

基于 ANSYS 的薄膜干燥器转子系统振动特性分析

ANSYS-based vibration characteristic analysis on rotor system of film dryer

李乃宇 李庆生 陈广宇

LI Nai-yu LI Qing-sheng CHEN Guang-yu
(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

(College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu 211816, China)

摘要:运用 ANSYS 软件对 $A=0.4\text{ m}^2$ 薄膜干燥器转子系统三维模型进行模态分析,提取转子的前 4 阶固有频率和振型,求得相应的临界转速;在模态分析的基础上,用 Full 法对转子进行谐响应振动分析,研究偏心($c=2.5\text{ mm}$)与质量不平衡($m=0.1, 0.2\text{ kg}$)对转子振动的影响,并分析不同轴承刚度对转子系统的固有频率和振动特性的影响。结果表明:偏心、不平衡质量等对转子振动响应影响较大;轴承刚度对转子固有频率和振动特性有一定影响。

关键词:薄膜干燥器;转子系统;振动特性;模态分析;谐响应分析

Abstract: The modal analysis was carried out based on the 3D solid model of the $A=0.4\text{ m}^2$ film dryer rotor by the ANSYS software, the first four orders of system inherent frequencies and vibration forms were initially attained, the critical speeds of main shaft were calculated; The harmonic response analysis was carried out based on the modal analysis of the rotor by the Full method, the influence of the eccentricity($c=2.5\text{ mm}$) and the unbalance mass ($m=0.1, 0.2\text{ kg}$) on the rotor vibration were analyzed, and the bearing stiffness was changed to analyze the inherent frequency and vibration characteristic of the rotor system. the results show that: the eccentricity and the unbalance mass have great influences on the rotor vibration response; the bearing stiffness has a certain effect on the inherent frequency and vibration characteristic of the rotor.

Keywords: film dryer; rotor system; vibration characteristic; model analysis; harmonic response analysis

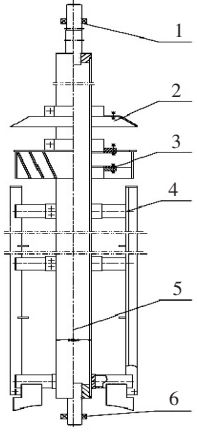
转子式薄膜干燥器(简称薄膜干燥器)是一种连续间接加热、节能高效蒸发器,具有干燥效果好、物料停留时间短、适用物料黏度范围广、操作弹性大等优越性能,在食品、化工、轻工、医药及环保等行业中发展前景较好^[1,2]。

本研究开发了一种适用于含固相溶液干燥的薄膜干燥器转子,其振动特性对设备安全可靠运转起着重要作用。当

转子转速接近临界转速或激振力频率接近结构的固有频率时,设备会产生剧烈的共振现象。同时转子在装配时可能在上、下轴头不对中现象,在偏心力作用下产生弯矩导致转子轴头与轴承偏磨,由于薄膜干燥器的下轴承采用非金属材料制造,偏磨导致下轴承内径尺寸发生变化,加剧了转轴系统的偏心,造成转子上安装的刮板装置对称质量不平衡^[3]。由于转子系统下端转轴不是全位移约束,其动态特性受到下端自润滑轴承刚度影响,而且考虑到研究偏心和不平衡质量影响的准确性,采用三维实体模型对薄膜干燥器的振动特性进行分析,旨在为薄膜干燥器转子正常运转提供理论指导。

1 薄膜干燥器转子系统结构

本研究分析对象是 0.4 m^2 薄膜干燥器的转子系统,该系统主要包括主轴、上下端轴承、刮板装置、物料分布器及捕沫器等部分。上轴端采用联轴器与电机连接在一起,主轴通过上下两个轴承支承,其中上端轴承是滚珠轴承 16009,下端轴承为 CFRP 自润滑轴承。结构简图见图 1。



1. 上端轴承 2. 捕沫器 3. 物料分布器 4. 刮板装置
5. 主轴 6. 下端轴承

图 1 转子系统结构简图

Figure 1 Structure diagram of rotor system

作者简介:李乃宇(1989—),男,南京工业大学在读硕士研究生。
E-mail:linaiyu0908@sina.com

通讯作者:李庆生

收稿日期:2015-01-09

2 转子系统有限元模型建立

2.1 有限元三维模型简化

为了提高模型网格划分质量,便于计算机分析,对复杂的转子系统机构进行适当等效和简化处理,忽略小圆角、螺纹、退刀槽及倒角等对分析结果影响较小的局部结构特征。为达到简化效果并确保结构准确性,将物料分布器、捕沫器复杂部件建成高度、位置不变的等质量块^[4]。薄膜干燥器转子系统三维模型见图 2,主要包括主轴、刮板装置、上下端轴承及若干质量块。

