基于Bennett机构的柱面拟合可展机构设计及分析

杨佳鑫,吕胜男,丁希仑

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京100191)

摘 要: 可展机构既可展开至指定构型用于工作,也可收拢以便于运输,在航天和建筑等领域具有广阔的应用前景。 本文提出并设计了一种以Bennett过约束机构为基本组成单元的可展机构,该机构的工作形面可拟合柱面,且具有全部杆件 可紧凑折叠成一束的收拢构型。对Bennett机构进行了几何描述,并分析其运动学特性;利用剪式机构实现了单元机构的组 合连接,保证了设计关键点准确位于目标参数曲面上,计算了所设计的可展机构的展收比;对机构的运动学及动力学性能 进行了仿真分析,验证了所提出的设计,为后续的样机研制提供了理论依据。验证结果表明:本文提出的Bennett过约束机 构单元组合简单、形面拟合精度高、刚度大,能够很好地应用于该圆柱面天线的设计。该研究对航天可展机构的设计分析 具有参考价值。

关键词: 可展机构; Bennett机构; 柱面拟合; 运动学分析

中图分类号: V11 文献标识码: A 文章编号: 2095-7777(2017)04-0340-06 **DOI:**10.15982/j.issn.2095-7777.2017.04.005

引用格式:杨佳鑫,吕胜男,丁希仑.基于Bennett机构的柱面拟合可展机构设计及分析[J].深空探测学报,2017,4(4):340-345.

Reference format: Yang J X, Lv S N, Ding X L. Design and analysis of approximate cylindrical deployable mechanism with bennett linkages[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4 (4) : 340-345.

0 引 言

在航天技术中,由于运载工具有效载荷舱几何尺 寸的限制,卫星和空间站等航天器广泛采用可展机 构,通过改变机构的物理形状和尺寸,以满足实际需 求。与一般机构相比,可展机构具备操作简单快捷、 完全收拢状态占用空间小、可重复利用、便于运输和 储存等优点¹¹。随着航空宇航事业的深入发展,空间可 展机构正朝着大口径、高精度、轻质化方向发展,同 时也要求天线结构具有较大的收纳率和优良的展开性 能。

目前,对于可展机构的研究主要集中在机构的运 动学、动力学分析上,而对可展机构单元本身的设计 尤其是空间可展机构单元的设计研究甚少。现有的可 展机构大多由单元机构组合构成,杆件可紧凑收拢并 展开至不同形状,由单元机构组合构成的大型空间可 展机构的典型代表有:ETS-VIII卫星采用六边形模 块,CSPDA环形桁架式展开天线将内外两层剪单元相 连,AstroMesh天线则利用四边形结构单元对角伸缩的 特点实现展开与收拢^[24]。 为使可展机构获得更高的强度和展收比,在其设 计中广泛应用了空间过约束单元机构。O'Brian和Phelan 基于Sarrus单元机构设计了一种环形展收机构^[4], Chen 等探讨了Bricard机构和Bennett机构在可展机构中的应 用^[5]。Lu等将第三类Bricard机构作为基本单元提出了 一种新型可展机构^[6]。

近年来,可展柱面结构作为航天器基础部件得到 越来越多的应用。柱面形面具有方向性强、增益高, 易于光束自动扫描等特点,已经成为空间可展天线形 面的重要发展方向。Bennett机构是经典的过约束空间 四杆机构,本文提出一种以其作为基本组成单元的单 自由度可展机构。该机构通过剪式机构连接Bennett机 构,保证了可展机构具有全部杆件可紧凑折叠成一束 的收拢构型,且其设计关键点可准确落在目标柱面上。

1 Bennett机构运动学分析

1.1 Bennett机构及其展收条件

Bennett机构是唯一含有4个转动副的单回路空间过 约束连杆机构。一般情况下,Bennett机构各轴线之间 既不相交也不平行。保证该机构实现单自由度运动的

收稿日期: 2017-07-24 修回日期: 2017-08-04

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51635002);青年科学基金资助项目(51605011)

