

# 周边桁架可展开天线小冲击展开过程设计

张逸群, 杨东武, 杜敬利

(西安电子科技大学电子装备结构教育部重点实验室, 西安 710071)

**摘 要:** 提出了周边桁架可展天线展开过程的一种轨迹设计方法。通过优化方法选择贝塞尔曲线作为驱动索的输入运动轨迹, 保证了展开角加速度的连续性并有效降低其峰值, 从而达到了减小天线所受冲击的目标。通过数值仿真对比得出结论, 天线的展开过程应是一个无中间匀速状态的先加速后减速过程。

**关键词:** 可展开天线; 展开过程设计

**中图分类号:** V443; V448

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-1328(2011)05-1205-06

**DOI:** 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.05.035

## Deployment Design for Reducing Impact on the Hoop Truss Deployable Space Antenna

ZHANG Yi-qun, YANG Dong-wu, DU Jing-li

(Key laboratory of Electronic Equipment Structure of Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A deployment trajectory design approach of the hoop truss deployable space antenna is proposed. Optimization method is used to select Bezier curves as the input motion trajectory of driving cable, which guarantees the continuity of deployment acceleration and efficiently reduces the peak value. As a result, the impact on antennas is reduced. Numerical simulations demonstrate that the deployment should be an acceleration-deceleration process without mid-uniform-speed period.

**Key words:** Deployable antenna; Deployment design

### 0 引 言

周边桁架式可展开天线由于其结构简单、易折叠、空间热稳定性好、易于实现大口径化等优点被广泛关注和应用<sup>[1-2]</sup>, 如图 1 所示。

可展开天线有收拢和展开两种状态, 在卫星发射过程中处于收拢状态, 进入轨道后, 天线由伺服电机通过桁架中的驱动索提供动力展开成预定形状。如图 2 所示, 假设  $AF$  边固定, 通过处于斜边  $BF$  和  $BD$  中的驱动索提供的驱动力, 可以将桁架单元撑开成为两个矩形单元。展开过程是天线最容易出现故障的环节之一, 表现为大的驱动力冲击产生过大的振动或损坏天线本身结构。为了使其顺利展开,

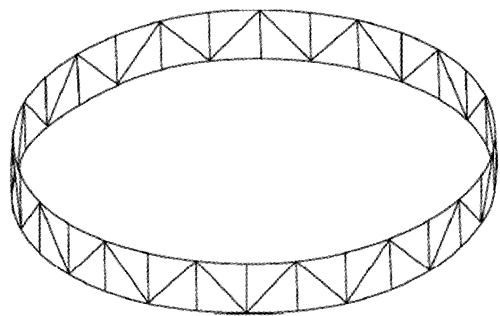


图 1 周边桁架可展开天线

Fig. 1 Hoop truss deployable space antenna

同时避免在展开过程中冲击过大, 有必要对天线展开过程的控制策略加以研究。

基于位置控制的展开控制策略首先根据展开要

求对周边单元的展开过程进行轨迹规划,然后根据单元的运动学关系,将轨迹规划转化为展开装置的位移规划。从而通过控制器控制电机驱动天线展开。文献[3]提出将天线展开角速度规划为匀加速-匀速-匀减速过程,通过逆运动学方程得到驱动索的位移,从而使天线展开。但是,由于加速和减速的过程都是线性的,导致展开角加速度是不连续函数,导致天线受到大的冲击力。文献[4]针对上述弊端,使用五次多项式曲线规划展开过程中的加速和减速过程,中间的大部分时间保持匀速运动,从而有效地消除了展开运动状态中的不连续性。但是由于天线所受冲击的大小主要是由天线展开过程中加速度的大小决定,所以为了使得天线展开平稳,应保证展开角加速度峰值尽可能小,这一点作者并未考虑。文献[5-8]消除了凸轮机构中存在的运动不连续性并且降低了从动件加速度峰值。文献[9]针对曲柄滑块机构通过设计贝塞尔曲线的控制点得到了一种广义的输入轨迹设计方法,可以获得任意的运动输出。

