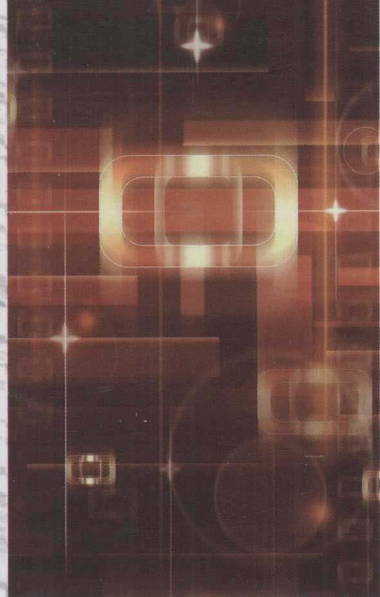




基于现代信号处理技术的 泵与风机故障诊断 原理及其应用

周云龙 李洪伟 著
孙 斌 杨 宁



科学出版社

基于现代信号处理技术的泵 与风机故障诊断原理及其应用

周云龙 李洪伟 孙 斌 杨 宁 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

作者在多年从事泵与风机故障诊断理论和试验研究工作中取得了具有创造性的成果,本书为上述研究成果的总结。

全书共分6章,主要内容包括绪论、泵与风机工作点的解析法、离心泵汽蚀故障诊断研究、离心泵振动故障诊断研究、风机故障诊断研究以及离心泵在线监测及故障诊断系统与风机选型系统的实现。

本书可供流体机械工程、控制理论与控制工程、模式识别与智能系统、检测技术与自动化装置、测试计量技术与仪器、热能工程等相关专业工程人员、工程设计人员阅读,也可作为高等院校相关专业的研究生教材、本科生选修教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于现代信号处理技术的泵与风机故障诊断原理及其应用/周云龙等著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-041927-9

I. ①基… II. ①周… III. ①信号处理-应用-泵-故障诊断 ②信号处理-应用-风机-故障诊断 IV. ①TH307 ②TH407

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第218116号

责任编辑:任加林 / 责任校对:王万红
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年10月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014年10月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:292 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

泵与风机广泛地应用于国民经济的各个领域,如能源动力、化工以及农业等领域,都离不开泵与风机的工作,换句话说,泵与风机是与流体、流动同时存在的,但随着科技发展及现代化工业设备自动化程度的提高,泵与风机的工作逐渐向高速化、连续化、大型化、集中化及自动化方向发展,同样随之而来的还有更加恶劣的及高压的工作环境,使得泵与风机发生故障的几率徒增,一旦出现故障,整个系统会陷入瘫痪,所造成的后果以及经济损失将十分巨大,因此,研究泵与风机的故障诊断技术是十分必要的,是科技和工业发展的重要研究课题之一。

本书作者所领导的课题组在此研究领域承担了各类科研项目6项,包括:吉林省科技厅项目“大型离心泵运行状态在线监测与故障诊断仪研制与开发”(No. 20130206008GX);吉林省教育厅科研项目“基于小波分析和神经网络信息融合的离心泵在线监测与故障诊断”(吉教科合字[2007]第47号);吉林市科技发展计划项目“泵与风机运行状态安全可靠在线监测系统”和“泵与风机运行状态安全可靠在线监测系统”;东北电力集团第一工程公司项目“元宝山电厂三期工程循环冷却水系统水泵间吸水室模拟试验研究”(No. 98220200002001);吉林哈达热电股份有限公司项目“吉林哈达湾电厂除灰泵水击现象计算与分析”(No. 99220200002198)。其中,研究成果“离心泵运行状态在线监测与故障诊断系统及应用”荣获吉林省科技进步三等奖。到目前为止,在泵与风机故障诊断方面发表学术论文25篇,其中EI收录论文6篇,中文核心及重要期刊18篇。申请国家发明专利2项,实用新型专利1项。结合以上项目对泵与风机工作点解析、离心泵气蚀诊断、离心式泵与风机机械故障诊断以及风机选型系统和离心泵在线监测与故障诊断系统的开发等进行了大量研究,并取得了一定的成果。