几何条件是:相对的两杆件长度相等,分别为a,b; 相对的转动副轴线转角相等,分别为a, β ;杆长与转 角的关系满足 $b\sin\alpha = a\sin\beta$;各转轴沿转动副轴线方 向的偏移为零^[5]。各变量 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 随机构运动而 变化,并始终满足

$$\theta_1 + \theta_3 = 2\pi$$

$$\theta_2 + \theta_4 = 2\pi$$

$$\tan \frac{\theta_1}{2} \tan \frac{\theta_2}{2} = \frac{\sin \frac{1}{2}(\beta + \alpha)}{\sin \frac{1}{2}(\beta - \alpha)}$$
(1)

上述条件保证了Bennett机构的运动仅存在一个独 立变量,图1给出了Bennett机构的示意图。



图 1 Bennett机构^[7] Fig. 1 The Bennett linkage^[7]

Bennett机构是由4根杆件通过4个转动副首尾相连 形成的单闭环结构,全部转动轴线均位于一个双曲面 的同族母线上。由单叶双曲面的几何特性可知,同族 的任意两条母线必为异面直线,而异族的两条母线必 共面,因此双曲面的另一族母线中的任意直线均与 Bennett机构的4条轴线相交。取该直线为机构杆件的构 造线,则该构型下机构各杆件收拢成为一束。图2所 示为一Bennett机构所在的单叶双曲面的两个正交视图。



图 2 单叶双曲面正交视图 Fig. 2 Orthogonal view of hyperboloid structure

遵循D-H坐标系所定义的机构连杆为两相邻轴线 的公垂线。在实际应用中,机构杆件的几何形状对其 运动不会产生影响,但是会在较大程度上改变机构的 几何外形。

为了得到更加紧凑的收拢构型,本研究中采用各 连杆长度和运动副轴线转角均相等的Bennett机构作为 组成单元,即a = b, $a = \beta$,如图 3所示。E和F分别为 $M_1M_3 和 M_2M_4$ 的中点,连接E、F,可知EF为 M_1M_3 和 M_2M_4 的公垂线。 ρ_i 代表第i个转动副轴线,由 ρ_1 和 ρ_3 形 成的平面 σ_1 始终与由 ρ_2 和 ρ_4 形成的平面 σ_2 垂直。此外, 位于 σ_1 面上的一对旋转轴关于 σ_2 对称,反之亦然,如 图 3所示。



图 3 Bennett单元机构 Fig. 3 The Bennett unit-mechanism

上述Bennett机构收拢后各杆件在一条直线上重合,而在实际应用中,杆件本身存在不可忽略的厚

度,连杆机构的几何外形随着机构的展开运动发生变

化,下面将对Bennett机构的进行位置分析。

1.2 位置分析

考虑到Bennett机构各杆件长度相同,存在两个相互 垂直的对称平面 σ_1 和 σ_2 , M_1 与 M_3 关于 σ_2 面对称, M_2 与 M_4 关于 σ_1 面对称。基于此,对机构展收过程进行位置分析。

理想的收拢运动即随着机构的运动,转动关节1和 关节3靠近的同时,关节2和关节4也逐渐靠近。将4个 杆件相互平行且彼此之间紧密相邻的构型定义为机构 完全收拢构型。在4个转动关节 ρ_i 上取两相邻杆件的交 点 M_i ($i = 1, \dots, 4$),当完全收拢时 $M_1 = M_3$ 重合, $M_2 = M_4$ 重合,且 M_i 均位于 $\sigma_1 = \sigma_2$ 的交线上。

设机构的完全收拢构型为该机构的初始位形,此 时 θ_i =0。将输入运动作用于转动关节 ρ_1 上,即输入变 量为 θ_1 。如图 4所示,建立固定参考系*Oxyz*,坐标原点 与两杆件交点重合, M_1 =*O*。方向向量定义如下:*y*轴 沿着 ρ_1 方向,*x*轴垂直于 σ_1 ,*Oyz*始终与 σ_1 重合。那么, 给定以下几何参数——杆件长度*l*,关节角度 γ,δ ,可 得到一个确定的Bennett结构单元。

