

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.01.05

单轴位置转台轴系特性分析

聂振华, 于亚云, 尹晓丽, 李晓婷, 胡慧颖

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 转台作为检测与评价惯性导航仪器仪表的主要设备, 其轴系静态刚度、动态特性和控制精度等直接影响到检测的可靠性和置信度。本文针对单轴位置转台, 对轴承和驱动电机等关键部件进行了等效处理, 利用软件 ANSYS 建立了有限元模型, 通过静力学分析得到了转台简化模型的变形情况; 通过模态分析得到其固有频率和振型, 结果表明转台结构刚度较大, 其固有频率远大于外部激励频率, 可以避免共振, 并为后续的结构优化打下基础。

关键词: 单轴位置转台; 有限元模型简化; 模态分析

中图分类号: TB535

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)01-0021-04

Static and Dynamic Characteristics Analysis for Uniaxial Position Turntables

NIE Zhenhua, YU Yayun, YIN Xiaoli, LI Xiaoting, HU Huiying

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: A turntable is one of the inertial instruments which can detect and evaluate navigation equipment, and its shafting's static stiffness, dynamics and control accuracy can affect inertial test's reliability and confidence directly. In this paper, we firstly conduct bearing and drive motor of uniaxial position turntable, and then simplify the finite element model using software ANSYS. We got the deformation of the simplified turntable by static analysis, and the natural frequencies and mode shapes by modal analysis. The results show the turntable has large rigidity, and its natural frequency is much greater than the external excitation frequency so as to avoid resonance. The finite element analysis is a foundation for subsequent optimization.

Key words: uniaxial position turntable; simplify finite element model; modal analysis

0 引言

转台作为航空航天惯性导航与制导领域中仿真和测试的主要设备, 可以用来检测与评价惯性导航传感器的性能指标, 为惯性导航精密仪器仪表提供一个技术标准。惯性转台的轴系静态刚度、动态特性和控制精度等直接影响到其工作的可靠度和置信度, 是保证航天、航空产品和武器系统准确度及性能的基础。因此, 针对转台的静、动态特性分析至关重要^[1-2]。

惯性转台结构复杂, 用传统的力学方法得到的结构特性结果计算不准确^[3]。有限元分析作为数值模拟分析技术, 将结构离散为有限个单元, 用每个单元内所假设的近似函数表示全区域内待求解的有限自由度

未知变量。对转台机械结构进行有限元分析, 虚拟实际工况, 准确计算其静态刚度、动态特性, 简化了设计流程。目前, 国际上约有 90% 的机械装置是经过有限元分析设计及优化的产物。

本文针对单轴位置转台进行有限元分析, 首先建立了单轴位置转台的三维模型并进行简化, 利用软件 ANSYS 进行静强度分析, 找出结构上的薄弱部分, 为其进一步的结构优化提供参考; 通过模态分析得到的转台结构固有频率及振型, 可以验证结构是否发生共振, 并为其他动力学分析做好铺垫。

1 单轴位置转台轴系静态特性分析

1.1 有限元分析简介

作为一种发展迅速的分析方法, 有限元技术常用的软件有 ANSYS, PATRAN 和 CATIA 等。本文利用 ANSYS WORKBENCH 模块进行单轴位置简化结构的静力分析和结构动力分析, 为结构设计提供参考。

收稿日期: 2015-12-02; 修回日期: 2015-01-07

作者简介: 聂振华(1990-), 女, 助理工程师, 硕士, 从事惯性测试设备开发研究工作。

利用软件 ANSYS WORKBENCH 进行有限元分析的流程见图 1 所示。

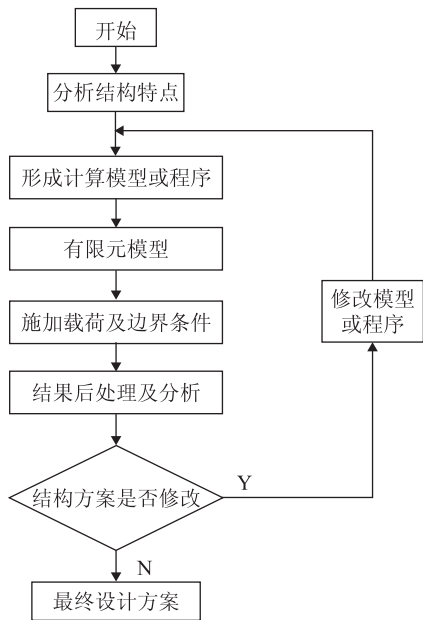


图 1 ANSYS 分析流程图

1.2 机械结构静态有限元法

结构静力分析用来求解静态外载荷引起的结构位移和应力等问题。通过静力分析可以校核转台结构的刚度和强度是否满足设计要求。静力分析分为线性静力分析和非线性静力分析。本文转台结构的静力分析属线性静力结构分析。

