DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2015.02.016

高压多级离心泵口环密封动力学性能研究

郭 嘉,吴 飞,何朝辉

(浙江省机电设计研究院 水泵所,浙江 杭州 310021)

摘要:针对高压多级离心泵口环密封的动力学特性求解问题,提出添加出口压力恢复系数的"有限长"理论求解方法,完善了控制方程组的边界条件,并用"打靶法"对此新边界条件下的口环密封流体控制方程组进行了Matlab编程求解。同时,为使软件脱离Matlab运行环境而独立运行,采用动态链接库的方式将内核计算程序封装,并利用VB实现了界面的设计、数据传输与内核程序的调用。研究结果表明,该程序运行流畅,对口环密封动力学特性计算精度高。

关键词:出口压力恢复系数;打靶法;口环密封;有限长法;动态链接库;混合编程 中图分类号:TH31 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)02-233-04

Dynamic characteristics of annular seals in multi-stage centrifugal pumps

GUO Jia, WU Fei, HE Chao-hui

(Institute of Pumps, Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310021, China)

Abstract: Aiming at the problem of annular seals in multi-stage centrifugal pumps, a theoretical method was proposed, boundary conditions was improved. The control equations with these new boundary conditions were solved with shooting method using Matlab. Meanwhile, VB combined with dynamic linking library (DLL) was used for the software interface design, data transmission and routine call. The results show that the program run smoothly and predicted the dynamic characteristics of the annular seals accurately. Key words: outlet pressure coefficient; shooting method; annular seals; finite-length method; dynamic linking library (DLL);

admixture programming;

0 引 言

高压多级离心泵机组作为流体输送的关键设备 广泛应用于石油、化工、电力和钢铁等行业,如用于高 压锅炉给水,大型化肥工业用液氨泵及甲氨泵等。这 类多级离心泵中,由于实现平衡压力及密封的需要, 大量存在如密封口环、级间密封、平衡鼓及平衡盘等 环形密封,高压多级离心泵环形密封示意图如图1所 示。该类环形密封结构一方面影响泵内的级间泄漏 量从而直接影响离心泵的效率,另一方面在密封间隙 流道内的高压流体在高速转子的作用下,产生了较大 的间隙流体力,对机组的动力学性能及动力学行为具 有明显影响,这一现象在上世纪60年代首先由Lomakin提出,被称为"洛马金效应"^[1]。目前,准确计算由 Lomakin效应产生的口环密封等效动力学性能并预估 考虑该效应的"湿转子"临界转速已成为高压多级离 心泵设计中的重要内容,在API610等国际泵行业标准 中明确均有明确规定。

20世纪60年代,环形密封动力学特性的相关研究 开始逐渐兴起。Black和Jenssen等人^[2-4]针对"短密 封"首次提出了主刚度的数值求解方法,但这一方法 在求解中对流动方程进行了较大简化,在口环轴向长 度与半径之比(简称长径比)大于0.3的口环计算结果 误差较大,适用范围较小。1983年,Childs^[5-6]在Black 研究的基础上,基于Hirs^[7]的整体流动理论补充了"短

收稿日期: 2014-11-04

密封"求解方法并提出了"有限长"求解方法,将口环 的求解范围扩大到长径比小于等于0.6。"有限长"求解 方法考虑了惯性项及入口旋流等因素,求得结果与实 验结果对比较好,在工程设计领域具有广泛的应用。 在随后的十几年间,Childs所领导的美国德州农工大 学涡轮机械实验室^[8-11]继续对离心泵密封口环、平衡 鼓的动力学求解进行了理论模型的完善,试验对比研 究并将"有限长"求解方法应用于锥形及迷宫密封等 多种型式的液体密封中。

本研究对Childs提出的"有限长"方法进行编程改进,在原有收敛条件的基础上增加出口压力恢复项,并采用"打靶法"对高压多级离心泵口环密封内流体控制方程组进行Matlab编程求解,从而求得口环密封的动特性系数。同时,用VB编写程序界面,通过动态链接库的方式将界面与内核算法结合,使计算程序脱离Matlab运行环境,程序计算结果与Childs理论计算结果一致。