对于一个确定的机构,给定输入运动 θ_1 ,则 M_2 在 坐标系Oxyz下的坐标可表示为

$$M_2 = \left(l\sin\gamma\sin\frac{\theta_1}{2}, l\cos\gamma, l\sin\gamma\cos\frac{\theta_1}{2} \right)$$
(2)





通过位置分析可以得出M2与M4之间的距离

$$|M_2 M_4| = 2l\sin\gamma\sin\frac{\theta_1}{2} \tag{3}$$

由式(3)可知, δ 对 $|M_2M_4|$ 无影响。

若将Bennett机构正交投影于Oyz面,即 σ_1 面上, M_2 与 M_4 的投影点将重合于一点 M_0 ,如图 5所示。



图 5 Bennett机构在Oyz面上的投影 Fig. 5 Projection of the Bennett linkage on Oyz

 M_0 和 M_1 之间的距离是关于I、 γ 和 θ_1 的函数

$$|M_1 M_0| = l \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \sin^2 \frac{\theta_1}{2}} \tag{4}$$

 M_0M_1 和 M_0M_3 之间的夹角 $\varphi = \angle M_1M_0M_3$ 可通过下 式获得

$$\varphi = \arccos \frac{\overline{M_1 M_0 \cdot \overline{M_1 M_3}}}{\left| \overline{M_1 M_0} \right| \cdot \left| \overline{M_1 M_0} \right|} \tag{5}$$

2 可展收圆柱面天线结构设计

2.1 Bennett机构的组合连接

Bennett机构的单元组合连接具有以下4个特征:通

过剪式机构实现单元机构的组合连接; 连接获得的可 展机构具有任意的长宽; 机构的工作形面可拟合柱面, 且具有全部杆件可紧凑折叠成一束的收拢构型; 机构 具有单自由度。

关节连接设计是保证Bennett单元机构能够同步展 开和收拢以及实现单元连接的关键。综合考虑关节尺 寸、杆件长度、连接形式等因素,对连接关节进行了 设计,如图 6所示。



图 6 剪式机构连接的两个Bennett机构 Fig. 6 Two Bennett linkages connect with scissors joints

1)同一Bennett机构内的转动副*M*₂和*M*₄的关节连接设计采用基本转动副,通过轴销连接,可实现杆件的平稳转动。考虑完全收拢状态下机构运动可能存在奇异,在轴销处安装扭簧以提供驱动力。

2)两个Bennett机构之间利用剪式机构将它们可动 地连接在一起。两组Bennett机构分别于*M*₁、*M*₃处铰 接,通过剪式机构相邻连杆可运动至相互平行的收拢 状态。具有不同几何参数的多个Bennett机构通过剪式 机构连接可保证组合机构仍具有单自由度。如图 6所 示,杆件1和杆件2通过轴销连接在一起,在运动过程 中始终保持为一个整体;连杆3与连杆4通过轴套连 接,在运动个过程中也是一个整体。

由位置分析可知, δ 对 $|M_2M_4|$ 不产生影响。将若干 具有相同I、y的Bennett单元机构顺次连接,使各Bennett 机构的 σ_1 面重合,当单元机构的 δ 发生变化时,机构杆 件在Oyz面内的投影角度会变化,但 $|M_2M_4|$ 相同。

两种不同大小的Bennett机构组成的网状结构完全 展开后可形成圆柱面。图 7所示为Bennett机构的组网 示意图,在所组成的机构网络中,位于同一行的Bennett 机构均具有相同的δ,而位于同一列的Bennett机构则具 有相同的γ。

2.2 天线的背架设计

在拟合目标曲面的过程中,大Bennett机构中所有 设计关键点均落在所拟合的圆柱面上,而小Bennett机 构只有两个点位于曲面上。

用分段法得到圆柱面展开天线的关键设计点位

343

置,如图 8所示。根据运动学计算,获得了可展机构 中大Bennett机构的几何参数,l=377.6, γ =60°, δ =139.076,小Bennett机构的几何参数l=110.06, γ =60°, δ =59.281。基于这两种Bennett机构,建立了 可展天线的背架模型。



