

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.01.004

# 高剪切均质机转子齿变形的可靠性研究

浦广益<sup>1</sup>, 钱善华<sup>1</sup>, 崔政伟<sup>2</sup>

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;  
2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:**目前高剪切均质机转子系统转速有不断提高的趋势,这对均质设备工作的可靠性提出了新的挑战。课题组以转子系统为研究对象,提出了高速转子齿径向位移的数学力学模型,在此基础上结合机械结构可靠性设计理论,以均质机转子的工作转速、齿全高、底厚和齿厚为变量,导出了转子最外层齿顶径向位移变形的可靠度计算函数。实例分析结合有限元计算结果表明该位移可靠度公式是正确的,实践也验证了该型号的高剪切均质机具有良好的工作可靠性。所得结论同时也为新型高剪切均质设备转子的设计与优化提供一定的参考依据。

**关键词:**高剪切均质机;转子系统;可靠性;变形

中图分类号:TQ051.7;TH123.3 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)01-0018-04

## Analysis of Deformation and Reliability of Rotors of High-Shear Homogenizer

PU Guangyi<sup>1</sup>, QIAN Shanhua<sup>1</sup>, CUI Zhengwei<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** In view of the trend of increasing rotational speed of rotor system in high-shear homogenizer, it poses a new challenge to the reliability of the equipment. The rotator system of the high-shear homogenizer based on its mechanical characters was studied. Taking the rotor system as the research object, a mathematical mechanical model of radial displacement of high-speed rotor tooth was proposed. Based on the reliability design theory of mechanical structure, the reliability calculation function of radial displacement and deformation of the outermost layer of the rotor was established by taking the rotational speed, tooth height, the thickness of plate and tooth thickness of the rotor of the homogenizer as variables. The example analysis and finite element calculation results show that the displacement reliability formula is correct. Practice also proved that this model of high-shear homogenizer has good reliability performance. The results also provide some reference for the design & optimization of the new high-shear homogenizer's rotor.

**Keywords:** high-shear homogenizer; rotator system; reliability; deformation

高剪切均质机在现代食品加工、农产品加工、生化、纺织浆料及纳米材料等行业的应用越来越广泛,其中定-转子结构的均质头系统是该设备的关键部件。当转子在高速旋转状态时,位于定-转子之间的流体中会产生非常大的速度梯度,从而产生极强的剪切应力,这可以将流体中的物料直接剪碎和搅匀,且能将物料

粉碎至 $2\ \mu\text{m}$ 以下。高剪切均质机具有连续化在线生产、运转平稳和生产效率高的特点,所以具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。现代工业对物料的均质要求越来越高,故造成目前均质头系统的转速有不断升高的趋势,这对均质头转子系统的设计、制造等都提出了新的挑战。转子齿在高速旋转状况下必然会发生变形,变形量若

收稿日期:2019-06-27;修回日期:2019-11-10

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSRP51634B)。

第一作者简介:浦广益(1972),男,江苏无锡人,硕士,讲师,主要从事生化与食品机械的结构分析与优化设计研究。E-mail: puguangyi@163.com

大于设计时定-转子之间的间隙,就会与定子发生碰撞,所以对转子上齿的变形进行可靠性分析具有一定的意义。文献[4]虽然也曾对均质机转子齿顶的变形进行了分析,但该文献仅考虑了转子材料的弹性模量  $E$  与转子半径  $R$  的影响。然而,由钢结构材料的力学特性可知:不同型号钢材的弹性模量  $E$  实际相差都不大。因此课题组以转子底厚  $t$ 、角速度  $\omega$ 、齿全高  $h$  及齿厚  $\delta$  共 4 个参数为变量,结合文献[5-7]导出了目前工程中最常见的 3 层齿结构的最外层齿顶的径向位移和变形的可靠性计算函数,最后结合实例进行可靠性分析验证。

### 1 高剪切均质机转子的数理模型

高剪切均质机的工作原理如图 1 所示。高速旋转状态的转子(又称均质头)与定子组成的间隙中,会产生非常大的速度梯度,从而在物料流体中产生极大的液力剪切应力,同时还伴随着离心挤压、高频机械动能撞击和湍流等综合作用,使不相溶的固相、液相和气相在相应成熟工艺和适量添加剂的共同作用下,瞬间均匀精细地粉碎且呈均质分布,再经过高频的循环往复,最终得到稳定的高品质产品<sup>[8]</sup>。