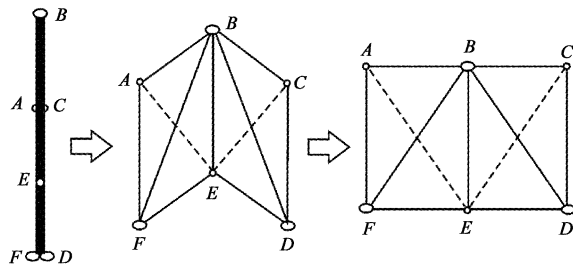


图2 展开过程示意图

Fig. 2 Deployment schematic diagram

本文利用贝塞尔函数来合成驱动索的输入运动轨迹,以保证展开角加速度的连续性并有效地降低展开角加速度峰值。提出求取输入运动轨迹时应注意的设计变量及约束条件,利用序列二次规划法求得最优的驱动索输入运动轨迹。通过与之前研究结果的对比得到结论,展开过程中间段并不需要保持匀速运动,匀速运动段会使展开所受冲击增大。通过数值仿真,证明了该方法的合理性和有效性。

### 1 周边桁架天线的运动学分析

天线中相邻两桁架单元如图3所示。通过运动学递推分析,桁架任意单元*j*中的节点*P*在惯性坐标系下的速度分量可表示为<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} V_{xj} = -\xi \dot{\phi} \sin\phi \\ V_{yj} = \psi \dot{\phi} \sin\phi \\ V_{zj} = \zeta \dot{\phi} \sin\phi \end{cases} \quad (1)$$

加速度分量可表示为:

$$\begin{cases} A_{xj} = -\xi(\ddot{\phi}^2 \cos\phi + \dot{\phi}^2 \sin\phi) \\ A_{yj} = \psi(-\ddot{\phi}^2 \sin\phi + \dot{\phi}^2 \cos\phi) \\ A_{zj} = \zeta(\ddot{\phi}^2 \cos\phi + \dot{\phi}^2 \sin\phi) \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$\xi = \left[ \sum_{i=2}^j \cos\left((i-2) \frac{360}{n}\right) \right] R_2,$$

$$\psi = 0.5 [1 - (-1)^{j-1}] R_2,$$

$$\zeta = \left[ \sum_{i=2}^j \sin\left((i-2) \frac{360}{n}\right) \right] R_2$$

式中:  $R_1$  为桁架竖杆长度;  $R_2$  为桁架横杆长度;  $n$  为天线桁架单元数;  $\phi$  为展开角。

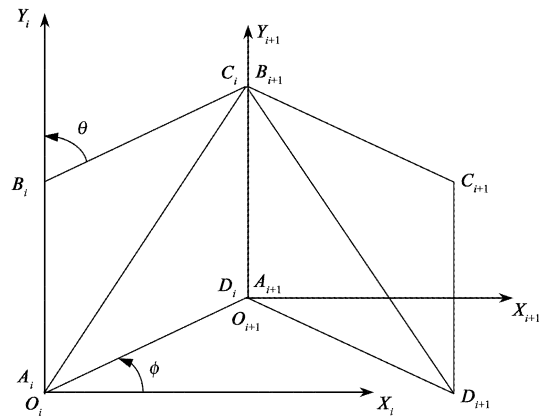


图3 相邻两桁架单元

Fig. 3 Two joined truss cells

可以看到,在天线结构形式确定后,天线上任一点的运动状态是由展开角的位移、速度、加速度计算得出,所以展开角的运动轨迹即可描述天线的运动状态。

由于驱动索索长可以等效被看作天线桁架单元斜边的长度,所以展开角的运动状态与驱动索的运动状态关系可表示为:

$$\phi = \arccos[(R_1^2 + R_2^2 - L^2)/(2R_1R_2)] - (\pi/2) \quad (3)$$

$$\dot{\phi} = L \dot{L} / (R_1 R_2 \cos\phi) \quad (4)$$

$$\ddot{\phi} = (\ddot{L}^2 + L \ddot{L} + R_1 R_2 \dot{\phi}^2 \sin\phi) / (R_1 R_2 \cos\phi) \quad (5)$$