本书是作者多年来在泵与风机故障诊断技术及应用方面所做的开创性工作的总结,对丰富和发展泵与风机故障诊断技等有重要的理论意义,同

时对指导许多相关设备的安全、稳定和高效运行提供技术指导，因此也具有重要的现实意义。此外，本书也可以作为同行开展此类方面研究工作的参考。

本书作者所领导的课题组的各位同仁和研究生黄娜、赵鹏、洪君、柳长昕、梁超、王锁斌、刘永奇、李红延、郭柯、杨美和侯延栋等对本书付出了辛勤劳动，在此向他们表示衷心感谢！在这个意义上讲，本书也是作者所领导的课题组集体劳动的成果。

本书前言、第1章、第4章、第5章由周云龙教授撰写，第2章由孙斌教授撰写，第3章由李洪伟讲师撰写，第6章由周云龙教授和杨宁硕士共同撰写。全书由周云龙教授统稿。

由于作者水平有限，书中难免存在缺点和不足，恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 泵与风机工作点求解方法研究	1
1.2 离心泵汽蚀故障诊断研究	2
1.2.1 汽蚀故障概述	2
1.2.2 常用汽蚀诊断方法	5
1.2.3 国内外关于汽蚀诊断方法的研究进展及趋势	6
1.3 离心泵机械故障诊断研究	11
1.3.1 离心泵机械故障概述	11
1.3.2 离心泵机械故障诊断常用方法	12
1.3.3 国内外离心泵机械故障诊断研究进展	14
1.4 离心式风机机械故障诊断研究	17
1.4.1 离心式风机机械故障概述	17
1.4.2 离心式风机机械故障诊断常用方法	22
1.4.3 国内外离心式风机机械故障诊断研究进展及趋势	23
参考文献	25
第 2 章 泵与风机工作点的解析法	32
2.1 管路特性曲线及工作点	32
2.1.1 管路特性曲线	32
2.1.2 工作点	32
2.2 泵与风机工作点的数学解法探讨	33
2.2.1 泵与风机的性能特性曲线和管路特性曲线	33
2.2.2 泵与风机在管路中的工作点	34
2.2.3 泵与风机变速时转速和工作点的求解	35
2.3 解析法确定泵与风机串并联运行的工作点	36
2.4 用 Excel 计算阻力系数和泵的工作点	38
2.4.1 单变量求解器介绍	39
2.4.2 泵工作点的确定	39
2.5 本章小结	41
参考文献	41

第 3 章 离心泵汽蚀故障诊断	42
3.1 压力脉动法	42
3.1.1 离心泵汽蚀压力信号的采集	42
3.1.2 自相关分析与短时傅里叶变换	47
3.1.3 基于小波理论的信号去噪	54
3.1.4 基于小波分析的气蚀故障信号特征提取	58
3.1.5 小波包与关联维数分析	59
3.1.6 基于经验模态分解的气蚀故障信号特征提取	65
3.1.7 基于边际谱频带能量法的气蚀故障信号特征提取	71
3.1.8 GA-BP 网络	74
3.1.9 几种方案的比较分析	75
3.2 超声波法	79
3.2.1 实验系统与实验方法	79
3.2.2 超声信号波的自相关与频谱分析	84
3.2.3 汽蚀超声信号的小波奇异性检测	87
3.2.4 基于 HHT 的超声信号分析方法	93
3.3 本章小结	96
参考文献	96
第 4 章 离心泵振动故障诊断	100
4.1 实验数据采集	100
4.1.1 实验系统	100
4.1.2 参数测量及仪表	101
4.1.3 数据采集系统	101
4.1.4 实验步骤	101
4.1.5 实验测得的振动信号及分析	102
4.2 基于第二代小波的故障信号去噪方法	103
4.2.1 去噪问题的描述	104
4.2.2 常用去噪方法	104
4.2.3 新型改进阈值函数的第二代小波去噪	108
4.2.4 Doppler 仿真信号去噪	109
4.2.5 实测故障信号去噪	110
4.2.6 类可分离性评价准则	112
4.3 离心泵振动故障特征提取方法	113
4.3.1 希尔伯特-黄变换 (HHT)	113
4.3.2 复杂度	117

