第24卷 第4期 空 间 科 学 学 报 Vol.24, No.4
2004 年 7月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE July, 2004

索杆式伸展臂的展开驱动设计与动力学分析*

苏 斌 关富玲 杨大彬 杨 治
(浙江大学建筑工程学院 杭州 310027)

摘 要

结合一类索杆式伸展臂的模型制作，介绍了与该类伸展臂相关的驱动装置的技术要求、驱动机理和设计方法，并针对三种不同的驱动方案进行了比较. 最后对伸展臂单元的展开运动过程进行了动力学分析.

关键词 伸展臂; 驱动装置

1 引言

空间展开机构通常分为一维、二维和三维展开，其中伸展臂属于一维展开机构，也是最基本最重要的展开机构. 伸展臂作为一种有效的支撑，可以用于大型展开天线、太阳帆板和望远镜的支撑背架、太空机械手及空间平台等.

伸展臂按照结构形式分主要有 6 种: 薄壁管式、伸缩式、卷曲式、铰接杆式、张拉整体式、充气硬化式 [1]. 其中铰接杆式伸展臂又可进一步分为索杆式和全杆式两类. 目前有应用的最长的伸展臂是由美国 AEC-Able 公司研制的 Folding Articulated Square Truss (FAST) 和 ABLE Deployable Articulated Mast (ADAM), 两者都属于铰接杆式伸展臂. FAST 已作为国际空间站 (ISS) 的太阳电池组的支撑，其直径为 1.09 m 、长度为 34.75 m, 驱动筒的长度为 2.3 m, 收纳率约为 6.6%; ADAM 已于 2000 年 2 月成功的应用于 NASA 的 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 项目，在该项目中 ADAM 的直径为 1.36 m, 长度为 60 m, 后端驱动筒长为 2.92 m, 收纳率约为 4.9%. 在国内，载人航天工程有效荷载展开天线曾使用过伸缩式伸展臂，而对于卷曲式和铰接杆式伸展臂的研究目前也取得了一些成果. 铰接杆式伸展臂具有高收纳率、高刚性、高精度的特点，代表了目前伸展臂研究和应用的方向.

在文献[2]中曾经介绍了一种索杆式伸展臂的设计方案，并对其结构性能进行了分析. 本文给出了该伸展臂系统的驱动方案，并对该方案的展开动力学性能进行初步研究 **.

2 伸展臂结构部分方案简介

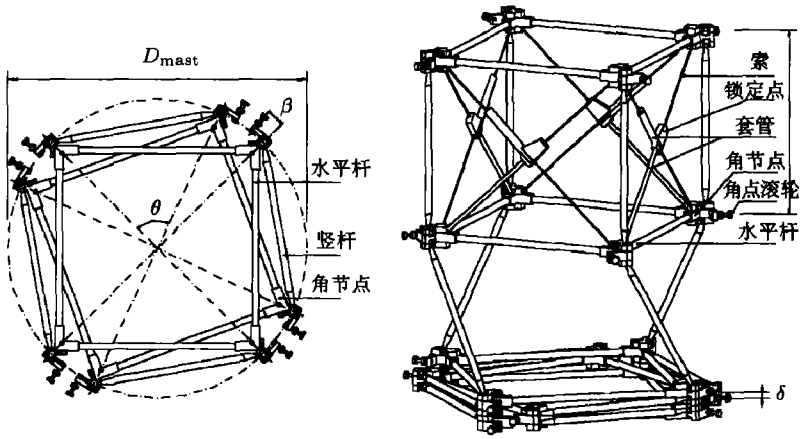
以下简要说明索杆式伸展臂系统结构部分的设计方案，更详细的说明见文献 [2].

* 国家自然科学基金项目资助 (69982009)
2003-05-18 收到原稿， 2004-04-15 收到修定稿

** 苏斌. 索杆式伸展臂的设计、分析与实验. 浙江大学硕士学位论文， 2004

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

索杆式伸展臂结构部分的主要构成如图 1 所示.