1 出口压力恢复系数的添加

1967年,Domm等提出离心泵口环出口位置同样存在压力的不连续,即压力突变的现象。流体即将流出出口面的压力比流体刚流出出口面时要低,即压力的恢复效应,其压力关系可定义为:

$$P(1,\theta,t) + \frac{\rho(1-\xi_{e})}{2}U_{z}^{2}(1,\theta,t) = P_{e}$$
(1)

利用 $p = P/\rho U_{z_0}^2, u_z = U_z/U_{z_0}$ 无量纲换算方程,对以上出口压力恢复式进行统一无量纲化处理,可得:

$$P_{0}(1) - P_{e} = -\frac{(1 - \xi_{e})}{2} u_{z0}^{2}$$
⁽²⁾

对压力分布及轴向速度进行摄动量简化,可表示为:

$$p = p_0 + \varepsilon p_1, u_z = u_{z0} + \varepsilon u_{z1} \tag{3}$$

本研究将以上摄动量代入无量纲处理后的压力 关系式,可得密封口环内压力分布在密封入口及出口 位置的压力边界条件:

 $p_1(0) = -(1 + \xi_i)u_{z1}(0)u_{z0}(0) \tag{4}$

$$p_1(1) = -(1 - \xi_e)u_{z1}(1)u_{z0}(1)$$
(5)

入口压力损失系数与出口压力恢复系数的无量 纲化及摄动法求解对比流程图如图1所示。

2 Matlab 程序的编制

考虑到 Matlab 对矩阵及微分方程求解运算的便 捷性,笔者采用 Matlab 编写环形间隙动特性求解的内 核程序,求解中采用打靶法对"有限长"理论推导出的



图1 入口压力损失系数与出口压力恢复系数添加流程图对比 由周向、轴向动量方程及连续性方程组成的流体一阶 摄动控制方程组进行求解。

由于入口与出口压力分布均与轴向速度有关,本 研究在求解中假设轴向速度为基础变量,将入口与出 口位置压力值用基础变量表示,并采用压力出口大小 为收敛边界条件,设定收敛准则为相邻两时间步长内 三组未知数求解残差小于10⁻⁸。介于收敛入口与出口 位置压力分布均与轴向速度有关,故取:

$$u_{z1} = \gamma_k, u_{\theta 1} = 0, p_1 = k \cdot \gamma_k, k = -\frac{1+\xi}{b}$$
(6)

式中: u_{i1}, u₀₁一轴向及周向速度一阶摄动量; p₁一轴 向压力分布一阶摄动量; b 一仅与口环密封几何参数 与运行工况相关的系数。

同时,设:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\boldsymbol{\gamma}_{k}} \begin{cases} u_{z_{1}} \\ u_{\theta 1} \\ p_{1} \end{cases} = \begin{cases} M_{1} \\ M_{2} \\ M_{3} \end{cases}$$
(7)

则:

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\gamma}_{k}} \left[\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z} \begin{cases} \boldsymbol{u}_{z1} \\ \boldsymbol{u}_{\theta1} \\ \boldsymbol{p}_{1} \end{cases} \right] = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z} \begin{cases} \boldsymbol{M}_{1} \\ \boldsymbol{M}_{2} \\ \boldsymbol{M}_{3} \end{cases}$$
(8)

原方程组各式,对γ_{*}求偏导数,可得:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z} \begin{cases} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{cases} + A \begin{cases} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{cases} = 0$$
(9)

其中:

由以上推导可知,边界条件为 $M_1(0)=1,M_2(0)=0,$
 $M_3(0)=k$ 。

设:

$$p_1(L) + (1 - \xi_e) u_{z1}(1) u_{z0}(1) = F$$
(10)

采用牛顿法对初值进行后续改进加速收敛:

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k + \frac{F(\gamma_k)}{F(\gamma_k)} \tag{11}$$