4.3.3 基于连续小波变换的故障特征提取	119
4.3.4 基于提升小波包的特征提取	121
4.3.5 递归定量分析	124
4.4 离心泵振动故障诊断模型	127
4.4.1 RBF 神经网络	127
4.4.2 Elman 神经网络	131
4.4.3 最小二乘法支持向量机	135
4.4.4 相关向量机	140
4.4.5 识别模型的比较	144
4.5 基于 2D-HMM 的离心泵振动故障诊断模型	144
4.5.1 隐 Markov 模型	144
4.5.2 二维隐 Markov 模型	148
4.5.3 2D-HMM 故障诊断原理及步骤	155
4.5.4 2D-HMM 故障诊断实验应用	159
4.6 本章小结	161
参考文献	162
第 5 章 风机振动故障诊断	168
5.1 风机的状态信号采集及其故障模式分析	168
5.1.1 风机的振动信号采集	168
5.1.2 风机故障的来源与典型故障模式分析	172
5.2 振动信号的预处理	175
5.2.1 ICA 的基本理论	175
5.2.2 仿真信号处理	177
5.2.3 风机振动信号处理	179
5.3 振动信号的特征提取	180
5.3.1 时域分析法	181
5.3.2 频域分析法	184
5.3.3 时频分析法	185
5.4 风机的故障诊断与分析	188
5.4.1 k-means 算法在风机振动信号分析中的应用	188
5.4.2 改进的 LVQ 模型在风机故障诊断中的应用	192
5.4.3 小波分析在风机故障诊断中的应用	198
5.4.4 HHT 与 GA-BP 网络联合的故障诊断	204
5.5 本章小结	217
参考文献	218

第 6 章 离心泵在线监测及故障诊断系统与风机选型系统的实现	220
6.1 离心泵在线监测及故障诊断系统	220
6.1.1 在线监测与故障诊断系统硬件组成介绍	220
6.1.2 软件开发	220
6.1.3 诊断系统的应用	228
6.2 风机选型软件系统的研制与开发	230
6.2.1 软件设计思路	230
6.2.2 管道阻力计算	230
6.2.3 风机优化选型	233
6.2.4 软件系统的运用	234
6.3 本章小结	238
参考文献	239

第 1 章 绪 论

泵与风机是将原动机的机械能转换成流体的压力能和动能从而实现流体定向运输的动力设备。输送液体的为泵，运输气体的为风机，液体和气体均属流体，故泵与风机也称为流体机械。

泵与风机广泛地应用在国民经济的各个方面，如农田的灌溉和排涝，采矿工业中井下通风和坑道排水，水力采煤中的液体输送，冶金工业中冶炼炉的鼓风及流体的输送，石油工业中的输油和注水，化学工业中的流体介质输送，城市给排水以及舰艇、航空航天的动力系统等。泵输送的介质除水外，还可输送油、酸液、碱液及液固混合物，以及高温下的液态金属和超低温下的液态气体。由此看出，凡需使流体流动的地方，都离不开泵与风机的工作。

随着科技发展及现代工业设备自动化程度的提高，各设备之间的联系也越来越紧密，高速化、连续化、大型化、集中化及自动化正成为泵发展的方向。泵的结构复杂，工作在高温、高速的恶劣条件下，加之各种随机因素的影响，泵容易发生各种机械故障，使得其功能降低。生产系统中一旦泵出现故障，将会导致连锁反应，严重会造成设备损坏乃至生产系统的瘫痪，无法正常工作，给企业和社会造成巨大经济损失。

风机在发电、化工、采矿等领域属于关键设备。同时，滚动轴承是应用最为广泛，最为重要旋转机械设备部件之一，一般都是长期运行的易损件，因此滚动轴承通常是机械设备中故障高发部件。设备运行过程中，磨损、疲劳、过载和腐蚀等原因都可能使滚动轴承发生局部损伤故障。而当其出现故障时，往往会对生产造成极为不利的影响，轻则造成经济损失，重则造成灾难。因此尽早和及时的探测出离心风机和滚动轴承的故障，及时维修成为避免损失关键。