(a) 一个单元压缩平面　　(b) 伸展臂展开过程中

图 1　伸展臂构成示意图

Fig.1　The mast composition, (a) is single unit compressed bay, and (b) is mast being deployed

在展开或收纳过程中，一个伸展臂单元是机构，情况如图 2 单元简图所示. 如果把单元的运动限制在一个圆柱内，那么伸展臂作为机构所具有的自由度仅为 1，独立的运动坐标可取为两个刚性平面之间转过的角度 θ，或取两个刚性平面之间的距离 z，机构自由度 $S = 1.\theta$ 与 z 之间的关系由下式决定：

$$\left(2R\sin\frac{\theta}{2}\right)^2 + z^2 = H^2. \tag{1}$$

在展开后，单元由机构向结构转变，结构锁定成形后的单元简图就变化为图 3 所示的形式，由结构自由度分析容易知道，这样的体系是超静定体系 $(S = 0, n = 7)$.

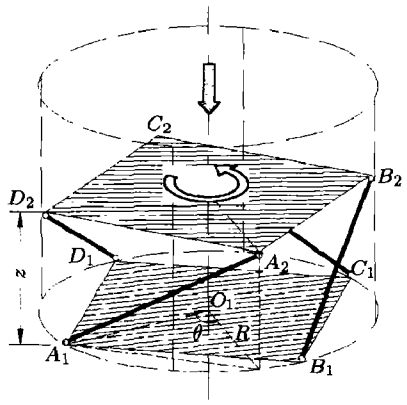


图 2　单元展开 (收纳) 原理示意图

Fig.2　Deployable and retractable mechanism

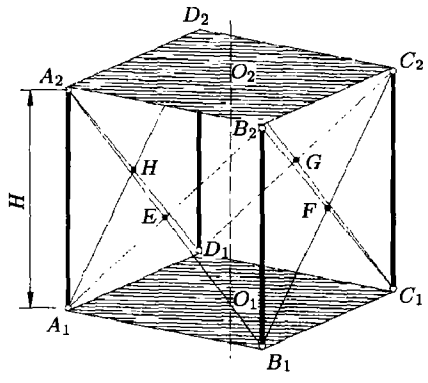


图 3　单元展开后简图

Fig.3　Sketch of unit after deployed

多个伸展臂单元首尾相连形成单元组，并且相邻两个刚性平面之间分别按照转角 θ 为

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

+70° 和 −70° 的规律交替压缩，这样就可以根据需要形成不同长度的伸展臂.

按照以上原理，我们制作了一个伸展臂的实物模型 (共 41 个单元) 如图 4 、图 5 所示，完全展开长度为 11.3 m，伸展臂直径为 460 mm，收纳率为 5.78%，总重为 36.6 kg.

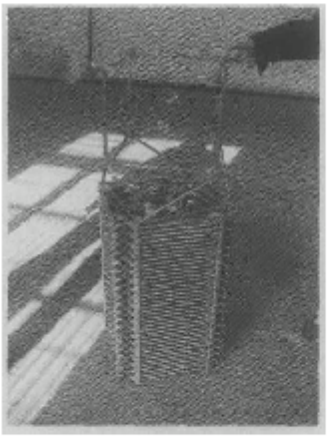


图 4 41 个单元 (收纳)
Fig.4. 41 bays retracted

图 5 41 个单元 (展开)
Fig.5 41 bays deployed

3 伸展臂驱动部分方案设计

由于空间所处的环境非常恶劣，因此，对于文献 [2] 所述的伸展臂，需要提供一种可靠的驱动机构，使其自动展开和收纳，而不需要人为地介入 [3],[4].

该模型的驱动装置的主要设计思路是，在刚性平面的每个角点安装两个滚轮 (见图 1 、图 9)，两个滚轮分别与驱动装置内外筒接触，在驱动装置内外筒相互旋转挤压下，将伸展臂推出筒外. 收纳的过程与展开相反，只要使外筒朝相反方向旋转即可.

