

机载 SAR 天线座结构动力学建模及分析

贺李平* 李军兴 刘 铭

(北京无线电测量研究所 北京 100854)

摘要: 该文对机载 SAR 天线座有限元建模及结构动力学特性进行了研究。文中基于结构动力学理论,建立了机载 SAR 天线座的有限元模型,指出了动力学分析的关键技术,并进行了模态分析和瞬态动力学分析。仿真结果表明:机载 SAR 天线座的动力学性能满足伺服控制系统带宽和结构强度需求。该文提供的有限元快速建模和分析方法可为机载 SAR 天线座的轻量化设计提供重要支撑。

关键词: 机载 SAR; 天线座; 模态; 动力学; 有限元方法

中图分类号: TN959.73; TU311.3

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)02-0203-06

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20018

Structural Modeling and Analysis on Dynamic Characteristics of Antenna Pedestal in Airborne SAR

He Li-ping Li Jun-xing Liu Ming

(Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract: Finite element modeling and structural dynamic characteristics of antenna pedestal in airborne SAR were studied in this paper. The finite element model of antenna pedestal in airborne SAR was set up on the basis of structural dynamic theory, then, the key technologies of dynamic simulation were pointed out, and the modal analysis and transient analysis were carried out. Simulation results show that the dynamic characteristics of antenna pedestal in airborne SAR can meet the requirements of servo bandwidth and structural strength. The fast finite element modeling and simulation method proposed in this paper are of great significance to the weight reducing design of antenna pedestal in airborne SAR.

Key words: Airborne SAR; Antenna pedestal; Modal; Dynamics; Finite element method

1 引言

机载 SAR 是一种安装在载机上的高分辨率微波成像雷达,它以脉冲压缩技术获得距离向高分辨率,以合成孔径技术获得方位向高分辨率^[1,2]。在工作过程中,机载 SAR 利用伺服控制系统隔离载机对天线的振动影响。在着陆瞬间,载机将冲击载荷作用到机载 SAR。面临复杂的环境条件,机载 SAR 在工作过程中的安全性和可靠性问题逐渐引起了人们的关注。

天线座是支撑天线、安装馈线及伺服控制系统的载体,是承受载机振动和冲击的关键构件,通过它实现天线的运转、定位和定向等功能。天线座结构动力学性能的好坏,直接影响到雷达系统的测试精度和安全性能。因此,在天线座的结构设计阶段,必须对其动力学特性进行分析研究。

文献[3-5]对机载 SAR 天线座进行了建模和动

力学分析,已表明动力学仿真能为天线座结构设计及优化提供重要支撑。建模方法及求解控制是分析计算的关键,文献[3]建立的动力学模型较为粗糙,对求解控制也未作详细说明;文献[4,5]建立了较为精细的天线座有限元模型,但建模过程复杂,不利于为设计师提供快速设计决策。

本文基于结构动力学理论,研究了机载 SAR 天线座的有限元快速建模方法,利用 ANSYS Workbench Mechanical 进行了模态分析和瞬态动力学分析,指出了动力学分析的关键技术,并详细解释了分析结果。

2 结构动力学基本理论

结构动力学用于分析动态载荷对结构响应的影响。在分析过程中,它要求考虑随时间变化的载荷、阻尼和惯性力的影响,基本方程为

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F \quad (1)$$

式中 M 为结构质量矩阵; C 为结构阻尼矩阵; K 为结构刚度矩阵; \ddot{U} 为节点加速度矢量; \dot{U} 为节点速度矢量; U 为节点位移矢量; F 为力矢量。

对于不同的分析类型,式(1)需采用不同的方法进行求解。

2.1 模态分析

模态分析用于确定结构的固有频率和振型,是其余动力学分析的基础。理论分析与实践均表明,阻尼对结构的固有频率和振型影响不大,所以在求解结构的固有频率和振型时,可以不计阻尼的影响^[6]。固有频率和振型是系统的固有属性,与外载荷无关。结构的无阻尼自由振动方程为

$$M\ddot{U} + KU = 0 \quad (2)$$

由式(2)可以得到其特征方程:

$$(K - w_i^2 M)\phi_i = 0 \quad (3)$$

式中 ϕ_i 为第 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 阶固有频率对应的特征向量,即振型; w_i 为第 i 阶固有圆频率。

