

面向卡塞格伦伞状天线的主副面同步展开机构设计及分析

韩晓童¹, 王晓凯², 邢永涛¹, 张树新¹

(1. 西安电子科技大学 电子装备结构设计教育部重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

摘 要: 针对长焦距双反射面伞状可展开天线的收展问题, 根据卡塞格伦式伞状天线结构特点, 提出一种曲柄滑块机构与绳索机构相结合的展开机构; 建立了展开过程运动分析模型, 可对关键运动部件进行展开过程的运动学分析与仿真。为减小冲击, 对展开过程进行了速度规划, 对比不同速度规划下天线展开时的运动参数曲线及接触力并综合考虑主面与副面的展开平稳性, 确定在五次多项式速度规划下为最平稳展开过程。本文对星载天线的深入研究具有一定的参考价值。

关键词: 伞状天线; 展开机构; 展开过程; 运动分析; 仿真分析

中图分类号: V 414; TH 112

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.05.002

Design and Analysis of the Synchronous Deployment Mechanism for Cassegrain Umbrella-Type Antenna

HAN Xiaotong¹, WANG Xiaokai², XING Yongtao¹, ZHANG Shuxin¹

(1. Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design (Ministry of Education), Xidian University, Xi'an 710071, Shaanxi, China; 2. Shanghai Institute of Aerospace System Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: According to the structural characteristics of Cassegrain umbrella-type antenna, a deployment mechanism combining the crank slider mechanism and the rope mechanism is proposed to solve the deployment problem of umbrella-type deployable antenna with long focal length and double reflectors. The kinematic analysis model of the deployment process is established to analyze and simulate the kinematics of the deployment process of the key parts. In order to reduce the effects, velocity planning is carried out for the deployment process. By comparing the movement parameter curves and the contact forces of the antenna during the deployment under different velocity planning and considering the stability of the deployment of the main-reflector and the sub-reflector, it is determined that the deployment process is the most stable under the quintuple polynomial velocity planning. It has some reference value to further study satellite antenna.

Key words: umbrella-type antenna; deployment mechanism; deployment process; kinematic analysis; simulation analysis

0 引言

目前发展较为成熟的星载可展开天线, 例如固面式^[1]、充气式^[2]、构架式^[3-4]及周边桁架式^[5-7]等, 都难以同时满足高收纳比、高精度的要求。而伞状可

展开天线^[8-11]在收纳比、面密度、展开性能以及在轨热环境下的形面保持等方面, 具有突出的优势, 受到了众多国际宇航研究机构的高度关注和广泛研究。

收稿日期: 2020-03-05; 修回日期: 2020-06-01

基金项目: 上海航天科技创新基金资助项目(SAST2019-022)

作者简介: 韩晓童(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空间展开机构设计及仿真分析。

伞状天线又称为支撑肋可展开天线,是指柔性反射面由肋支撑,收拢时支撑肋收拢,在轨后支撑肋展开带动柔性反射面展开到工作状态的可展开式天线。伞状天线的分类主要根据支撑肋的不同进行分类,可分为缠绕肋天线^[12]、径向刚性肋天线^[13]和可收拢肋^[14]天线。缠绕肋天线结构简单,收纳比高,可以研制出超过 30 m 的单一模块天线,但其刚度、抗振性、反射面精度都比较差。径向肋天线最早由美国 TRW 公司研制,具有高精度及高刚度,可收拢肋天线收拢时不仅各条肋可以进行收拢,每条肋也可进行自身的收拢。

美国喷气推进实验室(JPL)Chahat 等^[15-16]公开了一种小型伞状可展开天线的原理样机的展开过程,该伞状天线在气体推动的作用下天线开始进行展开,天线主反射面和副反射面主要通过弹簧进行展开,每一根天线肋通过各自的恒力弹簧和弹簧片联合作用完成天线尖肋的展开。该伞状可展开天线具有三次较大冲击,分别是气体推动瞬间、副面完全展开瞬间和天线肋完全展开瞬间,且天线展开同步性较差。

之后 Chahat 等^[17-18]对展开机构进行改进,将气体推进的展开方式改为以丝杠螺母机构作为推进机构,增加了轮毂底座展开时的稳定性,但是依然存在天线肋展开时同步性较差、存在两次较大冲击等问题。我国发射的“鹊桥”^[19-21]伞状可展开天线,采用缓释弹簧分布式驱动展开技术实现天线在轨展开功能,机构内部分为两个模块,分别为动力模块和传动模块。缓释弹簧分布式驱动展开技术采用动力多点布局,展开过程中保证所有动力源输出动力和速度的一致性,最大限度地降低了由于单点失效带来的可靠性下降问题和天线展开速度控制问题。但对于长焦距卡塞格伦式天线,该展开机构收拢后结构不够紧凑。

展开过程是可展天线最容易出现故障的环节之一,天线展开过程不稳定,容易产生过大的冲击,造成展开过程的失败。因此,在设计阶段,对天线的展开过程仿真来预测展开性能是十分重要的。针对长焦距卡塞格伦式天线结构特征,本文提出了一种基于曲柄滑块与绳索机构相结合的伞状天线展开机构,对主副面展开过程进行速度规划和仿真分析,确定最优速度规划,验证展开过程满足稳定的要求。