3.1 技术要求

伸展臂的驱动机构必须达到的主要技术要求包括：

(1) 在收纳后，驱动机构必须是伸展臂收纳状态时的容器;

(2) 在展开或收纳过程中，伸展臂的前端只作平动，没有转动;

(3) 在展开锁定时，驱动机构的驱动力必须能够使锁定后的索内部具有适当的预应力 (该模型经过计算将预应力取为 10 N);

(4) 在驱动机构断电后，电机传动机构也应有锁定功能，以免影响重复展开精度;

(5) 驱动机构力学性能必须能够满足发射和使用状态时的要求.

3.2 驱动机理

伸展臂的驱动机理与伸展臂单元的展开 (收纳) 机理是密不可分的. 驱动装置所要解决的是前后相连的伸展臂单元组的展开问题，因此在驱动装置的设计中除需要考虑单元展开 (收纳) 的问题外，还需考虑单元组驱动的衔接问题.

根据以上的技术要求，驱动装置被设计成筒状. 驱动筒的构成参见图 6，图 6(a) 给出的是筒的剖面 (含伸展臂)，图 6(b) 给出的是筒的轨道情况 (只画出一半). 以下简要说明该方案的驱动机理.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

在收纳后，伸展臂储存于筒后段的收纳区，技术要求的第 1 点可以满足.

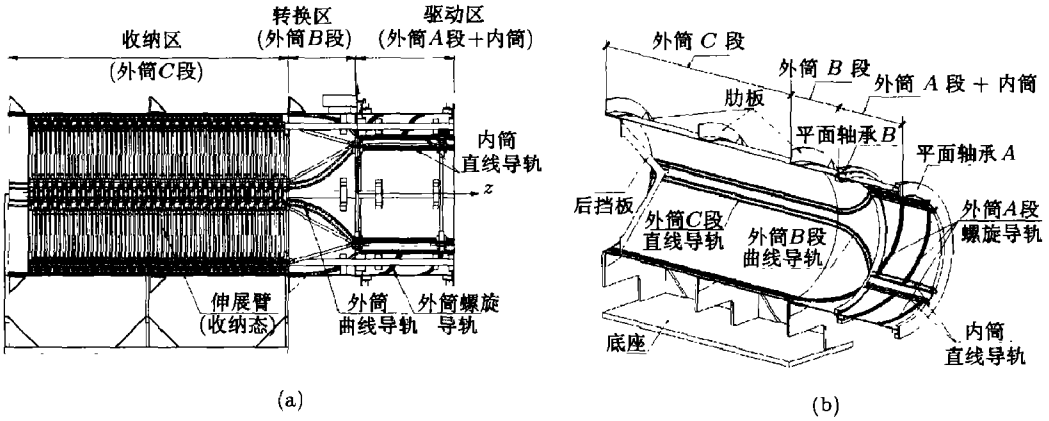


图 6　驱动筒构成示意图

Fig.6　The motor driving canister composition

在展开和收纳过程中，如何实现由收纳到展开的转换，而且要达到以上技术要求中第 2 点的要求是一个难点.

由式 (1) 可以初步得知，当伸展臂刚性面被约束在圆柱筒体内运动时，要控制刚性面的展开，只需要使它沿 z 方向平动或者延 θ 方向转动即可. 在具体设计时，可以采用只控制 z 向平动 (第 I 类)，只控制 θ 向转动 (第 II 类)，或两者同时控制 (第 III 类) 的 3 种方式.

