

水力机械中 流动诱导的脉动和振动

项目规划、设计和故障诊断工程师手册

(瑞士) 彼得·德夫勒 (Peter Dörfler)
(瑞士) 米尔哈姆·施克 (Mirjam Sick) 著
(加) 安德烈·库都 (André Coutu)

方玉建 张金凤 译

袁寿其 审

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

FLOW-INDUCED PULSATION AND
VIBRATION IN HYDROELECTRIC MACHINERY
ENGINEER'S GUIDEBOOK FOR
PLANNING, DESIGN AND TROUBLESHOOTING

水力机械中 流动诱导的脉动和振动

项目规划、设计和故障诊断工程师手册

(瑞士) 彼得·德夫勒 (Peter Dörfler)

(瑞士) 米尔哈姆·施克 (Mirjam Sick) 著

(加) 安德烈·库都 (André Coutu)

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

著作权合同登记:图字 10-2015-573 号

图书在版编目(CIP)数据

水力机械中流动诱导的脉动和振动/(瑞士)德夫勒,
(瑞士)施克,(加)库都著;方玉建,张金凤译. —镇
江:江苏大学出版社,2015.11

书名原文:Flow-Induced Pulsation and Vibration
in Hydroelectric Machinery
ISBN 978-7-5684-0098-5

I. ①水… II. ①德… ②施… ③库… ④方… ⑤张
… III. ①水力机械—脉动流速—研究②水力机械—水力振
动—研究 IV. ①TV136

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 266748 号

Flow-Induced Pulsation and Vibration in Hydroelectric Machinery
by Peter Dörfler, Mirjam Sick and André Coutu.
Copyright © 2013 Springer London.
Springer London is a part of Springer Science+Business Media.
All Rights Reserved.

水力机械中流动诱导的脉动和振动

Shuili Jixie Zhong Liudong Youdao De Maidong He Zhendong

著 者/(瑞士)彼得·德夫勒(Peter Dörfler) (瑞士)米尔哈姆·施克(Mirjam Sick)
(加)安德烈·库都(André Coutu)

译 者/方玉建 张金凤

责任编辑/吴昌兴 郑晨晖

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编:212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/南京精艺印刷有限公司

经 销/江苏省新华书店

开 本/718 mm×1 000 mm 1/16

印 张/17.25

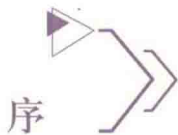
字 数/333 千字

版 次/2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0098-5

定 价/120.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

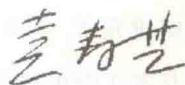


水力机械主要是实现水能和机械能相互转换的机械类总称. 从近千年前的水车, 发展到今天形式各样的水力机械, 如水泵、水轮机及水泵水轮机等, 它既古老又传统, 同时又越来越融入当代人们的新需求和现代的新技术, 水力机械领域方兴未艾. 近一个世纪以来, 在技术不断进步和快速发展的背景下, 人们从开始追求效率性能, 到追求可靠性, 最后追求机组运行的稳定性和舒适性, 可见, 伴随水力机械在国民经济各行各业获得快速而广泛应用的同时, 追求其技术进步的研究从未停止过.

江苏大学在水力机械领域的研究具有非常悠久的历史, 江苏大学流体机械工程技术研究中心就是其中一支队伍. 它的前身为创建于 1962 年的吉林工业大学排灌机械研究室, 1963 年成建制迁入镇江农机学院, 1981 年成立排灌机械研究所. 该单位一直致力于各类水泵及系统工程的研究, 连续 8 年被授予江苏省文明单位称号, 并被国家科委、国家教委授予全国高校科技工作先进集体称号. 于 2013 年, 又成立了国家水泵及系统工程技术研究中心. 长期孜孜不倦、坚持不懈地奋斗在科研征程上的科研人员们充分认识到, 引进该领域的优秀专著, 吸取前人的经验, 对于促进我国水力机械学科的发展和行业的技术进步具有举足轻重的意义.