1 伞状天线展开机构总体设计

1.1 设计依据

星载可展开天线机构设计的目的是使其具有收拢体积小、展开过程稳定等特点。针对长焦距卡塞格伦天线的结构特点,为满足收拢后结构更加紧凑,展开时需要进行副面和主面的两次展开。对于现有副面需要展开的卡塞格伦式伞状可展开天线,为副面与主面每条肋各自进行展开,展开方式为弹簧、扭簧驱动展开,展开过程冲击较大。当要求主面与副面同时展开时,只需要一个驱动,因此,可通过副面的展开来驱动主面的展开。而副面展开时为直线运动,主面展开时为旋转运动,因此,需实现主面展开时直线运动到旋转运动的转换。当曲柄滑块机构以滑块为主动件时,能够实现直线运动到旋转运动的转换。

在类似曲柄滑块机构的作用下,主面单根天线肋的展开过程运动简图如图 1 所示。图中: O 点表示天线肋转动铰链中心; A 点表示连杆与天线肋铰接中心; B 点表示连杆与滑块铰接中心; C 点表示天线肋顶点。天线展开时,副反射面需向上运动,而滑块需向下移动完成主面的展开,因此,可通过绳索和定滑轮的作用,实现天线展开时副反射面对滑块的反向拉动。

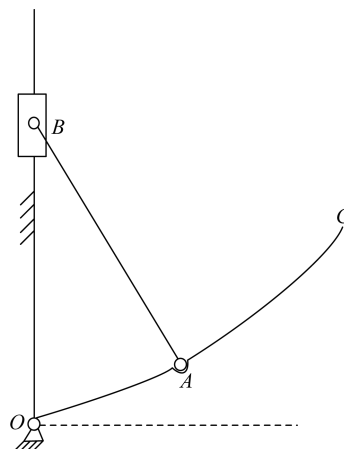


图 1 天线单根肋展开过程运动简图

Fig.1 Schematic diagram of the antenna single rib deployment process

1.2 展开机构设计

天线完全展开态剖面示意图如图 2 所示。天线展开机构主要由底座、天线肋、连杆、滑块、绳索机

构和副反射面组成,其中绳索机构包含绳索与定滑轮。天线收拢时,副面高度近似于天线肋高度。天线在展开时,主动件为副反射面。天线的副反射面上升时,通过绳索机构的作用,绳索拉动滑块向下运动,再通过连杆传递力的作用,使天线肋进行展开。副面到达固定位置后,天线完全展开,实现了天线副反射面与主反射面的同步展开。天线副反射面完全展开后,绳索具有一定的弹性,能够实现天线形态的保持。

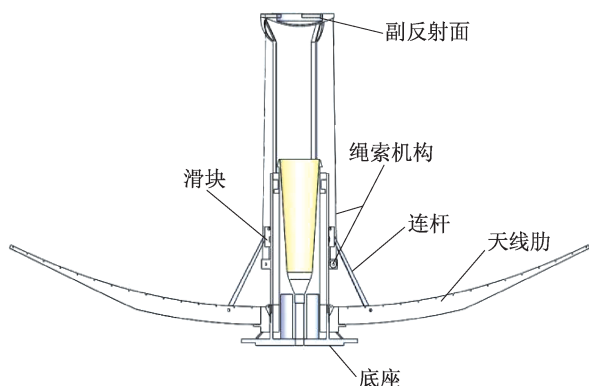


图 2 天线完全展开态剖面示意图

Fig.2 Profile diagram of the fully deployed antenna

本文设计的展开机构应用于卡塞格伦双反射面天线,得到天线完全展开时的整体三维实体模型图,如图 3 所示。

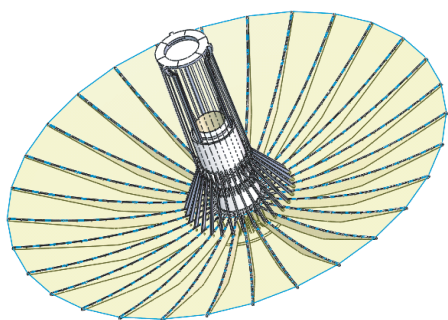


图 3 伞状天线完全展开态三维实体模型图

Fig.3 Three-dimensional entity model of the fully deployed umbrella-type antenna

2 伞状天线展开过程分析

2.1 位置分析

将天线单根肋的展开过程运动简图在坐标系

中表示,天线展开机构各部件间的位置及角度关系如图 4 所示。图中: O 、 A 、 B 、 C 代表的点与图 3 相同; θ 表示天线肋展开时角度; β 表示 AC 连接线与 OA 延长线夹角; r 表示滑块运动在 y 方向位置。

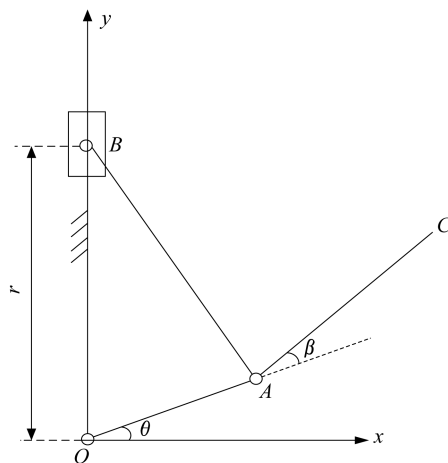


图 4 坐标系中单根肋展开机构运动简图

Fig.4 Kinematic sketch of the single rib deployment mechanism in the coordinate system

B 、 C 点的坐标为

$$\begin{cases} x_B = 0 \\ y_B = r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_C = l_{OA} \cos \theta + l_{AC} \cos \beta \\ y_C = l_{OA} \sin \theta + l_{AC} \sin \beta \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_B 为 B 点在 x 方向的坐标; y_B 为 B 点在 y 方向的坐标; x_C 为 C 点 x 方向的坐标; y_C 为 C 点在 y 方向的坐标; l_{OA} 为 O 、 A 点连接线的长度; l_{AC} 为 A 、 C 点连接线的长度; β 为定值;滑块的运动为 y 方向上下滑动;改变 θ ,可得到天线肋顶点的运动轨迹。