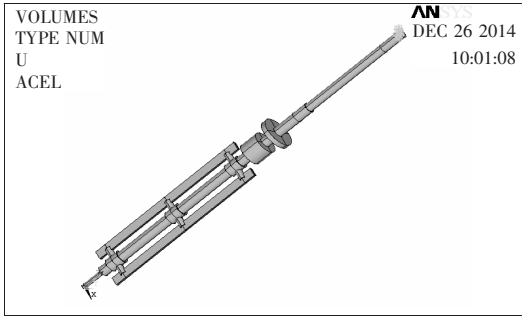


图 2 三维有限元模型

Figure 2 Three-dimensional finite element model

2.2 单元类型选择及材料属性定义

本转子系统模型采用 Combin 14 弹簧单元模拟上下轴承^[5],其他部分采用 Solid 45 单元建立。在建立接近实物的有限元模型基础上,根据实际情况,对各单元的材料属性及单元类型进行定义,各参数详见表 1,其中转子各部件材料均为 0Cr18Ni10Ti,主轴由 Φ 40 mm、 Φ 20 mm 钢棒及 Φ 45×4 mm 钢管三部分焊接而成,其总长 1 730 mm。

表 1 $A=0.4\text{ m}^2$ 薄膜干燥器转子系统的材料参数

Table 1 Material parameters of $A=0.4\text{ m}^2$ film dryer rotor system					
名称	总质量/ kg	弹性模 量/MPa	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	单元类型
转子	34.90	1.93×10^5	7.9×10^3	0.3	Solid 45

2.3 模型网格划分及约束方式

本模型采用自由网格(free)划分方式。简化后系统模型约束方式:主轴上端用联轴器与电机相连施加全位移约束;上轴承外侧施加全约束,内侧约束自由度 $U_z=0$;下轴承滑动固定,外侧施加全约束。划分网格后模型见图 3。

3 转子系统振动特性有限元分析

本研究基于 ANSYS 12.0 分析平台,主要对转子系统进行整体模态分析和不平衡谐响应分析,并研究了支承刚度对系统振动特性的影响。

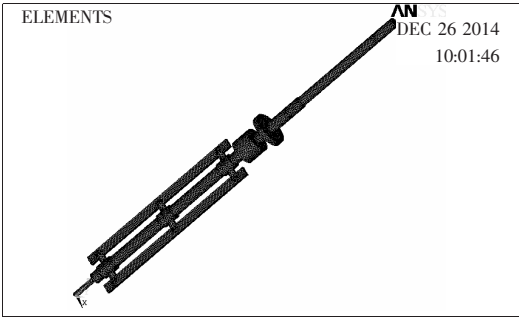


图 3 网格划分模型

Figure 3 Grid partition model

3.1 转子系统模态分析

系统模态分析的作用是确定结构的振动特性,得到其固有频率和各阶振型。ANSYS 12.0 提供多种模态分析方法,本转子系统采用 Qr Damped 模态分析法进行分析求解,该分析法支持模态叠加,具有较高求解效率和准确性。

由于下端只有轴承滑动约束,考虑轴承的弹性对系统固有频率的影响,用弹簧 Combin 14 单元模拟上下端轴承,每个轴承由 4 个均布弹簧单元组成。为了模拟转轴轴承模型实际工作状态,限制主动轴在轴向移动,在放置轴承截面处与弹簧相连的主轴节点(如图 4 的 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 节点)施加轴向约束,弹簧外侧节点(如图 4 的 C_5 、 C_6 、 C_7 、 C_8 节点)施加全约束^[6]。其中上轴承 Combin 14 的轴承刚度系数 K 取 $2\times10^7\text{ N/mm}$,下轴承刚度 K 取 $2\times10^6\text{ N/mm}$ ^[7],忽略阻尼系数影响。

