

The Effect of an Annular Fluid on the Vibrations of a Canned Motor Pump's Rotor

Fang Liu^{1,2}, Yanpeng Bu¹, Peng Wu^{1,2}, Xufeng Wang^{1,2}, Genfang Yu^{1,2}

¹Zhefu Holding Group Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²Zhejiang Fuchanjiang Hydropower Equipment Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Email: 18258206735@163.com

Received: May 28th, 2019; accepted: Jun. 11th, 2019; published: Jun. 18th, 2019

Abstract

In the canned motor pump, fluid is contained in the thin annular regions between the rotor and stator in locations such as the can annulus and in seals. When relative motion takes place between rotor and stator, the constrained motion of the fluid can give rise to significant interaction effects. In a paper authored by R. J. Fritz, the effects of an annular fluid on the vibrations of a long rotor are investigated. The hydraulic mass term m_H as defined in Fritz's equations, is based on the assumption that the annular region is sufficiently long that end leakage effects are negligible. For this case, the length L is simply the actual length of fluid annulus being considered. But the rotor is always finite length; the influence of the length needs to be considered in the formula of m_H . Therefore, the effects of fluid leakage at the end of the annular region can be taken into account by modifying the length L to get the effect length L_{eff} .

Keywords

Canned Motor Pump, Fluid in the Thin Annular Regions, FRITZ, Hydro Mass, Effect Length

屏蔽泵电机定转子环域水对转子振动的影响

刘芳^{1,2}, 卜延鹏¹, 吴鹏^{1,2}, 王旭峰^{1,2}, 於根芳^{1,2}

¹浙富控股集团股份有限公司, 浙江 杭州

²浙江富春江水电设备有限公司, 浙江 杭州

Email: 18258206735@163.com

收稿日期: 2019年5月28日; 录用日期: 2019年6月11日; 发布日期: 2019年6月18日

摘要

在屏蔽泵电机中, 定转子屏蔽套之间存在薄环域水, 当定转子发生相对位移时, 薄环域水的受迫移动时,

文章引用: 刘芳, 卜延鹏, 吴鹏, 王旭峰, 於根芳. 屏蔽泵电机定转子环域水对转子振动的影响[J]. 力学研究, 2019, 8(2): 149-155. DOI: 10.12677/ijm.2019.82017

会对定转子产生非常重要的反作用影响。在R. J. Fritz论文中,研究了环域水对于长轴的影响。但在FRITZ公式中,环域水的水动力质量 m_H 的影响是基于环域长度是无限长的,而忽略了端部泄露量的影响,公式中的 L 简单地认为是环域的长度。但是转子都是有限长度的,公式中需要考虑端部泄露量的影响。所以,在计算环域水的水动力质量时,考虑了端部泄露量,得到环域的有效长度 $L_{有效}$ 。

关键词

屏蔽泵电机, 薄环域水, FRITZ, 水动力质量, 有效长度

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

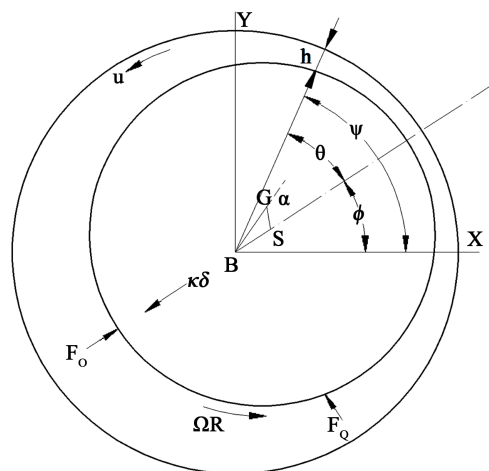
1. 简介

屏蔽泵电机转子浸在水中,定转子环域对转子固有频率的影响是不能忽略的,环域水的振动会引起附加的水体附加质量就是水动力质量,这会降低转子的固有频率。而在工业生产中,能成功的预测转子的固有频率,避开共振点是非常重要的。已有多位学者就环域水对振动的影响提出自己的看法[1] [2] [3]。

在 R. J. FRITZ 的论文[4] [5]中提出了环域水对长转子固有频率的影响($L/R \gg 1$),但当转子长度有限时,FRITZ的论文中是没有考虑的,本文就转子长度 L 与半径 R 长度相当时,提出环域水动力质量的计算方法。

