

大射电望远镜馈源支撑系统索拖动响应分析

缪岭, 刘玉标

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 根据 500m 口径球面射电望远镜 (FAST) 设计方案, 基于系统动力学建模方法, 建立了馈源支撑系统的机械模型。采用此模型进行了拖动状况下系统的动力响应分析, 研究了不同拖动速度及阻尼索各种阻尼取值下馈源的动力响应。同时对拖动扰动及风载荷的对系统响应的情况进行了对比分析, 研究结果可为此项目最终方案的选择提供参考

关键词: FAST; 索拖动; 多体系统动力学建模; 动力响应

中图分类号: TH113

文献标识码: A

文章编号: 1672-545X(2008)06-0051-03

拟建的 500m 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^[1]。

针对以往此项目的分析缺少整体的机构运动仿真, 本次仿真主要进行索拖动仿真, 分析了其在拖动情况下的动力响应。根据一种全新的光机电一体化创新设计方案^[2], 及国家天文台与德国 MT Aerospace 提出的原始馈源舱设计方案, 建立了系统模型。

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。

本仿真重点是建立模型后在各种情形下对悬索进行大范围的拖动 (换源的情形), 分析其关键点的响应情况。

1 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、力和外力等要素建立与实际机械系统一致的模型^[3]。

研究仿真采用 MSC.ADAMS 进行分析研究。ADAMS 是优秀的机械系统动力学虚拟样机仿真软件。

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, 形成三角形的连接方案。悬索模拟采用有限元方法, 将每根悬索分割为多段, 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真实。

馈源舱系统据动力响应分析要求可分为三脚架、摆索 (阻尼索)、Stewart 机构 (包括静平台、动平台、作动器、接收器等), 将各部分外形进行简化后, 以标准的连接副进行连接。设馈源最低处的中心位置为关键点的位置 (此为接收器的实际位置)。

设悬索支点与馈源舱顶部中心水平距离 300m, 垂直距离 150m, 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 150m。Y 向为竖直方向, x、z 平面为水平面。

收稿日期: 2008-03-23

作者简介: 缪岭 (1982—), 男, 主要从事机械动力学仿真研究; 刘玉标 (1961—), 男, 中国科学院力学研究所副研究员, 主要从事振动控制及结构动力学仿真研究。

设定悬索直径为 40mm, 初始建模单根悬索长度为 333.092m, 馈源质量为 30t, 尺寸尺度为 10m。建模效果图如图 1 所示。

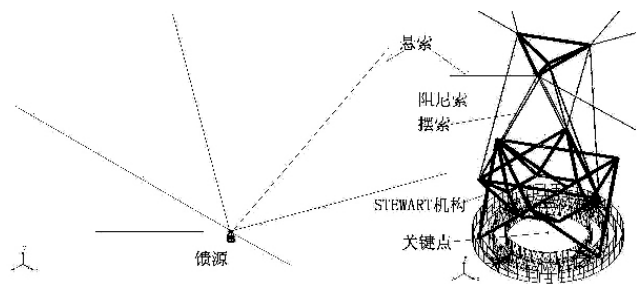


图 1 建模示意图

2 工况分析

根据馈源要求达到的位置, 可以根据悬链线方程逆向求解出六根悬索的长度^[4], 仿真分析以馈源要求轨迹最低处为初始, 对悬索进行拖动, 使得馈源行进到要求的位置。仿真中, 主要分析拖动时的动力响应, 对到达位置的精度不作要求。

拖动仿真时各根悬索拖动距离分别为 -10.897、-10.897、-0.0556、10.643、10.643、-0.0556 (m)。不同状况下每次拖动都采用前述拖动距离以作比较。拖动采用位移控制的方法, 使用 STEP 函数, 使得拖动比较平滑, 避免拖动初始和拖动结束时产生过大的加速度。

2.1 馈源舱阻尼索阻尼对系统响应的影响

馈源舱系统对系统响应有一比较关键的机构为阻尼索。在仿真时采用无质量纯阻尼的设置。对于阻尼索不同的阻尼的大小, 对系统的整体参数有一定的影响。

忽略低频 (小于 10^{-3} Hz) 时的系统整体模态响应, 可以通过软件计算得到系统的模态。表 1 为不同的阻尼索阻尼与一阶系统频率及系统整体阻尼比的关系。