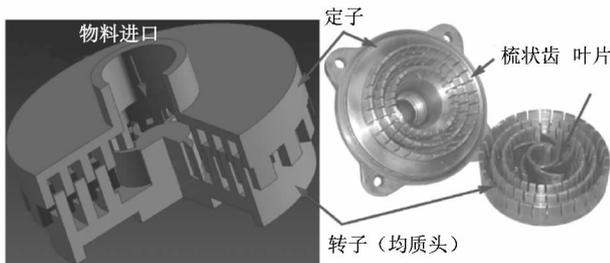


图 1 定-转子均质头的工作原理图

Figure 1 Stator-rotor structure of homogeneous head working schematic diagram

转子的基本结构如图 2 所示,在不同直径的圆周上排列着 3 层齿。其中位于最外层(第 3 层)齿顶点处的径向位移,是整个转子上的最大径向位移,由文献[7]第 33 页可知,该位移主要由:

1) 3 层齿所受到的离心力,向底盘中面简化时得到的均布力矩  $m_1, m_2$  和  $m_3$  引起的底盘弯曲而产生的牵连位移;

2) 最外层齿 3 本身在旋转惯性力(离心力)作用下,弯曲变形的挠度。

最外层的齿顶径向位移:

$$u_a = \Psi_3 \left( h + \frac{t}{2} \right) + f_3. \quad (1)$$

在受到均布离心载荷,当集度  $q_i = \rho s_i \delta \omega^2 R_i$  时,挠

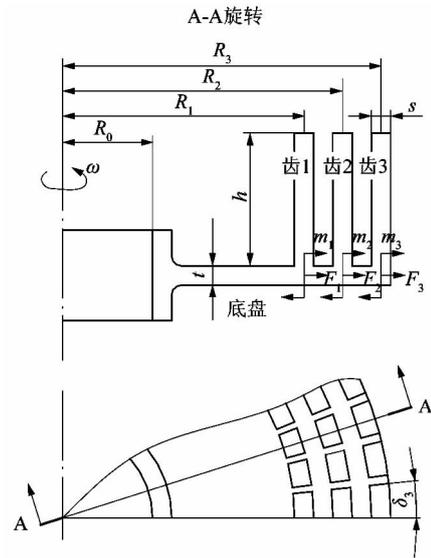


图 2 转子结构

Figure 2 Structure of rotator

度公式为:

$$f_3 = \frac{3\omega^2 \rho R_3 h^4}{2E\delta^2}. \quad (2)$$

式中:  $f_3$  为最外层齿 3 弯曲变形的挠度,  $h$  为齿全高,  $t$  为底厚,  $\delta$  为齿厚,  $\rho$  为密度,  $E$  为弹性模量;  $\Psi_3$  为齿 3 根部的转角,其值为  $\Psi_3 = \sum_{i=1}^3 \Psi_{3i}$ ;  $\Psi_{3i}$  是第  $i$  层齿的力矩  $m_i$  引起的齿 3 根部转角。其中  $m_i = \frac{q_i h (h + t)}{2(s_i + c)}$ ,  $c$  为齿槽宽,则:

$$\Psi_{3i} = \frac{1}{2} \left( \frac{d\omega}{dr} \right)_i \left( b \frac{R_3}{R_i} + a \frac{R_i}{R_3} \right) + \frac{1}{2K} (M_{ri}^- + m_i) R_i \cdot \left( -\frac{R_3}{R_i} + \frac{R_i}{R_3} \right). \quad (3)$$

式中:  $a = 1 + \mu$ ;  $b = 1 - \mu$ ;  $\mu$  是泊松比;  $K$  为底盘的弯曲刚度;  $s_i$  为平均齿宽;  $\left( \frac{d\omega}{dr} \right)_i$  为  $m_i$  引起的齿根部底盘的转角,  $\left( \frac{d\omega}{dr} \right)_i = \frac{P_i}{K} M_{0i}$ ,  $M_{0i} = m_i Q_i$ ;  $M_{ri}^-$  是  $m_i$  引起的齿根  $i$  部左侧的底盘中弯矩,  $M_{ri}^- = Z_i M_{0i}$ 。

