

# 大射电望远镜馈源支撑系统动力响应分析

缪岭, 刘玉标

(中国科学院力学研究所, 北京, 100190)

**摘要:** 根据 500 米口径球面射电望远镜 (FAST) 原始设计方案, 基于多体系统动力学建模方法, 建立了其馈源支撑系统的动力学模型, 同时建立了系统环境激励模型—随机风载模型。对整体模型进行了动力响应分析。通过不同风速状况的对比分析, 给出了系统响应的变化范围, 为此项目最终方案的选择提供参考。

**关键词:** FAST 多体动力学建模 风载荷模型 动力学响应

## 1 引言

拟建的 500 米口径球面射电望远镜 (Five hundred meter Aperture Spherical Telescope, 简称 FAST) 建成后将是世界上最大的单天线射电望远镜<sup>[1]</sup>。这么大口径的望远镜, 采用何种结构来保证其运行成为了关键的问题。如果采用目前世界上最大的射电望远镜美国 Arecibo 望远镜式的天线结构形式, 馈源与背架结构系统的自重达 1000 吨, 将会导致非常高的材料费用与工程造价。因此 FAST 采用了一种全新的光机电一体化的创新设计方案<sup>[2]</sup>。此方案采用闭环控制、二级调准的方法, 具有重量轻、工程造价低、扫描精度高等突出优点。

此方案先通过大跨度的悬索对馈源舱进行粗调, 然后在馈源舱内采用 Stewart 机构进行二次精调, 并实时通过激光检测装置检测接收装置的具体位置, 与主动反射面配合, 反馈给计算机处理进行闭环控制。

针对此设计方案, 国内众多学者做了大量研究工作。如在移动小车式无平台馈源支撑方案中, 建立了缩微 Stewart 平台实物模型<sup>[3]</sup>; 又在馈源系统的有限元模型分析中, 针对各个部位, 做了大量的数值模拟计算<sup>[4]</sup>, 并建立了 5 米和 50 米缩微实物模型进行分析<sup>[5]</sup>。并综合上述研究, 聘请了国外有关专家对系统进行了整体上的设计和分析, 提出了基本的结构方案和控制方案。

本文针对上述设计进行了整体机构仿真研究, 建立了馈源支撑系统的整体机械系统模型, 分析了此系统在环境激励下的动力学行为, 并研究了系统在不同风速的具体表现。后续工作还将为此系统建立驱动系统和控制系统模型, 并与此机械模型联合进行仿真, 分析其有控状态下的动力学行为。

## 2 模型的建立

按照多体动力学建模方法, 采用物理建模、数学建模、问题求解、结果后处理等步骤, 对实际机械系统进行抽象, 用标准的运动副、驱动约束、力元和外力等要素建立与实际机械系统一致的模型<sup>[6]</sup>。

在仿真计算中, 主体为悬索系统和馈源舱系统, 以及风载荷激励系统。

悬索系统采用 6 根悬索式悬吊方案。悬索与馈源舱连接并不交于一点, 而是以相邻两根为一组与馈源舱连接, 形成三角形式的连接方案。悬索模拟采用有限元方法, 将每根悬索分割为 20 段, 以铰接连接, 并考虑到悬索的变形, 添加了弹簧阻尼元件, 使悬索模拟更加符合实际。

馈源舱系统模型建立以 2006 年 9 月 Proprietary of MT Aerospace AG 的 Hans J. Kärcher 教授提出的原始设计方案为原型, 依此, 将整个馈源系统分为若干部分 (中心架、摆索、阻尼索、馈源舱平台、Stewart 平台、位置器等), 并且将馈源外形进行简化, 各部分之间使用标准的连接副进行连接。此系统突出特点是馈源舱上下两部分采用摆结构进行连接。整体模型及馈源舱模型效果图如图 1 所示。

作者简介: \* 缪岭 (1982—), 男, 江苏人, 硕士生 (Email:miaoling@foxmail.com);

