

基于 ANSYS 的滚珠丝杠螺母副的动力学分析

撰文 / 青海华鼎重型机床有限责任公司 刘琼 党秋会 杨亮

滚珠丝杠螺母副是数控机床中将旋转运动转化为直线运动的常用传动机构，利用 ANSYS Workbench 软件对其进行动力学仿真，对滚珠丝杠螺母副的实际应用有很好的参考价值，并能对使用滚珠丝杠螺母副的数控机床样机试制提供可靠的依据。首先利用三维软件 Solid Edge 建立三维模型，导入有限元分析软件 ANSYS Workbench 前处理，定义约束和施加载荷，然后对其进行模态分析，依据前 6 阶固有频率，分析各频率下的振型，对避免发生共振提出依据；而后对其进行了谐响应分析，分析正弦函数对滚珠丝杠螺母副的影响程度。结果表明，利用动力学分析中的模态和谐响应分析对滚珠丝杠螺母副的机械动态特性进行仿真分析，对滚珠丝杠螺母副在数控机床中的实际应用的好坏，有很好的参考价值和理论依据。

一、引言

数控机床中的滚珠丝杠螺母副运动部件是机床伺服轴的核心执行件，它的主要作用是将伺服电机的旋转运动转变为执行件的直线运动，从而进行机床的切削运动。

为了更好地发挥这种运动部件的高效率、高精度和高刚性的优势，必须按照机床的实际工况来准确合理地选择滚珠丝杠螺母副。在一般的滚珠丝杠螺母副的设计选型中，通常是采用经验公式的计算和类比法，随着数控机床高速化、智能化以及高的动态响应的发展，这种设计方法所带来的误差和不精确性已经体现在实际的应用中，因此借助 ANSYS Workbench 有限元软件的功能，再结合计算和实际应用经验的综合方法来检验和校核滚珠丝杠的实际动态特性对发挥其高的性能显得尤为重要。

二、动力学分析简介

动力学分析较之静力学分析较为复杂，其动力学的通用方程为：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}$$

不同的分析类型对应求解不同的形式的方程。对于模态分析，则 $F(t) = 0$ ， $[C]$ 一般忽略；对于谐响应分析， $F(t)$ 和 $U(t)$ 都假设为谐函数，假如 $X \sin(\omega t)$ ，其中 X 为振幅， ω 为频率。单位 rad/s；对于瞬态动力学分析，方程保持上述形式。

本文中主要针对滚珠丝杠螺母副的机械特性来进行模态分析和谐响应分析。

三、模态分析

1. 模态分析简介

模态分析是动力学分析的基础，分析模态的目的是在设计之前预先避免可能引起的共振，另外有助于在其他动力分析中估算控制参数，因为结构的振动特性决定了结构对各种动力载荷的响应情况。因此本文针对滚珠丝杠螺母副的机

械特性的动力学研究，首先要进行模态分析。

2. 模态分析的过程

(1) 模型导入。

利用三维设计软件对滚珠丝杠螺母副的丝杆、钢球、螺母及其丝杆两端的轴承支座，包含支座内的支撑轴承等建模，然后利用 ANSYS Workbench 模态分析模块 Modal，其分析框如图 1 所示。模态分析中支持各类几何体，如实体、面体、线体和质量点，对于一般的线体，只输出振型和位移结果。