可知,通过对驱动索的运动轨迹的规划,可以获得所需要的天线展开运动轨迹。

### 2 驱动索输入轨迹规划

这里引入贝塞尔曲线去合成驱动索的输入轨迹。

贝塞尔曲线是由控制点集合和贝塞尔基函数定义的,贝塞尔曲线的次数是由控制点的个数决定, $n + 1$  个控制点可以定义一条  $n$  次贝塞尔曲线:

$$B_n(T) = \sum_{i=0}^n P_i \cdot B_{i,n}(T) \quad 0 \leq T \leq 1 \quad (6)$$

其中基函数:

$$B_{i,n}(T) = \frac{n!}{i!(n-i)!} T^i (1-T)^{n-i} \quad (7)$$

$P_i$  为第  $i$  个控制点的坐标。

贝塞尔曲线的形状由控制点集合  $P = \{P_i\}$  决定。起始点  $P_0$  和终止点  $P_n$  确定后,通过设置不同的控制点位置,可以得到任意形状的曲线。图 4 为两种不同形状的三次贝塞尔曲线。

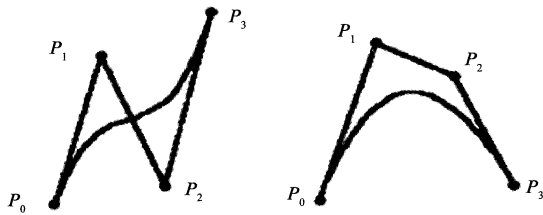


图 4 两种三次贝塞尔曲线

Fig. 4 Bezier curves with different shape

根据贝塞尔曲线的性质,我们用  $n$  次贝塞尔曲线定义驱动索的输入轨迹:

$$L(t) = \sum_{i=0}^n P_i \cdot B_{i,n}(t) \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (8)$$

参数  $t$  为广义时间,范围从 0 到 1。

驱动索速度和加速度为:

$$\dot{L}(t) = \frac{dL(t)}{dt} = \sum_{i=0}^n P_i \cdot \frac{dB_{i,n}(t)}{dt} \quad (9)$$

$$\ddot{L}(t) = \frac{d^2L(t)}{dt^2} = \sum_{i=0}^n P_i \cdot \frac{d^2B_{i,n}(t)}{dt^2} \quad (10)$$

其中

$$\frac{dB_{i,n}(t)}{dt} = \frac{n!}{(i-1)!(n-i)!} t^{i-1} (1-t)^{n-i} - \frac{n!}{i!(n-i-1)!} t^i (1-t)^{n-i-1} \quad (11)$$

$$\frac{d^2B_{i,n}(t)}{dt^2} = \frac{n!}{(i-2)!(n-i)!} t^{i-2} (1-t)^{n-i} - 2 \frac{n!}{(i-1)!(n-i-1)!} t^{i-1} (1-t)^{n-i-1} - \frac{n!}{i!(n-i-2)!} t^i (1-t)^{n-i-2} \quad (12)$$

得到了驱动索的位移、速度、加速度规划后,通过机构运动学方程式(3)~(5),即可得到相应的展开角位移、速度、加速度曲线。

由于  $n$  次贝塞尔曲线的导数是一条  $n - 1$  次贝塞尔曲线<sup>[10]</sup>,即  $n$  次贝塞尔曲线是  $n$  阶可微的,所以为了保证天线展开时角速度,角加速度,角加加速度的连续性,至少应取 4 次以上的贝塞尔曲线合成驱动索的输入位移轨迹。

### 3 驱动索输入轨迹优化

在描述驱动索输入运动状态的式(8)~(10)中,控制点位置为未定义的量。 $P_0$  和  $P_n$  为初始点和终止点。则剩余的控制点( $P_1, \dots, P_{n-1}$ )作为展开驱动系统中的设计变量,使用优化方法选择它们从而获得我们所需要运动性能。本文以减小展开过程中对卫星天线的冲击为目标,特定义目标函数为最小化展开角加速度峰值。于是优化模型为:

$$\text{寻找 } P = (P_1, \dots, P_{n-1})^T \quad (13)$$

$$\text{最小化 } f = \max_P(|\phi|) \quad (14)$$

满足约束

$$h_j(P_1, \dots, P_{n-1}) = 0, \quad j = 1, \dots, n_h \quad (15)$$

$$g_k(P_1, \dots, P_{n-1}) < 0, \quad j = 1, \dots, n_g \quad (16)$$

其中,  $n_h$  和  $n_g$  分别为等式和不等式约束个数。约束由所需输出的运动性能决定。首先,天线展开起始和终止时都是静止的,即驱动索速度和加速度都为零,应有等式约束:

$$h_1(P_1, \dots, P_{n-1}) = \dot{L}(0) = 0 \quad (17)$$

$$h_2(P_1, \dots, P_{n-1}) = \dot{L}(1) = 0 \quad (18)$$

$$h_3(P_1, \dots, P_{n-1}) = \ddot{L}(0) = 0 \quad (19)$$

$$h_4(P_1, \dots, P_{n-1}) = \ddot{L}(1) = 0 \quad (20)$$

其次,如果要求展开角速度在某段时间内保持匀速,则有不等式约束:

$$g(P_1, \dots, P_{n-1}) = \int_{t_1}^{t_2} |\dot{\phi}(t) - \dot{\phi}(t_1)| dt - \chi < 0 \quad (21)$$