刘玉标 (1961—), 男, 湖南人, 副研究员, 主要从事振动控制及结构动力学仿真研究 (Email:yubiao@imech.ac.cn)

设定悬索支点与馈源顶部中心水平距离 300 米, 垂直距离 150 米, 以主动反射面的底部最低处作为地面, 馈源最低点高度约为 150 米。Y 向为竖直方向, x、z 平面为水平面。

系统以两个关键点作为主要分析对象, 其一为馈源最上端中心处(下述称为 A 点), 为一次调准的关键位置, 其二为馈源最下端中心处(下述称为 B 点), 为二次调准的关键位置。

风载荷模型可根据达文波特风速谱模型建立。由达文波特风速谱模型, 可知:

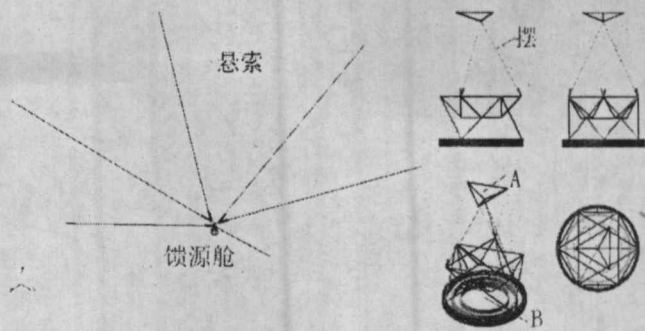


图 1 完整模型及馈源舱模型示意图

$$f S(z, f) = 4.0 \kappa U^2(z) \frac{x^2}{(1+x^2)^4}$$

其中  $S(z, f)$  为风速谱,  $f$  为频率,  $x = fL_1/U$ ,  $L_1$  是湍流的长度尺度,  $L_1 = 1200U/U(10)$ 。U 是所要研究的高度上的平均速度,  $U(10)$  是高度为 10 米处的平均速度。 $\kappa$  为地面粗糙度系数, 本文取  $\kappa = 0.0125$ 。

脉动风速可以通过如下的余弦级数模拟:

$$v(z, t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N [S(z, \omega_k) \Delta \omega]^{\frac{1}{2}} \cos(\omega_k' t + \phi_k) \quad \text{其中 } \omega_k = (k - \frac{1}{2}) \Delta \omega, \quad \omega_k' = \omega_k + \delta \omega, \quad k = 1, 2, \dots, N$$

N 为模拟随机过程频率数, 本文取  $N = 256$ 。 $\phi_k$  为在  $[0, 2\pi]$  之间均匀分布独立随机相角,  $\delta \omega$  是一个在  $[-\Delta \omega/20, \Delta \omega/20]$  之间均匀分布的小随机频率变量, 以避免模拟随机过程产生周期性。 $\Delta \omega = \omega_u / N$  为频率步长,  $\omega_u$  为模拟随机过程频率下限。本文取  $f_u = 0.512$  (Hz),  $\omega_u = 2\pi f_u = 1.024\pi$  (rad/s)。

又风速沿高度的分布取如下指数分布:

$$U(z > 10) = U(10) \left( \frac{z}{10} \right)^{2\alpha}$$

$\alpha$  为地面粗糙度指数, 本为取 B 类 (田野、乡村、丛林、丘陵地带),  $\alpha = 0.16$ 。

所以最终均值为 U 的风速随机过程由下式模拟:

$$V(z, t) = \left( \frac{z}{10} \right)^{2\alpha} (U(10) + v(10, t))$$

实际模拟中, 根据一定的方法将风速转化为力的函数加在实际的模型中。

根据上述原理, 可以计算得到某一风速下的脉动风速曲线。由于随机数的存在, 不同次计算所得脉动风速曲线略有区别, 但其均为一个均值为 0 的稳态随机过程。在实际仿真中, 根据同一主风速下不同脉动风速曲线得到的关键点动力响应变化曲线基本重合, 故由于随机数的存在造成脉动风速曲线的不同对系统基本没有影响。