泵与风机设备故障诊断技术是一门多个学科领域相互渗透和相互促进而形成的一门新兴交叉学科，它不仅包括电子技术、计算机技术、信号处理与模式识别以及人工智能等这些新型的技术学科，同时还包括数学、现代控制理论等传统学科。

1.1 泵与风机工作点求解方法研究

将泵与风机本身的性能曲线与管路特性曲线按同一比例绘在同一张图上，则这两条曲线相交的点即为泵与风机在管路中的工作点。泵与风机工作点的求解，对于了解泵与风机的工作性能，提高泵与风机的工作效率具有重要意义^[1]。

泵与风机工作点求解方法最为经典的是作图法,但是这种方法要通过描点作图,非常麻烦,而且准确性较差。近几年相关研究成果如下:

杨广华等^[2]讨论泵与风机的一般工作点的数学求解方法、变工况工作点求解方法及变工况时变速速比的求解数学模型。该方法和模型对工程设计、运行工况的计算带来便利,并提高了求解的精度。

周传辉等^[3]通过对流体力学中沿程阻力系数和泵与风机工作点等问题的求解,介绍了 Excel 单变量求解器和曲线拟合的方法。

周云龙等^[4]从实际出发,提出了两台同性能泵与风机串并联运行工作点的解析方法,推导出了泵与风机串并联前性能曲线与串并联后性能曲线之间的关系,结果表明:串联后性能曲线方程,只要把串联前泵与风机性能曲线方程中的扬程 H 变为 $H/2$; 并联后性能曲线方程,只要把并联前泵与风机性能曲线方程中流量 Q 变为 $Q/2$, 其他各项不变。

就目前而言,关于泵与风机工作点的研究成果还很少,在很多问题上尚有较大研究空间。

1.2 离心泵汽蚀故障诊断研究

1.2.1 汽蚀故障概述

1. 汽蚀的概念

汽蚀现象是一种常见的水泵故障。当液体压力降低到水温的汽化压力时,因汽化而形成的大量水蒸气气泡,随着汽化的水流入叶轮内部高压区,气泡在高压作用下在极短的时间内破裂,并重新凝结成水,气泡周围的水迅速向破裂气泡的中心集中而产生很大的冲击力。这种冲击力作用在水泵的壁上,就形成了对水泵的破坏作用,称为汽蚀^[5]。汽蚀现象又称空蚀现象、空泡现象,它是水力机械以及某些与液体有关的机器中特有的现象。

2. 汽蚀的产生机理

当液体的温度保持某一数值不变时,如果把液体压力降低到某一临界值(该温度下液体的汽化压力)时,液体中便会产生气泡。这些气泡随着液体向前流动,至某高压处时,气泡周围的高压液体压缩气泡,使气泡急剧缩小以致破裂。在这个过程中,液体介质必然要填充气泡溃灭后的空间而形成高速的微射水流,这种微射水流作用到金属表面,使其产生疲劳破坏,形成汽蚀现象。图 1-1 为金属表面上的气泡消失的过程。由于汽化产生气泡,进入高压区后逐渐增大,最后破裂成小的气泡,引发周围液体高频碰撞而导致金属表面受到破坏。

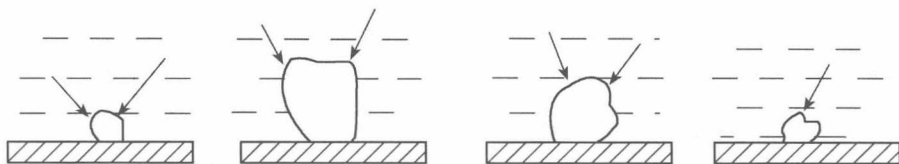


图 1-1 金属表面上的气泡消失过程

人们对汽蚀发生的内在机理进行了很多的研究,许多新的观点和论述不断被提出,其中最具代表性的是由柯乃普提出的“气核理论”^[6]。该理论认为液体中存在着微小的气泡(称为核子),这些核子使液体的抗拉强度降低;当液体的压强低于汽化压强时,这些核子将迅速膨胀形成气泡,从而导致汽蚀发生^[7]。

