工程优化课程作业

张秋源　S230200252

1　项目介绍

离心机是一种常用的固液分离设备，在制糖、蜂蜜分离、维生素 C 合成等领域都有相关的应用。为了解决离心机异常振动的问题，需要对转子的临界转速进行分析。本文首先使用 Ansys 转子动力学模块对该离心机转子进行分析，考虑了克里沃里力的效果，求解其在不同频率下的对应模态结果，随后求解出其临界转速。然后改变离心机弹簧与阻尼器的刚度等参数，在指定范围之内使用拉丁超立方抽样，并按照上述的方法进行仿真分析，获取其正、反进动临界转速。随后使用多项式拟合算法以及径向基函数算法构建转子一阶临界转速与弹簧刚度、阻尼等参数有关的响应面模型，并分析其变化趋势。

2　转子模型以及仿真分析

在给转子施加连接以及划分网格后，得到以下结果

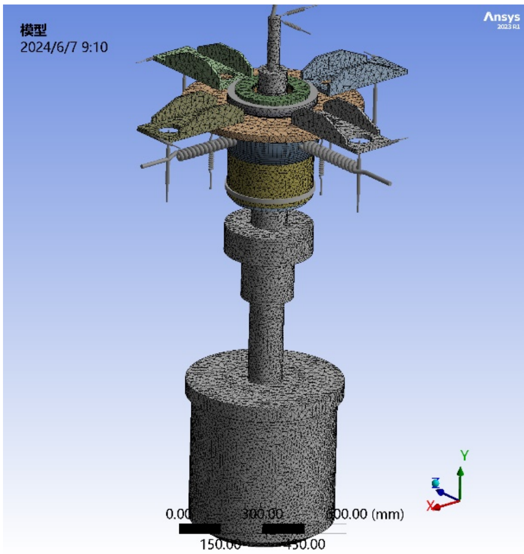

图 1 转子网格

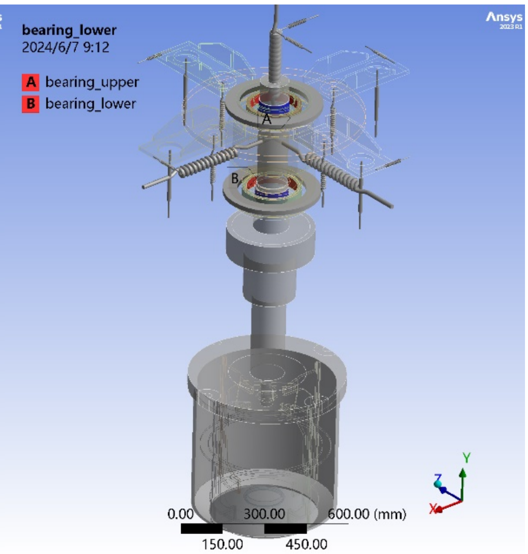

图 2 轴承-弹簧-阻尼连接位置

离心机转子模型主要有 4 个参数，分别是减振弹簧刚度、阻尼器阻尼、球铰支承刚度、轴承刚度。先使用拉丁超立方抽样方法在表 1 所示的参数范围内抽取 100 个样本，将抽取的样本参数带入 Ansys APDL 进行有限元仿真处理，求解其在不同转速下的模态，并由此获得正、反进动的临界转速。抽样得到的结果与与仿真得到的临界转速存储在在./data/sample_100.txt 中。

表 1 参数范围表

参数名称	取值范围
阻尼器阻尼	10~100 (N s/mm)
弹簧刚度	1~350(N/mm)
球铰支承刚度	1e5~8e5(N/mm)
轴承刚度	8e4~5e5(N/mm)

3 多项式响应面构建

在获得结果后，使用 python 编写算法，基于最小二乘法原理进行响应面构建，该算法支持多个自变量输入，且支持任意多数量的交叉项，且支持输入变量的归一化。详细内容见 polyresponse.py 文件。将上一章的获得的数据带入该多项式中，由此可以获得对应的多项式响应面。以x_1表示阻尼器阻尼，x_2表示弹簧刚度，x_3表示球铰支承刚度，x_4表示轴承刚度，首先需要对输入变量进行归一化处理，即：