### 3 工况分析

#### 3.1 无风载情况下模型平衡分析

首先对模型进行无风载时的平衡分析, 由于建模时无法知道平衡时的具体位置, 所以第一步求出馈源的平衡位置十分关键, 然后可根据此平衡位置, 得到实际的工作位置。图 2 为平衡状态效果示意图。

由计算可以得到, 平衡时, 相对初始设计参数, 馈源上下端中心位置相对变化量分别为 (单位 m):  $(0, +0.4962, 0)$ ,  $(0, +0.4962, 0)$ 。

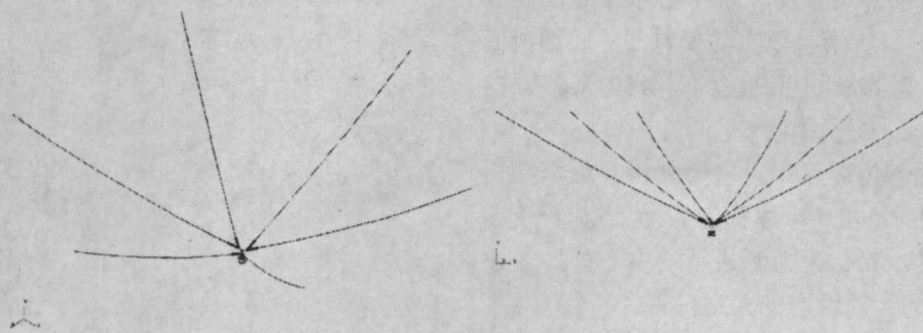


图2 平衡状态示意图

### 3.2 特定风速下模型响应分析

作用时设定风速方向为水平，与x方向成45度角，且前20秒处于平衡位置，不受风载。

下列各图是在工作风速下（10米高平均风速为3m/s），此系统关键点的动力响应状况分析。

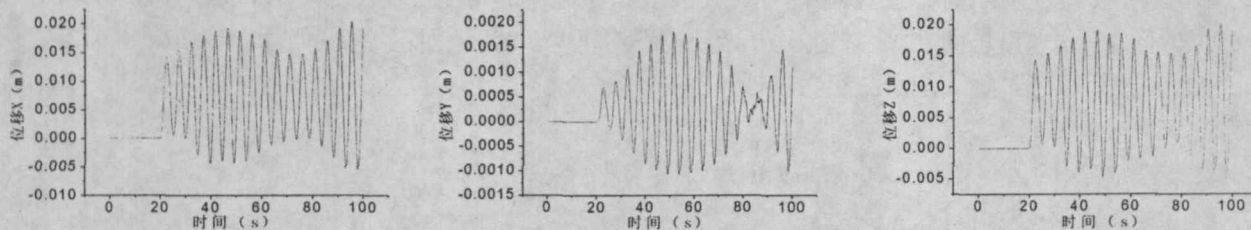


图3 A点x、y、z三方向位移曲线

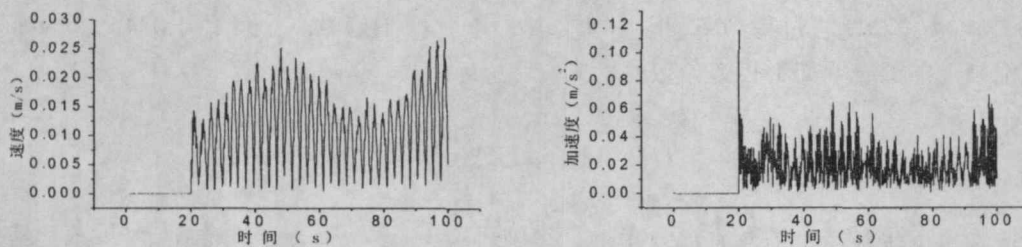


图4 A点速度绝对值变化曲线及加速度绝对值变化曲线

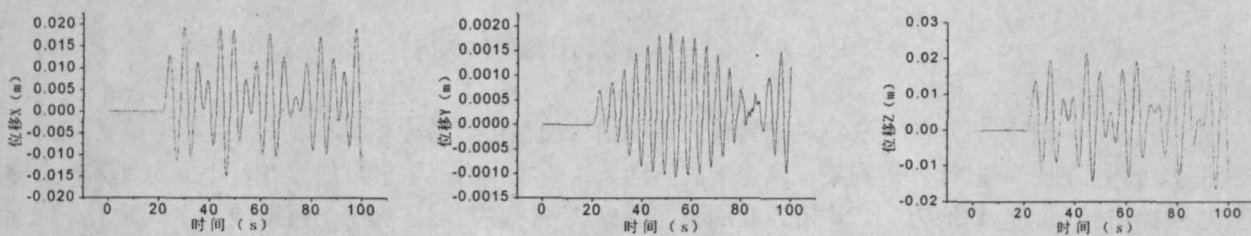


图5 B点x、y、z三方向位移曲线

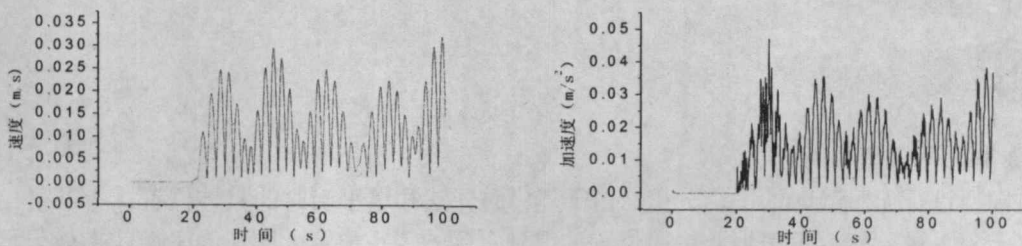


图6 B点速度绝对值变化曲线及加速度绝对值变化曲线