求解式(3),即得到系统的固有频率和振型。

2.2 瞬态动力学分析

瞬态动力学分析可包含所有类型的非线性,相对于其它分析技术(静力分析、模态分析等),瞬态动力学分析更加接近工程实际,因此得到广泛应用。

瞬态动力学方程为式(1),通常采用完全法和模态叠加法进行求解。基于实际应用,完全法允许包括各类非线性特性,应用最为广泛。

3 机载 SAR 天线座基本结构

本机载 SAR 天线座是一个单轴平台,主要由电

机、减速器、轴承、旋转变压器、安装支架等设备组成,如图1所示。天线座通过安装支架的6个锁紧螺栓与载机连接。电机带动减速器,同时利用伺服控制系统驱动天线运转。

4 有限元模型

有限元建模方法是分析计算的关键。为减小计算规模,可忽略对分析结果影响较小的几何特征,如倒角、圆角等。天线安装于天线座,为考虑天线对天线座动态特性的影响,天线座有限元模型还应包含天线模型。

带负载(天线)的天线座最低阶模态通常表现为减速器的扭转振动。因此,有限元模型必须准确考虑减速器的扭转刚度。带扭转刚度的铰链单元可用于模拟减速器(图2)。轴承用于支撑转动,可用铰链单元模拟(图3)。天线座组件中各零件之间采用螺栓连接。在有限元分析中,完全真实地模拟螺栓连接是一个非常复杂的非线性过程。为简化计算,可忽略各零件的螺栓孔,采用 MPC 算法模拟零部件之间的连接,这对结构整体模态影响较小,但将忽略连接处的局部应力对整体结构应力的影响。最终建立的天线座有限元模型如图1所示。为提高计算精度,有限元模型以高阶六面体为主,共46502个单元,168978个节点。

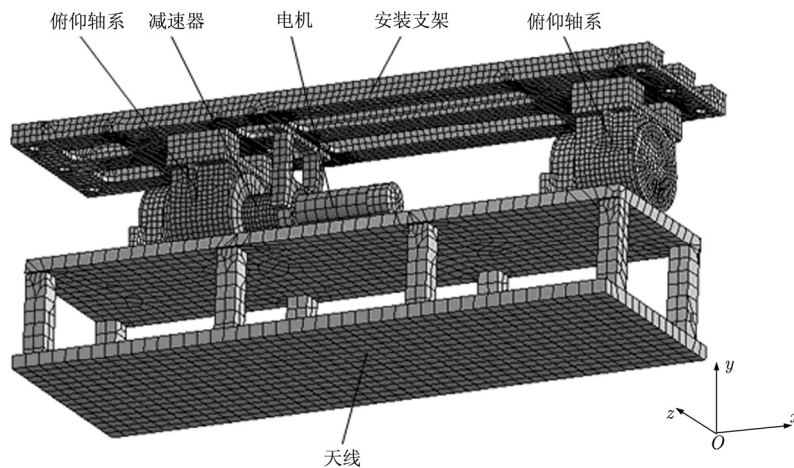


图1 天线座有限元模型

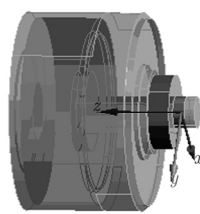


图2 减速器模型(带扭转刚度)

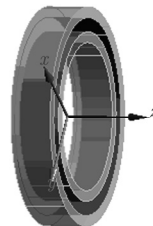


图3 轴承模型

5 模态分析

一般情况下，只需提取前几阶模态，因为低阶模态对结构的动力学响应影响最大。安装支架通过6个螺栓孔(图1)与载机连接，可将螺栓孔固定约束。采用 Block Lanczos 方法计算结构前6阶模态，模态频率列于表1，振型如图4~图9所示。

模态分析表明，系统最低阶模态(44.389 Hz)表现为减速器的扭转振动，它决定了伺服控制系统带宽，应引起充分重视。结构件表现的模态频率远高于减速器的谐振频率，不会影响伺服控制系统带宽，但会影响系统的动力学响应。

表1 天线座模态频率

模态阶数	频率(Hz)
1	44.389
2	187.36
3	203.26
4	264.09
5	387.89
6	410.36

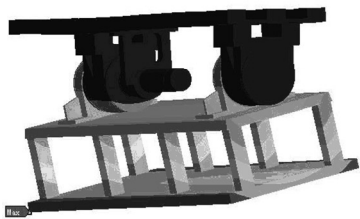


图4 第1阶振型(减速器扭转振动)

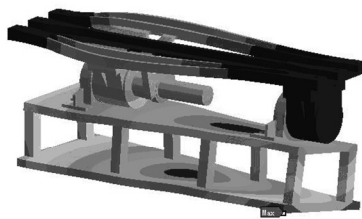


图5 第2阶振型(结构扭振)