2.2 展开速度和加速度分析

展开角度 θ 与滑块位置 r 的关系方程为

$$r^2 + l_{OA}^2 - l_{AB}^2 = 2 \cdot l_{OA} r \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \quad (3)$$

式中: l_{AB} 为 A 、 B 点连接线的长度。

以滑块位置 r 为自变量,建立展开角度 θ 与滑块位置 r 的关系为

$$\theta = \arcsin \left(\frac{r^2 + l_{OA}^2 - l_{AB}^2}{2 \cdot l_{OA} r} \right) \quad (4)$$

式(4)两端同时对时间 t 求一阶导,得到展开角速度 $\dot{\theta}$ 与滑块速度 $\dot{r}$ 之间的变换方程为

$$\dot{\theta} = \frac{r - l_{OA} \sin \theta}{l_{OA} r \cos \theta} \cdot \dot{r} \quad (5)$$

式(5)对时间 t 求一次导,得到展开角加速度 $\ddot{\theta}$ 与滑块加速度 $\ddot{r}$ 之间的变换方程为

$$\ddot{\theta} = [r^2 \ddot{r} - \ddot{r} r l_{OA} \sin \theta + \dot{r} (r^2 \tan \theta - l_{OA} r \sin \theta \tan \theta + \dot{r} l_{OA} \sin \theta - r l_{OA} \dot{\theta} \cos \theta)] (l_{OA} r^2 \cos \theta)^{-1} \quad (6)$$

滑块位置 r 随时间 t 的变化函数为

$$r = \int f(t) dt + C_1 \quad (7)$$

式中: $f(t)$ 为规划滑块运动的速度 $\dot{r}$ 的变化规律; C_1 为保证函数连续性而待确定的量。

这样就从机构运动学的角度,得出了天线在整个展开过程中天线展开角度 θ 、角速度 $\dot{\theta}$ 、角加速度 $\ddot{\theta}$ 与每一个展开时刻 t 的对应关系。

2.3 滑块速度规划

天线展开过程是否平稳,直接影响展开过程是否会出现大的振动。因此,有必要对伞状天线的展开过程进行运动规划。为了使副面展开时更加平稳,对比滑块在不同速度下天线肋展开时的稳定性,为减小最大角速度和角加速度,对滑块分别进行匀速^[22]、匀加速匀减速^[23]、三次多项式^[24]、五次多项式^[25]和正弦函数^[26]的速度规划。

滑块以匀加速匀减速运动时,滑块速度规划满足如下函数

$$\dot{r}_2 = \begin{cases} kt, & 0 \leq t < \frac{T}{5} \\ \frac{kT}{5}, & \frac{T}{5} \leq t < \frac{4T}{5} \\ k(T-t), & \frac{4T}{5} \leq t < T \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\dot{r}_2$ 为滑块以匀加速匀减速运动时滑块速度变化; k 为匀加速匀加速时速度变化曲线的斜率; T 为运动总用时。

滑块运动满足关系式

$$H = \int_0^{T/5} kt dt + \int_{T/5}^{4T/5} \frac{kT}{5} dt + \int_{4T/5}^T k(T-t) dt \quad (9)$$

式中: H 为滑块运动的总行程。

滑块速度以三次多项式变化时,三次多项式函数定义为

$$\text{Step}(x_3, x_{30}, h_{30}, x_{31}, h_{31}) = h_{30} + (h_{31} - h_{30}) \cdot \left[(x_3 - x_{30}) / (x_{31} - x_{30}) \right]^2 \cdot$$

$$\left\{ 3 - 2 \left[(x_3 - x_{30}) / (x_{31} - x_{30}) \right] \right\} \quad (10)$$

式中: x_3 为自变量; x_{30} 为阶跃函数起点自变量的值; h_{30} 为阶跃起点处函数值; x_{31} 为阶跃函数终点自变量值; h_{31} 为阶跃终点函数值。

滑块以三次多项式规划运动时满足函数

$$\dot{r}_3 = \begin{cases} \text{Step}(t, 0, \dot{r}_0, T/5, \dot{r}_s), & 0 \leq t < \frac{T}{5} \\ \dot{r}_s, & \frac{T}{5} \leq t < \frac{4T}{5} \\ \text{Step}(t, 4T/5, \dot{r}_s, T, 0), & \frac{4T}{5} \leq t < T \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\dot{r}_3$ 为滑块以三次多项式规划运动时滑块速度变化; $\dot{r}_0$ 为滑块初速度; $\dot{r}_s$ 为到达匀速段速度。

滑块运动总行程 H 满足关系式

$$H = \int_0^{T/5} \text{Step}(t, 0, \dot{r}_0, T/5, \dot{r}_s) dt + \int_{T/5}^{4T/5} \dot{r}_s dt + \int_{4T/5}^T \text{Step}(t, 4T/5, \dot{r}_s, T, 0) dt \quad (12)$$

滑块以五次多项式运动时,五次多项式函数定义为

$$\begin{aligned} \text{Step5}(x_5, x_{50}, h_{50}, x_{51}, h_{51}) &= h_{50} + \\ & (h_{51} - h_{50}) \left[(x_5 - x_{50}) / (x_{51} - x_{50}) \right]^3 \cdot \\ & \left\{ 10 - 15 \left[(x_5 - x_{50}) / (x_{51} - x_{50}) \right] + \right. \\ & \left. 6 \left[(x_5 - x_{50}) / (x_{51} - x_{50}) \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: x_5 为自变量; x_{50} 为阶跃函数起点自变量的值; h_{50} 为阶跃起点处函数值; x_{51} 为阶跃函数终点自变量值; h_{51} 为阶跃终点函数值。