2. FRITZ 基本理论

在分析中,考虑厚度 h 、平均半径 R 、包裹着旋转部件的环域水,环域水被认为是很薄的, $h \ll R$ 。水体流速在环域厚度方向认为是一致的,平均速度为 u ,是随周向角度与时间变化的函数。环域截面详见图 1。



(B、S 为非转动体和转动体的中心; G 为转动体质量中心; $GS = e$; $BG = r$; $BS = \delta$; ϕ 为极坐标系相对最小液膜厚度位置; ψ 为环域某水体位置; θ 为环域某水体相对于最小液膜厚度的位置; Ω 为转动部件角速度)

Figure 1. The section of the annular

图 1. 环域截面

流体连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{R} \frac{\partial hu}{\partial \Psi} = 0 \quad (1)$$

根据动量守恒得到:

$$-\frac{1}{R} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = \frac{\tau_1 - \tau_2}{h} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{R} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) \quad (2)$$

其中: p ——水动力压力

τ_1, τ_2 ——水壁面的剪切应力

ρ ——水体的密度

剪切应力在环域两个壁面的变化为:

$$\frac{\tau_1 - \tau_2}{h} = F_V \rho \left(\frac{C}{h} \right)^{1.217} V \quad (3)$$

$$\frac{\tau_1 - \tau_2}{h} = F_T \rho \left(\frac{C}{h} \right) V \quad (4)$$

其中: V ——由转子偏心产生的速度

F_V 、 F_T 、 F 为阻尼系数

将公式(3)(4)带入公式(2)得:

$$-\frac{1}{R} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = \rho \left(\frac{C}{h} \right)^a FV + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{R} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) \quad (5)$$

如图1所示, 对于小偏角下的厚度 h 与偏心率 ϵ 、间隙 C 的关系为:

$$h = C(1 - \epsilon \cos \theta) \quad (6)$$

角度对应关系:

$$\psi = \theta(\psi, t) + \phi(t) \quad (7)$$

由(6)、(7)求导并带入连续性方程(1)得到:

$$u = \frac{\Omega R}{2} (1 + \epsilon \cos \theta) + R\dot{\epsilon} \sin \theta - R\epsilon \dot{\phi} \cos \theta \quad (8)$$

由于转子的偏心, 得环域的流速为:

$$u = \frac{\Omega R}{2} + V \quad (9)$$

联立方程(9)和(8)得到:

$$V = \frac{\Omega R}{2} \epsilon \cos \theta + R\dot{\epsilon} \sin \theta - R\epsilon \dot{\phi} \cos \theta \quad (10)$$

由公式(7)得到:

$$\partial \psi = \partial \theta (\partial t = 0) \quad (11)$$

将公式(8)、(10)、(11)代入公式(5)得到:

$$-\frac{1}{\rho R} \frac{\partial p}{\partial \theta} = \cos \theta \left(-\Omega R \dot{\epsilon} + 2R \dot{\epsilon} \dot{\phi} + R \epsilon \ddot{\phi} - \frac{\Omega R}{2} \epsilon F + R \epsilon \dot{\phi} F \right) + \sin \theta \left(-\frac{\Omega R}{2} \epsilon \dot{\phi} - R \ddot{\epsilon} + R \epsilon \dot{\phi}^2 + \frac{\Omega^2}{4} R \epsilon - \frac{\Omega}{2} R \epsilon \dot{\phi} - R \dot{\epsilon} F \right) \quad (12)$$

如图 1 所示, 水动力载荷为:

$$F_0 = -\int_0^{2\pi} LRp \cos \theta d\theta \quad (13)$$

$$F_Q = -\int_0^{2\pi} LRp \sin \theta d\theta \quad (14)$$

由(12) (13) (14)得到:

$$-F_0 = m_H C \left(\ddot{\epsilon} - \epsilon \dot{\phi}^2 + \Omega \epsilon \dot{\phi} - \frac{\Omega^2}{4} \epsilon + F \dot{\epsilon} \right)$$

$$-F_Q = m_H C \left(\epsilon \ddot{\phi} + 2\dot{\epsilon} \dot{\phi} - \Omega \dot{\epsilon} - \frac{\Omega}{2} \epsilon F + F \epsilon \dot{\phi} \right)$$