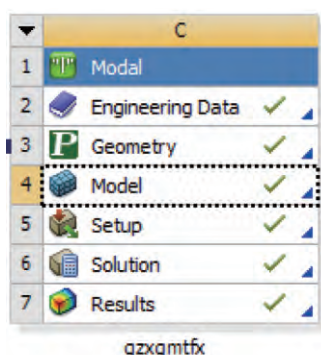


图 1 模态分析框

打开 Mechanical，进入设置界面，如图 2 所示。

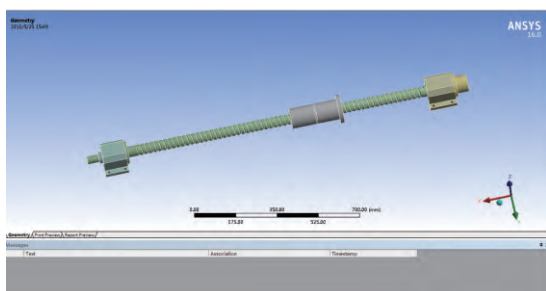


图 2 Mechanical 设置界面

(2) 设置模态分析。

接触对类型设置。由于模态分析是线性分析，所以定义接触时，最好设置为绑定或者不分离的模式，如表所示。

(3) 网格划分。

采用四面体网格划分的方法，如图 3 所示。



图 3 网格划分图

表 接触部位与接触类型

接触部位	接触类型
丝杠螺母与钢球	Bonded
滚珠丝杠丝杆与钢球	No Separation
轴承外圈与轴承座内孔	No Separation
轴承内外圈与轴承钢球	Bonded
轴承内圈内孔与丝杠轴外径	Bonded
轴承内环端面与丝杠轴端面	Bonded
螺母内径与丝杠轴外径	Bonded
螺母端面与各隔套端面	Bonded

(4) 分析项设置、约束和载荷添加

在模态分析中，一般不添加结构载荷和热载荷，模态分析并不要求禁止刚体运动，所以设置边界条件，也就是约束很关键。详细设计如图 4 所示。

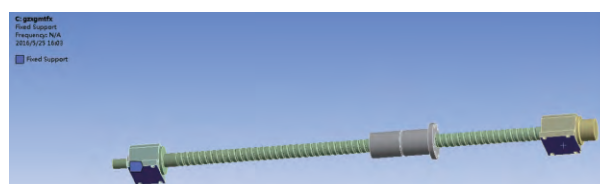


图 4 添加约束

一般情况下程序默认设置为前 6 阶模态，这样的设定在工程领域已经足够用了。

3. 求解结果计算

点击 Solve，其前 6 阶模态下的最大位移如图 5 所示，并产生各阶频率。

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	80.196
2	2.	80.385
3	3.	259.67
4	4.	260.39
5	5.	468.31
6	6.	512.93

图 5 各阶频率值

前 6 阶振型图如图 6 ~ 11 所示（云图均为放大比例图）。



图 6 1 阶振型云图



图 7 2 阶振型云图



图 8 3 阶振型云图

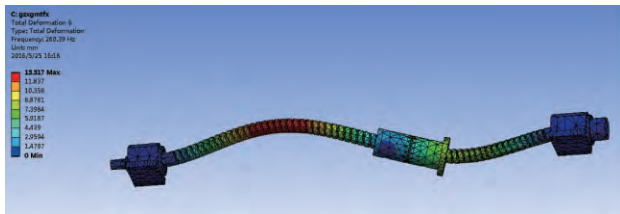


图 9 4 阶振型云图

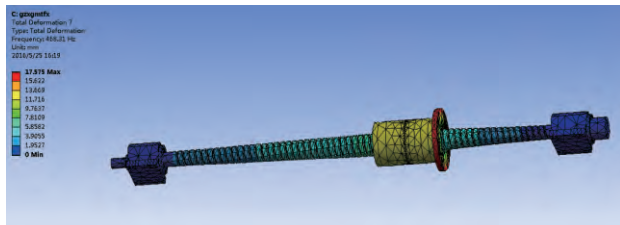


图 10 5 阶振型云图



图 11 6 阶振型云图

从以上前 6 阶频率和振型分析，如果发生同阶频率共振，其最大位移在第 5 阶，即 17.575mm，发生在螺母右端面处。一般情况分析前 3 阶，即可满足滚珠丝杠的共振情况，但本文中的丝杠的驱动电机的最高转速为 2500r/min，按 3000r/min 计算，它所产生的最高频率为 50Hz，达不到

前 3 阶的频率，因此滚珠丝杠在设计上满足使用要求。

四、谐响应分析

1. 谐响应分析简介

谐响应分析是用于确定线性结构在承受随正弦规律变化的载荷时稳态响应的一种技术。输入载荷可以是已知幅值和频率的力、压力和位移，输出值包括节点位移也可以是导出的应力和应变等。谐响应有两种方法，即完全法和模态叠加法。