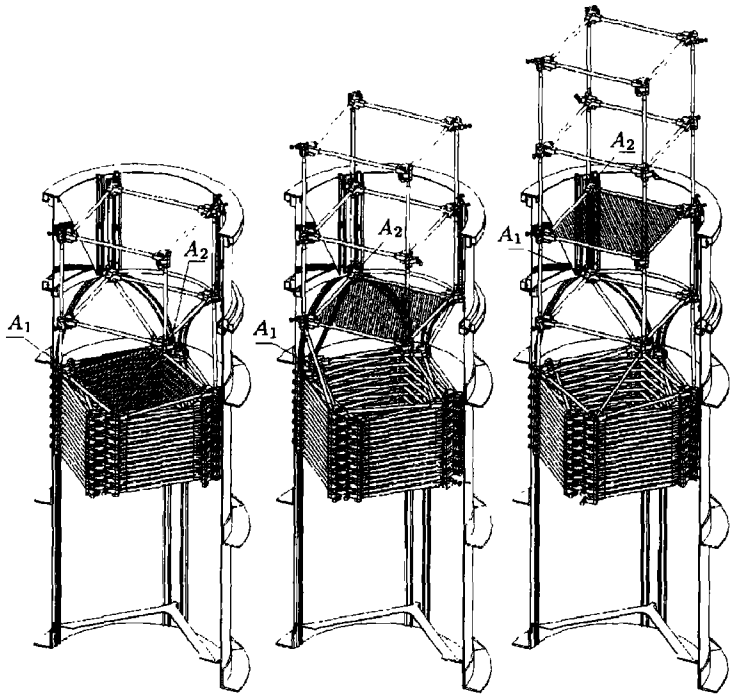
在设计中容易发现，单独采用第 II 类方案是很麻烦的. 第 II 类方案对于一个单元的展开和收纳没有问题，但是对于整个伸展臂单元组的展开就会有很多衔接上的问题无法解决. 该模型的前期设计阶段也曾经采用过第 III 类方案，但是这种方案的特点是，筒体的连接件复杂，重量大. 同时控制 z 和 θ 的运动，需要考虑两套驱动装置的同步问题，控制难度大，可靠性不高. 经过不断改进，形成了图 6 所示的方案. 图 6 中采用的是只控制刚性面 z 向平动的第 I 类方案. 该方法将比第 III 类方案减轻 50% 的重量.

伸展臂的展开驱动最根本要解决的问题就是如何将连接两个刚性面的竖杆 (以 A_1A_2 为例，见图 7) 由原来压缩卧倒状态转变到竖直的状态，刚性面也由原来处于外筒 C 段的出口处运动到外筒 A 段的出口处. 以下具体说明.

如图 7，筒内外伸展臂的位置关系并不是设计的刚性平面的相对转角 70°，而是 35°. 每个单元的展开采用分两步展开的方法. 对照图 7 、图 8，以角点 A_1 和 A_2 的滚轮运动过程为例说明 (其余各点的运动类似) 如下：第 1 步，先是 A_2 运动到 A(见图 7(b) 、图 8)，此时上下两个刚性平面相对转过了 35°；第 2 步，再是 A_1 运动到 A，此时 A_2 点沿着直轨向上运动 (见图 7(c) 、图 8)，这一步上下两个刚性平面又相对转过 35°. 这样分两步就完成了共 70° 的相对转角，一个单元也就自然展开了. 要特别指出的是，上述第 2 步的 35° 既是前一个单元的第 2 步转动，同时又是后一个相邻单元的第 1 步转动，这样接下去的每个单元都只要转第 2 步的 35° 即可. 采用这种方法的一个最重要的结果就是，在筒外已展出的部分伸展臂只做平动，而不转动.