滑块以五次多项式规划运动时函数满足

$$\dot{r}_5 = \begin{cases} \text{Step5}(t, 0, \dot{r}_0, T/5, \dot{r}_{5s}), & 0 \leq t < \frac{T}{5} \\ \dot{r}_{5s}, & \frac{T}{5} \leq t < \frac{4T}{5} \\ \text{Step5}(t, 4T/5, \dot{r}_{5s}, T, 0), & \frac{4T}{5} \leq t < T \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\dot{r}_5$ 为滑块以五次多项式规划运动时滑块速度变化; $\dot{r}_{5s}$ 为到达匀速段速度。

滑块运动总行程 H 满足关系式

$$H = \int_0^{T/5} \text{Step5}(t, 0, \dot{r}_0, T/5, \dot{r}_{5s}) dt + \int_{T/5}^{4T/5} \dot{r}_{5s} dt + \int_{4T/5}^T \text{Step5}(t, 4T/5, \dot{r}_{5s}, T, 0) dt \quad (15)$$

滑块速度以正弦函数规划运动时满足函数

$$\dot{r}_{\sin} = \begin{cases} A_s \sin \omega t, & 0 \leq t < \frac{T}{5} \\ A_s \sin \frac{T}{5} \cdot \omega, & \frac{T}{5} \leq t < \frac{4T}{5} \\ A_s \sin \omega(T-t), & \frac{4T}{5} \leq t < T \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\dot{r}_{\sin}$ 为滑块以正弦速度规划运动时滑块速度变化; A_s 为正弦函数幅值; ω 为正弦函数频率; 已知 $T/5 = 1/4 \cdot (2\pi/\omega)$, 可得 $\omega = 5\pi/2T$ 。

滑块运动总行程 H 满足关系式

$$H = \int_0^{T/5} A_s \sin \omega t dt + \int_{T/5}^{4T/5} A_s \sin \frac{T}{5} \cdot \omega dt + \int_{4T/5}^T A_s \sin \omega(T-t) dt \quad (17)$$

滑块速度分别按照匀速、匀加速匀减速、三次多项式、五次多项式和正弦函数进行速度规划时滑块的速度变化曲线, 分别如图 5(a)~图 5(e) 所示。

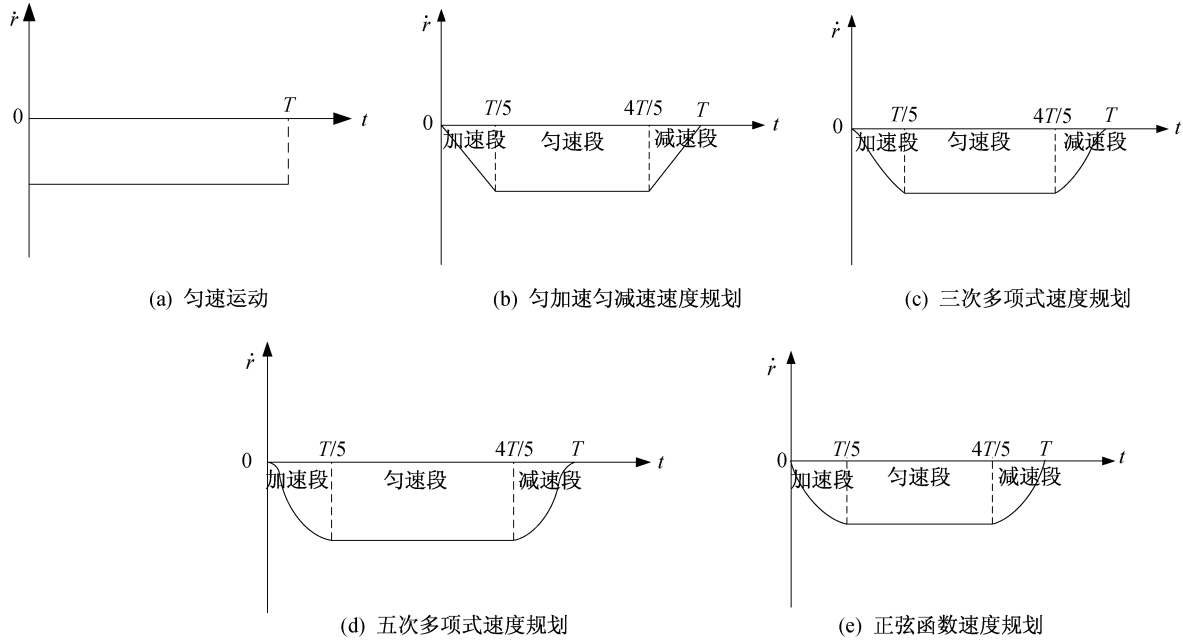


图 5 滑块速度变化曲线

Fig.5 Slider velocity curves

3 实例仿真

3.1 运动学仿真

伞状可展开天线为完全对称结构, 每一根肋的展开机构完全相同, 选取一根肋对其进行运动仿真研究。已知 $l_{OA} = 34.33 \text{ mm}$, $l_{AB} = 69.38 \text{ mm}$; r_0 为滑块在初始状态时 y 方向坐标, 值为 101.68; 设滑块从完全收拢态到完全展开态总行程 H 为 43.7 mm, $\dot{r}_0$ 为初速度, 值为 0, 展开总用时 T 为 10 s。