其中: $m_H = \pi \rho R^3 L / C$

所以, 根据 FRITZ 基本公式得到: 当 $h \ll R$ 并且 $L/R \gg 1$, 定转子环域水的水动力质量 $m_H = \pi \rho R^3 L / C$ 。

3. 分析方法

FRITZ 模型简化基于环域水与长转子半径比值远远大于 1, $L/R \gg 1$; 环域被认为是很薄的, $h \ll R$ 。而本文使用的模型对转子的长度没有限制, 但仍针对很薄的环域 $h \ll R$ 。

因为环域的刚度和阻尼对转子第一阶固有频率的影响很小, 本文在不考虑环域刚度和阻尼的条件下, 使用流固耦合分析方法, 得到考虑环域水的水动力质量时, 转子的第一阶固有频率。而后进行转子干模态的分析, 并增加环域水质量单元, 计算得到与流固耦合计算相同的第一阶固有频率, 此时施加的附加质量即为水动力质量。

修改水动力质量的公式为:

$$m_H = \pi \rho R^3 L_{\text{有效}} / C$$

$$\eta = L_{\text{有效}} / L$$

$L_{\text{有效}}$ 为水动力质量的有效长度, η 为有效长度比例。通过计算得到有效长度比例 η 随长径比变化的关系曲线。(长径比为内筒长度与直径的比值)。

4. 有限元分析模型

使用软件 ANSYS17.0, 对模型进行流固耦合和干模态分析计算。模型包括敞口外筒体和封闭的内筒体, 内外筒体间存在环域水。筒体和端部封头厚度都为 50 mm, 外筒体内径与内筒体外径间隙为 1.6 mm, 以内筒体长度和内筒体外半径作为变量, 得到水体动力质量与长径比的关系曲线。

内外筒体使用 20 节点高阶单元 SOLID186。流固耦合计算中, 水体环域部分使用 20 节点 FLUID220 进行模拟, 它是声学高阶单元, 需要定义水体密度、声速; 而在干模态分析中, 水动力质量使用 FLUID38 进行模拟, 它是 ANSYS 专门用于模拟环域水的计算单元, 对于定转子整体模态而言, 此处水体不存在水动力效应, 此处仅为水体的质量 $\pi L \rho (R_2^2 - R_1^2)$ 。此单元用于计算时, 需要定义水体的密度, 以及单元的实常数, 实常数分别有内外径和长度, 此处长度为有效长度, 考虑端部泄露的影响。

在计算时，在 A、B 圆面建立引导点，引导点与地面建立径向轴承，并在 A 圆面引导与地面建立推力轴承；外筒体两端固定。有限元模型见图 2。

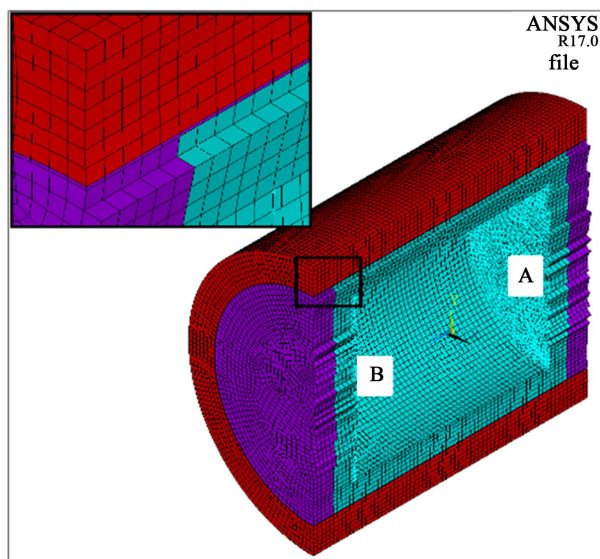


Figure 2. The FEA model
图 2. 有限元模型

分析模型参数如下：

内筒外半径分别为 245.5 mm、295.5 mm，内筒的长度从 280 mm 增加到 980 mm，每个计算模型对应的等效长径比，如表 1 所示。

Table 1. The geometric dimension of the FEA models
表 1. 有限元分析模型的几何尺寸

内筒外径 491 mm		内筒外径 591 mm	
内筒长[mm]	长径比	内筒长[mm]	长径比
280	0.568	280	0.472
380	0.771	380	0.641
480	0.974	480	0.810
580	1.177	580	0.979
680	1.380	680	1.147
780	1.583	780	1.316
880	1.786	880	1.485
980	1.989	980	1.654