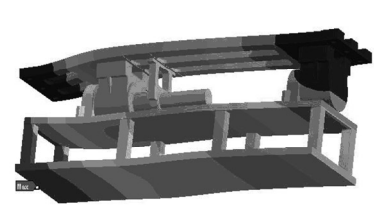


图6 第3阶振型(上下振动)

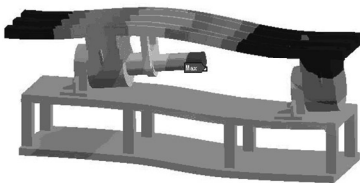


图7 第4阶振型(上下振动)

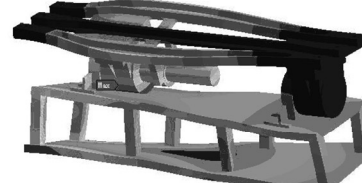


图8 第5阶振型(结构扭振)

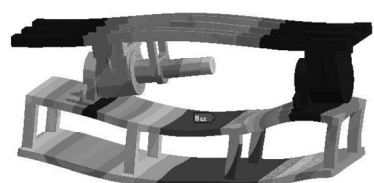


图9 第6阶振型(上下振动)

6 瞬态动力学分析

6.1 边界条件及载荷

载机在着陆瞬间受到来自地面的冲击作用，冲击载荷将通过载机作用到机载 SAR 天线座。安装支架通过6个螺栓孔与载机连接，可将螺栓孔固定约束。设定冲击载荷为半正弦加速度脉冲，如图10所示。

图中 g 为重力加速度，为 9.8 m/s^2 。

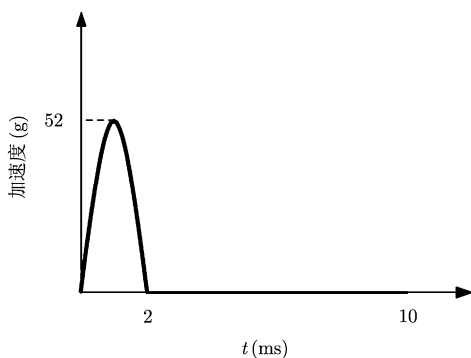


图10 半正弦加速度脉冲

6.2 求解控制

阻尼是用来度量系统自身消耗振动能量的能力的物理量。在瞬态动力学分析中，常用 α 阻尼和 β 阻尼。对于承受高频脉冲载荷的结构，阻尼对结构峰值响应影响较小，仅影响结构自由振动衰减速度^[6]。通常，设计师更加关注结构的峰值响应，即阻尼的选择不起决定作用。

一般的，结构低阶模态对动力学响应贡献较大。由模态振型可以看出，第3阶(图6)和第4阶(图7)为 $x-y$ 平面内的振动，可取第3阶模态频率(203.26 Hz)用阻尼参数控制。在许多实际问题中， α 阻尼(质量阻尼)可以忽略， β 阻尼(刚度阻尼)按式(4)计算。

$$\beta = \frac{2\xi_i}{w_i} \tag{4}$$

式中 ξ_i 为阻尼比，根据经验设为 2%； w_i 为第3阶模态圆频率，其值为 $2\pi \times 203.26 \text{ rad/s}$ 。

代入数据，求得 $\beta = 3.13 \times 10^{-5}$ 。

瞬态分析求解的精度取决于积分时间步长的大

小。对于 Newmark 时间积分方案,可按式(5)求解积分时间步长 Δt 。

$$\Delta t = \frac{1}{20f} \quad (5)$$

式中 f 为模态频率,取为 203.26 Hz。

代入数据,求得 $\Delta t = 2.5 \times 10^{-4}$ s。实际求解时,可采用更小的时间步长,并开启自动时间步长控制,设置最小步长为 5×10^{-5} s,最大步长为 2×10^{-4} s。

为了观察结构在冲击载荷作用后的响应,将计算时间延长至 10 ms。0~2 ms 为第 1 载荷步,用于计算瞬态冲击;2~10 ms 为第 2 载荷步,用于计算结构自由振动。

对天线座分别施加 y 方向和 x 方向的半正弦加速度脉冲载荷(图 10),采用完全法进行瞬态动力学求解。

6.3 计算结果分析

图 11 和图 12 分别为天线座的变形云图和应力云图(y 向冲击)。由图 11 可知,在时间点为 2.4 ms 时,天线的变形最大,为 0.55696 mm,记为 A 点。由图 12 可知,在时间点为 2.1 ms 时,安装支架的 von Mises 应力最大,为 163.03 MPa(小于屈服应力 930 MPa,材料为钛合金),记为 B 点。

图 13 为 A 点的 y 向位移-时间历程和 B 点的应力-时间历程。可以看出,在脉冲作用时间内(0~2 ms), A 点位移持续增大,之后表现为自由衰减振动,