图 7 Bennett机构的组网示意图 Fig. 7 Tessellation of the Bennett network



图 8 圆柱面拟合分段示意图 Fig. 8 Illustration of cylindrical fitting segmentation

本论文设计中,可展圆柱面天线包括4个大Bennett 单元机构和3个小Bennett单元机构。当*θ*₁=90°时,机 构展开曲面近似圆柱面,近似曲率半径为1 033 mm。

2.3 收纳率

基于Bennett单元机构,设计了可展圆柱面天线。 大、小Bennett机构连杆截面均为正方形,边长为*d*,杆 长分别为*L*,*l*。结构整体采用*n*×*n*_η的单元排列,形成 的近似圆柱面的半径为*R*。

收纳率是可展机构的一个基本技术指标。可通过 位置分析对可展机构的收纳率进行计算。本文定义收 纳率为机构在展开和收拢状态覆盖空间的体积比,其 计算公式为

$$\eta = \frac{V_0'}{V_0} \tag{6}$$

其中: V₀为机构的收拢体积; V₀'为机构的展开体积。

V0和V0′计算如下

$$V_0 = 4nn_\eta d^2 \left(l + L\right) \tag{7}$$

$$V_0' = R^2 n_\eta |M_1 M_3| \left(\frac{(2\pi - \varphi_1 - \varphi_2)}{2} n - \frac{\sin\left((2\pi - \varphi_1 - \varphi_2)n\right)}{2} \right)$$
(8)

其中: |*M*₁*M*₃|可由公式(5)得出。

因此基于Bennett机构组合的可展机构的收纳率η为

$$\eta = \frac{4d^2(l+L)}{R^2 n_\eta |M_1 M_3| \left(\frac{(2\pi - \varphi_1 - \varphi_2)}{2}n - \frac{\sin((2\pi - \varphi_1 - \varphi_2)n)}{2}\right)}$$

 η 越大,说明该机构的收纳率越高。相较于其他参数,收纳率与杆件的横截面积关系更大,采用更细的杆件,收纳体积会有显著的减少。Bennett单元机构的排列数量 $n \times n_{\eta}$ 对机构收纳率的影响不大,但是Bennett机构单元数目越多拟合曲面精度越高。

3 仿真模型建立与动力学分析

图 9给出基于上述的结构设计得到的机构模型, 既可收拢成束,又可展开拟合圆柱面。

基于该模型,应用Creo软件对其进行动力学分





析,着重分析运动输入关节的驱动力矩。如图 10所 示,给定转轴不同的输入运动,使其分别按正弦和线 性进行变化。通过动力学分析,得到了不同运动下驱 动力矩的变化曲线。通过观察可发现,两个仿真力矩 曲线均存在多个波峰,仿真机构在展开和收拢过程中 均存在力矩突然增大的点。在该位形下该机构可能奇 异,后续研究中我们将针对此现象展开深入研究。



(a) 正弦输入运动下关节驱动力矩仿真曲线







4 结 论

本文介绍了一种以Bennett过约束机构为基本组成 单元的可展收圆柱面天线,该机构具有单自由度和高 收纳率,既可收拢成束,又可展开拟合圆柱面。

在对一类特殊Bennett机构的几何特征、收拢过程 杆件的位置等运动学特性分析的基础上,获得了 Bennett机构能够组合形成可动连接的几何条件。利用 剪式机构实现单元机构的组合连接,通过关节设计保 证Bennett单元机构能够顺利展开和收拢。对机构进行 仿真模型建立与动力学分析,得到不同输入运动下关 节驱动力矩变化情况。

本文提出的Bennett过约束机构单元组合简单、形 面拟合精度高、刚度大,能够很好地应用于该圆柱面 天线的设计。本文的研究对航天可展机构的设计分析 具有重要价值。

参考文献

[1] Escrig F, Valcarcel J P, Sanchez J. Deployable cover on a swimming pool in Seville[J]. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 1996, 37(1): 39-70.