其中,  $[t_1, t_2]$  为匀速运动的时间区间,  $\chi$  为一个很小的正数, 表示误差范围的大小。

至此, 优化所需的目标函数, 设计变量, 约束条件都已推导得出。任何一种优化方法都可用于求解此问题, 由于该模型的强非线性特性, 本文使用序列二次规划法 (SQP) 求解得到  $(P_1, \dots, P_{n-1})$ , 带入式 (8) ~ (10) 即可得驱动索的运动状态, 再通过式 (3) ~ (5) 得到天线展开角的运动状态。

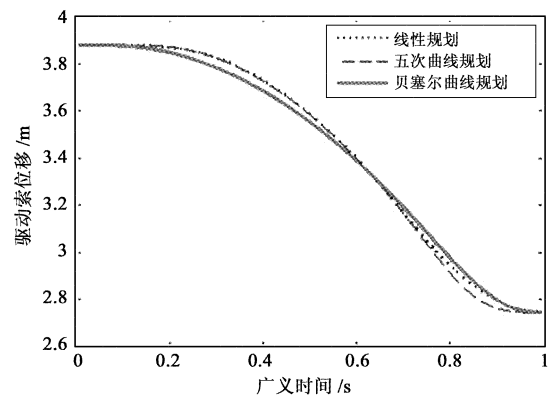
#### 4 数值算例与讨论

以图 3 所示周边桁架天线展开单元为例, 设计数值仿真实验。已知竖杆  $R_1 = 2\text{m}$ , 横杆  $R_2 = 1.88\text{m}$ 。使用 10 次贝塞尔曲线规划驱动索的输入轨迹。则驱动索的初始值和终止值分别为初始长度  $P_0 = 3.88$  和展开到位后长度  $P_{10} = 2.7449$ 。为了使得展开角速度在广义时间  $0.3 - 0.7\text{s}$  内保持匀速, 需加入非线性不等式约束 (21), 取  $t_1 = 0.3, t_2 = 0.7$  并取  $\chi = 1$ 。

优化结果为  $\mathbf{P} = (3.879, 3.88, 3.866, 3.648, 3.827, 3.099, 3.710, 2.744, 2.744)$ 。对应的输入和输出运动状态如图 5, 6 所示。

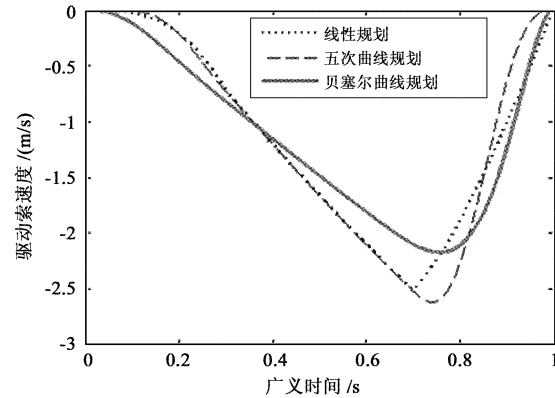
可以看到, 展开过程中, 角速度在  $0.3 - 0.7\text{s}$  段基本保持匀速。消除了线性规划存在的驱动速度、加速度、展开角速度和角加速度的不连续性。五次多项式规划产生的展开角加速度峰值为  $14.0246 \text{ rad/s}^2$ , 使用本方法得到的展开角加速度的峰值为  $11.8637 \text{ rad/s}^2$ , 减小  $15.4\%$ 。同时, 本文使用的方法所需驱动加速度峰值  $15.8932 \text{ m/s}^2$  也小于五次多项式规划方法产生的驱动加速度峰值  $17.9660 \text{ m/s}^2$ , 减小  $11.6\%$ 。