关于核子存在特性人们还未完全了解,许多专家学者对此提出了各种假设和设想^[6,8]。

一是由美国的 NHenry 于 1947 年提出的模式,即气体核子是液体中固体颗粒或绕流物体表面缝隙中未被溶解的一些气体,而固体表面是疏水性的,使得在缝隙中的气体形成一个凹面的自由面。

二是福克斯等人提出的有机薄膜理论,该理论认为微小气核之所以不会溶解,是因为气核被有机薄膜所包围,这种有机薄膜是在水-气界面上自然而然形成的,它改变了液体的有效表面张力,推迟了蒸发,阻碍着扩散,使微小气核可以持久地悬浮,但有机薄膜究竟是否存在也有待于进一步验证。

以上各种假设或设想,从理论上证明了气核的存在。但是,到目前为止有关汽蚀产生机理的研究还不充分,有待于更深入的研究。

3. 汽蚀的破坏作用

汽蚀的产生会剥蚀水力机械表面材料,从而破坏过流的固体边界^[6]。如果发生在金属壁面上,其结果是金属表面逐渐因疲劳而破坏。金属表面最开始是出现麻点,继而变成蜂窝状,严重时壁面会在短期内被击穿。在出现汽蚀的同时,一般还伴有气泡破裂的噼啪、轰鸣声和振动等。由于还有一部分没有破裂的气泡随水流出水泵,导致泵的流量减少,扬程、效率下降,甚至无法工作^[9]。

4. 汽蚀破坏机理

固体壁面产生空蚀破坏的机理有机械作用、化学腐蚀作用、电化学作用和热作用等,其中较公认的是机械作用为主^[10~12]。

(1) 机械作用

该理论认为,过流壁面上产生的汽蚀破坏作用,是汽蚀气泡在溃灭时产生微

射流和冲击波的冲击作用所致,这种冲击作用强烈。有关计算^[13]表明:汽蚀发生时在物体表面产生的冲击压力可达 140~170MPa,但是作用在壁面上的时间每次只有几微秒。这将直接破坏物体表面而形成蚀坑,较小冲击力的反复作用则引起物体表面疲劳破坏。

(2) 电化学作用

汽蚀气泡溃灭时产生高温高压,在其作用下金属晶粒中形成热电偶,冷热端间存在电位差,这将对金属表面产生电解作用,造成电化学腐蚀。

(3) 化学腐蚀作用

通常情况下,化学腐蚀与机械作用相互作用,造成了固体壁面更严重的剥蚀。

(4) 热力作用

汽蚀气泡溃灭时,其中含有的气体温度很高,高温热气体与物体表面接触时,把物体表面局部加热到熔点,使局部强度降低而破坏。

5. 汽蚀基本方程式

离心泵产生汽蚀的主要原因在于介质的压强降低至汽化压强^[14],由此可知:泵内流体的最低压强与该温度下的汽化压强的大小,是汽蚀产生的先决条件之一。因此,汽蚀余量被引入就是为了衡量泵入口处的总水头与汽化压力水头的大小。汽蚀余量可以分为有效汽蚀余量(NPSH_a)和必需汽蚀余量(NPSH_r)两种^[15]。

1) 有效汽蚀余量:泵入口处单位重量液体具有的超过汽化压头的富裕能量。它与泵进口法兰前吸水管路系统的布置有关,与泵本身无关,因此也称为装置汽蚀余量。当吸入液面在泵基准面以下时,有效汽蚀余量可表达为

$$\text{NPSH}_a = \frac{p_e}{\rho g} - H - h_w - \frac{p_{\text{汽}}}{\rho g} \quad (1-1)$$

当吸入面在泵基准面以上时,有效汽蚀余量为

$$\text{NPSH}_a = \frac{p_e}{\rho g} + H - h_w - \frac{p_{\text{汽}}}{\rho g} \quad (1-2)$$