故原方程组的求解可化为对 γ₄ 初值进行改进,并 验证原边界条件是否满足的迭代求解过程。最终迭 代结束,便得到环形间隙内流体压力沿轴向所在位置 的分布情况:)

(14)

$$p_{1}(z) = \left(\frac{r_{0}}{\varepsilon}\right) \left(f_{3c}(z) + if_{3s}(z)\right)$$
(12)

此时,对环形液体环的动特性系数进行定义并做 相应分析。作用于转子上面的反作用力可表示为:

$$F_{x}(t) = -\varepsilon RL \int_{0}^{1} \int_{0}^{2\pi} p_{1} \cos \theta d\theta dz = -\varepsilon RL \rho V^{2} \int_{0}^{1} \int_{0}^{2\pi} \bar{p}_{1} \cos \theta d\theta dz = -\varepsilon RL \pi \rho V^{2} \int_{0}^{1} \bar{p}_{1c} dz$$

(13)

$$F_{y}(t) = -\varepsilon RL \int_{0}^{12\pi} p_{1} \sin \theta d\theta dz \qquad -\varepsilon RL \rho V^{2} \int_{0}^{12\pi} \bar{p}_{1} \sin \theta d\theta dz = -\varepsilon RL \pi \rho V^{2} \int_{0}^{1} \bar{p}_{1s} dz$$

根据液体环内压力分布情况,对反作用力进行径 向与周向的分解分析,并进行无量纲化处理,如下:

$$-\frac{\lambda F_{r}(\Omega T)}{\pi R \Delta P R_{0}} = \bar{K} + \bar{c} \cdot (\Omega T) - \bar{M} \cdot (\Omega T)^{2} = \frac{2\sigma}{1 + \xi_{i} + 2\sigma} \int_{0}^{1} f_{3c}(z) dz - \frac{\lambda F_{\theta}(\Omega T)}{\pi R \Delta P R_{0}} = \bar{k} - \bar{C} \cdot (\Omega T) - \bar{m} \cdot (\Omega T)^{2} = -\frac{2\sigma}{1 + \xi_{i} + 2\sigma} \int_{0}^{1} f_{3s}(z) dz$$

$$(15)$$

由以上周向与轴向力的分析可知,在任意涡动频 率下,均可通过所求得的轴向与周向无量纲压力分布 函数 f_{3c}(z),f_{3c}(z) 沿轴向积分求得。在求解过程中,6个 动力特性系数组成唯一的一组由两个方程组成的六 元一次方程组。对于某一固定工作转速 N,可取涡动 频率为0,0.5,1.0,1.5,2.0倍的工作转速,组成5组六 元一次方程组,每3组方程可求解出一组动特性系数, 5组方程排列组合共求解10组动特性系数,求其平均 值,并通过Matlab输出其计算结果。

本研究在 Matlab运行环境下输入高压多级离心 泵叶轮口环各几何尺寸、操作工况,介质属性等参数 即可实现其当前工况下动特性系数的自动化求解,包 括主刚度、主阻尼、交叉刚度、交叉阻尼、主附加质量 及交叉附加质量。Matlab环境下简易的输入界面如图 2所示。

● New to MATLAB? Watch this <u>Video</u>, see <u>Derr</u>
 间隙单向直径=1.905E-4
 间隙长度=0.0762*2
 叶轮直径=0.0762*2
 转速=3600
 间隙入口压力=3440000
 间隙出口压力=0
 介质密度=1000
 介质动力粘度=1.295E-3
 是否考虑入口预旋(1_考虑/2_不考虑)1
 .
 图 2 Matlab环境下程序自动化输入界面

3 操作界面与数据传输的实现

Matlab作为一种高性能数值计算软件,提供了强 大的数值分析、矩阵运算等功能,作为该软件的核心 求解程序,编程便捷,计算效率高,但其界面开发能力 较差,与其他后处理软件、功能开发等的兼容性较差, 且不能脱离 Matlab环境运行。相比之下,VisualBasic (VB)在设计开发Windows应用程序方面界面友好,方 便快捷。本研究集成VB和Matlab各自的优点,内核 计算由Matlab独立完成,VB编写程序界面,完成数据 传输及用户交互,极大地提高程序的开发效率,并使 其脱离于Matlab独立运行。