转换区是筒内惟一实现刚性面相对转动的区域，在该区内刚性平面既做平动、又做转动；除此之外，在收纳区和驱动区的刚性平面都只做平动.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



(a) 初始状态 (b) 第 1 步后 (c) 第 2 步后
(a) Initial state (b) After the first step (c) After the second step

图 7 展开驱动原理
Fig.7 Driving mechanism

在驱动装置的主要设计思路中提到，每个角节点有两个滚轮，一个与外筒接触，一个与内筒接触，如图 9 所示. 在展开 (收纳) 过程中，外筒做单向转动，刚性平面就在筒驱动区被往前 (后) 推动. 此时，外滚轮相对于外筒是沿螺旋导轨运动的，而内滚轮相对于内筒是沿直线运动，这在本质上相当于两个相互重叠的移动副，角点滚轮属于局部自由度. 由于内筒固定，这样对于底座来说，驱动装置所控制的就是刚性面的 z 向直线运动. 至于在展开过程中刚性面的 θ 向转动，完全由满足式 (1) 的曲线轨道自动控制 (见图 6 转换区)，

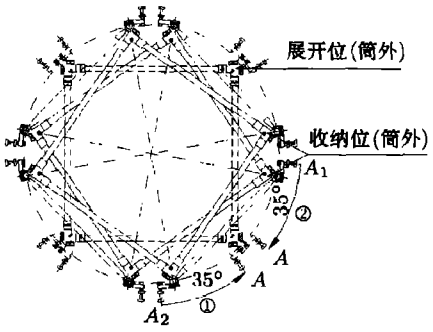


图 8 展开驱动原理 (平面投影)
Fig.8 Driving mechanism (plane projection)

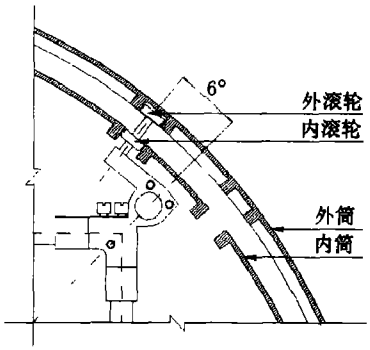


图 9 角点滚轮
Fig.9 Corner wheel

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

不需要有额外的驱动装置去控制这种转动. 所以从总的来看，动力来源于外筒的单向转动，而外筒的转动又是由一个步进电机带动的齿轮传动机构输入的.

注意到图 9 中角节点上的滚轮有 6° 的偏位，这与图 10 的轨道是相配合的. 滚轮的偏位主要是为了收纳的考虑. 在图 10 轨道方案中 A_1、A_2 各对应着一个 A 点，也就是在 A 点有平行的两条直轨，这就是我们称之为分轨的方案. 经过分轨，伸展臂的奇数序号的刚性平面和偶数序号的刚性平面将严格由左右不同的导轨进出筒体，避免了收纳时轨道的二义性；同时，也正是由于滚轮的偏位，虽然 A_1、A_2 分属于两个竖向导轨，但是它们之间的竖杆在完全展开时候仍然准确沿着竖直方向，见图 7(c).

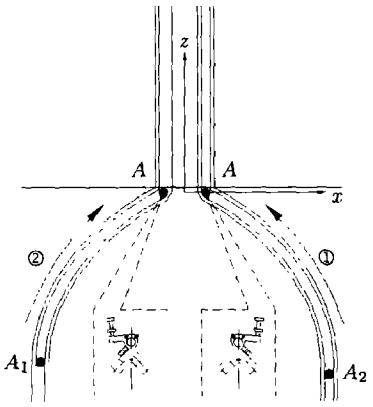


图 10　改进的轨道方案 (分轨)
Fig.10　Improved track scheme (double track)

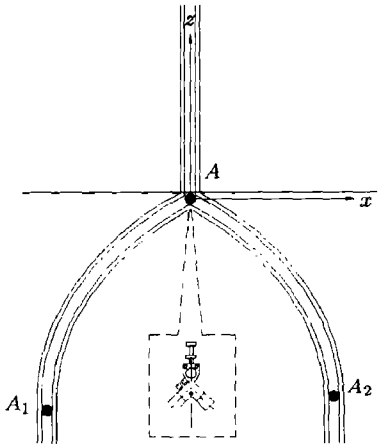


图 11　原轨道方案 (并轨)
Fig.11　Original track scheme (single track)