- [2] Zhao J S, Chu F L, Feng Z J. The mechanism theory and application of deployable structures based on SLE[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(2): 324-335.
- [3] 刘荣强,田大可,邓宗全.空间可展开天线结构的研究现状与展望
 [J].机械设计,2010,27(9):1-10.
 Liu R Q, Tian D K, Deng Z Q. Research status and prospect of space developable antenna structure[J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(9):1-10.
- [4] O'brian E D, Phelan C. Folding structure employing a sarrus linkage: U.S., 4437413[P].1984.
- [5] Chen Y. Design of structural mechanisms[D]. Oxford: University of Oxford, 2003.
- [6] Lu S N, Zlatanov D, Ding X L, et al. A network of type III Bricard linkages[C]//ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference .[S. 1.]: ASME, 2015.
- [7] Phillips J. Freedom in machinery[M].[S. 1.]: Cambridge University Press, 2007.
- [8] 杨毅,丁希仑.四棱锥单元平板式可展开收拢机构的运动特性分析
 [J].航空学报,2010,31(6):1276-1268.
 Yang Y, Ding X L. Design and analysis of a deployable mechanism based on the four pyramid cell[J]. Acta Aeronautica et Astronautica

based on the four pyramid cell[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(6): 1276-1268.

[9] 罗尧治,刘晶晶.基于环形连杆机构原理的可展结构设计[J].工程设 计学报,2006,13(3):145-149.

Luo Y Z, Liu J J. Design of retractable structure based on closed-loop linkages[J]. Journal of Engineer Design, 2006, 13(3): 145-149.

- [10] 陈务军,关富玲,董石麟.空间可展开桁架结构展开过程分析的理论 与方法[J].浙江大学学报,2000,34(4):382-386.
 Chen W J, Guan F L, Dong S L. Theory and approach of deployment analysis for deployable space truss structures[J]. Journal of Zhejiang University, 2000, 34(4):382-386.
- [11] Qi X Z, Deng Z Q, Li B, et al. Design and optimization of large deployable mechanism constructed by Myard linkages[J]. CEAS Space Journal, 2013, 5(3-4): 147-155.
- [12] Lu S N, Zlatanov D, Ding X L. Approximation of cylindrical surfaces with deployable Bennett networks[C]//ASME 2016-International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE.[S. 1.]; ASME, 2016.
- [13] 孙从军.折叠网络结构的几何构成及其力学性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
 Sun C J.Geometric formation of foldable latticed structures and the

mechanical performance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

[14] 赵孟良,吴开成,关富玲.空间可展桁架结构动力学分析[J].浙江大学 学报,2005,39(11):1669-1674.

Zhao M L, Wu K C, Guan F L. Dynamic analysis of deployable space truss structures[J]. Journal of Zhejiang University, 2005, 39(11): 1669-1674.

作者简介:

杨佳鑫(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向:空间可展机构。 通讯地址:北京市海淀区学院路37号(100191) 电话:(010)82339055 E-mail:jessieyao_buaa@163.com

丁希仑(1967-),男,教授,主要研究方向:机构学、机器人学。 通讯地址:北京市海淀区学院路37号(100191) 电话:(010)82338005 E-mail:xlding@buaa.edu.cn

Design and Analysis of Approximate Cylindrical Deployable Mechanism with Bennett Linkages

YANG Jiaxin, LV Shengnan, DING Xilun

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100081, China)

Abstract: Deployable mechanisms can be deployed to the designated configuration for work, and can also be folded for facilitating transportation. It has broad application prospects in space, architecture, and other fields. A deployable mechanism is presented, which uses the Bennett over-constraint mechanism as a basic element. Working surface of the mechanism can be fitted to cylindrical surface. Meanwhile, all bars of the mechanism can be compactly folded into a bundle configuration. Firstly, geometric description of the Bennett mechanism is analyzed, and its kinematic characteristics are discussed. Secondly, combination of unit mechanism is realized by using the scissors linkage, ensuring that the design key points are accurately located on the target surface. Finally, kinematics and dynamic performances of the mechanism are simulated, validating the proposed design and providing theoretical fundamental for the follow-up prototype development. The Bennett over-constraint mechanism in this paper is simple and have high precision and rigidity, which can be well applied to the cylindrical surface of the antenna design. This study is of great value to the design and analysis of aerospace deployable mechanism.

Key words: deployable mechanism; Bennett linkages; cylindrical surface; kinematics analysis; simulation

[责任编辑:杨晓燕,英文审校:朱恬]