由上述图形可以看出,在系统整体平衡时,突然受到外来风载的情况下,系统会发生振动,且振动平衡位置并非无风时的平衡位置。

系统加速度在突然受到外力时会出现一个峰值,但在其后总体趋向稳定。

根据仿真,由测量可得,风速为 3m/s 时,无控状态下一次调准基准位置偏离值为 0.0287m,二次调准基准位置偏离值为 0.0319m。

### 3.3 不同风速下模型响应变化

考虑到风速不同,模型的响应也不同,故做出不同风速下模型关键部位参数的变化,结果展示在下列图中。

由于当地历史平均风速为 1.4m/s,最大风速为 17m/s,故将模拟风速最大取到 20m/s,来进行分析。

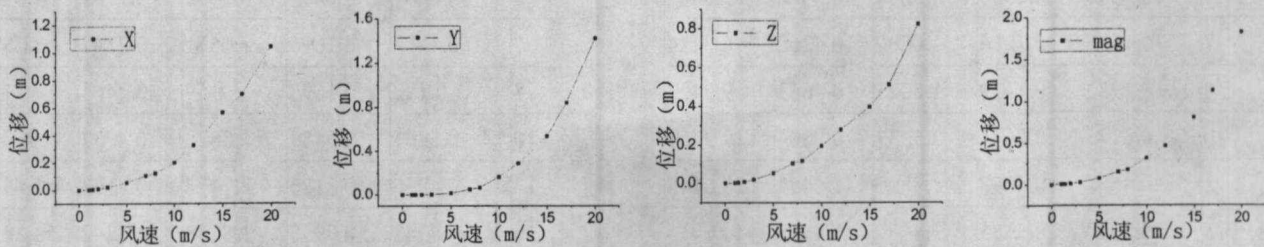


图 7 随风速变化 A 处中心偏离最大值 (x 向, Y 向, Z 向, 幅值) 曲线

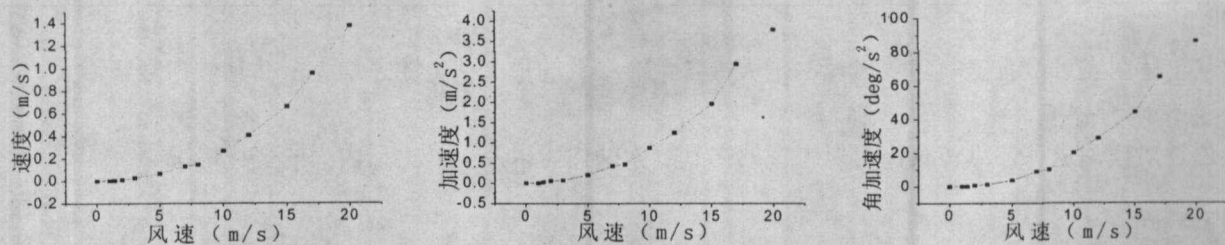


图 8 随风速变化 A 处中心最大速度、最大加速度、最大角加速度曲线

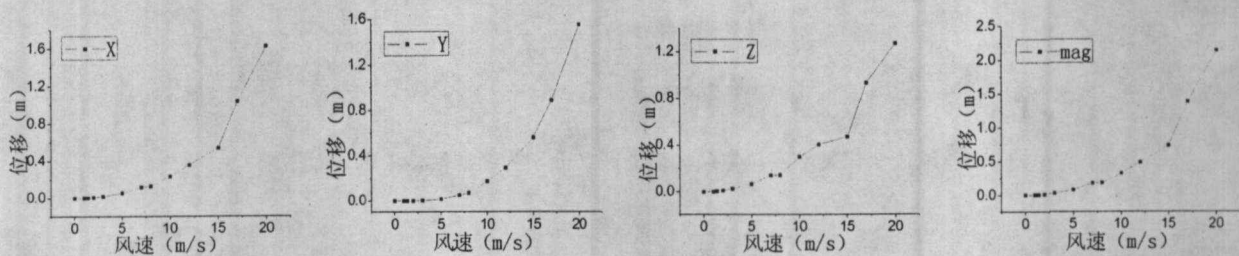


图 9 随风速变化 B 处中心偏离最大值 (x 向, Y 向, Z 向, 幅值) 曲线

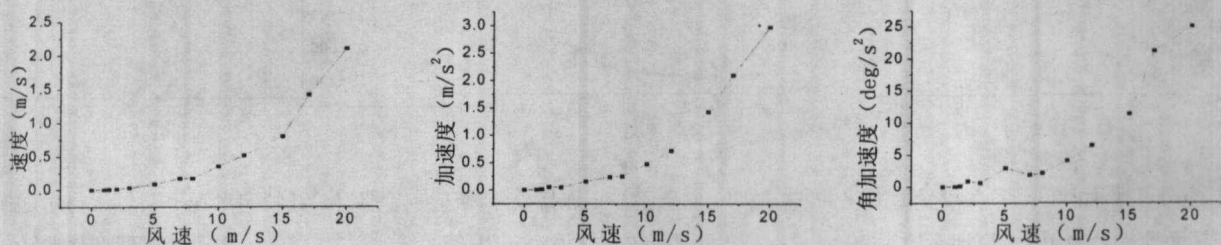


图 10 随风速变化 B 处中心最大速度、最大加速度、最大角加速度曲线

下表列出了一些主要响应参数。

表 1 随风速变化 A 处响应参数最大值表