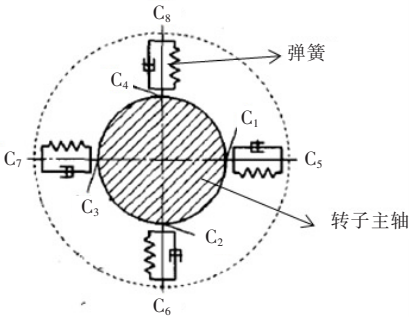


图 4 轴承支撑简图

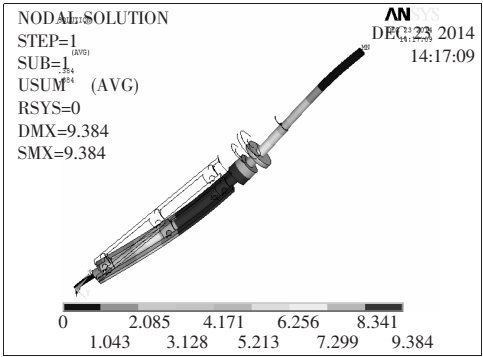
Figure 4 Simplified graphic of shaft bearing

模态分析计算后薄膜干燥器转子系统提取的前 4 阶振型见图 5。转子系统模态分析结果见表 2。

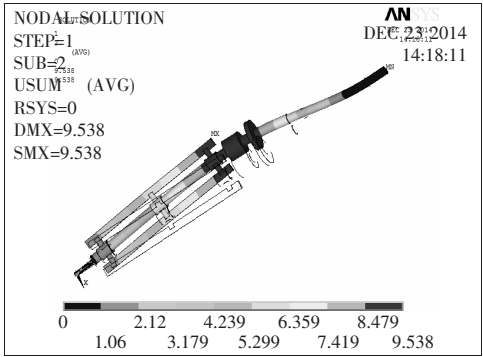
由表 2 可知,本转子系统 1 阶固有频率为 43.31 Hz,则 1 阶临界转速 $n=2\,598.6\text{ r/min}$,而实际设备的转子工作转速为 300~500 r/min,远小于 1 阶临界转速,故不会产生共振现象,可见转子主轴是刚性轴,能够稳定运行。

3.2 转子系统不平衡振动特性分析

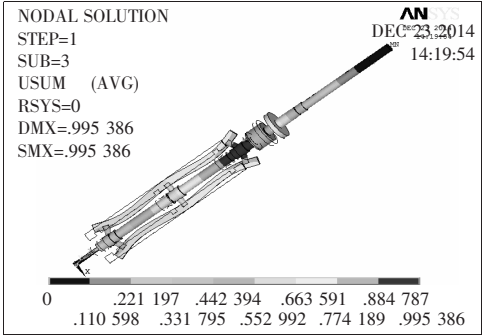
在模态分析基础上使用本模型采用完全法(full)对转子进行谐响应计算,完全法是较为简单和易使用的方法,并且具有较高的效率。通过不平衡谐响应分析,能较好预测这些



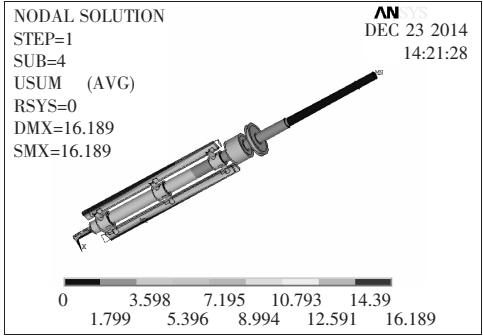
(a) 1 阶振型



(b) 2 阶振型



(c) 3 阶振型



(d) 4 阶振型

图 5 转子系统振型图
Figure 5 Vibration graphic of rotor system

表 2 $A=0.4\text{ m}^2$ 薄膜干燥器转子系统固有频率[†]
Table 2 Inherent frequencies of $A=0.4\text{ m}^2$ film dryer rotor system

模态阶次	模型固有频率/Hz	振型描述
1	43.31	yoz 面一次弯曲
2	55.20	xoz 面二次弯曲
3	98.29	xy 面沿 Z 轴摆动
4	125.03	沿 Z 轴拉伸扭转

