展比的要求, 将成角杆单元在 e 点处断开, 铰点分别为 p 、 q , 在 p 、 q 之间增加两组平行四边形机构, 用于放大两点距离, 如图 7 虚线框所示。

图 7 多级剪式单元构成

断开的成角杆单元与平行四边形的两边形成成角杆-直杆铰接单元(Angulated-straight, AS), 如图 8 所示, 原成角杆单元则变为三级剪式单元, 如图 9 所示。

图 8 成角杆-直杆铰接单元

图 9 三级剪式单元

以三级剪式单元推倒 n 级剪式单元构成的等腰三角形顶角不变, 底边 L_s 、腰长 L_e 分别为

$$L_s = 2nl \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (7)$$

$$L_e = \frac{L_s}{\sin \frac{\gamma}{2}} \frac{2nl \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad (8)$$

折展比的大小可视为收缩至最小时与伸展至最大时的棱边长度之比, 则有以下情况。

当 $\beta=0^\circ$ 时

$$b_1'd_1' = 2l \sin \alpha \quad (9)$$

当 $\beta=180^\circ$ 时

$$b_3'd_3' = 6l \quad (10)$$

则三级剪式单元折展比为

$$\chi = \frac{\sin \alpha}{3} \quad (11)$$

推广到一般情况, 则单元的折展比为

$$\chi = \frac{\sin \alpha}{n} \quad (12)$$

由此可见, 采用此种方法中, 剪式单元随着单元级数的增加, 所构成的等腰三角形被放大了 n 倍, 折展比变小为原来的 $1/n$, 因此, 该方法是一种很好的减小和优化折展比的方式。

1.3 正棱锥可展单元模块

将 n 个成角杆剪式单元相连成环, 其连接点所在直线为正 n 棱锥, 将这种由 n 个成角杆单元组成的可展单元模块称为成角杆正 n 棱锥可展单元, 如图 10 所示, 下文简称正 n 棱锥可展单元。表 1 列出了四种正棱锥可展单元的构型。

图 10 正五棱锥可展单元

表 1 正棱锥可展模块

类型	正棱锥可展模块	展收包络	正棱锥
三棱锥单元			
四棱锥单元			
五棱锥单元			
六棱锥单元			

以图 10 正五棱锥单元为例,分析正棱锥自由度。将五棱锥可展单元沿虚线处铰点展开为平面,其运动链如图 11 所示。

图 11 正五棱锥单元展开运动链

将多级剪式单元简化为一级剪式单元,则图 11 所示的运动链可简化为图 12 所示运动链。

图 12 正五棱锥单元展开简化运动链

如图 12 所示,简化后的正五棱锥展开运动链共有 25 个转动副,20 个构件,应用回路连接矩阵(Loop connectivity matrix, LCM)^[23]对该多回路机构进行自由度分析。简化后运动链拓扑图如图 13 所示。机构由 5 个独立回路构成,其回路连接矩阵表示为

$$\mathbf{R}_{LCM} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

图 13 正五棱锥单元展开简化运动链对应拓扑图

根据回路连接矩阵可计算机机构的自由度为

$$M = 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 = 1 \quad (14)$$

由此可知,闭环形式的正五棱锥可展单元自由度

为 1。

由成角杆单元构成的等腰三角形与正棱锥性质可知,正棱锥可展模块在展开收拢过程中,形状不变,机构围绕着正棱锥顶点,进行放缩变化。

根据第 1.2 节可知,所构成的正 n 棱锥棱长为 l_e ,底面为边长 l_s 的正 n 边形。此外,正 n 棱锥相邻两侧面二面角也是重要的参数。对上述 n 棱锥的二面角进行计算分析如下。

n 棱锥底面为正 n 边形,为不失一般性,以正五棱锥为例,如图 14 所示。取任意相邻三点 A 、 B 、 C ,则 $\triangle ABC$ 为等腰三角形,作顶点 O 到边 AB 、 AC 的垂线与 D 、 E , D 和 E 分别为 AB 和 BC 的中点,连接 D 、 E ,过 D 、 E 作 OB 边垂线交 OB 于 F ,则 $\angle DFE$ 即为 n 棱锥相邻两侧面的二面角,其中棱长 l_e ,底边长 l_s ,侧面顶角为 γ 。