对比来说，在原方案 (第 Ⅲ 类) 中，由于没有采用滚轮偏位 (也就是没有分轨)，则图 10 所示的两条轨道将互相靠近，并在 A 点以上完全合并成单条直轨，形成一个三叉形 (图 11)，称之为并轨的方案. 在伸展臂展开时，这样的轨道是可行；但是在收纳过程中由直线段进入曲线段时，滚轮向那条曲线段运动不明确，有可能导致刚性面向相反的方向运动，伸展臂就会被卡死. 这时候就需要采用同时控制 z 和 θ 的方法 (第 Ⅲ 类方案)：在收纳时，从三叉点处向下运动的同时，由另一套驱动装置明确界定滚轮往那条轨道运动. 可想而知，采用这种方案两套驱动装置在转速和节奏上都必须紧密配合，控制系统就显得相对比较复杂，所以在实际模型中未采用.

3.3　驱动机构具体设计

根据上一节的驱动机理，制作了一台驱动机构的原理样机. 模型驱动筒采用普通钢，全长 1.364 mm，外筒径 530.4 mm. 平面轴承 B 上带有外齿，通过附着在筒外壁的步进电机驱动平面轴承带动外筒 A 段转动，给驱动机构提供动力. 图 12 是驱动筒的实物模型图. 由于伸展臂展开实验需要平衡重力，因此同时也设计了与该伸展臂配套的地面零重力吊架系统，如图 5 所示，此处不作详细说明.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

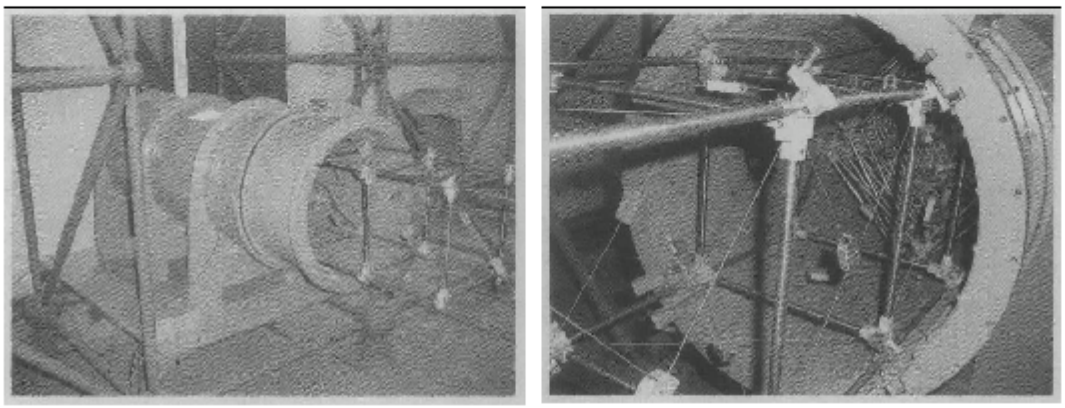


图 12 驱动筒实物模型
Fig.12 Prototype of motorized driving canister

4 伸展臂动力学分析

展开过程分析的动力学模型的理论主要借助了多刚体力学研究成果，比较成熟的方法有：Newton-Euler 方法、Wittenburg 方法和 Lagrange 方法. 针对索杆式可展结构的特点，可采用 Lagrange 方法对结构进行动力学建模. Lagrange 形式的动力学普遍方程可表示为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial K}{\partial q_j'}\right)-\frac{\partial K}{\partial q_j}+\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial Q_i''}{\partial q_j}\lambda_i-F_j=0,\quad j=1,2,\cdots,6. \tag{2}$$

上述 6 个一阶动力学方程将力与加速度相联系. 求解时还要有 6 个一阶运动学方程(即三个方向线速度与角速度的定义), 以将位置与速度相联系; 此外, 还要引入约束代数方程、外力定义方程和自定义的代数-微分方程.