[†] 转速 n 与频率 f 转换公式 $f=n/60$ 。

力对转子系统振动特性影响情况。

3.2.1 转子系统在自由和偏心载荷情况下频率—振幅关系比较 薄膜干燥器转子系统在自由载荷时只受重力和驱动力矩影响,驱动力矩大小由传动效率确定,经计算本研究模型在转子上端施加一轴向驱动力矩 $M_1=4.7\times10^4\text{ N}\cdot\text{mm}$ 。在实际情况下,由于大型薄膜干燥器采用多筒身法兰连接结构,转子在加工装配时存在一定尺寸误差,使得轴承上下不对中,产生偏心转动,产生的偏心弯矩对其造成影响。在允许范围内,假定偏心距 $c=2.5\text{ mm}$,则除受重力和驱动弯矩影响,还需在主轴质心处加上横向力,经计算横向力 $f_1=1\text{ N}$ 。对转子系统进行工作范围频率(8.5 Hz 左右)的低频响应分析,两种载荷下谐响应分析结果见图 6。

由图 6 可知,两种载荷下的曲线趋势基本一致,但自由

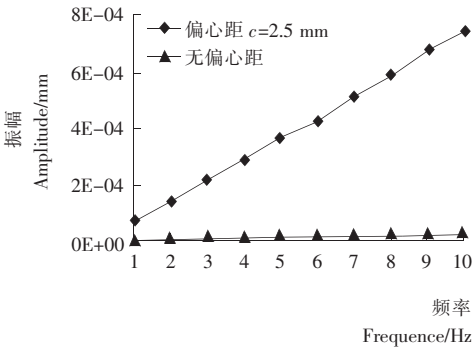


图 6 自由载荷与偏心载荷下振幅与频率关系曲线图
Figure 6 The relation between frequency and amplitude for free load and eccentric load

载荷情况下比偏心载荷作用下的振幅小很多。

3.2.2 转子系统不平衡响应分析 实际工作中,转子系统由于制造误差及偏心等因素影响对下端轴承套造成刮板偏磨,使得设备运转时出现转子质量不平衡。本模型在偏心作用基础上施加偏心质量作用,并忽略质量块的重力作用,偏心质量则会在转子转动过程中产生不平衡力 F , F 可按式(1)计算:

$$F=m\omega^2c$$
 (1)

式中:

c ——偏心距, m;

m ——偏心质量,kg;
 ω ——转动角速度,rad/s。

根据文献[8]可知,不平衡力对转子系统作用相当于轴心处加上两个周期变化的正、余弦简谐力。

由于离心力与 3 个参数呈正相关关系,此处只假设刮板装置同一偏心位置上取 m 为 0.1 kg 或 0.2 kg,偏心距 c 为 0.05 m,转动速度取工作转速 300 r/min,则 $\omega = \frac{n \times 2\pi}{60} = \frac{300 \times 2\pi}{60} = 31.4 \text{ rad/s}$,根据式(1),转子上产生的不平衡力见表 3。

表 3 不同偏心质量下转子系统所受的不平衡力

Table 3 The unbalanced force on the rotor system under different eccentricity quality

偏心质量 m /kg	转子系统所受的离心力 F /N
0.1	4.93
0.2	9.86

在偏心基础上施加偏心质量作用的响应分析结果见图 7。

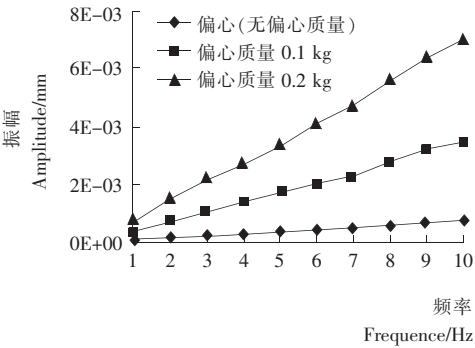


图 7 偏心与偏心质量作用下振幅与频率关系比较曲线图

Figure 7 The relation between frequency and amplitude for eccentric load and eccentric mass

由图 7 可知:在低频范围内,随着频率的增加,各载荷情况下系统振幅随之增加;随着偏心力增加振幅也增加,即在低频范围内振幅与偏心距、偏心质量和转动速度呈正相关。

3.3 轴承刚度对转子系统振动特性影响

下端轴承滑动约束,考虑轴承刚度对转动轴振动特性的影响,改变下轴承弹簧刚度值 K ,取值范围 $2 \times 10^5 \sim 2 \times 10^8 \text{ N/mm}$,以 10 倍递增,忽略阻尼影响,分别进行模态分析,结果见表 4。