图 14 五棱锥模型

根据几何关系可求得

$$\begin{aligned} OD = OE &= l_e \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \\ \angle ABC &= \frac{n-2}{n}\pi \\ DE &= l_s \sin\left(\frac{n-2}{2n}\pi\right) \\ DF = FE &= \frac{1}{2}l_s \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

则在 $\triangle DEF$ 中,由余弦定理可得

$$\cos \lambda = \frac{DF^2 + FE^2 - DE^2}{2 \cdot DF \cdot FE} = 1 - \frac{2 \sin^2\left(\frac{n-2}{2n}\pi\right)}{\cos^2 \frac{\gamma}{2}} \quad (16)$$

正 n 棱锥两侧面二面角为

$$\lambda = \arccos \left[1 - \frac{2 \sin^2\left(\frac{n-2}{2n}\pi\right)}{\cos^2 \frac{\gamma}{2}} \right] \quad (17)$$

$$\lambda \in \left[\frac{n-2}{n} \pi, \pi \right)$$

2 构造空间球形可展机构

空间球形可展机构的拓扑结构是通过正多面体按照一定的构造方法所获得。因此,研究正多面体的几何特征、拓扑结构及构造方法是研究空间球形可展机构的必要基础。

2.1 构造空间多面体

正多面体是最简单却又最具对称性的立体图形,结构稳定,外形美观。正多面体的结构特征和几何特征为:每个面都是全等的正多边形;汇聚于每个顶点的棱和面都相同;每个面都在所在平面一侧,为凸多面体;各个多面角都是全等的。

设简单多面体的顶点数为 V , 面数为 F , 棱数为 E , 由欧拉公式可得三者之间有关系: $V+F-E=2$ 。由欧拉公式可推导出正多面体数目不会多于五种,如表 2、3 所示。

表 2 正多面体欧拉参数

正多面体	顶点数 V	棱数 E	面数 F	面的边数	$V-E+F$
4	4	6	4	3	2
6	8	12	6	4	2
8	6	12	8	3	2
20	12	30	20	3	2

表 3 五种正多面体

正四面体	正六面体	正八面体	正十二面体	正二十面体

多面体的构造方法对空间球形可展机构的设计有很多启发。一般多面体都是由如表 3 所示的五种正多面体构造而成,主要的构造方法有两种:加面构造法和切割构造法。

加面构造法:在多面体的棱添加适当的菱形构造菱形多面体。例如:在正四面体或正六面体的棱上添加适当的菱形可得菱形面体,如图 15 所示。

切割构造法:切掉已知多面体的某些部分构造新的多面体。例如正二十面体沿棱的分点切掉每个角得到截顶二十面体,如图 16 所示。

对多面体经过多步加面和切割可以得到顶点数、面数和棱数更多的一类多面体,即类似球形的多面体。基于截顶二十面体的类似球形多面体,化学中被称为“巴基球”或“富勒烯”。最常见的富勒烯结构是由 60 个顶点,32 个面组成的,32 个面中有 20 个六边形和 12 个五边形。由欧拉公式 $V+F-$