在优化过程中发现, 非线性不等式约束对优化结果的影响是巨大的。为了保证展开角速度的中间段匀速, 即在中间段保持展开角加速度为零, 开始段和结束段中展开角加速度的峰值必然会增大。为尽可能地减小天线展开过程中所受冲击, 不考虑非线性不等式约束 (21) 对控制点  $\mathbf{P}$  进行优化。优化结果  $\mathbf{P} = (3.88, 3.88, 3.879, 3.849, 3.786, 3.195, 3.078, 2.744, 2.744)$ 。对应的输入和输出运动状态如图 7, 8 所示。



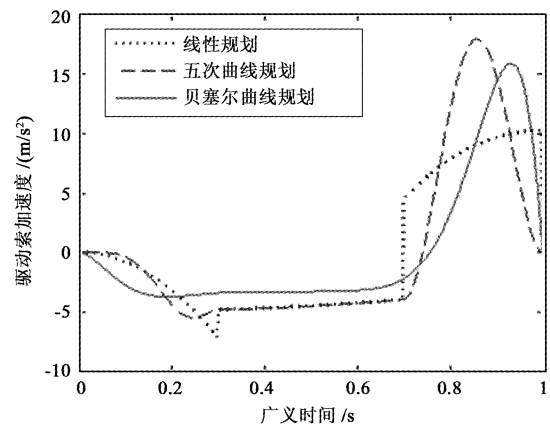
(a) 驱动索位移

(a) Displacement of driving cable



(b) 驱动索速度

(b) Velocity of driving cable



(c) 驱动索加速度

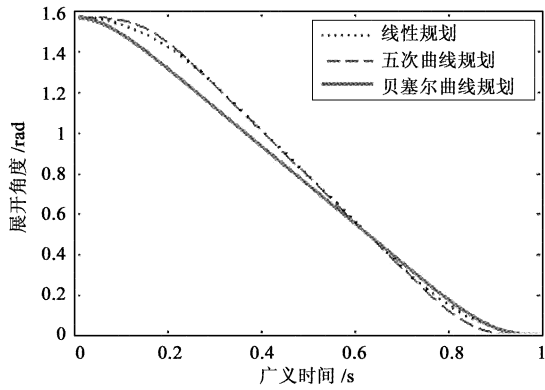
(c) Acceleration of driving cable

图 5 贝塞尔规划输入轨迹

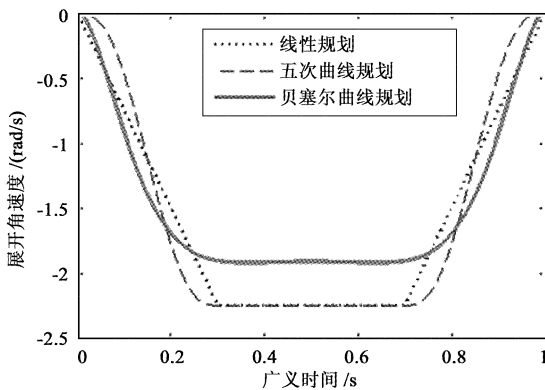
Fig. 5 Input trajectory with Bezier programming

可见, 不考虑非线性约束 (21) 时, 展开角加速度峰值由  $11.8637 \text{ rad/s}^2$  降至  $7.6037 \text{ rad/s}^2$ , 减小  $36\%$ 。同时, 所需的驱动加速度峰值也从  $15.8932 \text{ m/s}^2$  降低到  $9.8772 \text{ m/s}^2$ , 减小  $37.7\%$ 。所

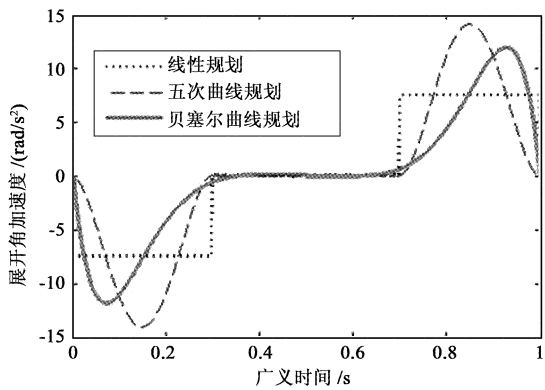
以,为降低整个展开过程中所受到冲击,天线的展开角速度不应按之前研究所指出的满足先加速、后匀速、最后减速的过程,而应该是一个没有中间匀速运动状态的先加速然后减速的过程。