频率为 204.08 Hz。将图 11 与图 6 对比可知, y 方向的冲击脉冲正好激发了结构的第 3 阶模态响应(频率为 203.26 Hz)。由于脉冲频率(500 Hz)远大于响应频率(204.08 Hz),故极限位移和应力出现在脉冲激励之后。

图 14 和图 15 分别为天线座的变形云图和应力云图(x 向冲击)。由图 14 可知,在时间点为 5.6 ms 时,电机变形最大,为 0.4243 mm,记为 C 点。由图 15 可知,在时间点为 1.9033 ms 时,安装支架的 von Mises 应力最大,为 119.73 MPa(小于屈服应力 930 MPa),记为 D 点。

图 16 为 C 点的 y 向位移-时间历程和 D 点的应力-时间历程。尽管结构承受 x 向加速度冲击,但由于悬臂结构, C 点的 y 向位移大于 x 向位移。可以看出,在脉冲作用时间内(0~2 ms), C 点位移持续增大,之后表现为自由振动,频率为 263.16 Hz。将图 14 与图 7 对比可知, x 方向的冲击脉冲主要激发了结构的第 4 阶模态响应(频率为 264.09 Hz)。由于脉冲频率(500 Hz)远大于响应频率(263.16 Hz),故极限位移和应力出现在脉冲激励之后。与 y 向冲击响应不同的是, x 向冲击不仅激发了结构的第 4 阶模态,同时也激发了第 3 阶模态,结构整体响应更为复杂,具体表现为 C 点的 y 向位移在第 2 个波峰达到最大值。

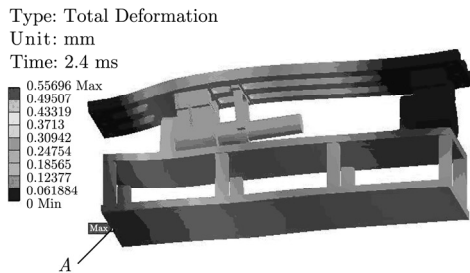


图 11 天线座变形云图(y 向冲击, $t=2.4$ ms)

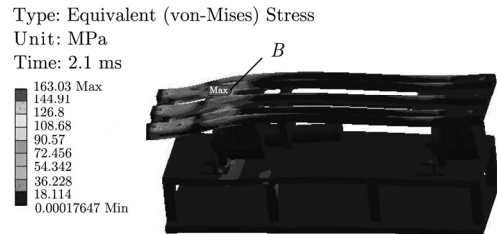


图 12 天线座应力云图(y 向冲击, $t=2.1$ ms)

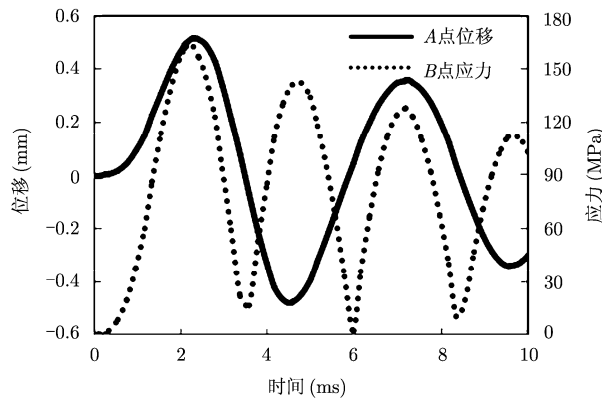


图 13 位移-时间历程和应力-时间历程

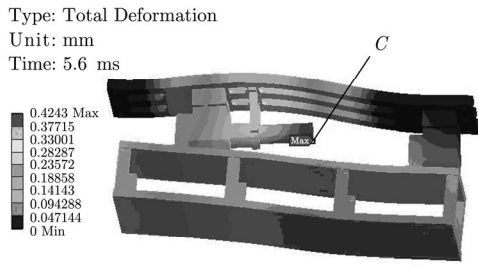


图 14 天线座变形云图(x向冲击, $t=5.6$ ms)

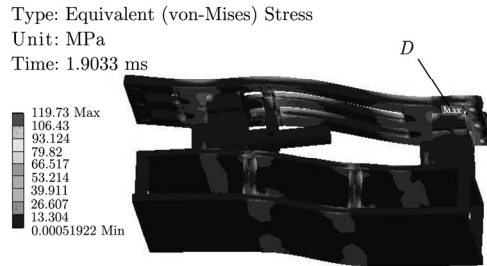


图 15 天线座应力云图(x向冲击, $t=1.9033$ ms)