图 2、图 3 为单根阻尼索阻尼 c 为 10 Ns/mm, 对应阻尼比 0.0260 时拖动同样的距离具体系统响应情况。

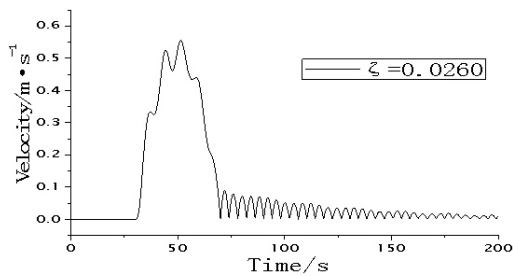


图2 c=10Ns/mm 系统速度变化曲线

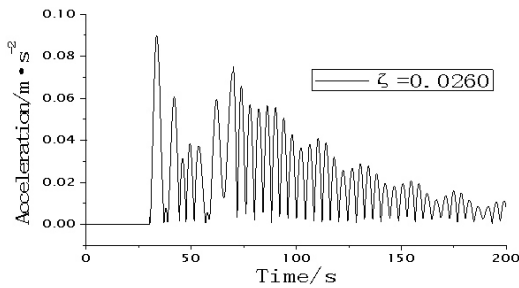


图3 c=10Ns/mm 系统加速度变化曲线

表1 阻尼索阻尼大小对应系统频率及整体阻尼比表

阻尼索阻尼 N·s/mm	频率 Hz	阻尼比	拖动时最大加速度 m/s ²
0	0.126221	7.26E-07	0.0950
0.1	0.126241	0.000265	0.0942
1	0.126247	0.00265	0.0936
5	0.126363	0.0132	0.0924
10	0.126753	0.0260	0.0900
20	0.128215	0.0490	0.0876
50	0.135823	0.0782	0.0866
100	0.142345	0.0549	0.0875
300	0.144754	0.0193	0.0931
1000	0.145014	0.00581	0.0938
10000	0.145042	0.000583	0.0949

从上述图表可以发现阻尼索阻尼选择对无拖动情况下抑制系统振幅比较有效。对于不同的阻尼大小,略微影响拖动时的系统达到的最大加速度,且在拖动状态下,系统响应最大值变化不明显。但在系统停止拖动后,合适的阻尼可以使系统振动加快衰减,最终达到平衡,而过大或过小的阻尼则无法实现这种效果。当阻尼过小时,衰减很不明显,当过大时,摆的上下部分相当于一整体,关键点振动表现为跟摆的上部振动相似。按照上述的设计质量及长度,由表中数据得到,当阻尼索阻尼逐渐增大时,系统的一阶频率也在逐渐增大;但其对应的系统整体阻尼比从一个极小值逐渐增大,然后到某一极值(约0.08)时又逐渐减小;对应的拖动时最大加速度逐渐略微减小,然后到某一极值(约0.086)时又逐渐稍微增大。在实际选取中,可以选择阻尼比较大的时的阻尼,根据设定条件,一般选取为5~200 Ns/mm)的范围。下述仿真中,阻尼索阻尼大小均取值10(Ns/mm)进行计算。

2.2 拖动速度对系统响应的影响

图4、图5分别为在20、80s内拖动同样的距离具体系统响应情况。馈源直线位移约为13.671m,平均换源速度按照拖动时间的不同,分别对应为0.684(20s)、0.342(40s)、0.171

(80s)(m/s),仿真30s后开始进行拖动。(拖动40s响应状况,对应速度0.342m/s,曲线同图2、图3)。

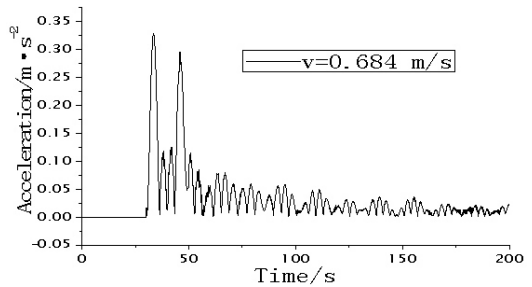


图4 换源速度0.684m/s 系统加速度变化曲线

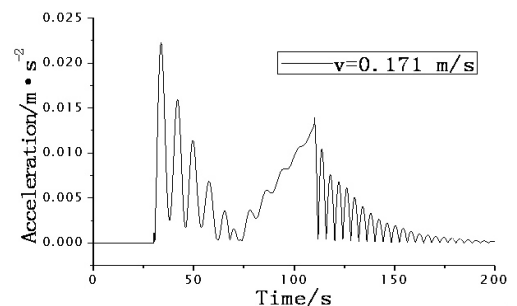


图5 换源速度0.171m/s 系统加速度变化曲线

由图可以看出,拖动速度对系统的影响十分明显,拖动越慢,系统各项响应参数就越小,运行就越平稳,但同时却增加了系统换源作用时间。按照换源速度最大为0.6m/s的设计标准,并且使换源完成最快,完成时间40s时拖动时系统最大速度为0.555m/s,最大加速度为0.090m/s²。

2.3 拖动时风载荷对系统响应的影响

风载荷模型根据达文波特风速谱模型建立得到,风速可以分成标准风速及脉动风速两部分相加得到,最终得到的风速公式^[9]为:

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

其中z为高度,t为时间,V(10)是地面高度为10m处的平均速度,为地面粗糙度指数,v(10,t)为脉动风速。实际模拟中,据一定的方法将风速转化为力的函数加在实际的模型中。