$$x_1 \ \text{-= } 55.00$$

$$x_1 \ \text{/= } 26.24188186156556$$

$$x_2 \ \text{-= } 175.5$$

$$x_2 \ \text{/= } 101.76018632984868$$

$$x_3 \ \text{-= } 450000.00000000006$$

$$x_3 \ \text{/= } 204103.52558995443$$

$$x_4 \ \text{-= } 290000$$

$$x_4 \ \text{/= } 122462.1153539726$$

在归一化处理后，一阶正进动与一阶反进动的多项式表达式如表 2 与表 3 所示。

表 2 一阶正进动多项式响应面的表达式

系数	值	系数	值
1	733.9510728	x_4^1	-0.159718684
x_3^1	18.84781908	x_2^1	-9.227846813
x_1^1	230.5637286	x_4^2	-6.356620804
$x_3^1x_4^1$	1.157798146	x_3^2	-7.189987342
$x_2^1x_4^1$	2.8293146	$x_2^1x_3^1$	0.770081849
x_2^2	-0.51333038	$x_1^1x_4^1$	17.43286741
$x_1^1x_3^1$	0.681639415	$x_1^1x_2^1$	-1.840649611
x_1^2	35.46748625	x_4^3	3.799526198
$x_3^1x_4^2$	-3.836274745	$x_3^2x_4^1$	-1.152441838

x_3^3	0.941375485	$x_2^1x_4^2$	2.362569849
$x_2^1x_3^1x_4^1$	0.908749941	$x_2^1x_3^2$	-3.034651538
$x_2^2x_4^1$	-1.225096479	$x_2^2x_3^1$	-3.04501108
x_2^3	6.36780611	$x_1^1x_4^2$	-7.642004099
$x_1^1x_3^1x_4^1$	-2.156279329	$x_1^1x_3^2$	4.878415183
$x_1^1x_2^1x_4^1$	-2.137052348	$x_1^1x_2^1x_3^1$	0.895947818
$x_1^1x_2^2$	-4.894765593	$x_1^2x_4^1$	8.412772229
$x_1^2x_3^1$	-6.799829351	$x_1^2x_2^1$	-3.453303998
x_1^3	-32.83341703		

表 3 一阶反进动多项式响应面的表达式

系数	值	系数	值
1	673.5868448	x_4^1	-20.4474064
x_3^1	39.34833628	x_2^1	-14.6179798
x_1^1	196.8854479	x_4^2	-5.49715218
$x_3^1x_4^1$	11.65363392	x_3^2	-12.2598107
$x_2^1x_4^1$	4.585369993	$x_2^1x_3^1$	1.979375817
x_2^2	3.770019998	$x_1^1x_4^1$	10.38300853
$x_1^1x_3^1$	8.892423227	$x_1^1x_2^1$	-0.47982516
x_1^2	44.43422235	x_4^3	6.159532957
$x_3^1x_4^2$	-6.20769949	$x_3^2x_4^1$	-0.39622898
x_3^3	0.748934752	$x_2^1x_4^2$	7.443783237
$x_2^1x_3^1x_4^1$	-3.75440284	$x_2^1x_3^2$	-7.99778246
$x_2^2x_4^1$	-1.11973991	$x_2^2x_3^1$	-6.00035707
x_2^3	5.32517939	$x_1^1x_4^2$	-7.75161785
$x_1^1x_3^1x_4^1$	0.894091247	$x_1^1x_3^2$	8.565594884
$x_1^1x_2^1x_4^1$	-1.81322905	$x_1^1x_2^1x_3^1$	-2.38725062
$x_1^1x_2^2$	-3.62875186	$x_1^2x_4^1$	14.14279934
$x_1^2x_3^1$	-9.51747081	$x_1^2x_2^1$	0.921833445
x_1^3	-24.049363		

为了验证结果的准确性，我在离心机模型参数中随机抽取了 10 个不同的样本，对应的输入参数以及得到的临界转速储存在./data/sample_extra_10.txt 文件中，为了评价多项式响应面的拟合效果，我根据仿真得到的实际值与响应面计算得到的估计值，计算其决定系数R^2，表示为

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \tag{1}$$

其中SS_{res}为残差平方和，表示为

$$SS_{res} = \sum_i (y_i - f_i)^2 \tag{2}$$

其中y_i为样本点的实测值，f_i为样本点的预测值。SS_{tot}为总平方和，表示为

$$SS_{tot} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2 \tag{3}$$

根据以上的结果，计算得到一阶正进动的R^2为 0.9927，一阶反进动的R^2为 0.9876 表明此多项式的拟合效果非常理想。该计算过程以及表达式生成算法为 response_caller.py。