自 2013 年以来, 江苏大学在水力机械领域相继引进并翻译了多本优秀国外专著作为研究生使用的教材, 如世界著名泵专家美国布伦南著的《泵流体力

学》《空化与空泡动力学》等, 2013 年底至 2014 年底, 我的博士生方玉建和张金凤副研究员在德国作访问学者, 期间他们发现了瑞士著名水力专家彼得·德夫勒等的最新英文专著《Flow-Induced Pulsation and Vibration in Hydroelectric Machinery》, 该书非常契合中国水利机械行业快速发展的需求. 他们夫妇积极承担下来该书的翻译工作, 江苏大学出版社负责了版权引进. 所以, 借本书中文版顺利出版的机会, 我对所有积极参与和承担这些国外优秀专著翻译的老师和相关人员表示衷心的感谢, 衷心地希望江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心引进翻译的这些国外优秀专著在提升研究生和国内学者研究能力的同时, 搭建起国内外学者广泛深入学术交流的平台.



2015 年 11 月 7 日

作者寄语

当我们写作这本书时,我们试图帮助水力工程师对各种可能的振动问题及其成因,以及如何避免和消除它们展开一个广泛的研究.我们的想法是将散落在成千上百篇论文中涉及这方面的零散知识做一次集中展现,其中的有些论文因为



年代非常久远,很难找到.同时,我们发现现行的文献中关于正常水力脉动和振动特性的资料数据非常缺乏,因此我们也想在本书中提供.本书出版之后,我们很自豪地发现本书受到了水力工程师的积极反馈.

2013年,本书的中文版译者方玉建和张金凤夫妇,在研究他们所关注的一个振动问题时,意外地发现了本书的英文版.他们意识到本书的中文版将非常契合中国水力机械行业快速发展的需求,可能会受到欢迎,所以他们愿意承担翻译工作.他们的翻译工作非常幸运地得到了江苏大学校长袁寿其教授的积极支持,我们对袁校长的积极支持深表感谢.另外,江苏大学出版社的林卉老师与施普林格驻北京办事处的 Parick Chen 先生积极协调处理所需的出版事宜.翻译过程中最困难的是各种复杂的专业术语,不仅要求意思准确,同时还要兼顾易读性,所以,江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心的

潘中永副教授和加拿大安德里兹水电的李惠君专家详细阅读了译稿,特别是对现代水力机械领域科技术语的正确使用提出了许多宝贵意见,在此表示感谢.

我们非常高兴这本书成功地被翻译成中文版,并诚挚地感谢所有参与该书中文版工作的人员,也希望中国的水力工程师能够从中找到有帮助的信息和有价值的想法.

P. Dörfle
2015/09

Author's foreword for the Chinese edition

When we wrote the original version of our textbook, we intended to give hydraulic engineers a broad survey of possible vibration problems, their causes and how to avoid or cure them. The idea was to concentrate knowledge that otherwise only exists in small pieces spread over hundreds of technical papers, some of them quite old and not easy to find. At the same time, we also wanted to provide information about the normal hydraulic pulsation and vibration behavior that has actually been missing in the literature. In the meantime, we are proud to notice the English edition has become quite well-known among hydraulic engineers.

It was in 2013 that Fang Yujian and his wife Mrs. Zhang Jinfeng, investigating a vibration problem, came across the English book. It occurred to them that a Chinese version of the book might be welcome to his colleagues in the huge Chinese hydraulic community, and that they could undertake the translation. They were lucky to obtain support from their tutor, Prof. Yuan Shouqi, president of Jiangsu University and Head of the Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology. We are very grateful for Prof. Yuan's active support. Mrs. Lin of Jiangsu University Press kindly arranged the necessary publication agreement with Mr. Parick Chen from Springer publishers, Beijing. The demanding task of translating

complex technical content from English into Chinese, while maintaining good readability, received valuable support from Prof. Pan Zhongyong. Mr. Li Huijun, at ANDRITZ HYDRO Canada, carefully checked the translation in particular for the proper use of technical terms as in modern hydropower.

The authors are very glad about the successful translation. We express our thanks to all who facilitated the Chinese edition, and we hope that hydraulic engineers in China may find there helpful information and valuable ideas.