滑块以匀速运动时滑块行程的变化满足关系式

$$r_1 = \int \dot{r}_1 dt + C_0 \quad (18)$$

式中: r_1 为滑块以匀速运动时行程的变化; $\dot{r}_1$ 为滑块以匀速运动时速度大小; C_0 为保证函数连续性而待

确定的量。代入数据可得, $C_0 = r_0 = 101.67$ 。将式(18)代入到式(5)和式(6), 可得到天线肋展开时角速度 $\dot{\theta}$ 和角加速度 $\ddot{\theta}$ 随时间 t 的变化规律。

滑块以匀加速-匀速-匀减速运动时, 代入数据到式(8)和式(9), 可得 $k = -\frac{43.7}{16}$ 。对式(8)积分可得每个时间段内滑块行程的变化为

$$r_2 = \begin{cases} kt^2/2 + C_1, & 0 \leq t < \frac{T}{5} \\ \frac{kT}{5}t + C_2, & \frac{T}{5} \leq t < \frac{4T}{5} \\ -kt^2/2 + kTt + C_3, & \frac{4T}{5} \leq t < T \end{cases} \quad (19)$$

式中: r_2 为滑块以匀加速-匀速-匀减速运动时滑块行程的变化; C_1 、 C_2 、 C_3 为保证函数连续性而待确定的量, 代入数据可得 $C_1 = 101.67$, $C_2 = 106.96$,

$C_3=194.35$ 。将式(19)代入到式(5)和式(6),可得匀加速匀减速速度规划下,天线肋展开时角速度 $\dot{\theta}$ 和角加速度 $\ddot{\theta}$ 随时间 t 的变化规律。

$$r_3 = \begin{cases} -\frac{125}{2} \frac{(\dot{r}_s - \dot{r}_0)}{T^3} t^4 + 25 \frac{\dot{r}_s - \dot{r}_0}{T^2} t^3 + \dot{r}_0 t + C_{31}, & 0 \leq t < \frac{T}{5} \\ \dot{r}_s t + C_{32}, & \frac{T}{5} \leq t < \frac{4T}{5} \\ \frac{25}{2} \frac{\dot{r}_s}{T^2} t^4 - \left(\frac{80}{3} \frac{\dot{r}_s}{T} + \frac{275}{3} \frac{\dot{r}_s}{T^2} \right) t^3 + \left(\frac{220\dot{r}_s}{T} + 16\dot{r}_s \right) t^2 - 175\dot{r}_s t + C_{33}, & \frac{4T}{5} \leq t < T \end{cases} \quad (20)$$

式中: r_3 为滑块以三次多项式的速度规划运动时滑块行程的变化; C_{31} 、 C_{32} 、 C_{33} 为保证函数连续性而待确定的量,代入数据可得 $C_{31}=101.67$, $C_{32}=107.21$, $C_{33}=-1\,990.50$ 。将式(20)代入到式(5)和式(6),可得三次多项式速度规划下,天线肋展开时角速度

滑块以三次多项式的速度规划运动时,代入数据到式(10)~式(12),可得 $\dot{r}_s = -43.7/8$ 。对式(11)积分可得每个时间段内滑块行程的变化为

$\dot{\theta}$ 和角加速度 $\ddot{\theta}$ 随时间 t 的变化规律。

滑块以五次多项式的速度规划运动时,代入数据到式(13)~式(15),可得 $\dot{r}_{5s} = -\frac{43.7}{8}$ 。对式(14)积分可得每个时间段内滑块行程的变化为

$$r_5 = \begin{cases} \frac{3\,125(\dot{r}_{5s} - \dot{r}_0)}{T^5} t^6 - \frac{1\,875(\dot{r}_{5s} - \dot{r}_0)}{T^4} t^5 + \frac{625}{2} \frac{(\dot{r}_{5s} - \dot{r}_0)}{T^3} t^4 + \dot{r}_0 t + C_{51}, & 0 \leq t < \frac{T}{5} \\ \dot{r}_{5s} t + C_{52}, & \frac{T}{5} \leq t < \frac{4T}{5} \\ -\frac{3\,125\dot{r}_{5s}(4T/5 - t)^6}{T^5} - \frac{1\,875\dot{r}_{5s}(4T/5 - t)^5}{T^4} - \frac{625}{2} \frac{\dot{r}_{5s}(4T/5 - t)^4}{T} + \dot{r}_{5s} t + C_{53}, & \frac{4T}{5} \leq t < T \end{cases} \quad (21)$$

式中: r_5 为滑块以五次多项式的速度规划运动时滑块行程的变化; C_{51} 、 C_{52} 、 C_{53} 为保证函数连续性而待确定的量,代入数据可得 $C_{51}=101.67$, $C_{52}=107.13$, $C_{53}=85\,409.50$ 。

将式(21)代入到式(5)和式(6),可得五次多项式速度规划下,天线肋展开时角速度 $\dot{\theta}$ 和角加速度 $\ddot{\theta}$ 随时间 t 的变化规律。

滑块以正弦函数的速度规划运动时,代入数据到式(16)~式(17),可得 $A_s = -\frac{43.7\pi}{8+6\pi}$ 。对式(16)积分可得每个时间段内滑块行程的变化为

$$r_{\sin} = \begin{cases} -\frac{A_s}{\omega} \cos \omega t + C_{s1}, & 0 \leq t < \frac{T}{5} \\ A_s \sin \left(\frac{\omega T}{5} \right) t + C_{s2}, & \frac{T}{5} \leq t < \frac{4T}{5} \\ \frac{A_s}{\omega} \cos \omega (T - t) + C_{s3}, & \frac{4T}{5} \leq t < T \end{cases} \quad (22)$$