本文中除了对滚珠丝杠系统自身的属性和特性，为了得到实际工作状态的动态响应，需要在此基础上做谐响应分析。

2. 谐响应分析过程

(1) 模型导入。

同样利用之前静力学的模型关联谐响应分析模块 Harmonic Response，其分析框如图 12 所示。

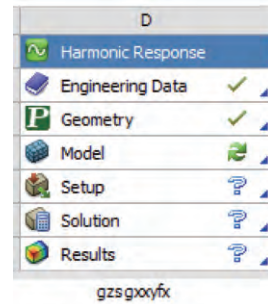


图 12 谐响应分析框

打开 Mechanical，进入设置界面（图 13）。

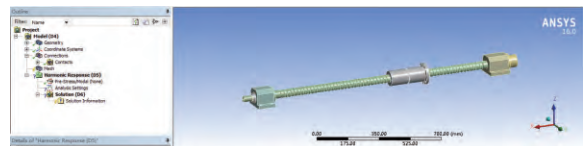


图 13 Mechanical 设置界面

(2) 分析设置。

接触对设置、网格划分及添加约束接触对设置及网格划分同模态分析，此处不再赘述，如图 14、15 所示。



图 14 网格划分图

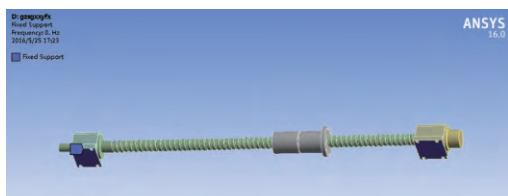


图 15 添加约束

分析参数输入本文中输入频率范围为 0 ~ 200Hz 的频率载荷, 间隔为 10Hz, 即每隔 10Hz 计算相应的值。如图 16 所示。

Options	
Frequency Spacing	Linear
☐ Range Minimum	0. Hz
☐ Range Maximum	200. Hz
☐ Solution Intervals	10
Solution Method	Mode Superposition
Cluster Results	No
Modal Frequency Range	Program Controlled
Store Results At All Frequencies	Yes

图 16 频率载荷输入图

同时输入轴向载荷为 150N, 相位角为 60° 的正弦载荷, 如图 17、18 所示。

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Type	Force
Define By	Vector
☐ Magnitude	150. N
☐ Phase Angle	60. °
Direction	Click to Change
Suppressed	No

图 17 轴向载荷输入图

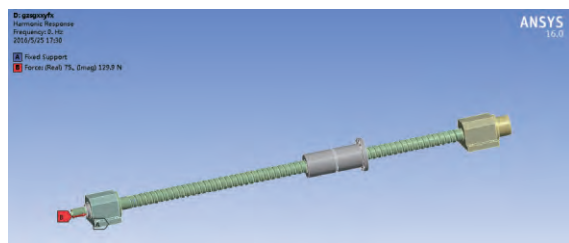


图 18 载荷和约束设置图

3. 求解计算结果

主要输出滚珠丝杠丝杆在 0 ~ 200Hz 时, 在 500N, 相位角为 60° 的轴向载荷的作用下的应变—频率的频谱图以及相频图。如图 19、20 所示。

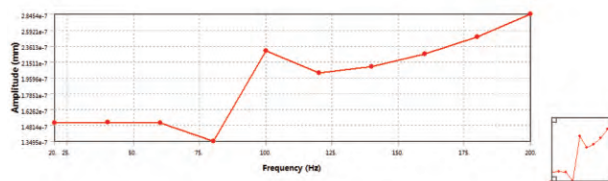


图 19 幅频特性图

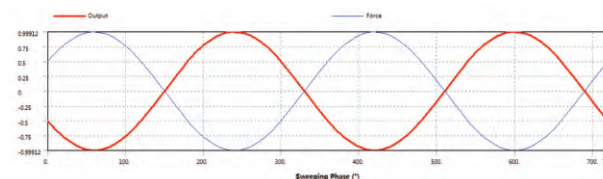


图 20 相频特性图

4. 计算结果分析

从以上幅频特性图中可以看出其在频率到达 200Hz 时, 相位角为 120° 时, 滚珠丝杠的丝杆在轴向载荷 500N 的作用下, 其在 X 方向也就是轴向的最大幅值为 2.845×10^{-7} mm, 变形量非常的小; 从相频特性中可以看出, 在其 50Hz 时, 轴向力 500N 时, 同时在相位角为 57.6° 时, 滚珠丝杠的丝杆在 X 方向也就是轴向的最大幅值为 1.508×10^{-7} mm, 变形量也是非常的小, 说明本设计的丝杠在外部载荷的作用下完全可以满足使用要求。

五、结语

对滚珠丝杠螺母副的进行了模态和谐响应的动力学分析, 提出了滚珠丝杠的避免共振的频率范围和在外载荷下的动态特性, 为滚珠丝杠螺母副的理论计算和实际应用提供了可靠、合理的依据和参考价值。