P. Dörfler
2015/09

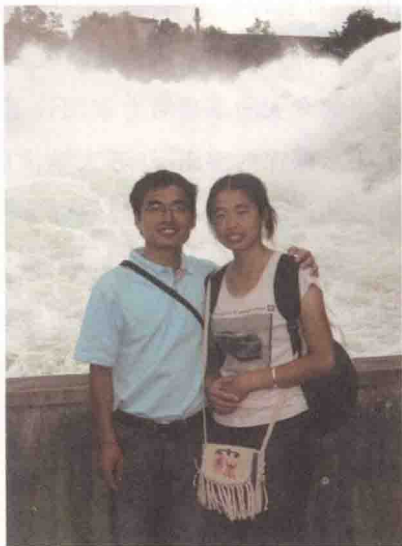
译者的话

2014年春,我们夫妇在德国卡尔斯鲁厄理工大学游学访问期间,偶然间发现了《Flow-Induced Pulsation and Vibration in Hydroelectric Machinery》这本书。该书的内容系统且新颖,因此我们有了将此书译成中文的想法。

彼得博士,在水力机械领域已经从事了将近半个世纪的研究。退休之前,他和另外两位作者把研究和实践积累的专业知识和经验写作成书,非常难能可贵。除了翻译过程中各种具体问题的讨论之外,

我们还跟他交流了许多想法,跟他请教学习或研究中遇到的各种问题,他都耐心提供建议。无论是翻译这本著作,还是遇到彼得先生,对我们来说都是一种幸运,在此我们要特别感谢彼得先生和另外两位作者。

还值得特别感谢的是我们的导师袁寿其校长,没有他的长期鼓励与支持,我们不可能这么顺利地完成这本书的翻译工作,也是他鼓励我们写作了人生中的第一本书——《我的新农村梦》。他点燃了我们写作的热情。在一年漫长的翻译过程中,他不断地鼓励我们继续坚持下去。本书的翻译完成之后,他第一个通读了全书,详细地提出了许多宝贵的审稿意见。所以,仅以此书的



出版,对袁校长表示我们发自内心的诚挚的敬意和谢意.

江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心的潘中永副教授、安德里兹水电加拿大的李惠君专家阅读了书的译稿,提出了许多宝贵的意见,在此我们表示深深的感谢.江苏大学出版社的林卉老师,协调处理了翻译的版权及出版的许多工作,在此我们对她表示特别的感谢.

彼得博士在古稀之年尽自己所能写作了此书,在中文版的翻译过程中,他耐心地陪伴着我们,竭尽所能地及时解答翻译过程中遇到的各种问题,并纠正了原书中的一些错误.作为年轻的译者,我们也尽自己所能把此书翻译给国内的专家学者.但是,由于译者的经验和水平局限,书中难免存在翻译不准确的地方,恳请读者批评指正.

方玉建、张金凤

于江苏大学

2015年7月21日

前 言

一个世纪以来,在人们获得可再生能源的过程中,水力透平机械起着重要的作用.在技术普遍进步的背景下,在效率和可靠性方面,机组的设计已经达到了非常显著的水平.如混流式水轮机的效率已经达到了接近 96% 的水平,这是任何其他透平机械都达不到的.与其他设备不一样,水电站的水轮机或蓄能泵的设计,一般都是根据给定站址的流量和水头“量身”定制的,所以,对于工程设计来说,要使每个项目都达到这样的效率水平,它将是一项长久的挑战.而且,由于分布式能源的整合融入引起了电力市场的基础性变革,即在电网中,水电将从提供基础负荷的角色逐渐转变成提供高度可调节的负荷能源.正是由于这些外部发生的变化,引起了水力透平机械的运行方式越来越动态化,因此,也就对它的技术开发提出了实质性的进步要求.

因为水力机械的主要水力性能——出力、效率和空化,与业主的财务业绩明显紧密相关,所以,从一开始这些就是大家关注的焦点.很长一段时间以来,我们已经建立了成熟的机组水力性能测试的方法和标准.相反,对设备的耐用性和可靠性进行预先的评判则更具有难度.经过一段时间运行后,设备中一个或多个部件所出现的结构失效,在绝大多数情况下,是由叠加在静态荷载上的动态应力所导致的疲劳引起的.与静态应力一样,这些动态应力也遵循水力机械的工作原理.如果不仅要求机组具有良好的水力性能,而且要求机组具有尽可能低的运行成本和尽可能好的运行可调节性,那么,对其动态应力能够进行准确的预测就显得尤为重要.

