

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.027

基于 Ansys 的天线测试架模态分析及结构优化

丁雨焄¹, 张梦², 李胜峰³, 王雨豪³

(1. 比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 518118;

2. 北京航天光华电子技术有限公司, 北京 100854;

3. 北京信凯达科技有限公司, 北京 100088)

摘要: 为了研究天线测试架结构的动态特性, 提高测试架的力学性能, 对天线测试架结构进行有限元模态分析及优化设计。运用 SolidWorks 软件建立天线测试架三维实体模型, 进而利用 Ansys Workbench 软件进行模态分析, 得到前 6 阶固有频率, 并与天线测试架激励频率进行对比研究, 从而对天线测试架进行结构优化, 将优化后结构的固有频率与激励频率进行对比分析。

关键词: 天线测试架; Ansys Workbench; 模态分析; 结构优化

中图分类号: TG339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0141-05

Modal Analysis and Structural Optimization of Antenna Test Racks Based on Ansys

DING Yutao¹, ZHANG Meng², LI Shengfeng³, WANG Yuhao³

(1. BYD Auto Industry Company Limited, Shenzhen 518118, China;

2. Beijing Aerospace Guanghua Electronic Technology Co., Ltd., Beijing 100854, China;

3. Beijing Xinkaida Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics of the antenna test frame structure and improve the mechanical properties of the test frame, the finite element mode analysis and optimization design of the antenna test frame structure are carried out. The three-dimensional solid model of the antenna test frame is established by using SolidWorks software, and the Ansys Workbench software is applied to perform modal analysis, the natural frequencies of the first 6 orders are obtained, and the excitation frequency of the antenna test frame is compared and studied, thus the structure of the antenna test frame being optimized, and the comparison and analysis on the natural frequency and excitation frequency of the optimized structure are conducted.

Keywords: antenna test stand; Ansys Workbench; modal analysis; structural optimization

0 引言

天线测试架作为天线指标的重要测试工具, 是微波测试系统的主要部件之一^[1]。天线测试架的力学性能影响着微波测试的准确性和测试效率, 人们对天线测试系统的精度、自动化程度和测试效率要求也越来越高^[2-4]。在天线测试架运行过程中, 当外界激励频率与自身固有频率相同时, 天线测试架会发生共振, 进而影响天线测试架平顺性与微波测试精度, 严重时会对天线测试架的结构造成破坏。本文以天线测试架作为研究对象, 对其进行模态分析与结构优化, 避免天线

测试架发生共振, 为天线测试架的设计制造提供有价值的参考。

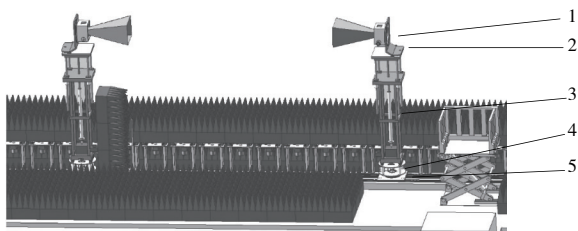
1 测试架建模

1.1 三维实体建模及简化

根据项目设计要求, 基于振动力学理论, 首先运用 SolidWorks 对天线测试架的极化旋转机构、俯仰旋转机构、垂直升降机构、方位旋转机构和水平运动机构进行三维实体建模, 如图 1 所示。天线测试架负责搭载探头或天线喇叭, 在控制系统控制下, 由步进电机和传动机构驱动, 运行到指定位置完成微波测试。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFB034104)

第一作者简介: 丁雨焄 (1999—), 男, 江西九江人, 硕士, 研究方向为高精度智能测试设备, 2524153682@qq.com。



1—极化旋转机构;2—俯仰旋转机构;3—垂直升降机构及支架;
4—方位旋转机构;5—水平运动机构及底座。

图1 微波暗室远场测试系统

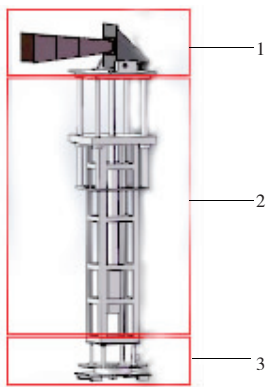
表1 天线测试架零部件材料表

零部件	材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比
升降台、升降支撑座、升降螺杆螺母和俯仰机构	PVC	1 460	2 600	0.385 69
天线喇叭	Q235 结构钢	7 850	21 000	0.300 00

1.2 有限元模型

本文运用 Ansys Workbench 软件进行模态仿真研究,将天线测试架三维实体模型导入 Ansys Workbench 软件,装配体导入 DM 后没有任何装配关系,每个零部件都是完全独立的^[6]。