式中, p_e ——吸入面的绝对压力, Pa;

H ——泵的基准面到吸入面的垂直距离, m;

h_w ——吸入管总的水头损失, m;

$p_{\text{汽}}$ ——当时温度的水汽化压力, Pa。

2) 必需汽蚀余量:在泵的转速和流量一定时,保证泵内不发生汽蚀的必需量,其大小取决于泵本身的设计和制造,与吸入系统装置无关。

$$\text{NPSH}_r = \mu \frac{v^2}{2g} + \lambda \frac{\omega^2}{2g} \quad (1-3)$$

式中, μ ——绝对速度变化及水力损失引起的压降换算系数;

λ ——相对速度变化及绕流叶片头部引起的压降换算系数;

v ——叶轮进口的绝对速度, m/s;

ω ——叶轮进口的相对速度, m/s。

$NPSH_a$ 曲线和 $NPSH_r$ 曲线相交时所对应的流量称为临界流量, 它是汽蚀的界限。当流量小于临界流量时是汽蚀的安全区, 即不会发生汽蚀, 此时 $NPSH_a > NPSH_r$ 。

6. 常见的汽蚀程度衡量方法

汽蚀程度衡量常用以下几种方法^[10]:

- 1) 失体法, 用试验材料在试验前后的体积损失率来衡量。
- 2) 失质法, 用试验材料在试验前后的质量损失率来衡量。
- 3) 时间法, 用单位面积失去单位质量所需的时间来衡量。
- 4) 蚀坑法, 用空蚀后单位时间单位面积的麻点数(即空蚀麻点率)来衡量。
- 5) 面积法, 用受空蚀失去的涂层面积与总涂层面积的比值来衡量。
- 6) 深度法, 用试验材料表面受空蚀破坏的深度来衡量。

7) 同位素法, 在试件上涂上放射性同位素保护层, 通过测定空蚀后水中放射性的大小来衡量。上述各种方法中, 以失质法应用最普遍, 国内外许多重要成果及规律都是基于该法得到的。

泵站中汽蚀非常普遍, 由于汽蚀的存在, 水泵的性能大大降低, 流量减小, 压力损失加大, 能耗增加, 同时叶轮及叶片的使用寿命也大大降低, 严重影响了泵站效益^[16]。因此, 采取针对性措施防止汽蚀一直是水泵研究与应用的重要课题。水泵汽蚀原因涉及设计、制造、运行和管理等各方面因素, 需要各方共同努力^[17]。如提高材料本身的抗汽蚀破坏的能力, 提高水泵设计水平和加工精度, 加强运行管理, 及时维修等。同时需要对水泵叶轮及叶片的形状、尺寸、材质和表面防护技术做更深入地研究, 以提高泵的抗汽蚀能力。

1.2.2 常用汽蚀诊断方法

离心泵汽蚀故障诊断主要有以下几种方法:

1. 流量-扬程法(能量法)

汽蚀发生时, 水泵的扬程、效率和流量会明显降低。通常将离心泵汽蚀特性曲线上扬程下降3%的点作为汽蚀发生的临界点, 并在各行业中得到广泛采用。但在泵的初生汽蚀阶段, 特征曲线变化不是太明显, 而当特征曲线有明显变化时, 汽蚀已经发展到一定程度。也就是, 能量法诊断汽蚀有一定的滞后性, 尤其

对初生汽蚀的诊断有一定的偏差。但是,此方法在工程中使用时十分简洁且易于操作,故目前仍在许多企业中采用^[18]。

2. 振动法

由于泵处于不同汽蚀状态时,引起的泵体振动幅度明显不同,可以通过固定在泵壳或泵轴上的加速度计,得到泵的振动信号。其中振动信号包括:由电机和离心泵等引起的振动,可以视其为背景振动信号;气泡破裂产生的信号,此为汽蚀故障信号。对采集到的信号运用各种分析手段进行后期处理,从而判别泵内是否发生汽蚀^[19]。