本研究对中间文件传递法、ActiveX 自动化服务技术、DDE技术进行比较,发现以上3种混合编程在调用的过程中比较复杂繁琐,且无法脱离 Matlab 的编译环境,这直接影响了所开发软件的独立运行和发布。为实现脱离 Matlab 运行环境,方便以后程序的推广与用户使用,本次研究采用动态链接库的方式完成数据传输与程序间的调用。

通过 Matlab 调用 C++编译器,将核心计算程序编 译成可供 VB 程序调用的后缀名为 dll 的动态链接库文 件,并将此动态链接库文件在 VB 中进行注册,即可在 VB 编译过程中对此核心程序完成调用,且完全脱离 Matlab运行环境。程序用户操作界面如图 3 所示。



图3 口环计算程序用户交互界面

4 可执行文件的生成与打包

为保证高压多级离心泵动力学分析计算软件在 其他非编译计算机上的安装及计算的正常执行,研究 者需通过VB 6.0将工程文件生成可执行文件,利用软 件Setup Factory 7.0对可执行文件及其相关的窗口文 件、链接库文件、注册文件等进行封装,通过Setup Factory 7.0内部的代码编写实现链接库的自动注册, 最终打包成安装程序,并进行软件授权和安装界面美 化等方面的处理,打包文件列表如图4所示。

本研究目前针对已调试程序进行了简略的打包

			\$2 4m @ ##				-				
		5	Neme	86	不地文绅夫	Size	0 #)	义律委本	载击	Pes-	快速方式
中 法加入年 著 法加入并未到用 第 法加入并未到用 第 法制造经约定计 3、编建文件图指			stdole2.tb	%WindowsFolder%\SysW	C:\Windows\Sys	16,896	14-Jul-2009	6.1.7600	OK		
			5 form1.frm	%App[older%	FOVB/VBenady/ A	25,334	28-May-2		OK		IS1 (Field
			MSSCOPU.SCC	%AppFolder%	EAVB\VBstudy\ct	190	07-Apr-20	1.0.0.0	OK		
			13 ISLese	%AppFolder%	E/\V8\V8study\:	45,056	28-May-2		OK.		
			J T#1.vbp	%AppFolder%	E//VB//VBstudy/d	887	28 May 2		OK		
			□ I €Lvbw	%AppFoider%	E//VE/VEstady/Q	53	28 May 2		OK		
震			canhi0330.ctf	%AppFolder%\2\distrib	E:\VB\VBstady\@	441,604	30-Mar-2		OK		
		118	💁 re-bi0330_1_0.dll	%Appfoider%\25distrib	F/\VB\VBehady\:#	122,880	30-Mar-2		OK		
MRen		11	📄 readme.txt	%AppFolder%\2\distrib	EAVB\VBstudy\;	9,240	30-Mar-2		OK		
NHT R			🖾 zhuce1.bat	%AppFolder%\Z\distrib	E/\V8\V8study\a.	26	30-Mar-2		OK.		zhuce1 (开始
0.0.0.0			🖾 compopts.bat	%AppFolder%\2\distrib\ce	E/\VB\VBstudy\d:	3,212	21 Mar 2		OK		compopts (
100	- 1		matlab.prf	%AppFolder%\2\distrib\cc	E/\VB\VBstady\Q	912	30 Mar 2		OK		
2296		Ш	i matlabprefs.mat	%AppFolder%\2\distrib\ce	E:\VB\VBstady\@	289	02-Mar-2		OK		
. a.:			MATLAR Editor State and	%Appfolder%\7\distrib\re	F/\VB\VBenady\@	4,955	30-Mar-2	OK			
			MLintDefaultSettings.txt	%Apploider%\2\distrib\ce	CAVB\VBstudy(:::::	40	28-Feb-20		OK		
			MLintialurefiles	%AppFolder%\2\distrib\ce	E/\VB\VBstudy\音	0	30-Mar-2		0K		
-		14	publish_configurations.m	%AppFolder%\2\distrib\ce	E/\VB\VBstudy\d:	779	30-Mar-2		OK		
工程主题			run_configurations.m	%AppFolder%\2\distrib\cc	E///B///Bstady/Q	599	30 Mar 2		OK		
- 史後之前			🗟 cart8.db	%AppFolder%\2\distrib\ce	E:\VB\VBstady\@	65,536	27-Mar-2		OK		
- 空想之前			in makies.tet	%Appfolder%\?ydistrib\ce	F/\VB\VBehady\#	432	28-Feb-20		OK		
3 \$\$25			s key3.db	%Appfolder%\2\distrib\ze	CAVB\VBstudy\;	16,384	27-Mar-2		OK		
0	•	1.3	10-H								
		1.1									
7 CDM1											
- 所有40											
4. 进行实装时											