为了方便仿真计算,简化对仿真分析影响较小的倒角、插头和螺钉等多余特征,将极化旋转机构、俯仰旋转机构、垂直升降移动部分等零件连接成整体部分 1,升降固定部分、方位旋转机构和水平运动机构连接成整体部分 2。然后进入设置模块进行网格划分。本文网格采用四面体。由于整体模型较大,网格尺寸设置为 50 mm,并将倒角和应力较大部分局部网格细化为 5 mm,升降机构和俯仰机构的网格划分为 20 mm,表面粗糙度和平滑度设置为中等,其他设置保持默认即可。网格划分后,天线测试架模型具有 109 760 个节点,59 193 个网格。有限元模型如图 2 所示。



1—俯仰机构;2—升降机构;3—天线测试架底座。

图2 天线测试架简化模型

运用 Ansys Workbench 进行力学仿真。考虑到微波天线测试静场要求,天线测试架极化旋转机构、俯仰旋转机构、垂直升降机构采用聚乙烯 PVC 材料,天线喇叭、方位旋转机构和水平运动机构采用 Q235 结构钢,非金属材料连接部分采用尼龙螺钉,金属材料的连接部分采用不锈钢 304 螺钉^[5]。材料属性如表 1 所示。

2 模态分析

在实际工程中,认为天线测试架为完全刚体。所以在有限元分析时,对天线测试架滑块底面进行固定支撑设置,对部分 1 与部分 2 之间的 4 根导向杆与非金属直线滑动轴承之间施加摩擦约束,摩擦因数为 0.2;对升降机构的丝杆螺母机构施加绑定约束。

因为天线测试架机械结构阻尼远小于临界阻尼,所以在仿真计算天线测试架的模态时忽略不计^[7]。

模态分析动力学方程^[8]为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0 \quad (1)$$

式中: M 表示天线测试架结构的 n 阶质量矩阵; C 表示天线测试架结构的 n 阶阻尼矩阵; K 表示天线测试架结构的 n 阶刚度矩阵; $\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$ 、 u 分别表示天线测试架的加速度矩阵、速度矩阵和位移矩阵。

忽略阻尼的自由振动:

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (2)$$

谐运动:将 $u = f(t)\phi$ 带入式(2)

$$f(\ddot{t})M\phi + f(t)K\phi = 0 \quad (3)$$

$$\frac{f(\ddot{t})}{f(t)} = -\frac{K\phi}{M\phi} \quad (4)$$

令 $\frac{f(\ddot{t})}{f(t)} = -\lambda$, 则有

$$f(\ddot{t}) + \lambda f(t) = 0 \quad (5)$$

$$(K - \lambda M)\phi = 0 \quad (6)$$

令 $\omega^2 = \lambda$, 带入式(6):

$$(K - \omega^2 M)\phi = \{0\} \quad (7)$$

所以

$[K-\omega^2M]=\{0\}$ (8)

式中: ϕ 表示自由振动时的振幅向量,即各节点各坐标方向上的振幅所组成的列阵; $f(t)$ 表示谐运动方程; ω 表示系统的固有频率。

本文模态分析采用施加约束的模态分析,求解天线测试架升降高度处于升降最高点、升降中点和升降最低点的前6阶模态,如表2所示。

表2 天线测试架模态分析前6阶固有频率 单位:Hz

位置	阶次					
	1	2	3	4	5	6
升降最高点时	2.676 6	2.723 9	4.539 9	5.161 2	6.855 9	8.880 9
升降中点时	3.289 8	3.345 8	4.817 5	5.218 2	7.990 6	10.707 0
升降最低点时	3.718 2	3.723 7	4.933 4	5.700 4	8.476 5	8.960 8

从表2中可以看出:随着升降机构的升降高度越高,天线测试架的振动基频就越低。在升降机构达到最高点时,天线测试架的第1阶模态频率为2.67 Hz,如图3所示。此时天线测试架与电机输出轴产生共振,会对其结构产生破坏,故需对结构进行改进。因此,后续针对测试架升降机构最大时的工作状态进行优化。

分析原因如下:

- 1) 非金属材料的比刚度较低,导致固有频率下降;
- 2) 天线测试架的升降高度比较大,天线喇叭的悬臂较大,导致振动周期长;
- 3) 天线测试架的非金属升降机构和俯仰机构的刚度较差,导致振动频率下降。