V10 (m/s)	位移(m)	速度(m/s)	角速度 (deg/s)	加速度 (m/s <sup>2</sup> )	角加速度 (deg/s <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0	0
1	0.00264	0.0021	0.0147	0.0036	0.0437
1.4	0.00534	0.0043	0.0367	0.0258	0.077
2	0.01183	0.0105	0.0898	0.0613	0.683
3	0.02869	0.0270	0.2126	0.0703	1.2614
5	0.07663	0.0654	0.5264	0.2078	3.8067
7	0.1535	0.1286	1.0800	0.4269	8.7724
8	0.1781	0.1439	1.5023	0.4663	9.9422
10	0.3175	0.2674	2.5339	0.8804	19.9769
12	0.4651	0.4058	3.9890	1.2454	28.6148
15	0.8047	0.6585	9.4487	1.9578	44.1015
17	1.1250	0.9538	16.0094	2.9492	65.0536
20	1.8200	1.3729	15.1917	3.7903	86.2671

表 2 随风速变化 B 处响应参数最大值表

V10 (m/s)	位移(m)	速度 (m/s)	角速度 (deg/s)	加速度 (m/s <sup>2</sup> )	角加速度 (deg/s <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0	0
1	0.00293	0.0028	0.0175	0.0033	0.0234
1.4	0.005943	0.0059	0.0376	0.0123	0.1165
2	0.01321	0.0135	0.0847	0.0522	0.8858
3	0.03192	0.032	0.2179	0.0473	0.6211
5	0.08009	0.0831	0.5405	0.1544	2.9485
7	0.1789	0.1696	1.0671	0.2347	1.896
8	0.182	0.1698	1.0159	0.2464	2.1199
10	0.3261	0.3489	1.8828	0.4737	4.064
12	0.4866	0.5126	2.7477	0.7142	6.4111
15	0.7342	0.7958	3.8338	1.4242	11.3253
17	1.385	1.4159	7.2345	2.0847	21.1341
20	2.14	2.097	12.0963	2.9587	24.9923

从上述图表可以看出，随着风速的增大，各主要参数的最大值也随之增大，并且成指数级增大。

### 3.4 悬索内力分析

通过对模型进行计算仿真，可以方便的得到悬索的内力以及受外力后内力的变化情况。

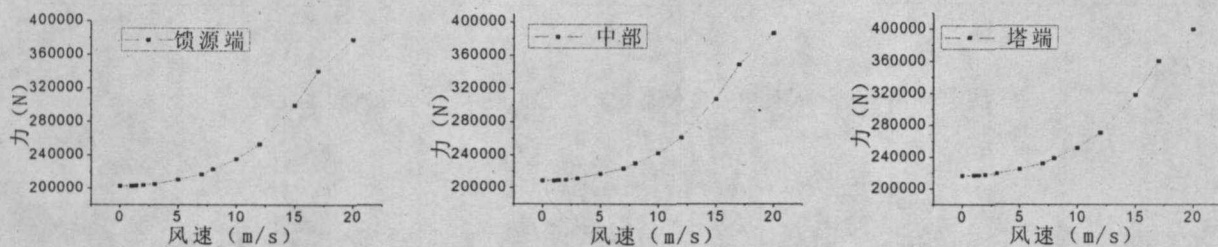


图 11 随风速变化某悬索拉力最大值曲线(分别为馈源端、中部、及塔端)