3. 噪声法

噪声法的原理与振动法相似,它是将声压传感器放置于合适位置上,以获得气泡破灭时产生的噪声信号,通过对此噪声信号的分析处理,达到对泵汽蚀状况的监测和识别。

4. 压力脉动法

由于汽蚀会造成离心泵泵体内汽-液两相流动,随着汽蚀程度的加深,泵内流道会发生变化,造成流场内压力脉动与正常工作时有明显的不同。因此,可以通过分析泵进口或出口压力脉动信号,得到表征离心泵汽蚀状况的参数。

5. 图像法

借助可视化实验装置和高速摄影仪对汽蚀空泡进行观测,以判断离心泵的汽蚀状况。此方法是最直观较准确的诊断方案,但由于装置对流体介质要求比较严格,且操作比较麻烦,其在应用上有很大的局限性。

1.2.3 国内外关于汽蚀诊断方法的研究进展及趋势

1. 研究进展

国外方面,Harvey认为,当水中含有灰尘之类固体杂质是恐水(非湿润性)的,那么在固体质点的微小隙缝中,就会存在微小的气泡。在液体被气体过饱和的情况下,液体中的气体就会扩散到隙缝内的气泡中去,使气泡逐渐扩大^[20]。当气泡的体积扩大到超过隙缝的容积时,气液交界面就超出隙缝的范围,并在升力或水动力的作用下与固体质点脱离而形成微小的气泡。这种不可溶杂质中所形成的微细气泡就是所谓“汽蚀核子”^[21]。汽蚀核子的尺寸很小,通常只有 $1\sim 40\mu\text{m}$,所以肉

眼是不易观察到的。核子越小,液体能承受的张应力就越大。除了 Harvey 所提出的假设外,还有一些其他的假设,但这些假设虽然有各自不同的观点,却并没有脱离液体中存在不可溶气体这一说法的范畴。

Knapp 进一步用实验,即通过对水进行加压处理,来证实当普通的水经过加压处理去掉其中的汽蚀核子后,水就可以承受更大的张应力,从而使汽蚀在低于汽化压力下发生^[22]。

Csandy^[23]则进一步认为,在高压锅炉给水泵中,汽蚀的影响没有同一台水泵在其他条件都相同的情况下输送冷水时那么严重,因为输送的水是经过锅炉高度加压脱气的。但是,包括 Knapp 在内,只是暂时承认有核子的存在,因为在实验中从未测到过这种核子。直到近代,才用全息照相的光学方法测得了这种核子的存在,发现了直径为 $7\sim 10\mu$ 的核子^[24]。汽蚀的发生取决于液体中汽蚀核子的大小和数量,因此,液体可以在不同的压力下开始断裂,所以不存在使汽蚀发生的明确压力^[25]。

微射流理论为当今大多数人所接受,认为空蚀是由于气泡不对称溃灭产生高压高速微射流,微射流作用于材料表面,使表面产生破坏^[26]。气泡与壁面距离和流速是影响溃灭特性的重要参数,流速直接影响壁面附近气泡的畸变,泡群溃灭压力决定空蚀破坏程度。泡群溃灭时气泡将能量传递至邻近内部已溃灭的气泡,引起能量叠加,因而空蚀破坏性极大。Chahine^[27]和 Huang^[28]的计算结果表明:泡群中气泡数目增加,泡群溃灭更激烈,溃灭压力显著增高。

此外,目前还建立了冲击波等理论,以解释材料空蚀机制。冲击波理论认为气泡溃灭时产生冲击波,空蚀是冲击波作用于表面产生的机械破坏^[29]。另一种理论也是与冲击波有关的理论,认为除了冲击波的机械作用外,还有化学的作用。冲击波引起局部温度的增加,使金属表面氧化,产生的氧化层因其气泡的破裂而被冲刷掉。