系统约束方程为

$$\varphi(q',q,t)=0; \tag{3}$$

系统外力方程为

$$F(u',u,q,f,t)=0; \tag{4}$$

自定义代数-微分方程为

$$G(u',u,q,f,t)=0. \tag{5}$$

实际应用中采用了动力仿真程序 ADAMS 进行单元的动力学分析，ADAMS 动力学分析采用的也是 Lagrange 方法. 对于刚性系统动力学微分方程，ADAMS 采用变系数的 BDF 刚性积分程序，它是自动变阶、变步长的预测-校正法 [5].

伸展臂单元展开动力学分析的目的是观察单元中刚性面的运动情况，分析在展开和收纳的过程中刚性面和竖杆的线速度和角速度的情况，并且对运动中单元节点球铰的受力性能进行评估.

单元分析模型如图 13 所示, 其中刚性下表面固定在地面. 选用最大静扭矩为 20.0 N·m 的低压直流电机，转速为 20 r/min, 驱动过程中刚性面可以视为延 z 向匀速平动，取齿轮

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

传动机构的齿数比为 14/284，那么驱动筒转速为 1 r/min，刚性面的 z 向平动的速度为 8.47 mm/s，将此恒定线速度作为 ADAMS 的输入.

图 14 给出了刚性面相对距离 z、相对转角 θ 随时间变化关系，该图也可视为竖杆端点 A 位移变化曲线. 可以看出一个单元展开的总时间为 29.2 s. 由于电机可以认为是匀速转动，因此相对距离 z 是一直线；而相对转角 θ 由于要满足式 (1)，则为一曲线，并且可以看出刚开始运动时相对转角变化很小，在展开即将结束时相对转角 θ 的值迅速降低.

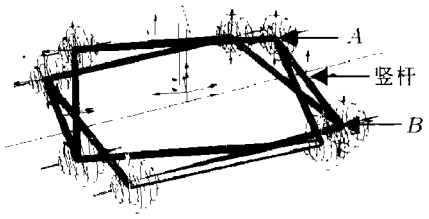


图 13　ADAMS 分析模型图
Fig.13　Figure of ADAMS analysis model

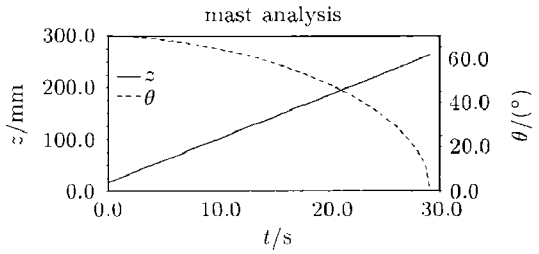


图 14　刚性面相对距离 z 和相对转角 θ 随时间变化
Fig.14　The relationship between the relative distance z and angle θ of two rigid planes with time

图 15 给出了竖杆端点 A 线速度 v 随时间变化的关系. 竖杆的速度 $\boldsymbol{v}$ 可以分解为沿刚性面外接圆切向速度 v_τ 和 z 向向上速度 v_z. 由于刚性面沿 z 向匀速平动，则 v_z 不变；而 v_τ 在开始时变化较小，在展开将结束时增大得很快，这与图 14 的相对转角 θ 变化趋势相符.

图 16 是节点力随时间变化关系，节点力以 z 向的为主，在单元开始展开时很小，但是即将展开完毕时有一个突然增大的过程，这与此刻竖杆的速度变化是相符合的. 节点球铰受到的最大力是 2.6 N.