气象资料表明,工程当地年平均风速为1.4m/s。此方案设计正常工作风速为4m/s,最大风速为10m/s。

图6、图7为10m高处风速为4m/s和10m/s时系统响应情况。仿真时30~70s区间进行拖动。20s时加入风载,前20s处于静止平衡无风载情况。

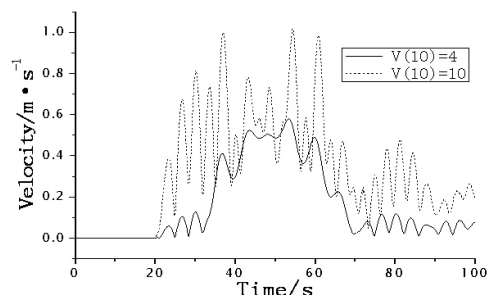


图6 不同风速下系统速度变化曲线

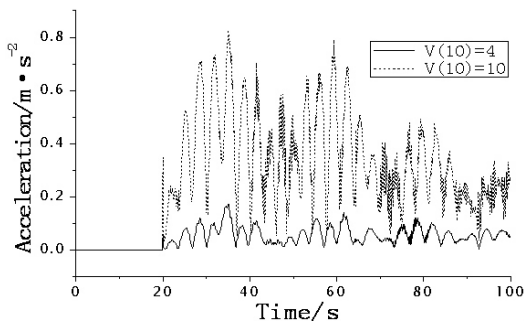


图7 不同风速下系统加速度变化曲线

外界风载荷对系统有一定影响。在系统没有拖动的情況下,系统在平衡位置受到风载荷的影响,达到的最大加速度分别为 0.0793 m/s^2 ($\psi = 10^\circ$) 和 0.347 m/s^2 ($\psi = 10^\circ$)。在高速影响下,10m高处平均风速是 10 m/s ,在进行拖动时,最大加速度达到 0.829 m/s^2 ,而无风载拖动时,此数值仅有 0.090 m/s^2 ,可见在高速对系统的影响很巨大。但在常风速 (10m 高处平均风速是 4 m/s) 影响下,上述数值只有 0.171 m/s^2 ,相对高速影响较小,但仍旧大于无风载时的情形。风载荷对无拖动时的系统影响十分巨大。

3.4 拖动干扰对系统响应的影响

仿真时,对模型拖动函数添加拖动干扰,以检测它在不同条件下的工作状况。添加干扰时,在上述拖动位移函数中分别加入振幅为 0.01 m ,但周期不同的正弦曲线。只在拖动时添加,无拖动时不添加,造成拖动不平滑。

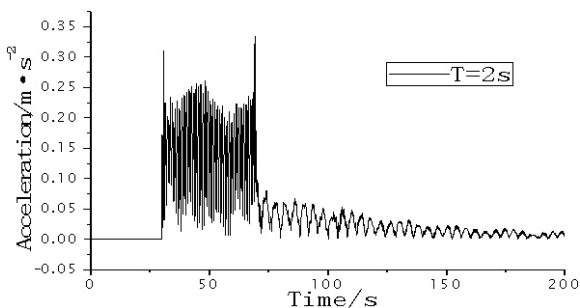


图8 周期2s的拖动干扰下系统加速度变化曲线

在无风载只受到拖动干扰时,系统速度响应值与无干扰情况比极值变化不明显,但加速度变化较大。在干扰源振动周期较小时,对系统的影响尤其是加速度更加大而明显,如图8。在实际工程运行中,必须重视拖动不平滑带来的影响。

3 结论

文中重点讨论了拖动时各种因素对系统动力响应的影响。根据仿真图像及数据可以知道,关键点位置主要表现为一系列的振动。馈源振动主要由索拖动本身,外界风载荷的激励及拖动干扰引起。系统振动主要由前三部分所引起的振动叠加。各因素对系统响应都有比较大的影响,其中高速及高频的拖动干扰对系统影响最大,其带来的加速度增大量为无外部干扰时的5倍以上,而低速及低频的干扰对系统影响不大,但仍有一定的干扰。具体见上文各情况后的分析,在此不再重复。而系统选择合适的阻尼,可以使得振动逐渐衰减,加快系统的稳定。根据建立的模型,通过对参数的设定,可以对系统运行的各种情况加以仿真分析,得到系统的响应状况,从而可以选择合理的参数。

本仿真研究结果证明了此方案的可行。后续还将加入控制系统,实现机电一体化的仿真。

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(5):449-466
- [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] 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.
- [4] 吴恒立.悬索与吊桥及薄壁杆件理论[M]. 重庆:重庆大学出版社,1992.
- [5] 希 缪,斯坎伦.风对结构的作用 - 风工程导论[M]. 上海:同济大学出版社,1992.

Rope Dragging Response Analysis of Feed Supporting System for the Large Radio Telescope

MIAO Ling, LIU Yu-biao

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: According to the design of Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope (FAST), the mechanical model with flexible rope of the feed supporting system was established based on the multi-body system dynamics modeling methods. Dynamic response was studied under various the dragging speed and different damping values of rope. The influence on the system under dragging disturbance or wind load was also analyzed to contrast different situations. The result may provide a good reference for the final choice of the project.

Key words: FAST; Rope dragging; Multi-body system dynamics modeling; Dynamic response