图 15 加面构造法构造菱形 30 面体

图 16 切割构造法构造截顶二十面体

$E=2$ 可知 60 顶点的富勒烯有 90 条棱。六边形和五边形连接构成足球状空心对称结构,因此也被称作足球烯。

2.2 构造球形多面体

空间多面体可以分割为多个由其正多边形与正多面体外接球的球心所构成的棱锥。如图 17 所示正四面体,可分割为 4 个正三棱锥,正六面体可分割为 6 个正四棱锥等。

图 17 正四面体分割

组成空间多面体的 n 个棱锥同时需满足:必有 k 个棱锥的棱线与多面体任意顶点到体心的连线重合, k 为该顶点的度

$$\sum_{i=1}^k \lambda_i = 2\pi \quad (18)$$

式中, k 为顶点的度。

根据式(15)可得,各空间正多面体组成棱锥、数量及其几何参数如表 4 所示。

以截顶三十二面体为例的球形多面体,由 12 个正五棱锥和 20 个正六棱锥组成,如图 18 所示。

截顶三十二面体中每个顶点度为 3,且每个顶点处,均为一个五棱锥与两个相同的六棱锥相邻,根据式(15)和式(16)可求得五棱锥二面角为 111.38° ,

六棱锥二面角为 124.31° , 如图 19 所示。

表 4 正多面体组合

名称	图形	组成 棱锥	棱锥 数量	侧面二 面角/(°)	侧面顶 角/(°)
正四面体		正三棱锥	5	120	109.47
正六面体		正四棱锥	6	120	70.52
正八面体		正三棱锥	8	90	90
正十二面体		正五棱锥	12	120	41.81
正二十面体		正三棱锥	20	72	63.43

图 18 构造球形多面体

图 19 球形可展机构参数分析

3 可展球形雷达校准机构设计

可展球形雷达校准机构设计方法及流程如下。

(1) 确定球形雷达校准机构等效几何构型。

根据实际需求确定拟合球形的空间多面体类型。所选用的空间多面体顶点及组成平面越多，其形状越接近于球形，与之对应的是机构复杂程度的增加。因此，应根据实际需求合理选择球形雷达校准机构的几何构型。

本节将以截顶三十二面体为例，构造球形可展机构，并加以详细说明。该机构是一种放射性单自由度可展机构，李端玲等已在“一种变胞机构—魔术花球自由度分析”中运用多种方法证明了此类机构单自由度特性^[17]。机构构型是由 12 个五边形面及 20 个六边形面围成一个 90 条棱边、60 个顶点的球形线框，其具有良好的结构刚度、位置精度、收纳率等特点。这种机构作为一种自支撑结构，每个顶点通过有特定角度的铰链以剪式单元的形式连接，以保证这些顶点都可以朝球体的中心收缩，在展开或收拢时能保持几何曲率的同步特性。

(2) 确定剪式单元基本尺寸。

根据球形雷达构型骨架展开半径与收拢半径，可计算出机构应采用的折展比，根据式(6)可求得成角杆剪式单元折角 α 及所构成的等腰三角形顶角角度 γ 。同时，连接多面体顶点及其几何中心，可获得多个正棱锥，如图 13 所示。每个正棱锥底面边长应与多级剪式单元完全展开长度一致，由 $l_s = n \cdot l$ 可在设定底边剪式单元级数后计算获得剪式单元杆件长度。如图 20 所示，设定杆件厚度 T 与杆件宽度 D ，则可获得成角杆与直杆基本剪式单元。

图 20 剪式单元直杆

(3) 构造多级剪式单元。

将成角杆与直杆按照图 21 所示连接，这种连接方式可使剪式单元完全展开与收拢，如图 22 所示。在多级剪式单元中对称安装扭转弹簧，用于为机构展开提供驱动力。随着机构的运动，多级剪式机构会在完全展开与完全收拢状态出现奇异位置，这是应该要避免的，同时为防止各杆件之间的碰撞干涉，通过增加限位螺栓来解决这个问题，限位螺钉位置如图 22 所示。

图 21 构建多级剪式单元

(4) 构造正棱锥可展单元。

根据球形雷达校准机构所需正棱锥构型，将多级剪式单元通过特定角度的分支铰链连接成环，形

图 22 多级剪式单元完全展开与收拢

正棱锥可展单元,如图 23a 所示,正五棱锥可展机构以 O 为原点呈放射状展开,其半收拢及完全展开模型如图 23b、23c 所示。分支铰链各分支夹角根据所推导的正棱锥二面角公式(17)求得,是多级剪式单元能否成环连接的关键。分支铰链设计尺寸与剪式单元对应,使剪式单元末端铰点轴线能够交于一点,且该点位于分支铰链所对应的正棱锥棱边上,同时,与分支铰链相连的各多级剪式单元中心面交线也与该棱边重合,如图 24 三分支铰链所示。这样能够保证在设计过程中,杆件与铰链截面尺寸不对模型骨架基本尺寸产生影响,使几何推导结果具有普遍性。