除了结构安全性外,还有其他的原因提出了对非稳态现象的限制要求.例如,由一些非稳定性机理引起的自发出力摆动,对于电网来说,是不允许机组出现的.对于机组安全性和环境舒适性之间的界限,像压力激波、振动和噪声现象,就其可接受的水平,运行方和供货方可能会存在一些分歧,所以,还存在一些研究议题.

不仅如此,现代电站的可调节性,要求设备在非设计工况下运行的时间

比例出现了明显增加的趋势,这使得问题更具有挑战性,同时,这就使得动态荷载的重要性逐渐增加,我们必须更加重视机组的非稳态特性。

几年前,当行业内许多到了退休年纪的研究者(包括本书的一位作者)相聚在一起交流的时候,我们产生了写作这本书的想法。行业内工程师获得的专业经验和知识,其中很大一部分都是从意料之外的技术失误及在跟进的问题解决过程中获得的。这样的工程问题,当达到必须解决的程度,往往每隔几年才发生一次,甚至很多年才发生一次。然而,为了避免重复发生类似的故事,技术管理先进的公司通过这些事故推动规章流程的制定,不断吸取教训、总结经验、改进设计导则。多年来,随着制定的规章和设计导则越来越完善,最终可避免各种可能的技术失误。而对行业内的公开研究团体,情况却并不完全是这样。出现了非常矛盾的情况,大量的科技论文似乎有助于无情地侵蚀着这些通过实践获得的经验和知识。鉴于这样的情况,我们认为有必要写作一本书将这些实践得到的专业知识和经验进行一次集中公开。有些经验是通过公开赞助的科研项目获得的,有些是通过与参加国际水力机械及系统协会(IAHR)工作组的其他单位同行交流搜集起来的。

另外,我们还期望这本书有助于增进水力机械买方和供货方相互合作的效率。在许多项目中,对于机组的非稳定性能,我们遇到了许多不现实的或不切实际的技术要求。出现这样的情况,主要是因为缺乏关于水力机械实际特性的实用信息和数据。通过这本书,我们希望缩小双方在知识和经验方面的差距,并希望在未来的项目中,大家可以更加理性地处理相关问题。

彼得·德夫勒

2012年4月于瑞士苏黎世



符号表

拉丁字母

a	波的传播速度	1.3, 2.3.4, 3.6, 3.6.2, 7.1
a_{ij}	传递矩阵的元素	1.3
A	横截面面积	1.3, 1.4
A	传递矩阵	1.3
A	幅值	3.3.2
B_0	活动导叶的高度	4.1.3
c	流速	1.1, 2.1.2
c_m	轴面流速	1.1, 7.2.1, 7.2.2
c_r	圆周流速	2.1.1, 2.1.2
C_C	空化柔度	1.4, 1.5, 2.2.1, 7.2.3, 8.2
C	破坏量比值	1.6
C_p	压力系数	3.5.1
d	厚度, 宽度	4.1.2, 4.1.3, 8.4.3.3
D	直径	1.1, 5.1, 7.2.1, 7.2.3, 7.3.1, 7.3.2, 8.3
$D(s)$	分母	1.4
E	能量	1.1, 6.4.2
E	弹性模量	1.3
f	频率	1.2~1.5, 2.4, 3.1~3.6, 8.1
F	作用力	3.5.4, 7.3.3
g	重力加速度	1.1
G	传递函数	1.2, 1.4