线性结构的静力分析总的等效方程为

$$Ku = P(t) \tag{1}$$

式中： K 为单轴位置转台刚度矩阵； u 为单轴位置转台整体坐标下的节点位移向量； $P(t)$ 为单轴位置转台节点所受外力向量。

1.3 建立转台有限元模型

惯性转台具有较为复杂的机械结构，在进行有限元结构分析前，对其进行简化。单轴转台的底座部分在转台系统中主要起支撑作用，但对结构的机械特性影响不大，所以本文选单轴转台的转动部分即轴系部分作为研究对象，分析其静态特性。对于单轴位置转台轴系部分零部件的简化，主要包括：①保留轴系结构的基本特征，忽略倒角、圆角、定位孔等；②对轴承及电机等难以建模的复杂元件进行简化等效处理；③根据转台的实际受力和约束情况，对轴系结构承受的载荷和约束进行等效处理。

在软件 Solidworks 中建立的单轴台三维模型如图 2 所示，按上述原则转台简化后的静力分析模型如图 3

所示。

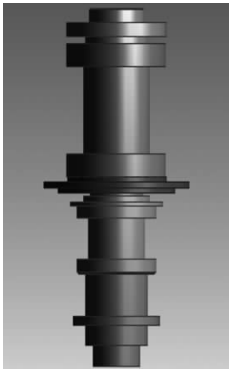
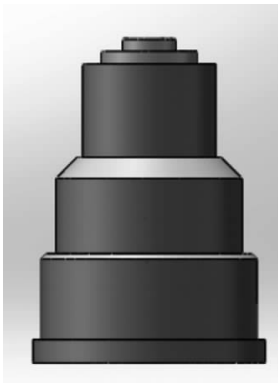


图 2 转台三维模型图 图 3 转台静力分析模型图

1.4 静态有限元计算

静态有限元分析通过将结构离散为有限数量的单元，对实际工况、材料属性、边界和载荷条件等进行设置，将机械结构无穷单元的函数方程简化为有限自由度未知变量，进行线性方程求解。

1) 材料属性

轴承的支承刚度对转台系统的结构特征有重要影响，国内外对轴承建模有众多研究^[4-6]。根据文献[7]，本文采用有限元试算的方法对其进行等效处理，轴系其余部件按质量等效原则赋予其材料属性，整个结构的材料划分为表 1 所示。

表 1 转台主要零部件的材料属性

零部件	材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
轴承	等效	210	0.3	4868
直流力矩电机	等效	108	0.33	4470
电机座	铸铝合金	68.9	0.33	2650
其它	钢	210	0.3	7850

2) 接触类型选择

单轴位置转台轴系部分主要由主轴、轴承、电机组件等联接而成，将零件之间的接触选为绑定接触。

3) 网格划分

设定网格划分的参数，以控制网格密度，提高网格质量。有限元网格越大，模型就越粗糙，计算结果越不准确；网格越小，计算时间和占用内存越大。划分网格时，必须保证每一个波长内至少有四个单元^[8]，才可以表达出结构的振动特性，结合计算能力，最终确定单轴位置转台轴系结构的有限元模型如图 4 所示，模型中共有 57385 个单元、112035 个节点。

4) 载荷条件

轴系主要支承在轴承上，因此在有限元模型轴承

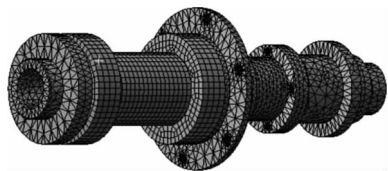


图4 单轴位置转台轴系网格图

位置转添加除绕自身轴转动以外的其余五个方向约束。单轴位置转台根据实际工况,其简化轴系所受的载荷主要包括:①自身重量(可在 ANSYS 软件中直接设置重力加速度);②惯性力矩(绕主轴转动的惯性力矩可以通过软件进行计算);③驱动扭矩(电机为单轴位置转台提供扭矩,作用在主轴上控制其转动,本文单轴位置转台的电机最大扭矩为 $30 \text{ N} \cdot \text{m}$);④集中载荷(转台的集中载荷主要来自负载,负载是通过螺栓固定在工作台的,本文模型的负载总质量为 10 kg)。