(a) 展开角度  
(a) Deployment angle



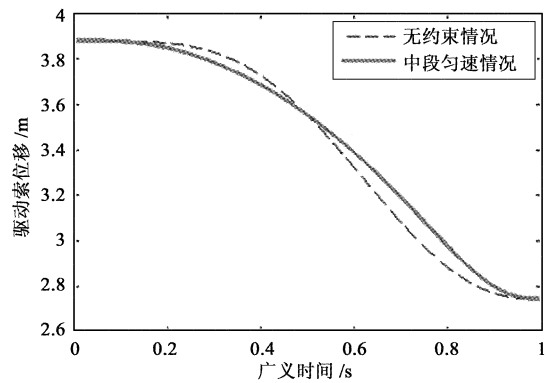
(b) 展开角速度  
(b) Deployment angular speed



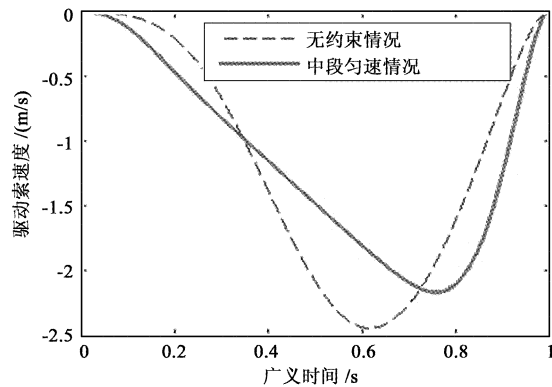
(c) 展开角加速度  
(c) Deployment angular acceleration

图 6 贝塞尔规划输出轨迹

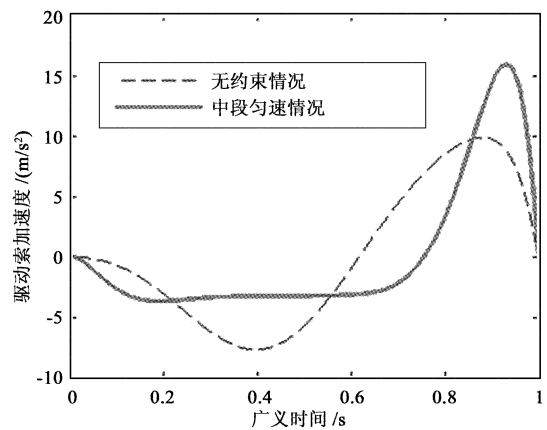
Fig. 6 Output trajectory with Bezier programming



(a) 驱动索位移  
(a) Displacement of driving cable



(b) 驱动索速度  
(b) Velocity of driving cable



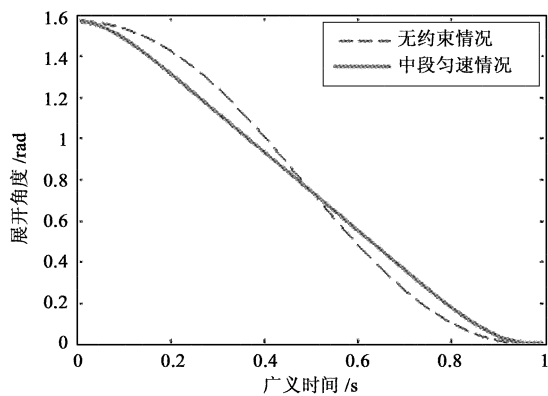
(c) 驱动索加速度  
(c) Acceleration of driving cable