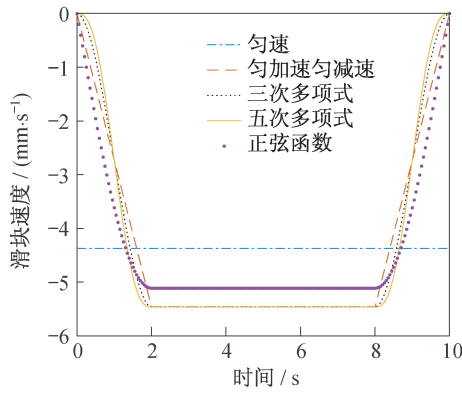
式中: $r_{\sin}$ 为滑块以正弦函数的速度规划运动时滑块行程的变化; C_{s1} 、 C_{s2} 、 C_{s3} 为保证函数连续性而待确定的量,代入数据可得 $C_{s1}=95.16$, $C_{s2}=105.39$, $C_{s3}=64.48$ 。将式(22)代入到式(5)和式(6),可得正弦函数速度规划下,天线肋展开时角速度 $\dot{\theta}$ 和角加

速度 $\ddot{\theta}$ 随时间 t 的变化规律。

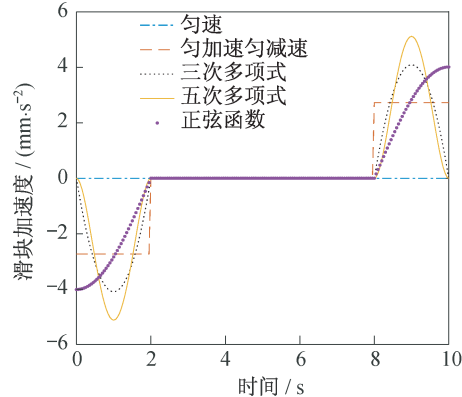
滑块速度分别按照匀速(uniform velocity)、匀加速匀减速(uniform acceleration)、三次多项式(cubic polynomial)、五次多项式(quantic polynimial)和正弦函数(sine fuction)进行速度规划时,得到的滑块速度变化曲线如图6(a)所示,滑块加速度变化曲线如图6(b)所示。

在不同速度规划下进行天线肋的展开过程仿真,为验证仿真可靠性,对天线肋的展开过程分别进行 Matlab 数值仿真与 ADAMS 软件仿真。ADAMS 软件仿真时,将简化的三维实体模型导入到多体系统动力学分析软件 ADAMS 中,然后根据模型的材料和约束特性设置相应的材料属性和约束。在驱动滑块上设置驱动函数,驱动滑块将按照驱动函数进行运动,从而进行运动学仿真。

设软件仿真设时间为 10 s,步数为 200。两种方法得到天线展开时肋顶点的运动轨迹如图 7 所示。滑块分别在匀速运动速度规划、匀加速匀减速速度规划、三次多项式速度规划、五次多项式速度规划和正弦函数速度规划下运动时,天线肋展开时质心角速度变化曲线,分别如图 8(a)~图 8(e)所示,天线肋质心角加速度变化曲线分别如图 9(a)~图



(a) 滑块速度变化曲线



(b) 滑块加速度变化曲线

图 6 不同速度规划下滑块运动变化曲线

Fig.6 Velocity curves of the sliding block in different velocity planning

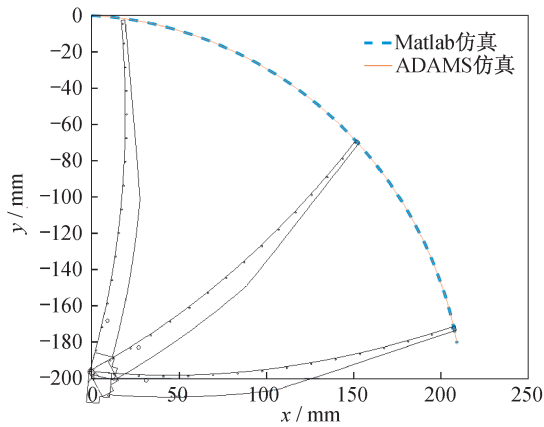
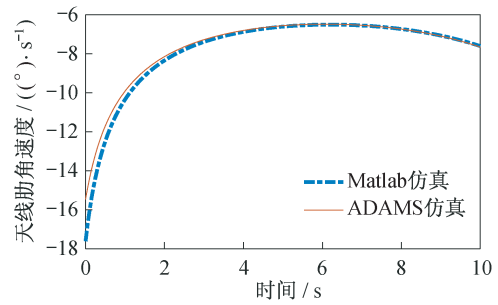


图 7 天线展开时肋顶点的运动轨迹

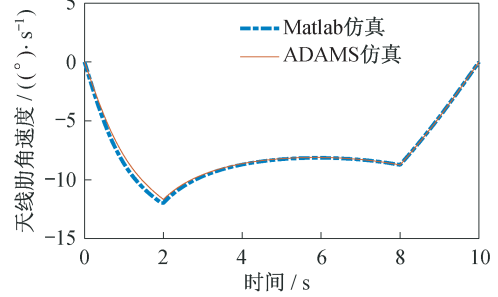
Fig.7 Movement track of the rib vertex of the antenna when it is deployed

9(e)所示。

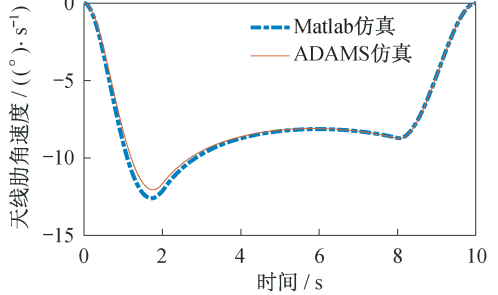
滑块采用不同的速度规划进行天线肋的展开时,由图6、图8和图9可以看出,当天线采用五次多项式速度规划进行展开时,副面与天线肋展开过程