5. 分析结果

分析得到，对于薄环域水体， $h \ll R$ ，水动力质量的有效长度仅与环域长径比有关，将有效长度除以环域原长，进行无量纲化处理，得到有效长度比值如表 2 所示。两组有效长度比例与长径比的关系曲线如图 3 所示。

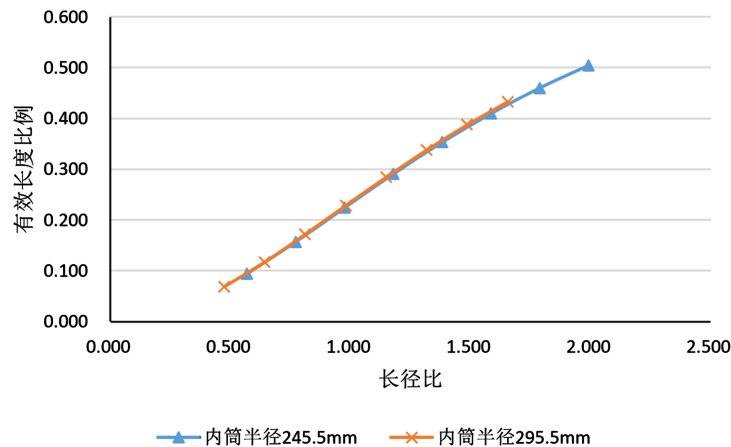


Figure 3. The curved line between the ratio of effective length and the ratio of length to diameter of the annulus
图 3. 有效长度比例与长径比之间的关系曲线

Table 2. The ratio of effective length to the ratio of length to diameter of the annulus
表 2. 有效长度比例随环域长径比的变化

内筒外径 491 mm		内筒外径 591 mm	
长径比	有效长度比例	长径比	有效长度比例
0.568	0.094	0.472	0.069
0.771	0.157	0.641	0.117
0.974	0.224	0.810	0.172
1.177	0.290	0.979	0.229
1.380	0.353	1.147	0.284
1.583	0.409	1.316	0.338
1.786	0.460	1.485	0.387
1.989	0.504	1.654	0.433

由图 3 中得到：曲线为水动力质量有效长度比例与长径比的关系曲线，也就是说不同几何尺寸的内筒半径和长度，只要长径比相同，水动力质量有效长度比例是相同的。

6. 结论

- 1) FRITZ 公式基于环域水长度与转子直径比值远远大于 1 的情况， $L/R \gg 1$ ；这是较理想的状态，在很多实际分析中是不适用的；
- 2) 本文得到的环域水动力质量有效长度比例与长径比的关系曲线仅针对于水体薄环域， $h \ll R$ ，计算中没有考虑环域的阻尼和刚度；
- 3) 本文将两种常规较成熟的计算分析方法的计算结果进行对比，得出环域水动力质量有效长度比与长径比的关系曲线，对考虑水中模态的工程人员有一定借用价值；
- 4) 流固耦合与干模态虽为较成熟的计算方法，但有效长度关系曲线仍需试验进一步验证。

参考文献

- [1] 成德. 大功率屏蔽式核主泵浸没转子系统动力学特性研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2016.

-
- [2] 曲大庄, 金乐, 等. 间隙环流对核电主泵电机转子振动的影响[J]. 动力工程学报, 2015(35): pp.
- [3] 蒋庆磊, 邢桂坤, 吴大转, 等. 离心泵内小间隙环流瞬态流体力计算[J]. 浙江大学学报, 2012, 46(5): 929-934.
- [4] Fritz, R.J. (1970) The Effects of an Annular Fluid on the Vibrations of a Long Rotor, Part 1—Theory. *Journal of Fluids Engineering*, **92**, 923-929. <https://doi.org/10.1115/1.3425165>
- [5] Fritz, R.J. (1966) The Effects of an Annular Fluid on the Vibrations of a Long Rotor, Part 1—Test. *Journal of Fluids Engineering*, **150**, 6-8.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-498X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ijm@hanspub.org