图 7 输入轨迹对比

Fig. 7 Comparison of input trajectory

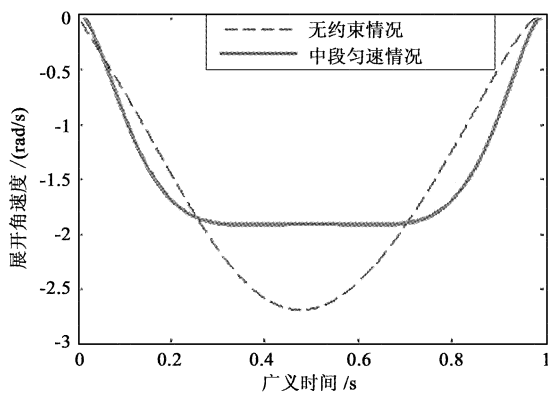
### 5 结论

本文基于贝塞尔函数,利用优化的方法选择控制



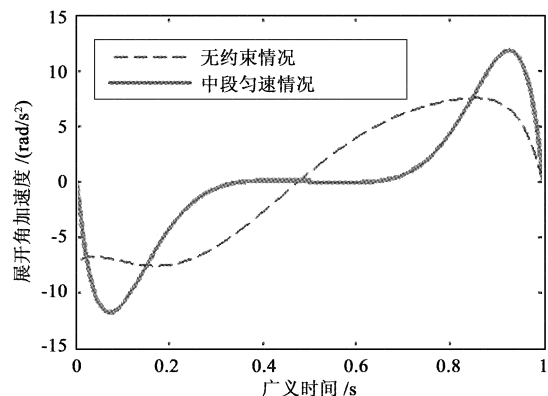
(a) 展开角度

(a) Deployment angle



(b) 展开角速度

(b) Deployment angular speed



(c) 展开角加速度

(c) Deployment angular acceleration

图 8 输出轨迹对比

Fig. 8 Comparison of output trajectory

点来合成驱动索的输入运动轨迹,以保证天线展开角加速度的连续性并有效地降低展开角加速度峰值。数值仿真实验说明了该方法的合理性和有效性。

其次,与之前研究进行对比得出结论,展开过程保持中间匀速运动段会使天线所受冲击增大。所以

天线的展开角速度应该是一个无中间匀速运动状态的平稳的先加速后减速过程。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Thomson M W. The astromesh deployable reflector [ J ]. IEEE Antennas and Propagation Society, 1999, 3: 1516 - 1519.
- [ 2 ] 罗鹰, 段宝岩. 周边桁架式展开天线几何布局优化 [ J ]. 空间科学学报, 2004, 24(2): 132 - 137. [ Luo Ying, Duan Bao-yan. Layout optimization of large flexible deployed antenna [ J ]. Chin. J. Space Sci. 2004, 24(2): 132 - 137. ]
- [ 3 ] 段宝岩. 柔性天线结构分析、优化与精密控制 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [ 4 ] 李团结, 张琰, 李涛. 周边桁架可展天线展开过程动力学分析及控制 [ J ]. 航空学报, 2009, 30(3): 444 - 449. [ Li Tuan-jie, Zhang Yan, Li Tao. Deployment dynamic analysis and control of hoop truss deployable antenna [ J ]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2009, 30(3): 444 - 449. ]
- [ 5 ] Yan H S, Hsu M H, Fong M K, et al. A kinematic approach for eliminating the discontinuity of motion characteristics of cam-follower systems [ J ]. J Appl Mech Robot, 1994, 1(2): 1 - 6.
- [ 6 ] Yan H S, Tsai M C, Hsu M H. A variable-speed method for improving motion characteristics of cam-follower systems [ J ]. ASME Trans J Mech Design, 1996, 118(1): 250 - 258.
- [ 7 ] Yan H S, Fong M K. An approach for reducing the peak acceleration of cam - follower systems using a B - spline representation [ J ]. J Chin Soc Mech Eng., 1994, 15: 48 - 55.
- [ 8 ] Yan H S, Tsai M C, Hsu M H. An experimental study of the effects of cam speed on cam-follower systems [ J ]. Mech Mach Theory, 1996, 31(4): 397 - 412.
- [ 9 ] Yan H S, Chen W R. On the output motion characteristics of variable input speed servo controlled slider-crank mechanisms [ J ]. Mech Mach Theory, 2000, 35(4): 541 - 561.
- [ 10 ] 李团结, 文群燕, 蒋而进. 伺服输入曲柄滑块机构的控制模型 [ J ]. 西安电子科技大学学报, 2002, 29(3): 415 - 418. [ Li Tuan-jie, Wen Qun-yan, Jiang Er-jin. A control model of slider - crank mechanism with a variable input speed [ J ]. Journal of Xidian University, 2002, 29(3): 415 - 418. ]

作者简介: 张逸群(1984 -), 男, 博士研究生, 主要从事柔性机构控制, 空间天线结构与控制集成设计。

通信地址: 西安电子科技大学电子装备结构教育部重点实验室(710071)

电话: (029)88207425

E-mail: tallyho@sohu.com

(编辑: 曹亚君)