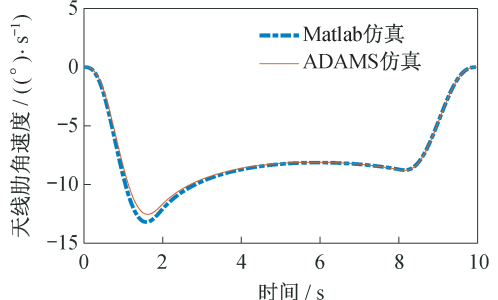
(a) 匀速运动



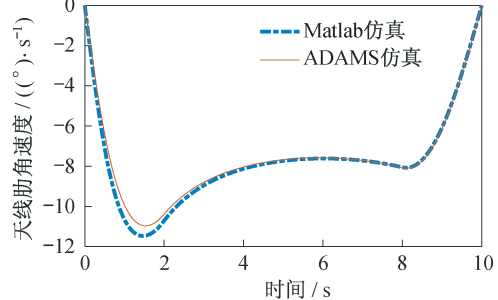
(b) 匀加速匀减速速度规划



(c) 三次多项式速度规划



(d) 五次多项式速度规划



(e) 正弦函数速度规划

图 8 天线肋展开时角速度变化曲线

Fig.8 Angular velocity curves of the antenna when it is deployed

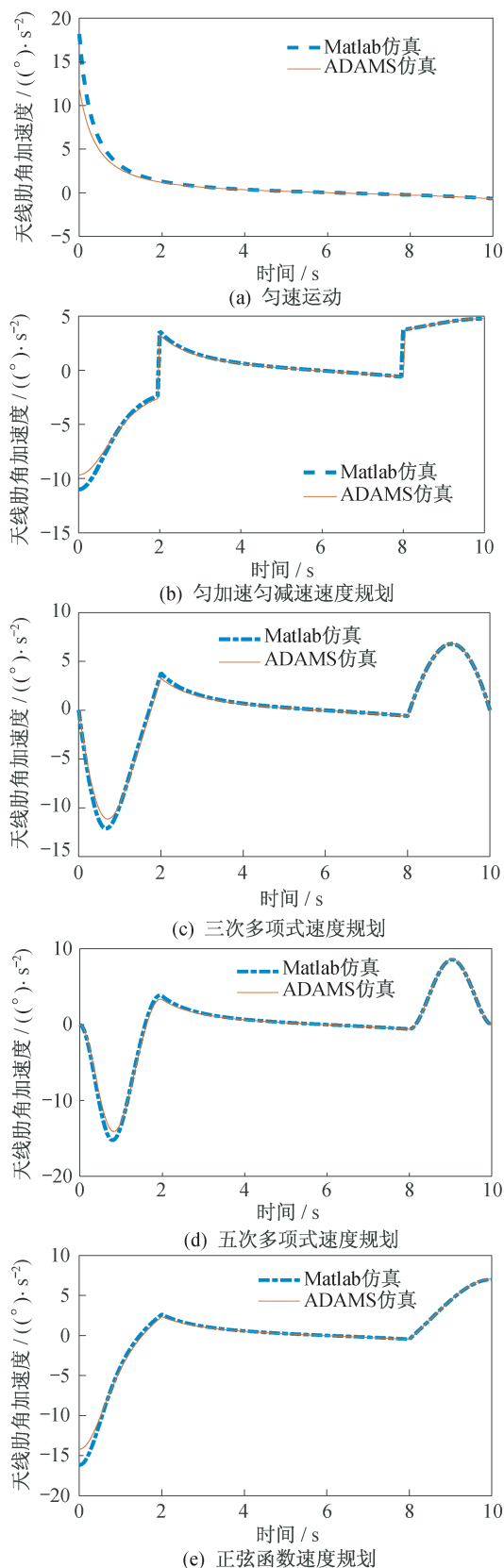


图9 天线肋角加速度变化曲线

Fig.9 Angular acceleration curves of the antenna when it is deployed

的速度加速度连续性更好,为满足天线主副面展开过程的平稳性,滑块采用五次多项式的速度规划进行天线肋的展开较为合理。

3.2 接触力仿真

在天线肋和底座之间添加接触力,ADAMS中接触力^[27-28]的法向力计算方法有补偿法和基于碰撞函数的接触算法两种。补偿法需要确定两个系数——惩罚系数和补偿系数,而这些数据一般需要通过实验测得。本文选用基于碰撞函数的三维接触力(IMPACT型接触力)。

IMPACT函数的格式为

$$\text{IMPACT}(q, \dot{q}, q_1, k_i, e, c_{\max}, d) \quad (23)$$

式中: q 为距离变量,用来定义两个点之间的距离; $\dot{q}$ 为 q 对时间的导数,通常是速度; q_1 为IMPACT的阈值,当 $q > q_1$ 时,IMPACT为0,当 $q \leq q_1$ 时,IMPACT不为0; k_i 为刚度系数; e 为力指数; $c_{\max}$ 为最大阻尼系数; d 为阻尼达到最大值时的切入量。

对于铝材与铝材接触,以上参数值的选取见表1。

表1 IMPACT接触力参数

Tab.1 IMPACT contact force parameters

IMPACT接触力参数	选取值
接触材料	铝材与铝材
接触类型	实体对实体
接触刚度 $k_i/(\text{N}\cdot\text{mm})$	35 000
力指数 e	1.5
阻尼系数 $c_{\max}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{mm}^{-1})$	28
穿透深度 d/mm	0.1