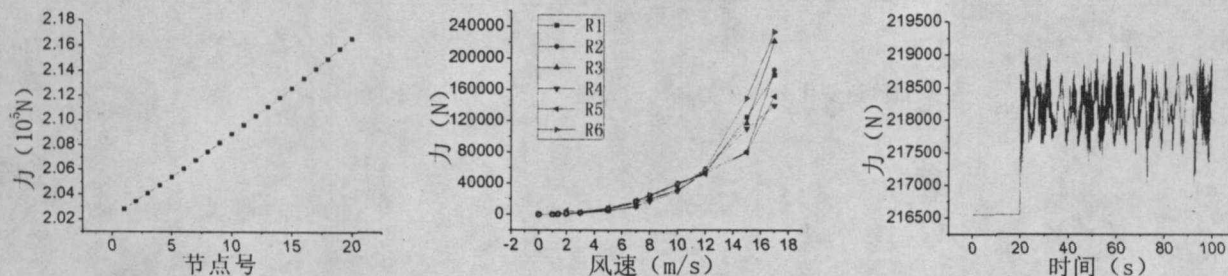


图 12 无外载平衡时单悬索各段受力变化曲线 图 13 六悬索与塔连接处随风速变化 图 14 在特定风速下某悬索与塔连接处  
(与馈源连接处为 1, 与塔连接处为 20) 而改变的内力幅度最大值曲线 内力随时间变化曲线

根据图像及计算结果可知，在不受风载情况下，悬索与塔连接处内力为 216550N，对应应力为 172.3MPa。在风载荷的影响下，悬索内力会在一定的范围内不断的变化。各段内力最大值都随着平均风速的增大而增大。

## 4 结论

根据上述仿真分析,外界风载荷对系统运行有一定的影响。在只受风载的情况下,假定在高度 10 米处平均风速为 10m/s 时,馈源舱上端最大加速度达到  $0.8804 \text{ m/s}^2$ ,下端为  $0.4737 \text{ m/s}^2$ 。风速 $<10\text{m/s}$ 时(系统设计正常运行风速为  $0\sim 8\text{m/s}$ ),关键点偏离的最大位移小于 0.5m (0.5m 为悬索第一级调节所允许的误差),在当地年平均风速 1.4m/s 的情形下,偏离最大位移约为 6mm,远小于 0.5m 的允许误差,但大于馈源舱第二级精调节所允许的误差 4mm,故此时必须重点考虑风载荷对第二级精调节带来的影响。

对单根悬索本身,其内力大小近似沿索长线形分布,且与塔连接处最大,与馈源连接处最小。受到风载荷后,各索根据位置不同,有些索(迎风向)平均内力增大,有些索(背风向)平均内力减小,但各索内力变化幅度仍随平均风速的增大而增大。

对于此馈源舱方案,如果其连接部分采用摆结构,使得与悬索连接的上端和接收器连接的下端并不是一个固结的整体。仿真数据表明,采用摆结构,如果不加其他的控制措施,下端相对于上端,最大位移及速度的最大值和变化幅度略有增加,但同时,加速度以及角加速度等参数却有较大的减小,在一定程度上方便以后控制的实施。

本文通过对 FAST 原始设计方案建立了系统动力学模型,并分析了在不同风载下的动力响应,得到了一系列的响应参数的变化范围。通过比较已有有限元软件分析得到的结果于量级上相同,反映本仿真模型的可行性。由于此模型后续可以进行大范围拖动、控制方面的模拟,克服了单一有限元软件无法进行大范围运动的缺点。因 FAST 最终设计方案还没有定型,本仿真结果可为 FAST 的最终设计方案选择提供参考。

### 参考文献:

- [1] 南仁东. 500 m 球反射面射电望远镜 FAST[J]. 中国科学 G 辑, 2005, 05
- [2] B Y Duan. A new design project of the line fed structure of large spherical radio telescope and its nonlinear dynamic analysis[J]. Int.J.Mechatronics, 1999, (1):53 — 64
- [3] 清华大学. 大射电望远镜 FAST 移动小车-馈源稳定系统耦合研究[R] 2003
- [4] 孙欣. 大射电望远镜悬索式馈源支撑系统的非线性静力学、运动学和动力学理论及方法的研究[D]. 西安电子科技大学, 博士学位论文, 2001
- [5] 汤奥斐. 大射电望远镜馈源支撑系统的建模仿真与分析[D]. 西安电子科技大学, 硕士学位论文, 2005
- [6] 陈立平等. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005