在 ANSYS WORKBENCH 中进行机械结构静力分析 (Static Structural), 首先在 Mechanical 模块中设置网格、接触、载荷、约束、求解类型、结果和后处理。

在如图 5 所示的静力分析界面中, 导入几何体、设置材料, 在 Model 模块中设置接触、网格、载荷、求解等, 完成有限元静态分析的前处理过程, 如图 6 所示。

A	
1	Static Structural(ANSYS)
2	Engineering Data ✓
3	Geometry ✓
4	Model ✓
5	Setup ✓
6	Solution ✓
7	Results ✓

图5 Static Structural 模块分析流程图

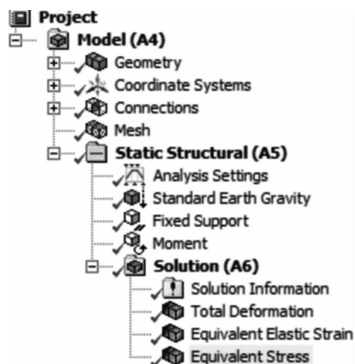
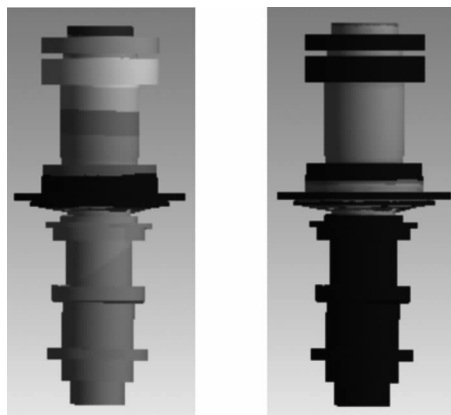


图6 Model 模块分析流程图

1.5 单轴位置转台轴系静态有限元结果

经过上述有限元静态分析, 得到单轴位置转台简

化轴系的节点位移变形图和应力分布云图, 如图 7 所示。



(a) 节点位移变形图 (b) 节点应力分布图

图7 单轴位置转台静态有限元结果

变形最大位置在负载处, 最大位移为 $0.056 \mu\text{m}$, 在材料的许用应变范围内。最大应力区出现在上端轴系部位, 最大应力值为 1.79 MPa , 与其材料的屈服应力相比, 安全系数较高, 强度满足要求。

2 单轴位置转台轴系模态分析

2.1 模态分析理论

实际工况中, 机械结构承受的载荷一般都是随时间变化的, 此时可以用动力学分析其对机械结构的影响, 动力学分析主要包括模态分析、瞬态动力学分析、谐响应分析等。模态分析是其他动力学分析的基础, 通过模态分析可获得单轴位置转台的固有频率和振型, 反映了结构的固有特性。

模态分析的前提是线弹性系统, N 阶自由度线性系统的振动微分方程为

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

式中: M 为单轴位置转台质量矩阵; K 为单轴位置转台刚度矩阵; C 为单轴位置转台阻尼矩阵; $\dot{u}$ 为单轴位置转台整体坐标下节点位移向量的一阶导数; $\ddot{u}$ 为单轴位置转台整体坐标下节点位移向量的二阶导数。

当不考虑阻尼和外力时, 单轴位置转台动力学方程简化为

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

单轴位置转台结构做简谐运动时, 其动力学方程式的解为

$$u = \phi \xi(\omega) e^{j\omega t} \quad (3)$$

式中: ϕ 为单轴位置转台振幅矩阵; $\xi(\omega)$ 为单轴位置

转台模态函数; ω 为单轴位置转台振动速度。

将解的形式代入动力学方程中, 化简得

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0 \quad (4)$$

只有当式(4)的系数行列式为零时方程才有非零解, 即

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (5)$$

通过求解此行列式可得到结构的特征参数, 单轴位置转台固有频率的平方 ω^2 为特征值, 特征向量为单轴位置转台结构的模态振型 ϕ , 由此根据结构的刚度矩阵和质量矩阵用有限元的方法求得单轴位置转台的模态参数。