IMPACT函数的返回值如下:

IMPACT =

$$\begin{cases} 0, & q > q_1 \\ k_i - c_{\max} \dot{q} \cdot \text{step}_i(q, q_1 - d, 1, q_1, 0), & q \leq q_1 \end{cases} \quad (24)$$

式中: step_i 为ADAMS中的阶跃函数; $k_i(q_1 - q)^e$ 为弹性力; $c_{\max} \dot{q} \cdot \text{step}_i(q, q_1 - d, 1, q_1, 0)$ 为阻尼力。当 $e=1, c_{\max}=0$ 时,IMPACT函数相当于只产生压缩的线性弹簧。

滑块采用以上5种速度规划进行展开时,相应的接触力变化曲线如图10所示。滑块运动到9.5 s时,天线肋在不同速度规划下开始相继和底座相接触,接触力变化满足式(24),由于天线行程一定,天线完全展开后的预紧力约为104 N。

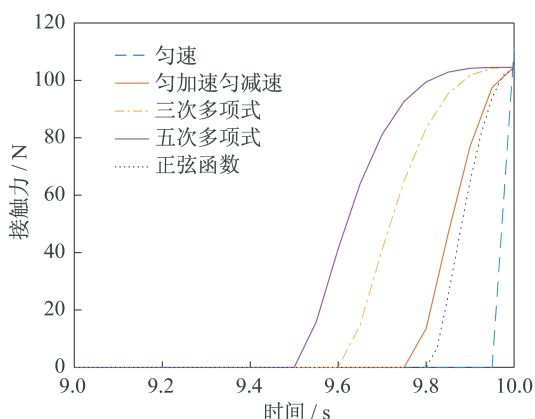


图 10 接触力变化曲线

Fig.10 Contact force curves

滑块采用不同的速度规划进行天线肋的展开,由图 10 可以看出,当天线采用五次多项式速度规划进行展开时,天线肋与底座的接触力变化曲线更加平稳,天线展开过程中冲击最小。综合天线肋展开过程中角速度与角加速度变化曲线,滑块采用五次多项式速度规划为最优速度规划。

4 结束语

本文针对长焦距卡塞格伦式双反射面伞状天线,提出了一种曲柄滑块机构与绳索机构相结合的展开机构,实现了主副面的同步展开,天线收拢后结构紧凑。建立了天线展开过程的运动分析模型,通过实例仿真,对比不同的速度规划下天线展开时副面的速度、加速度变化与天线肋的角速度、角加速度、接触力变化,确定在五次多项式速度规划下展开最为合理。

参考文献

- [1] 郭宏伟,王建东,刘荣强,等. 固面天线可展开机构设计及动力学分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(7): 1-8.
- [2] WANG C G, XIA Z M, TAN H F. Initial shape design and stability analysis of rib for inflatable deployable reflector [J]. AIAA Journal, 2015, 53(2): 486-492.
- [3] 胡飞,宋燕平,郑士昆,等. 空间构架式可展天线研究进展与展望[J]. 宇航学报, 2018, 29(2): 111-120.
- [4] 郭金伟,许允斗,刘文兰,等. 基于四面体单元的新型可展机构自由度分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(12): 9-18.
- [5] 戴宇航,蒋松,陈金宝,等. 大型星载天线桁架式可展机构的模态分析[J]. 上海航天, 2019, 36(1): 96-100.
- [6] GUAN F L, DAI L. Dynamic analysis and test research of double-ring deployable truss structure [J].

- Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(9): 1605-1610.
- [7] 刘瑞伟,郭宏伟,刘荣强,等. 大口径索肋张拉式折展天线索网结构动力学特性分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(12): 1-8.
- [8] 段宝岩. 大型空间可展开天线的研究现状与发展趋势[J]. 电子机械工程, 2017, 33(1): 1-14.
- [9] 马小飞,李洋,肖勇,等. 大型空间可展开天线反射器研究现状与展望[J]. 空间电子技术, 2018, 15(2): 16-26.
- [10] RAHMAT-SAMII Y, HAUPT R L. Reflector antenna developments: a perspective on the past, present, and future [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2015, 57(2): 85-95.
- [11] RAHMAT-SAMII Y, DENSMORE A C. Technology trends and challenges of antennas for satellite communication systems [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(4): 1191-1204.
- [12] ZOU T, CHEN W J, PENG F J, et al. Numerical simulation of stowing and deploying process of lenticular wrapped-rib [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(2): 151-156.
- [13] HASANZADE V, SEDIGHY S H, SHAHRAVI M. Compact deployable umbrella antenna design with optimum communication properties [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2017, 54(3): 781-785.
- [14] ZHENG F, HE J, ZHANG P. Simulating evaluation of new space deployable antenna [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2016, 88(6): 835-845.
- [15] CHAHAT N, HODGES R, SAUDER J, et al. CubeSat deployable Ka-band mesh reflector antenna development for earth science missions [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(6): 2083-2093.
- [16] SAUDER J, CHAHAT N, HODGES R, et al. Designing, building, and testing a mesh Ka band parabolic deployable antenna (KaPDA) for CubeSats [C]// The 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2016: 1-7.
- [17] CHAHAT N, SAUDER J, HODGES R E, et al. The deep-space network telecommunication CubeSat antenna: using the deployable Ka-band mesh reflector antenna [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2017, 59(2): 31-38.
- [18] SAUDER J, CHAHAT N, HIRSCH B, et al. From prototype to flight: qualifying a Ka-band parabolic deployable antenna (KaPDA) for Cubesats [C]// The 4th AIAA Spacecraft Structures Conference. 2017: 9-13.

(下转第 36 页)