由表 4 可知,当弹簧支承刚度逐渐增加时,前 3 阶的固有频率也有所增加,并趋于平衡,但是变化较小,可见轴承刚度对转子系统的固有特性影响不大。

进一步研究轴承刚度对转子系统的振动特性影响。由于低频区振动响应较微弱,为研究支承刚度对系统动态影响,此处谐响应逐步计算到前 2 阶固有频率点处,可明显表

现出振幅变化,取 43.3,56.0 Hz 下转子质心在不同刚度下的振动响应幅值,见表 5。

表 4 不同支承刚度下的转子系统固有频率

Table 4 Inherent frequencies of rotor system under different support stiffness

支承刚度/ (N · mm ⁻¹)	转子系统固有频率/Hz		
	1 阶	2 阶	3 阶
2×10 ⁵	43.22	55.16	98.25
2×10 ⁶	43.31	55.20	98.29
2×10 ⁷	43.33	55.22	98.30
2×10 ⁸	44.33	55.22	98.31

表 5 $F=0.4 \text{ m}^2$ 薄膜干燥器转子系统不同支承刚度下的共振幅值

Table 5 Amplitude values of $F=0.4 \text{ m}^2$ film dryer rotor system under different support stiffness

支承刚度/ (N · mm ⁻¹)	共振幅值/ μm	
	43.3 Hz	56.0 Hz
2×10 ⁵	0.061	1.04
2×10 ⁶	0.070	1.12
2×10 ⁷	0.072	1.16
2×10 ⁸	0.072	1.17

由表 5 可知,下端轴承刚度越大,转轴振幅越大,系统抗振能力变弱。在轴承刚度较小时,随着刚度变化幅值变化较大,当支承刚度越来越大,振幅变化趋于稳定。

4 结论

(1) 通过对薄膜干燥器转子系统进行模态分析,得出转子工作转速在 1 阶临界转速之下,是刚性轴,实际操作时不会产生共振现象,转子系统能够稳定工作,且本试验设备开车后转子运转正常,结果具有一定可靠性。

(2) 偏心尺寸和偏心质量都会对转轴系统的振幅有较大影响。偏心会加剧振动;随着不平衡质量增加,转子振幅增大。

(3) 一定刚度范围内,随着支承刚度值增加,转子固有频率有所增加,转子振幅增加。但随着轴承刚度增大,两者都趋于平稳。本研究开发的 $F=0.4 \text{ m}^2$ 薄膜干燥器由于规格较小,转子总尺寸较短,整体刚度较大,轴承刚度影响较小。对于实际生产的大型薄膜干燥器,转子就会变成一个细长结构,刚性减弱,轴承刚度与质量分布变化将会对转子结构固有模态产生较大影响。本研究可为大型薄膜干燥器转子结构开展振动分析提供参考。

参考文献

1 董金善,李庆生. 旋转薄膜蒸发器的应用[J]. 化工机械,1997(6): 337~340.

V_C 及 BHT 对参照探究油茶叶黄酮提取物对该自由基的清除效果。由图 4 可知,3 种物质都具有一定的·OH 清除能力,随着浓度的增加,·OH 清除率增加,当浓度达到某一值后清除率趋于稳定。各个浓度提取样品的·OH 清除率都比 BHT 高,与 V_C 相当。由 Excel 拟合出油茶叶黄酮浓度与·OH 清除率的回归拟合方程为 $y=0.122x(R^2=0.944)$,将 $y=50$ 代入该方程,求得半数自由基清除值(IC₅₀)为 410.00 μg/mL。

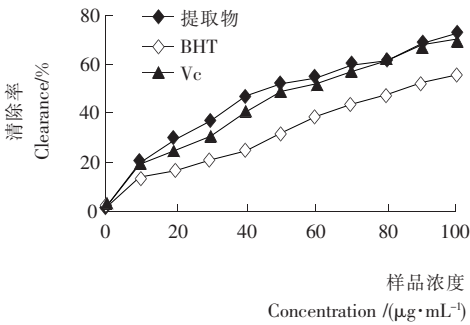


图 4 不同浓度提取物、BHT、V_C 清除羟自由基能力
Figure 4 The Hydroxyl free racial-scavenging capacity of Extract, BHT & V_C in different concentrations