其中:

$$K = Et^3 / [12(1 - \mu^2)]; \quad (4)$$

$$P_i = \frac{1}{2} R_0^2 \left( -\frac{R_i}{R_0} + \frac{R_0}{R_i} \right); \quad (5)$$

$$Z_i = \frac{1}{2} \left( a + b \frac{R_0^2}{R_i^2} \right); \quad (6)$$

$$Q_i = \left\{ -2 \left[ a + b \frac{R_i^2}{R_3^2} \right] \right\} \sqrt{\left[ a + b \frac{R_0^2}{R_i^2} \right] \left[ a + b \frac{R_i^2}{R_3^2} \right]} +$$

$$ab \left( 1 - \frac{R_0^2}{R_3^2} \right) \left( 1 - \frac{R_i^2}{R_3^2} \right) \quad (7)$$

## 2 最外层齿顶最大径向位移的可靠性计算

课题组考虑了转子底厚  $t$ 、角速度  $\omega$ 、齿全高  $h$  及齿厚  $\delta$  这 4 个参数对最外层齿顶最大径向位移的影响。故式(1)可以表达为:

$$u(t, h, \omega, \delta) = u_a = \Psi_3 \left( h + \frac{t}{2} \right) + f_3 \quad (8)$$

式中:  $\omega$  为角速度,  $\omega = \pi n / 30$  rad/s;  $n$  为转速, r/min。

假设参数  $h, \omega, \delta$  及  $t$  均服从高斯分布即正态分布, 各参数可以如下表达:

$$h \sim (\bar{h}, \sigma_h^2), \omega \sim (\bar{\omega}, \sigma_\omega^2), \delta \sim (\bar{\delta}, \sigma_\delta^2), t \sim (\bar{t}, \sigma_t^2)。$$

则最外层齿顶的径向位移  $u(t, h, \omega, \delta)$  的均值  $\bar{u}$  为

$$\bar{u} = \bar{u}(\bar{t}, \bar{h}, \bar{\omega}, \bar{\delta}) = \bar{\Psi}_3 \left( \bar{h} + \frac{\bar{t}}{2} \right) + \bar{f}_3 \quad (9)$$

标准差  $\sigma_u^2$  由参考文献[9]得:

$$\begin{aligned} \sigma_u^2 = & \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 \sigma_t^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial h} \right)^2 \sigma_h^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial \omega} \right)^2 \sigma_\omega^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial \delta} \right)^2 \sigma_\delta^2 = \\ & \left( \frac{\partial \Psi_3}{\partial t} \left( h + t/2 \right) + \frac{\Psi_3}{2} + \frac{df_3}{dt} \right)^2 \sigma_t^2 + \left( \frac{\partial \Psi_3}{\partial h} \left( h + t/2 \right) + \Psi_3 + \right. \\ & \left. \frac{df_3}{dh} \right)^2 \sigma_h^2 + \left( \frac{\partial \Psi_3}{\partial \omega} \left( h + t/2 \right) + \frac{df_3}{d\omega} \right)^2 \sigma_\omega^2 + \left( \frac{\partial \Psi_3}{\partial \delta} \left( h + t/2 \right) + \right. \\ & \left. \frac{df_3}{d\delta} \right)^2 \sigma_\delta^2 \end{aligned} \quad (10)$$

将式(2)~(3)分别对底厚  $t$  求导后得:

$$\frac{df_3}{dt} = 0; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Psi_3}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 \left\{ P_i \left[ \frac{A_i Q_i}{K} - \frac{36(1-\mu^2) M_{r0i}}{Et^4} \right] X_i + \frac{1}{2} \left[ \frac{A_i}{K} (Z_i Q_i + 1) - \frac{36(1-\mu^2)}{Et^4} (M_{ri}^- + m_i) \right] \right\} \quad (12)$$

$$\text{其中: } A_i = \frac{\omega^2 \rho s_i R_i h \delta}{2(s_i + c)}; X_i = \frac{1}{2} \left( b \frac{R_3}{R_i} + a \frac{R_i}{R_3} \right)。$$