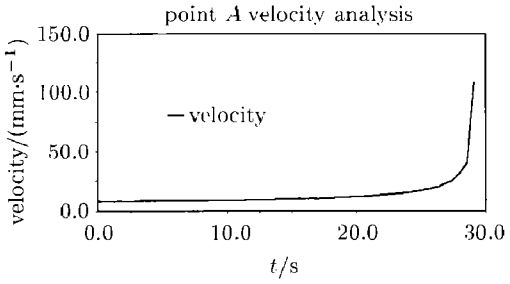


图 15　竖杆端点 A 线速度随时间的变化
Fig.15　The relationship between node-velocity of point A with time

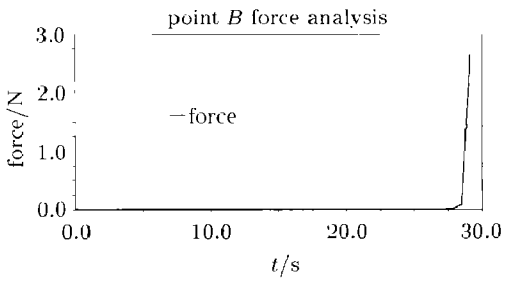


图 16　竖杆节点 B 节点力随时间的变化
Fig.16　The relationship between node-force of point B with time

在模型加工完成后，我们对伸展臂整体进行了展开实验. 伸展臂完全展开需要 19.5 min，展开到筒外的有 39 个单元，由于驱动的需要，尾部还留有两个单元在驱动筒内.

同时，对整体模型在地面零重力吊架系统上进行了重复展开精度实验和模态实验，结果证明伸展臂的各项指标都和理论分析结果比较接近. 这就证明了该伸展臂系统具有高收纳率、高刚性、高精度的特点，同时也表明本文所介绍的展开驱动装置是可行的.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

5 小结

本文针对文献 [2] 所给出的索杆式伸展臂模型，设计了与之相应的驱动装置. 根据方案比较、 ADAMS 仿真分析和模型实验的结果，证明这种驱动装置是简单可靠的.

参 考 文 献

[1] Gunnar Tibert. Deployable tensegrity structures for space applications. *Roy. Ins. Tech. Dep. Mech.*, 2002, 10—17

[2] SU Bin, GUAN Fuling, SHI Weihua, XIE Tiehua. Design and analysis of rod-cable deployable mast. *J. Eng. Des.*, 2003, **10**(5):287—294. in Chinese (苏斌, 关富玲, 石卫华, 谢铁华. 索杆式伸展臂的结构设计与分析. 工程设计学报, 2003, **10**(5):287—294)

[3] YUE Jianru, GUAN Fuling, YANG Yulong. Modify design and structural analysis for adjustment mechanism of the imaging lens's focal length of a space solar telescope. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(2):155—160. in Chinese (岳建如, 关富玲, 杨玉龙. 空间望远镜成像调焦机构改进设计与分析. 空间科学学报, 2003, **23**(2):155—160)

[4] HU Qibiao, GUAN Fuling, CHEN Wujun, YANG Yulong. Design research of structure of a new space deloyable/retractable mast. *J. Eng. Des.*, 1999, **2**:36—40. in Chinese (胡其彪, 关富玲, 陈务军, 杨玉龙. 一种新型展开/折叠式空间伸展臂结构方案的设计研究. 工程设计, 1999, **2**:36—40)

[5] Wang Guoqiang, ZHANG Jinping, MA Ruoding. Virtual Prototyping Technology and Its Application in ADAMS. Xian: Northwestern Polytechnical University Press, 2002. in Chinese (王国强, 张进平, 马若丁. 虚拟样机技术及其在 ADAMS 上的实践. 西安: 西北工业大学出版社, 2002)

DESIGN AND DYNAMIC ANALYSIS OF A DRIVING SYSTEM FOR ROD-CABLE DEPLOYABLE MAST

SU Bin GUAN Fuling YANG Dabin YANG Zhi

(*College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou* 310027)

Abstract

The technique requirements, basic driving principles and designing methods of a motorized drive system for a kind of rod-cable deployable mast has been introduced in this paper. Three different kinds of driving system scheme are compared and the best one is chosen for the calculated model. Finally, the dynamic analysis of this mechanical system is presented.

Key words Mast, Driving system

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com