Chen 等人^[30]提出了一种新观点,认为空蚀是在空泡形成期间产生的,而空泡溃灭时不产生空蚀。空蚀形貌一般呈海绵状和蜂窝状,有时产生针孔和麻点等。挟沙浑水中空蚀形貌与含沙量等有关,除具有空蚀形貌特征外,一般还伴随有鱼鳞坑^[31]。扫描电镜下有时可观察到疲劳裂纹,空蚀一般被认为是一种疲劳破坏^[32]。裂纹沿晶界萌生、扩展和连接而导致晶粒剥落是空蚀的一种重要失效模式^[33]。

大多数学者认为空蚀主要是机械力的作用,很多试验也证实了这一点。然而,实际上各种机械几乎全在腐蚀程度不同的介质中运转,尤其是各类化工机械和航行于海洋中的舰船。空蚀的成因也可能是液体腐蚀作用占主导地位。实践证明,抗空蚀材料应有良好的抗腐蚀性^[34],航行于海水中的舰船螺旋桨材

料之所以用铜合金等有色金属,而运行于河水中的水轮机等流体机械过流部件以不锈钢等材料为主制造,其中一个重要原因就是由于腐蚀在空蚀中起着重要的作用^[35]。

国内方面,周云龙等^[36,37]通过对不同流量下汽蚀信号的分析,完成对离心泵汽蚀故障的诊断研究。为了使实验数据更加的精确,实验过程中采用变频器改变流量、采用涡轮流量计测量流量。根据入口压力脉动信号的特点,对离心泵汽蚀故障诊断问题进行研究,并运用不同的方法对所采集的信号进行了分析和处理。

周云龙等^[38,39]应用了自相关分析结合短时傅里叶变换、关联维数分析、EMD 能量熵分析、小波多尺度统计特征分析 4 种方法进行了特征提取,并比较了这些方法的局限性及各自的特点,对“应用压力脉动法的离心泵汽蚀故障诊断”进行了初步的探索,其实验分析的结果也对实际的工程应用提供了一定的参考依据。

潘中永^[40]等根据离心泵汽蚀余量的计算公式来分析影响泵汽蚀特性的因素,主要包括泵体设计和叶轮进口设计。假设泵进口来流无预旋,将由流动变量表征的泵汽蚀比转速公式,改写为由几何参数也就是反泵体设计和叶轮进口设计的两个系数以及进口叶片安装角和轮毂比表示的形式,并通过绘制汽蚀比转速的图谱来分析影响泵汽蚀比转速的设计因素。通过图谱发现,获得最高汽蚀比转速对应的最优进口叶片安装角在 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$,叶轮进口处的设计比泵体的设计对泵汽蚀比转速的影响大。另外,根据初生汽蚀比转速的计算公式认为,基本上所有的离心泵都在汽蚀状态下工作。划分了离心泵的容许汽蚀运行区域的边界,即扬程下降 0.5% 时对应的汽蚀比转速曲线。

黄建德等^[41]利用水泵汽蚀试验台和涂漆法对具有不同叶片进口角和叶片进口边位置的 5 种离心泵叶轮进行了系统的汽蚀损伤、汽蚀性能试验。弄清了 3% 扬程下降点汽蚀状态下叶轮形状,流量;运行时间对叶轮内汽蚀损伤的位置和程度的影响以及叶轮形状与汽蚀性能的关系;并结合叶轮内部流动规律和进口回流的发生对测试结果进行了分析。为了防止汽蚀引起扬程下降而丧失给水功能,通常将 3% 或 1% 扬程下降点作为水泵的必需汽蚀余量 ($NPSH_r$) 来设计水泵的管道系统。但是,根据日本透平机械协会所做的调查,从 1976~1992 年在所谓的安全区域,即有效汽蚀余量 $NPSH_a > \text{必需汽蚀余量 } NPSH_r$ 条件下运行的水泵系统中出现了 45 起因汽蚀引起水泵材料破损而影响系统工作的重大事故,据调查发现,损伤的水泵 $NPSH_a/NPSH_r$ 占 75%。设计点流量 (Q_d) 和小流量 ($0.6Q_d$) 附近损伤较多。

国内这方面的统计资料较少,因此,国内外都急需弄清汽蚀对水泵材料损伤的机理和损伤发生的预估,以指导水泵的改进和确保水泵系统的安全。有关