同理将式(2)~(3)分别对齿高  $h$ 、角速度  $\omega$  和齿厚  $\delta$  求导后有:

$$\frac{\partial \Psi_3}{\partial h} = \sum_{i=1}^3 \left\{ P_i Q_i X_i B_i + \frac{B_i (Z_i Q_i + 1)}{2K} \right\}; \quad (13)$$

$$\text{其中: } B_i = \frac{\omega^2 \rho s_i R_i \delta}{2(s_i + c)} (2h + t);$$

$$\frac{df_3}{dh} = \frac{6\omega^2 \rho R_3 h^3}{E\delta^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \Psi_3}{\partial \omega} = \sum_{i=1}^3 \left\{ \frac{Q_i X_i G_i}{K} + \frac{G_i (Z_i Q_i + 1)}{2K} \right\}; \quad (15)$$

$$\text{其中: } G_i = \frac{\omega h \rho s_i R_i \delta}{s_i + c} (h + t);$$

$$\frac{df_3}{d\omega} = \frac{3\rho R_3 \omega h^4}{E\delta^2} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \Psi_3}{\partial \delta} = \sum_{i=1}^3 \left\{ \frac{Q_i X_i P_i L_i}{K} + \frac{L_i (Z_i Q_i + 1)}{2K} \right\}; \quad (17)$$

$$\text{其中: } L_i = \frac{\omega^2 h \rho s_i R_i}{2(s_i + c)} (h + t);$$

$$\frac{df_3}{d\delta} = -\frac{9\rho R_3 \omega^2 h^4}{2E\delta^3} \quad (18)$$

将式(11)~(18)代入式(9)和式(10), 即得到了齿顶径向位移的均值  $\bar{u}$  和标准差  $\sigma_u^2$ 。

设定-转子间的间隙为  $\Delta$ ,  $\Delta$  通常亦服从正态分布规律, 记作  $\Delta \sim (\bar{\Delta}, \sigma_\Delta^2)$ , 则定-转子要正常工作, 齿顶变形必需满足  $u \leq \Delta$ , 其联结方程  $Z$  为<sup>[10]72</sup>:

$$Z = \frac{\Delta - u}{\sqrt{\sigma_\Delta^2 + \sigma_u^2}} \quad (19)$$

则在最大齿顶变形下, 设备正常工作的可靠度  $R$  为:<sup>[10]76</sup>

$$R = \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-\frac{1}{2}z^2} dz = \Phi \left( \frac{\Delta - u}{\sqrt{\sigma_\Delta^2 + \sigma_u^2}} \right) \quad (20)$$

故最终只要将相应的参数代入式(20), 就能求得所设计的均质机能正常工作的可靠度值。

## 3 可靠性分析实例

已知一个用于豆乳均质的高剪切均质机的转子, 其周向排列 3 层齿, 已知  $R_0 = 20$  mm,  $R_1 = 58$  mm,  $R_2 = 79$  mm,  $R_3 = 100$  mm。正常工作时转速为  $n = 3000$  r/min, 即角速度为 314 rad/s。已知角速度  $\omega \sim (\bar{\omega}, \sigma_\omega^2)$ , 其中  $\bar{\omega} = 314$  rad/s,  $\sigma_\omega^2 = 20^2$ ; 齿高  $h = (35 \pm 0.15)$  mm; 则由参考文献[10]第 77 页可知  $h \sim (35, 0.1^2)$ 。同理, 已知底厚  $t = (10 \pm 0.2)$  mm, 则  $t \sim (10, (0.4/3)^2)$ 。另外齿厚  $\delta = (10 \pm 0.1)$  mm, 则  $\delta \sim (10, (0.2/3)^2)$ 。材料的弹性模量 200 GPa, 密度为 7 850 kg/m<sup>3</sup>。设计要求此均质机装置正常工作时的可靠性在 0.99 以上, 则只要将上面各参数代入式(8), 即得出最外层齿顶位移  $u = 0.194$  mm。用同样的参数和边界条件对转子进行有限元分析<sup>[11]</sup>, 得到的最外层齿顶位移为 0.198 mm, 二者结果相差 2.06%, 这说明式(9)的计算方法是可行的。转子变形云图如图 3 所示。