3 结论

本研究优化了油茶叶黄酮的超声提取工艺,其最优工艺条件为:以 50% 乙醇溶液为提取剂,料液比 1 : 20 (m : V),提取温度 70 ℃,超声功率 300 W,提取 2 次,每次 30 min,该条件下总黄酮得率为 47.01 mg RE/g。说明试验采用正交分析法优化油茶叶中总黄酮的提取具有实际可行性,可为油茶叶的综合开发利用提供参考依据。该结果比肖新生等^[11] (4.17%) 和黄陈陈^[6] (46.82 mg RE/g) 的高,原因可能与采收期、粉碎粒径等有关,还需进一步的研究。本试验中采用的微波功率为 300 W,乙醇浓度为 50%,与肖新生等^[11] 的 (450 W 和 60% 乙醇) 相比,节省了能量和有机溶剂,与黄陈陈^[6] 的 (75% 乙醇) 节省了有机溶剂。

体外抗氧化试验表明,油茶叶黄酮有很强的 DPPH·、ABTS⁺ 及·OH 清除活性,IC₅₀ 分别为 15.12, 21.15, 410.00 μg RE/mL。对于其活性的深入研究可以考虑进行动物试验。

随着油茶叶研究的不断深入,多种萃取方法联用,其提取率将大大提高,且节能环保。油茶叶黄酮提取物可以作为新型的天然食品防腐剂加以开发利用,不仅可以减少对环境的污染,还可以提高油茶业的收入。

参考文献

1 张建良,裴爱泳. 油茶叶中油脂抗氧化成分研究[J]. 无锡轻工业学院学报, 1990, 9(3): 37~42.

2 张婷,刘海燕,邹天才. 贵州 8 种野生山茶叶片主要化学成分的含量[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(11): 78~80.

3 陈跃龙,冯宝民,唐玲,等. 油茶叶的化学成分[J]. 沈阳药科大学学报, 2010, 27(4): 292~294.

4 李姣娟,龚建良,周尽花,等. 油茶叶总黄酮的提取及其抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2008, 29(12): 93~96.

5 黄陈陈,丁之恩,杨松,等. 油茶叶黄酮类化合物清除自由基及抑菌作用研究[J]. 粮食与油脂, 2011(12): 12~15.

6 黄陈陈. 油茶叶黄酮、油茶籽多酚的提取分离及部分特性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012.

7 肖新生,周洁,胡绍文. 油茶叶提取物对青提保鲜作用的研究[J]. 湖南农业科学, 2011(1): 94~96.

8 彭凌,朱必凤,刘主. 油茶肉质果和肉质叶提取液降血糖及抗氧化作用的实验研究[J]. 中国药理学通报, 2007, 23(12): 1 679~1 680.

9 朱晓阳,钟海雁,周波,等. 油茶籽多酚超声辅助提取的响应面优化[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 166~170.

10 杜若源,谢晶,王婷,等. 超声波辅助提取银杏叶中总黄酮的工艺优化[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 167~170.

11 肖新生,张敏,袁先友,等. 油茶叶中黄酮类物质的提取及纯化工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2012(4): 93~97.

12 Liu Hai-ying, Qiu Nong-xue, Ding Hui-huang, et al. Polyphenols contents and antioxidant capacity of 68 Chinese herbals suitable for medical or food uses[J]. Food Research International, 2008, 41(4): 363~370.

13 Arnao M B, Cano A, Acosta M. The hydrophilic and lipophilic contribution to total antioxidant activity[J]. Food Chemistry, 2001, 73(2): 239~244.

(上接第 96 页)

2 皮丕辉,杨卓如,马四朋. 刮膜薄膜蒸发器的特点和应用[J]. 现代化工, 2001(3): 41~44.

3 张彦军,翟淑珍. 搅拌薄膜蒸发器在使用中出现的問題及改进措施[J]. 氯碱工业, 2003(6): 21~22.

4 刘雪梅,倪泽浩,李爱平. 基于 ANSYS 的大型异步电机转子系统动态特性分析[J]. 中国工程机械学报, 2013, 11(6): 480~484.

5 Feng Zai-chun, Xiao Zhang-zhang. Rubbing phenomena in rotor-stator contact [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2002 (14): 257~267.

6 Bai Bing, Zhang Li-xiang, Guo Tao, et al. Analysis of dynamic characteristics of the main shaft system in a hydro-turbine based on ANSYS[J]. Procedia Engineering, 2012(31): 654~658.

7 钟一谔,何衍宗,王正,等. 转子动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.

8 杨玉强,贺小华. 薄膜蒸发器转子模态分析及系统稳态不平衡响应研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(1): 107~109.