2.2 单轴位置转台模态分析

模态分析求解的是结构的固有特性, 在对转台结构进行模态分析时忽略外部载荷的作用。边界条件能影响结构的固有频率和振型, 采用实际约束支撑, 更精确的反映出转台在工作时的动态性能。

在 Mechanical 模块中建立模态分析, 模态分析的简化模型、接触、材料属性、约束和求解与 2.1 中静力特性分析的计算过程相同, 只不过不需要施加载荷。

2.3 模态分析结果

单轴位置转台简化轴系前六阶固有频率数值见图 8, 提取前六阶固有振型, 图 9 和 10 为其中典型的振型。

Tabular Data		
	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	1190.3
2	2.	1197.4
3	3.	1679.2
4	4.	1683.
5	5.	3527.9
6	6.	4040.5

图 8 转台前六阶固有频率数值

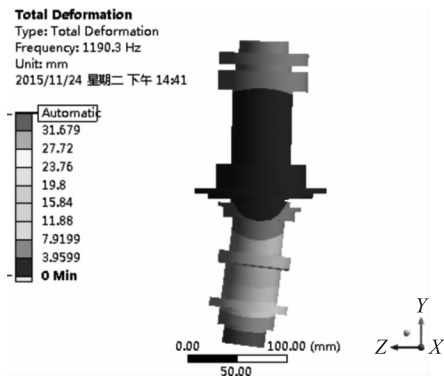


图 9 转台一阶振型图

从图 8 中可看出, 转台的第一阶固有频率为 1190.3 Hz, 单轴位置转台受到的外部激励主要为直流力矩电机, 其工作频率 10 ~ 150 Hz, 远小于轴系的第

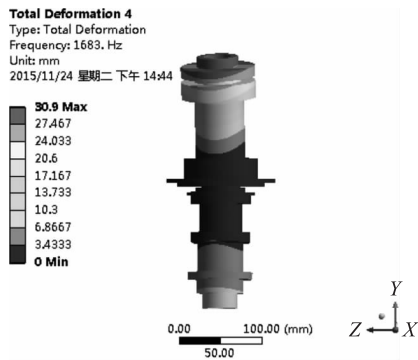


图 10 转台三阶振型图

一阶固有频率, 避开了电动机工作频率范围, 所以转台在实际工作中不会发生共振。从转台轴系的振型图(见图 9 和图 10)可以观察出其主要在轴系上下端位置振动, 这个结论为后续的结构优化提供依据。

3 结论

本文建立了单轴位置转台的三维模型, 并对其零部件进行简化, 得到了有限元分析模型; 利用软件 ANSYS WORKBENCH 对其进行了静力学分析, 从得到的应力和应变仿真结果发现, 单轴位置转台的强度满足要求, 材料选择和结构布局等较为合理; 对简化后的模型进行模态分析, 得到各阶固有频率及相应振型, 其固有频率远大于外部激励频率, 各阶振型图较为光滑, 避免了突变。本文通过有限元方法验证了单轴位置转台结构设计的合理性, 同时为转台的结构优化做了铺垫。

参考文献

- [1] 梁迎春, 陈时锦, 黄开榜. 惯性系统三轴综合测试转台总体设计若干问题的探讨[J]. 中国惯性技术学报, 1996, 4(1): 71-74.
- [2] 尹衍丽. 三轴测试转台结构的静动态特性分析及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.
- [3] 杨显宏. 基于 Pro/E 的回转起重机的转台结构的有限元分析[J]. 煤矿机械, 2010(10): 104-105.
- [4] 谢涛, 刘品宽, 陈在礼. 转台轴系轴承刚度矩阵的理论推导与数值计算[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(3): 329-333.
- [5] 陈时锦, 张春玉. 轴承刚度矩阵解析的推导与计算机求解[J]. 轴承, 2006(4): 1-4.
- [6] 谢涛, 单小彪, 陈维山. 转台轴承轴向刚度研究[J]. 轴承, 2006(1): 24-26.
- [7] 李秋红. 三轴转台有限元结构分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [8] 朱锡, 胡忠平, 石勇. 预报基座结构噪声的有限元方法研究[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(6): 33-36.