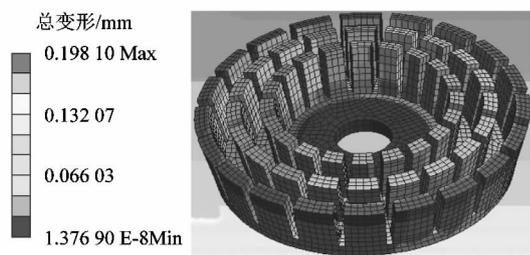


图3 转子变形云图

Figure 3 Deformation of rotator

定-转子之间的间隙 $\Delta$ 不仅与齿顶径向位移相关,还与定-转零部件的几何尺寸、形位公差和装配精度相关,由零部件图纸要求,可以得到 $\Delta \sim (0.45, 0.065^2)$ 。再将以上各参数代入式(10),即可得出 $\sigma_u^2 = 0.05122$ ,亦即 $u \sim (0.19, 0.041^2)$ 。将此参数代入式(20),即可以得到设备正常工作时实际间隙大于0时的可靠度 $R = \Phi(3.19) = 0.99929$ ,满足此产品设计的可靠性在0.99以上技术要求。最终高剪切均质机设备如图4所示,工程实践已经证明,此均质机设备具有良好的工作可靠性能。

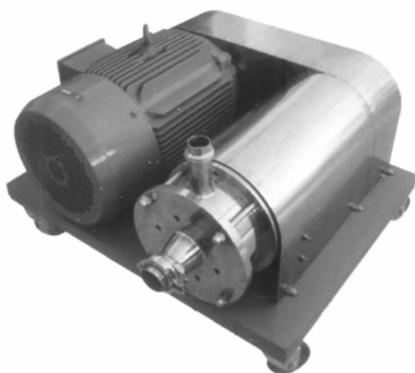


图4 最终的高剪切均质机设备

Figure 4 Final high-shear homogenization equipment

#### 4 结语

高剪切均质技术在现代工业领域中有着极为广泛的应用,因此对产品均质和转子系统高工作转速的要求不断提高。在追求高生产效率、高品质的今天,既要提高生产效率、保证产品质量,又要确保设备安全、可靠地工作,这是需要设计人员重点考虑的。课题组就目前工程上最典型的3层齿结构的动转子,以转子的工作角速度、齿全高、底厚和齿厚4个为参数为变量,

给出了最外层齿(第3层齿)顶径向位移可靠性的公式,有限元计算结果及工程实践均证明了位移可靠性公式的正确性。

课题组主要只是考虑了齿变形的可靠性,在此基础上,以后还可以:

1) 进一步引入强度问题,再综合地讨论其工作可靠性问题;

2) 基于力学性能研究高剪切均质设备转子系统的动力学问题和多目标优化设计;

3) 对于流-固同步耦合多物理场问题,分析与计算齿变形与强度。

同样本研究成果,对以后进一步研究提供了一定的参考依据。

#### 参考文献:

- [1] PUGLIA C, OFFERTA A, RIZZA L, et al. Optimization of curcumin loaded lipid Nanoparticles formulated using High Shear Homogenization ( HSH ) and Ultrasonication ( US ) methods [ J ]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2013, 13 ( 10 ): 6888 - 6893. DOI: 10.1166/jnn.2013.7766.
- [2] FARZI M, YARMAND M S, SAFARI M, et al. Gum tragacanth dispersions: particle size and rheological properties affected by high-shear homogenization [ J ]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 79: 433 - 439. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2015.04.037.
- [3] PEREIRA E A, PETRUCI J F S, CARDOSO A A. Determination of nitrite and nitrate in brazilian meats using high shear homogenization [ J ]. Food Analytical Methods, 2012, 5 ( 4 ): 637 - 642. DOI: 10.1007/s12161-011-9294-1.
- [4] 许其峰,浦广益,张愉恩,等.剪切均质设备高速转子的变形与可靠性分析[J].江南大学学报(自然科学版),2006,5(6):25-29.
- [5] 范本隽.多圆齿高速转子按力学性能优化结构参数[J].机械设计,2003,20(10):60-61.
- [6] 许其峰.高剪切均质机关键结构可靠性分析与研究[D].无锡:江南大学,2006:9-12.
- [7] 范本隽,张志森.解析法计算高剪切均质机转子的变形[J].力学与实践,2002,24(3):32-34.
- [8] 浦广益,宋广雷,张裕中.高剪切均质机内部三维流场分析[J].轻工机械,2010,28(1):28-31.
- [9] 刘混举.机械可靠性设计[M].北京:科学出版社,2016:113-117.
- [10] 孙志礼,陈良玉.实用机械可靠性设计理论与方法[M].北京:科学出版社,2003:26-30.
- [11] ALAWADHI E M. Finite element simulations using ANSYS [ M ]. 2nd ed. Boca Raton, FL. :CRC Press,2013:125-132.