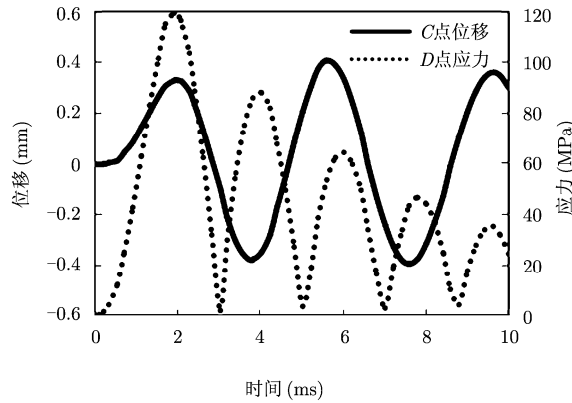


图 16 位移-时间历程和应力-时间历程

7 结论

(1) 有限元分析的精度很大程度上取决于建模方法及求解控制。为减小计算规模，并为设计师提供快速设计决策，对模型进行合理简化是必要的。尽管基于完全法的瞬态动力学分析无需进行模态分析，但其求解的关键参数(积分时间步长、阻尼比等)依赖于模态分析。因此，模态分析是动力学分析的基础。必要时，还应通过模态试验获取系统动力学参数，如阻尼比。

(2) 模态分析表明，结构件所表现的模态频率远高于减速器的谐振频率，虽不会影响伺服控制系统带宽，但会影响系统的动力学响应，瞬态动力学分析结果给出了详细解释。

(3) 动力学分析结果表明，机载 SAR 天线座既满足伺服控制系统带宽需求，也满足结构强度要求。对于机载设备，结构轻量化设计依赖于准确的分析技术，本文提供的有限元快速建模和分析方法可为机载 SAR 天线座的轻量化设计提供重要支撑。

参考文献

[1] 邱德洁, 张平, 陆岷. 机载 SAR 天线稳定平台伺服控制系统的算法设计改进[J]. 电子器件, 2010, 33(3): 327-331.

Qiu De-jie, Zhang Ping, and Lu Min. Study on algorithm for servo controlling system of antenna stabilized platform of air-borne SAR[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2010, 33(3): 327-331.

[2] 张彬, 李凉海. 机载 SAR 运动补偿技术研究[J]. 遥测遥控, 2007, 28(增刊): 130-134.

Zhang Bin and Li Liang-hai. Motion compensation of airborne SAR[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2007, 28(Suppl.): 130-134.

[3] 朱金彪, 熊永虎, 叶佩青. 机载 SAR 天线稳定平台结构动态特性与动强度分析[J]. 机械设计与研究, 2007, 23(6): 94-97.

Zhu Jin-biao, Xiong Yong-hu, and Ye Pei-qing. The analysis on dynamic characteristics of the structures of antenna gyro-stabilized platform of an airborne SAR[J]. *Machine Design and Research*, 2007, 23(6): 94-97.

[4] 段勇军, 顾吉丰, 平丽浩, 等. 雷达天线座模态分析与试验研究[J]. 机械设计与制造, 2010, (2): 214-216.

Duan Yong-jun, Gu Ji-feng, Ping Li-hao, et al.. Mode analysis and experiment research of radar antenna pedestal[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2010, (2): 214-216.

[5] 洪长满, 段勇军. 机载雷达天线座结构的刚强度性能评估[J].

现代雷达, 2011, 33(6): 72-75.

Hong Chang-man and Duan Yong-jun. Performance evaluation of stiffness and strength of antenna pedestal structure in an airborne radar[J]. *Modern Radar*, 2011, 33(6): 72-75.

[6] 贺李平, 龙凯, 肖介平. ANSYS13.0与HyperMesh11.0联合仿真有限元分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

He Li-ping, Long Kai, and Xiao Jie-ping. Collaborative Simulation of ANSYS13.0 & HyperMesh11.0[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.

作者简介



贺李平(1982-), 男, 四川遂宁人, 博士(北京理工大学), 工程师, 工作单位: 北京无线电测量研究所, 主要研究方向为有限元方法、动力学建模及仿真分析。

E-mail: bithlp@sina.com

李军兴(1979-), 男, 河北石家庄人, 本科(河北科技大学), 工程师, 工作单位: 北京无线电测量研究所, 主要研究方向为雷达伺服系统结构设计。E-mail: leese_1979@163.com

刘铭(1979-), 男, 辽宁抚顺人, 硕士(北京科技大学), 工程师, 工作单位: 北京无线电测量研究所, 主要研究方向为雷达伺服系统结构设计。E-mail: liuming_7911@163.com