试验,安装过程完整顺畅,软件安装界面如图5所示。 安装完成后,通过单独执行注册程序对动态链接库进 行注册,安装完成后软件能够正常运行。



图5 软件安装界面

5 结束语

本研究在"有限长"理论求解方法的基础上,将口 环密封出口压力恢复系数添加到边界条件中,并利用 "打靶法"对该边界条件下的口环内流体控制方程组 进行了 Matlab编程求解。同时,笔者利用 VB编写程 序界面,实现 Matlab核心计算程序与整体界面间的数 据交互与程序调用,使计算程序脱离 Matlab运行环 境。此外,本研究还对可执行文件及其相关的窗口文 件、链接库文件、注册文件等进行封装,实现了非编译 计算机上的安装及计算的正常执行。

下阶段,本研究将通过补充具有较大长径比的平 衡鼓的计算程序,并尝试实现动态链接库自动注册, 在今后的研究中,通过与更多的试验结果进行对比, 完善口环动特性系数的计算程序。

参考文献(References):

- LOMAKIN A A. Calculating of critical speed and securing of dynamic stability of high pressure pumps with reference to forces arising seal gaps [J]. energomashinostroenic, 1958,4(1):1158-1162.
- BLACK H F. Effects of high-pressure ring seals on pump rotor vibrations[J]. Fluid Engineering Division. 1971, 184 (3):92-100.
- [3] JENSSEN D N. Dynamics of rotors systems embodying high pressure ring seals[D]. Edinburgh: Heriot-Watt University, 1970.
- [4] BLACK H F. Calculation of forced whirling and stability of pump rotor vibrations [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1974,96(3):1076-1081.
- [5] CHILDS D W. Dynamic analysis of turbulent annular seals based on hirs' lubrication equation [J]. ASME Journal of lubrication technology, 1983, 105(3):429-436.
- [6] CHILDS D W. Finite-length solutions for rotordynamic coefficients of turbulent annular seals [J]. Journal of Tribology, 1983, 105(3):437-444.
- [7] HIRS G G. Fundamentals of a bulk flow theory for turbulent lubricant films[D]. Pelft: PhD thesis, Delft University, 1970.
- [8] CHILDS D W. Turbomachinery rotordynamics: phenomena, modeling, and analysis [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 1993.
- [9] CHILDS D W. Dressman J B. Convergent-Tapered Annular Seals: Analysis and Testing for Rotordynamic Coefficients
 [J]. Journal of Tribology. 1985, 107(3): 307-316.
- [10] KIM C H, CHILDS D W. Analysis for rotordynamic coefficients of Helically-Grooved turbulent annular seals [J].
 Journal of tribology, 1987, 109(1):136-143.
- [11] 曹树谦,陈予恕.现代密封转子动力学研究综述[J].工程 力学,2009,26(Ⅱ):68-79.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

郭 嘉,吴 飞,何朝辉. 高压多级离心泵口环密封动力学性能研究[J]. 机电工程,2015,32(2):233-236.

GUO Jia, WU Fei, HE Chao-hui. Dynamic characteristics of annular seals in multi-stage centrifugal pumps[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(2):233-236. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn