

# 弹簧驱动的剪式铰可展开天线设计与分析<sup>①</sup>

江 洁<sup>1,2</sup>, 李团结<sup>2</sup>, 邓汉卿<sup>2</sup>, 林占超<sup>2</sup>

(1. 红问学院, 内蒙古自治区 661100; 2. 西安电子科技大学 机电工程学院, 西安 710071)

**摘 要:**空间可展开天线是现代卫星通信、地球观测、深空探测等航天和国防领域的关键设备之一, 现正朝着高频段、高增益、高精度与大口径的方向发展。剪式铰可展开天线在周边桁架天线的基础上, 结合张拉整体结构的特性设计而成, 使用弹簧驱动的剪式铰结构形成自驱动展开结构。对其结构设计原理、不同口径下形面精度以及展开过程运动性能的研究和分析表明, 该天线收拢体积小、形面精度高、质量轻, 可用于制作大口径、高精度的空间可展开天线。

**关键词:**弹簧驱动; 剪式铰; 大口径; 高精度; 可展开天线

**D O I:**10.3969/j.issn.1674-7135.2013.03.005

## 0 引言

在卫星通信、地球观测、陆地遥感、深空探测与通信等航天及国防领域, 空间大型可展开天线是必不可少的关键设备之一, 现正朝着高频段、高增益、高定位精度与大口径的方向发展。

目前国外常见的可展开天线的形式有: 固面展开天线、构架式可展开天线、半刚性可展开天线、伞状可展开天线、充气可展开天线、环形可展开天线等, 而具有制作大口径、高精度可展开天线前景的类型主要为上面所述后三种。伞状可展开天线具有结构简单, 展开可靠性高的优点。但是其收纳率小, 仅适用于低频段、小口径的天线<sup>[1]</sup>。充气可展开天线具有无可争议的轻质量, 但是其制作技术尚未成熟, 自美国 1996 年开展的在轨试验失败后, 开展的进一步研究较少, 尚未在轨应用。环形可展开天线虽然起步较晚, 却是大型空间可展开天线家族中的“后起之秀”。环形可展开天线也叫周边桁架天线, 采用周边可展开桁架结构和柔性网面成型技术, 在一定范围内口径的增大, 桁架结构形式不需要改变, 质量也不会成比例增长。目前已经在国外“THURAYA”、“MBSAT”、“INMARSAT”等系列卫星上得到应用<sup>[2]</sup>。

然而太空环境特殊, 空间机构<sup>[3]</sup>工作过程不易控制, 一旦出错将有可能“全盘皆输”, 甚至导致整个航天项目的失败。这样的特点决定了空间机构必须对其稳定可靠的工作有充分的保证, 对于大型的

空间可展开天线尤其是这样。虽然周边桁架天线作为现在和未来研制超大型空间可展开机构的理想结构形式, 可是由周边桁架结构形式制作的天线却也存在着不可避免的问题: 其环形刚性支架的结构形式不至于使桁架结构重量随着天线口径的增大而成倍增长, 但是驱动传动链较长, 集中控制的驱动展开系统并不能保证展开过程的稳定平滑。弹簧驱动的剪式铰可展开天线由此而产生, 在周边桁架天线的基础上, 结合张拉整体结构的特性设计而成, 使用弹簧驱动的剪式铰结构形成自驱动展开结构。口径增加时, 剪式铰天线展开系统复杂度并不需增加, 而且该驱动系统属于分散驱动方式, 可以有效保证展开过程顺利稳定。对其结构设计原理、不同口径下形面精度以及展开过程运动性能的研究和分析表明, 剪式铰可展开天线收拢体积小、形面精度高、质量轻, 可用于制作大口径、高精度的空间可展开天线。

文章对弹簧驱动的剪式铰可展开天线(下称剪式铰天线)的结构设计原理进行介绍, 通过对天线性能的研究和分析总结了该天线的优良特性。

## 1 结构设计

### 1.1 结构介绍

剪式铰天线在周边桁架天线的基础上, 综合了张拉机构的特性, 不再使用以往桁架天线电机集中驱动的形式, 转而利用弹簧结构形成新型的自驱动展开结构, 其基本形式如图 1 所示。剪式铰天线可

由多个单元组成,每个单元的四边以弹簧连接,四边形的两个对角线为两刚性杆,杆中间用剪式铰连接(图2),不同单元之间用专用接头相连,最终形成天线整体桁架,用以支撑反射面。与周边桁架天线相比,在同样口径、桁架边数和桁架高度情况下,剪式铰天线收拢体积小,且省去了一套复杂的驱动传统系统,结构简单。

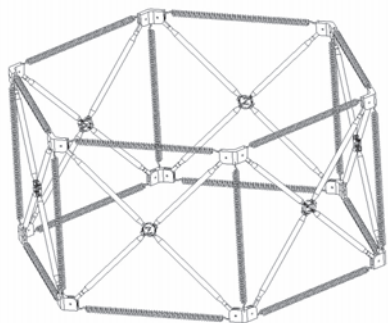


图1 剪式铰天线桁架

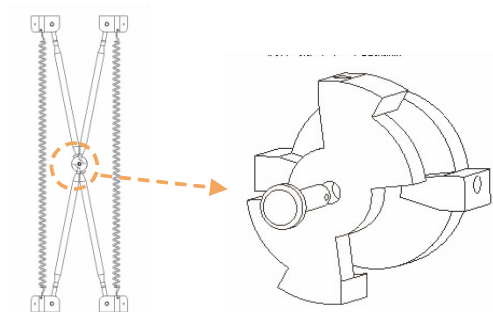


图2 收拢态单元与剪式铰

## 1.2 天线参数关系推导

对于这样一个由弹簧驱动的天线机构,剪式铰天线的展开过程完全由弹簧能量的释放来完成,而其展开过程在收拢态确定后,便不受外界影响。由势能最小定理可知,最终静力平衡状态必然是势能最小态。也就是说天线最终展开的状态只取决于弹簧参数和索网张力。推导各个参数之间的关系如下。

设处在展开态剪式铰天线有  $n$  单元,半径为  $R$ 。水平弹簧刚度为  $K_1$ ,原长为  $L_1$ ,展开态长度为  $b$ ,则  $b = 2R\sin(\frac{180}{n}) = 2R\sin(e)$ ,其中  $e = \frac{180}{n}$ 。竖向弹簧刚度为  $K_2$ ,原长为  $L_2$ ,展开态长度即为天线高度  $h$ 。令水平弹簧与直径方向的夹角为  $\theta$ ,则  $\theta = (180 - \frac{360}{n})/2 = 90 - e$ ;斜向杆与竖向弹簧之间的夹角为

$\alpha$ ,有  $\alpha = \arctan(\frac{b}{n})$ 。

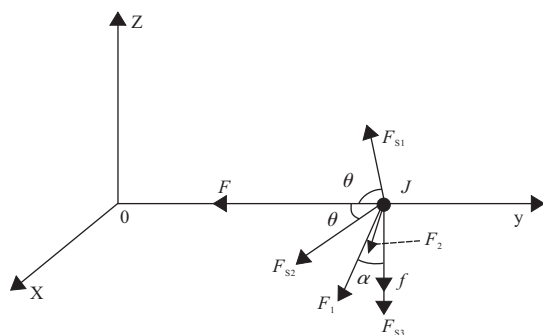


图3 杆件一点受力分析图

以剪式铰天线桁架上平面几何中心为原点建立装配坐标系,选取桁架上一点  $J$ ,坐标  $(0, R, 0)$ ,进行静力平衡分析(弹簧所有端点都是对称的),受力示意图如图3所示。设索网预张力指向原点的分力为  $F$ ,沿  $Z$  轴负方向的分力为  $f$ ;弹簧1(水平弹簧)上的力为  $F_{s1}$ ,弹簧2(水平弹簧)的力为  $F_{s2}$ ,弹簧3(竖向弹簧)的力为  $F_{s3}$ ;斜杆1方向的力为  $F_1$ ,斜杆2方向的力为  $F_2$ 。其中  $F_{s1} = F_{s2} = K_1(L_1 - b)$ ,  $F_{s3} = K_2(L_2 - h)$ 。分别从  $x, y, z$  三个方向进行如下受力分析得到:

$$\begin{cases} F_2\sin(\alpha)\sin(\theta) + F_2\sin(\theta) - F_1\sin(\alpha)\sin(\theta) - F_{s1}\sin(\theta) = 0 \\ -F_{s1}\cos(\theta) - F_1\sin(\alpha)\cos(\theta) - F_{s2}\cos(\theta) - F_2\sin(\alpha)\cos(\theta) - F = 0 \\ -F_1\cos(\alpha) - F_2\cos(\alpha) - f - F_{s3} = 0 \end{cases}$$

整理并消除  $\alpha$  可得到如下公式:

$$2K_1L_1\sin(e) - 2R(2K_1 - K_2 + \frac{K_2L_2}{h})\sin^2(e) = C[e]$$

其中,  $C[e] = \frac{2}{h}Rf\sin^2(e) - F$ 。

当索网张力远远小于内部弹簧力时,有  $C[e] = 0$ ,得到:

$$2K_1L_1\sin(e) - 2R(2K_1 - K_2 + \frac{K_2L_2}{h})\sin^2(e) = 0 \quad (1)$$

在此条件下,假如水平弹簧和竖直弹簧选取同样的参数,即  $K_1 = K_2 = K$  以及  $L_1 = L_2 = L$ ,得到:

$$2L - 2R(1 + \frac{L}{h})\sin(e) = 0 \quad (2)$$

进一步推导可得:

$$L = \frac{Rh\sin(e)}{h - R\sin(e)} \quad (3)$$

由公式(1)可知,影响天线静力平衡的参数为弹簧刚度  $K_1, K_2$ ,弹簧原长  $L_1, L_2$ ,天线半径  $R$ ,桁架

高度  $h$  和桁架边数  $n$ 。当桁架展开后,为了使天线保持一定的刚度,以承受一定的外载荷,需使横向和竖向弹簧保持同样的拉力。在此条件下,如果横向和竖向弹簧选取同样的刚度和原长,那么从公式(2)可知,此时弹簧的刚度将不再影响展开最终状态,只是影响展开过程和天线内部力的大小,进而影响结构的整体刚度。若设定参数  $R$ 、 $h$  和  $n$ ,则可直接通过公式(3)求出所需弹簧原长。反之,知道其中三个参数也可以计算出另外一个参数,从而完成整个剪式铰天线结构的几何尺寸设计。

2 性能分析

对于空间可展开机构,最为关键的三个性能指标是:收拢态性能、展开态性能以及展开过程的性能表现。前两个性能常常被统称为两态性能,决定了空间可展开天线性能中最基本的性能指标。下面就剪式铰这三方面的性能做详细的分析。

2.1 收拢态性能

收拢态性能,指的是收拢态天线的体积、质量以及由于收拢而出现的结构特征等。收拢态决定了天线是否便于运输、安装。图 4 是剪式铰天线从基本单元到构成收拢态的示意图。经过对 10m、30m 和 50m 口径天线的研究分析,得到其收拢高度、收拢半

径及收拢体积如表 1 所示。

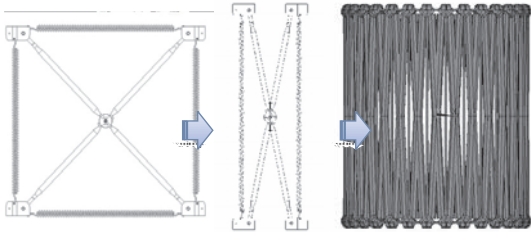


图 4 剪式铰天线收拢态示意图

表 1 剪式铰天线的收拢态参数表

天线口径(m)	收拢高度(m)	收拢半径(m)	收拢体积(m³)
10	1.47264	0.6163	1.7572
30	4.41286	1.1102	4.2718
50	7.3842	1.5422	13.7935

从表 1 可以看出,剪式铰天线收拢态体积小,在桁架高度、天线口径相同的情况下,该体积比周边桁架天线小了近 1/4。周边桁架天线的收拢态高度约为竖直杆长的两倍,而剪式铰天线的收拢态高度约为斜杆长度。对于同样的展开口径,收拢态的体积越小,所占用的空间越小,对于空间可展开天线的运输以及在卫星上的安装固定也就带来大的便利。

2.2 展开态性能

对于剪式铰天线,其优越性能不只是简易轻便的结构、自驱动性能、朝大口径发展的良好前景以及较好收拢态性能,它的展开态的性能也相当优秀。因为即便在超大口径情况下,剪式铰天线仍具有优良的形面精度,具备优良的工作性能。这里采用 ANSYS 软件对天线的形面精度进行分析。

表 2 剪式铰天线的收拢态参数表

	刚性杆	剪式铰	索网	水平弹簧	竖向弹簧	五向接头	固定臂	金属网
单元类型	Beam188	Beam188	Link10	Link8	Link8	Beam188	Beam188	Shell41
弹性模量(GPa)	160	160	1.014	12.5	25	70	300	1.014

建模所选单元基本材料参数如表 2 所示,以约束固定臂一个端点的全部自由度为求解的边界条件,建立剪式铰天线整体结构 Ansys 有限元模型如图 5 所示。

按照表 3 设置天线结构参数,分别对 10m、30m 和 50m 口径的天线进行分析计算,得到其形面精度(RMS)、最大/最小索力的结果如表 4 所示。

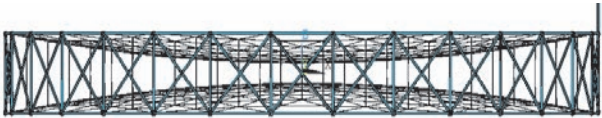


图 5 剪式铰天线收拢态示意图

表 3 结构参数设置

口径(m)	10	30	50
焦距(m)	16	40	70
高度(m)	1.045	3.12	5.3
桁架边数	30	30	30
主索分段数	12	15	18
水平弹簧拉力(N)	176	220	330
竖向弹簧拉力(N)	352	440	660