(a) 正五棱锥可展单元模型

(b) 半收拢状态 (c) 展开状态
图 23 正五棱锥可展单元

图 24 三分支铰链

(5) 多模块拼接。

将组装完成的正五棱锥可展单元与正六棱锥可展单元拼接,公共棱边可在组装正棱锥可展单元过程中去除。如图 25 所示,通过三分支铰链将两个正六棱锥可展单元与一个正五棱锥可展单元连接。图 26 为球形可展机构多模块拼装过程,将 12 个正五棱锥可展单元和 20 个正六棱锥可展单元依次拼接,即可获得球形可展机构。

图 25 三模块连接

图 26 球形可展机构拼装步骤示意图

本雷达校准机构原理样机中由 12 个正五棱锥可展模块和 20 个正六棱锥可展模块组成,有 60 个外侧顶点,60 个内侧顶点,并通过 540 个铰链以剪刀机构的形式连接,收拢直径为 800 mm,完全展开直径为 2052 mm,如图 27 所示。每个顶点都沿其与球心连线所在射线朝球体的中心缩放,样机展开过程如图 28 所示。

展收过程中,由于铰链数目较多,球形可展机构刚度较弱,这也避免了由于加工误差导致该过约束机构的展开过程中的卡死;展开到位后,铰链每个剪刀铰在扭矩弹簧的作用下会变成趋近于线形结

图 27 截顶三十二面体可展球形雷达校准机构

图 28 球形可展机构展开过程示意

构,球形可展机构的整体结构刚度增强。发射时,处于收拢状态的校准球形机构被压紧在整流罩内,入轨后压紧释放装置解锁,校准机构被放置在预定轨道上,校准机构在扭簧驱动下缓慢展开到位,进入工作状态。

4 结论

(1) 本文根据可展球形雷达校准机构的功能要求,通过对传统成角杆剪式单元进行分析,提出了一种基于成角杆剪式单元的正棱锥可展单元,该单元能够实现空间放缩,并对其自由度进行了分析;推导获得了正棱锥可展单元的关键几何参数与成角杆剪式单元的关系。

(2) 通过对空间多面体的研究,分析了空间球形可展机构的拓扑结构是通过正多面体按照一定的构造方法所获得的,并研究了正多面体的几何特征、拓扑结构及构造方法,为研究空间球形可展机构提供了必要基础。

(3) 根据所构造的截顶三十二面体球面构型,本文分析了球形可展机构的关键几何参数,并通

过模块化的正五棱锥和正六棱锥可展单元组合,构成截顶三十二面体球形可展机构;总结了一种用于设计球形可展机构的理论方法,并通过设计原理样机验证了方法的可行性,这将为我国第一颗雷达校准卫星研制打下一个良好的基础,具有很好的应用前景。

参考文献

- [1] 李春来, 欧阳自远, 都亨. 空间碎片与空间环境[J]. 第四纪研究, 2002, 22(6): 540-551.
LI Chunlai, OUYANG Ziyuan, DU Heng. Space debris and space environment[J]. Quaternary Sciences, 2002, 22(6): 540-551.
- [2] 袁伟明, 曾令旗, 张波, 等. 空间碎片监测技术研究[J]. 现代雷达, 2012, 34(12): 16-19.
YUAN Weiming, ZENG Lingqi, ZHANG Bo, et al. A study on the surveillance of space debris[J]. Modern Radar, 2012, 34(12): 16-19.
- [3] 李怡勇, 沈怀荣, 李智. 空间碎片环境危害及其对策[J]. 导弹与航天运载技术, 2008, 298(6): 31-35.
LI Yiyong, SHEN Huairong, LI Zhi. Space debris's hazard and countermeasures[J]. Missile and Space Vehicle, 2008, 298(6): 31-35.
- [4] Committee on Space Debris. Orbit al Debris: A technical assessments[M]. Washington D. C.: National Academy Press, 1995.
- [5] 黄学祥. 利用近地卫星鉴定航天测控设备外测精度的方法研究[J]. 飞行器测控学报, 2001, 20(1): 84-90.
HUANG Xuexiang. Study on the method of using the near-Earth satellite to identify the external measurement accuracy of aerospace measurement and control equipment[J]. Journal of Aircraft Measurement and Control, 2001, 20(1): 84-90.
- [6] 张延鑫, 武红霞. 使用 SLR 卫星实现雷达坐标测量的标定和精度鉴定[C]// 2006 年航天测控技术研讨会, 2006年9月, 西宁. 北京: 中国宇航学会, 2006: 345-348.
ZHANG Yanxin, WU Hongxia. Calibration and accuracy identification of radar coordinate measurement using SLR satellite[C]// Proceedings of the Aerospace Measurement and Control Technology Symposium, Sep., 2006, Xining. Beijing: Chinese Society of Astronautics, 2006: 345-348.
- [7] 李贺. 基于剪式单元的高精度球形展开雷达校准机构的设计与研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
LI He. Design and research of spherical deployable mechanism for high precise radar calibration based on the scissors unit[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [8] LIU Zhiqian, QIU Hui, LI Xiao, et al. Review of large spacecraft deployable membrane antenna structures[J].

- Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(6): 1447-1459.
- [9] FOSTER J L, BENBROOK J R, STANSBERRY E G. Detection of small radar cross-section orbital debris with the haystack radar[J]. Advances in Space Research, 2005(35): 1210-1213.
- [10] SETTECEN T J, STANSBERRY E G, MATNEYM J. Haystack measurements of the orbital debris environment [J]. Advances Space Research, 1999, 23(1): 13-22.
- [11] FENNER R G, BRODERICK R F. Spaceborne-radar applications[M]. New York: McCraw-Hill Book Company, 1970.
- [12] DAVIS M E. Technology challenges in affordable space based radar[C]// The Record of the IEEE International Radar Conference, May 12-12, 2000, Alexandria, VA. New York: IEEE Press, 2000: 18-23.
- [13] HOBERMAN C. Radial expansion/retraction truss structures: US, 05024031[P]. 1991-06-18.
- [14] YOU Z, PELLEGRINO S. Foldable bar structures[J]. International Journal of Solids&Structures, 1997, 34(15): 1825-1847.
- [15] PATEL J, ANARRTHASURES G K. A kinematic theory for radially foldable planar linkages[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(18): 6279-6298.
- [16] KIPER G, SÖYLEMEZ E, KIŞISEL A U Ö. A family of deployable polygons and polyhedra[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(5): 627-640.
- [17] 李端玲, 戴建生, 张启先, 等. 一种变胞机构——魔术花球的自由度分析[J]. 机械工程学报, 2002, 38(9): 12-16.
- LI Duanling, DAI Jiansheng, ZHANG Qixian. Mobility of a kind of metamorphic mechanism — magic ball[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(9): 12-16.
- [18] WEI X Z, YAO Yanan, TIAN Y B. A new method of creating expandable structure for spatial objects[J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(12): 1813-1818.
- [19] 廖启征, 李端玲. 平面图形放缩机构 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 140-143.
- LIAO Qizheng, LI Duanling. Mechanisms of scaling planar graphs[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 140-143.
- [20] 张英, 魏世民, 李端玲, 等. 平面并联机构正运动学分析的几何建模和免消元计算[J]. 机械工程学报, 2018, 54(19): 27-33.
- ZHANG Ying, WEI Shimin, LI Duanling, et al. Geometric modeling and free-elimination computing method for the forward kinematics analysis of planar parallel manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(19): 27-33.
- [21] WEI Guowu, DING Xilun, DAI Jiansheng. Mobility and geometric analysis of the Hoberman switch-pitch ball and its variant[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2010(2): 031010.1-031010.9.
- [22] SUN Yuantao, WANG Sanmin, JAMES K M, et al. Kinematics and dynamics of deployable structures with scissor-like-elements based on screw theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 28(4): 655-662.
- [23] LIU T, YU C H. Identification and classification of multi-degree-of-freedom and multi-loop mechanisms[J]. Journal of Mechanical Design, 1995, 117(3): 104-111.
-
- 作者简介: 李端玲(通信作者), 女, 1974 年出生, 博士研究生导师。主要研究方向为机构学及机器人学。
E-mail: liduanling@126.com
董凯捷(通信作者), 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为空间可展机构。
E-mail: dongkaijiedj@163.com