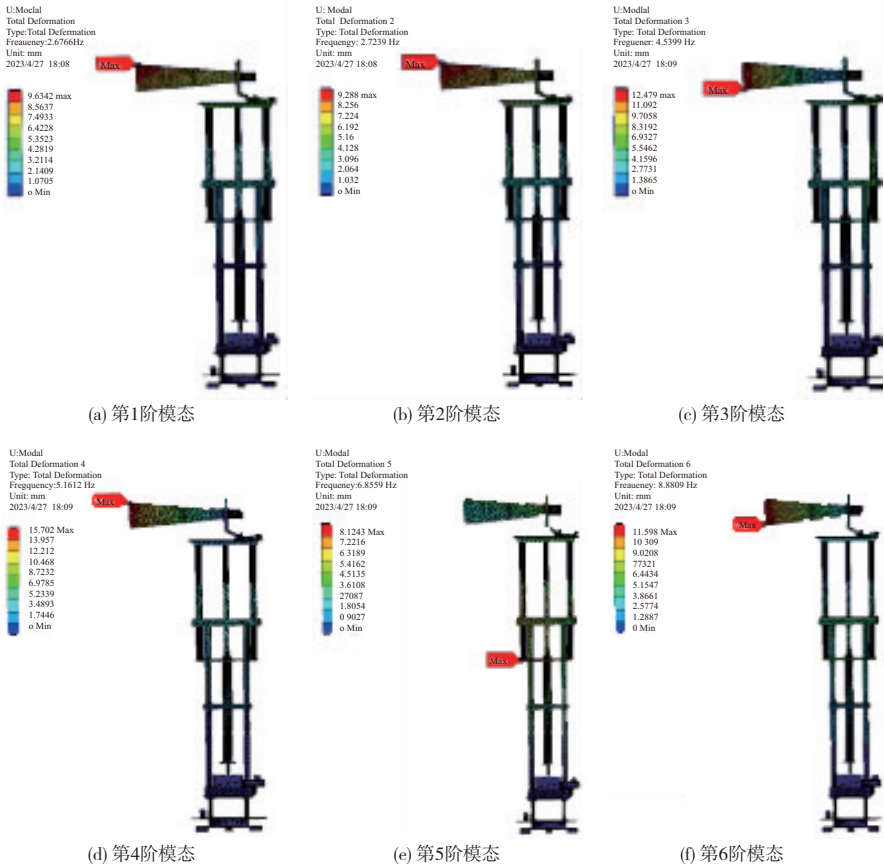


图3 天线测试架升降最高点的模态分析前6阶变形云图

因为暗室几乎无外界干扰,因此在天线测试过程中,电机激励或者齿轮啮合激励影响较大。其激励频率根据电机的转动频率 ω_z 的计算公式为

$\omega_z = \frac{n}{60}$ (9)

本文研究天线测试机所用升降电机正常工况下的额定转速、输出轴振动频率和齿轮啮合频率

如表3所示。

表3 天线测试架的主要激振频率

传动机构	电机输出轴 转速/(r/min)	输出轴振动 频率/Hz	齿轮的啮合 频率/Hz
方位旋转机构	0~1.089	0~0.018	0~0.540
垂直升降机构	0~180	0~3	—

因此天线测试架的结构固有频率需大于 3 Hz,避开电机的激振频率,减小测试架的振动幅值,提高测试精度。

3 结构改进

通过对比电机激励频率与天线测试架固有频率可知:其第 1 阶模态频率低于 3 Hz,容易产生共振,天线喇叭变形较为明显,易受到影响微波测试准确性。为提高测试架的测试精度、使用寿命和行驶平顺性,对天线测试架的原有结构进行改进。

在俯仰机构上增加加强筋。将升降机构的底座由方棒改成 4 块空心 PVC 板热熔形成空心四棱立柱,加强梁结构的强度和连接位置的强度,如图 4 所示。

4 响应面优化

响应面优化主要以升降机构和俯仰机构的相关尺寸作为优化参数 D1—D13,如图 5 所示。

敏感性参数筛选后,选择对质量、静力学变形量和 1 阶固有频率影响最大的参数。以质量最小、静力学变形量小于 2 mm、振动基频大于 3 Hz 作为优化

目标,改进天线测试架的参数,如表 4 所示。

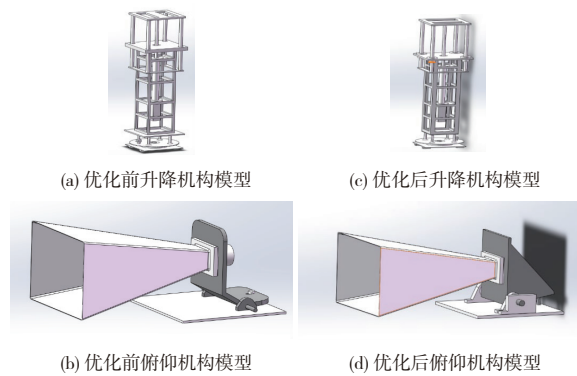


图 4 天线测试架结构形式优化前后模型

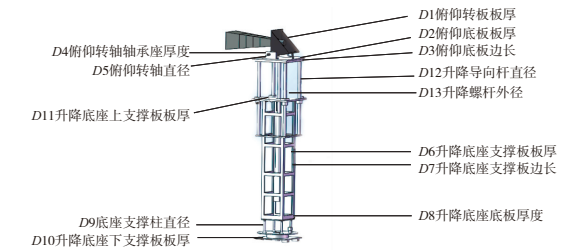


图 5 天线测试架的响应面优化参数

表 4 响应面优化结果

设计点	参数/mm								1 阶固有频率/Hz	最大变形量/mm	质量/kg
	D1	D2	D6	D7	D9	D10	D11	D12			
1	12.5	15.7	39.7	297.4	23.9	7.5	6.6	24.8	4.75	1.47	178.9
2	14.8	17.1	16.1	270.9	37.0	12.7	4.4	51.4	4.09	1.56	178.9
3	35.7	12.6	23.3	294.8	25.4	11.6	5.5	38.3	4.24	0.81	181.4

对改进后天线测试架进行模态分析,对比改进前后试验数据。由图 4 改进天线测试架 1 阶模态可知:改进后 1 阶模态为 4.75 Hz,高于电机输出轴的激励频率,摆脱了改进前可能发生共振的情况。通过对比可知:各阶模态固有频率皆有显著提升,都在外界激励频率之上,并且天线测试架的质量减少了约 10%,最大静态变形量减小了 11.40 mm,结构优化达到预期目标。优化前后对比如表 5 所示。

5 实验验证

针对天线测试架存在的振动较大问题,对天线测试架进行振动测试,得到天线测试架的振动特性,对天线测试架的振动强度进行分析,如图 6 所示。

表 5 参数优化前后对比

参数	优化前	优化后	对比值	百分比/%
D1/mm	15.00	12.51	-2.49	-16.6
D2/mm	15.00	15.69	0.69	4.6
D6/mm	15.00	39.73	24.73	164.9
D7/mm	330.00	297.35	-32.65	-9.9
D9/mm	25.00	23.85	-1.15	-4.6
D10/mm	10.00	7.46	-2.54	-25.4
D11/mm	10.00	6.62	-3.38	-33.8
D12/mm	40.00	24.82	-15.18	-38.0
最大变形/mm	13.77	2.37	-11.40	-82.8
振动基频/Hz	2.68	4.75	2.08	77.2
天线测试架质量/kg	195	178	-17	-8.7



图6 天线测试架上传感器的布置点

测试10组数据,取平均值,得到天线测试架的固有频率,锤击实验测得振动频率与模态分析结果如表6所示。

表6 天线测试架的振动实验频率与振动仿真频率对比
单位:Hz

项目	频率					
实测数据	4.750	5.270	8.250	16.318	16.539	22.029
仿真数据	4.960	5.220	8.030	16.140	16.290	21.500

对比天线测试架的实测振动频率和仿真频率,发现天线测试架的仿真比较准确。

6 结语

通过对天线测试架俯仰旋转机构和垂直升降机构进行结构形式优化和响应面优化,天线测试架的质量减少了约10%;并且提高局部结构强度,使其1阶固有频率从2.67 Hz提高到4.75 Hz,脱离共振带,天线测试架整体模态性能得到提升,满足预期结果,可为天线测试架结构优化提供参考。

参考文献:

- [1] 李亚妮. 天线近场测试扫描架动力学分析与优化设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.
- [2] 郁佳婧. 平面天线近场测量系统的研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2020.
- [3] 顾吉丰. 大型天线平面近场测试扫描装置[J]. 电子机械工程,1996,12(2):1-4.
- [4] 向文良. 改善结构设计,提高大型平面近场测试设备精度探讨[J]. 电子机械工程,2000,16(3):29-32.
- [5] 许进峰. Ansys Workbench 15.0 完全自学一本通[M]. 北京:电子工业出版社,2014.
- [6] 路娜. 基于 Ansys 的煤炭采样机采样臂动力学分析[D]. 西安:长安大学,2014.
- [7] 秦玉玲. 基于 Ansys 某履带起重机臂架参数化有限元分析系统开发[D]. 沈阳:东北大学,2010.
- [8] 李建,邹开,周小江,等. 地铁车辆转向架构架模态试验和仿真分析[J]. 机车车辆工艺,2021(3):41-43,57.

收稿日期:2023-07-03