从表 4 中可以看出,在初始应变一样的情况下,形面精度与最大最小索力基本都随口径的增大而增

大;对于同一口径的天线,形面精度与最大最小索力则随初始应变的变小而相应变小。

2.3 展开过程分析

展开过程分析<sup>[4]</sup>相对于两态分析来说,是一种动态分析。它主要分析的是,天线在展开过程中是否顺利,展开曲线是否平滑,展开过程受哪些因素影响,影响因素的重要性等。在天线静态性能良好的情况下,天线能否展开,展开态重复性程度等将成为天线能否实现预定要求的根本问题。

表 4 天线找形结果

初始应变	口径(m)	形面精度 RMS(mm)	最大索力(N)	最小索力(N)
0.01	10	1.9461	76.1091	0.1644
	30	6.8199	80.1698	0.0314
	50	11.0028	97.3593	1.4645e-4
0.001	10	0.2011	7.1190	0.0016
	30	1.2897	8.1005	0.0085
	50	1.1408	9.3505	3.57e-4
0.0001	10	0.095	0.6336	0.0016
	30	0.1278	0.5715	1.75e-4
	50	0.1354	0.3340	2.746e-4

相对于周边桁架天线,剪式铰天线使用各单元弹簧作为分散驱动形成独特新颖的自驱动系统,使得其展开性能尤为突出。在分析中采用 ADAMS 软件分别对口径 10m、30m、50m 的天线进行了动态仿真。其中 30m 天线的展开过程如图 6 所示,仿真中剪式铰天线展开平滑而稳定。

顺利稳定。经过对其结构设计原理、不同口径下形面精度以及展开过程运动性能的研究和分析表明,剪式铰天线结构简单,质量轻、展开过程可靠,特别适合于制作大口径、高精度的空间可展开天线。

参考文献:

[1] 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.

[2] 李团结, 马小飞. 大型空间可展开天线技术研究[C]. 卫星有效载荷技术学术年会论文集, 2011, 333-341.

[3] 李团结. 可展开结构的研究及应用[C]. 中国机构与机器科学应用国际会议, 2009, 35-36.

[4] 李团结, 周懋花, 段宝岩. 可展天线的柔性索网结构找形分析方法[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 79-798.

作者简介:

江 洁 1981 年生,西安电子科技大学在读博士生。主要研究方向为空间可展开结构。

李团结 教授,博士生导师,主要研究方向:空间可展开天线。

3 结束语

弹簧驱动的剪式铰可展开天线继承并发展了周边桁架天线的优秀性能,而使用弹簧驱动的剪式铰结构形成自驱动展开结构,有效保证了展开过程的

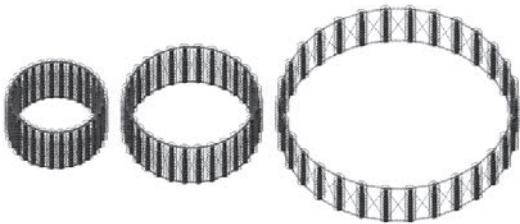


图 6 剪式铰天线展开过程



# Equivalent Models and Experiments of Rectenna Arrays

WANG Ye-Qing, YANG Xue-Xia, JIANG Chao

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University of China, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** A rectenna is equivalent to a series circuit of a dc power and a load. Equivalent models of series and parallel of a rectenna arrays are proposed so the relationship of the optimum loads and the element numbers for the series and parallel rectenna arrays are obtained. Using a rectenna element with low power density applications, the two-element parallel array is analyzed with ADS software and the two-element arrays both in series and in parallel are measured. The results of ADS and measurements are approximately in accordance with the equivalent models of rectenna arrays, which validate the effectiveness of the equivalent models. Further more, suggestions are given for design large rectenna arrays.

**Key words:** Rectenna; Rectenna array; Rectifying circuit; Rectifying efficiency; Equivalent models

\*\*\*\*\*  
(上接第 23 页)

# Design and analysis of space deployable antennas composed of scissor-like hinges driven by springs

JIANG Jie, LI Tuan-jie, DENG Han-qing, LIN Zhan-chao

(1. Hong he University, Meng zi 661100, China;

2. School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Space deployable antennas are indispensable for future advanced satellite communication, earth observation and deep space exploration systems. The tendency of deployable antennas is large aperture, higher gain and frequency. On the basis of hoop truss deployable antennas, the self-driven deployable structure with scissor-like hinges is designed by incorporating with tensegrity structure properties. The results of analysis on structure design principles, surface accuracy of different apertures and deployment motion performance show that the self-driven deployable structure with scissor-like hinges can be applied to space deployable antennas with large aperture and higher precision due to the smaller folded volume, higher surface accuracy and light weight.

**Key words:** Spring-driven; Scissor-like hinge; Large aperture; Higher precision; Deployable antenna

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>