h	水头的变化	9.1.1
h_{dyn}	流速水头	7.2.1, 7.2.2
H	水头	1.1, 2.2.12, 6.4.2, 7.2.1, 8.3
I	惯性, 惯量	1.4, 3.5.4
I, J	惯性力矩	8.2, 8.3
j	虚部单位	1.3, 1.4, 1.5, 2.2.1, 3.5, 3.6, 7.2
k	转轮叶片频率下的谐波	3.1
k	多变指数	5.1
K	相对于 $\sqrt{2E}$ 的转速系数	1.1, 1.6
L	长度	1.3, 1.4, 3.6
n	转速, 转轮旋转的频率	3.1
m	导叶通过频率下的谐波	1.1, 3.1
m	涡量比	2.1.1
Ma	马赫数	3.6
M	力矩, 弯矩	7.3.3
N	样本容量	1.2
$N(s)$	分子	1.4
p	压力	1.3, 1.4, 1.5, 2.2.1, 3.6
P	功率, 出力	1.1, 8.3
q	流量的变化	1.4, 2.2.7
Q	均值流量	1.1, 1.3
R	半径	2.1.1, 5.1, 6.2
R	阻抗	1.4
s	拉普拉斯变换参数	1.4
S	表面张力	5.1
St	斯特劳哈尔数	8.4.3.3
t 或 T	时间	1.2, 1.4, 3.5, 3.6, 8.3.2
T	力矩	3.5, 7.3.2
u	转轮旋转的圆周速度	1.1, 2.1
u	流速的径向源	2.1
v	流速	2.1
V_c	空穴体积	1.4, 2.2.7
w	相对流速	2.1
X	通用变量	1.2, 9.1.1

X_2	流动变量	7.3.2
Y	水力导纳	1.3
Y	活动导叶开度	6.4.1
Z	水力阻抗	1.3, 6.3.1, 7.2.3
Z	叶片数	3.1

希腊字母

α	孔隙率	5.6
α	特征值的实部	1.4
α	活动导叶开度的转角	1.1, 4.2.3
α_ω	机组加速度的无量纲数	3.5.4
β	倾角	3.5.4
β	桨叶开度的转角	7.4.2
χ	质量流量增益	1.5, 2.2.7
Δ	……的脉动, ……的差值	1.2, 1.4, 1.5, 2.2, 3.3, 3.4, 3.5, 7.2.2, 7.3.1, 7.4.3
γ	传播常数	1.3
η	水力效率	1.1
φ 或 ϕ	流量系数	1.1, 6.4.3, 6.4.4, 8.3.3
κ	上游侧的质量流量增益	2.2.7
λ	稳态摩擦损失系数	1.3
Λ 或 λ	波长	1.3, 7.1
μ	体积黏性系数	1.3
ν	比转速	1.1
ν	带正负号的节径值	2.4, 2, 3.1, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6
π	3.141 592…	1.1, 1.4, 1.5, 2.2.5, 3.3.1, 3.3.2, 3.5.4, 3.6
ρ	密度	1.3, 1.4, 5.1
σ	空化系数	2.2, 2.2.1, 4.2.3, 5.1, 7.2.3, 9.2.1, 9.2.2
σ	结构应力	3.5.2
Σ	求和	1.6, 2.2.5, 3.3.2, 3.5.4, 8.1, 8.2, 8.3
ω	角速度	1.3, 1.4, 2.2.5
Ω	转轮旋转的角速度	3.5.4

ψ	压力系数	1.1, 6.4.3, 7.4.3, 8.3.3
ζ	衰减率	1.4, 1.6, 3.5.2, 3.5.4

下标

B	大气压力	5.1
C	空穴	1.3
DT	尾水管	5.4.3, 8.1
dyn	尾水管压力脉动的非同步分量	7.2.1, 7.2.2
EX	受迫激振项	1.4, 2.2.1, 2.2.13.1
G	发电机	3.5.4
G	活动导叶	7.3.2
h	水平的, 水力的	8.1
L	液体	5.1
max	最大值	6.4.6, 9.1
min	最小值	4.2, 6.4.6, 9.1
n	固有(频率)	1.4, 3.3.2, 8.1, 8.3
NB	窄频	6.4.4
opt	最优点	2.2, 4.2.2, 7.2.1, 7.2.2, 7.3.1
r	额定	2.2.12, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5
r	旋转的叶栅	3.1
s	静止的叶栅	3.1
sp, SC	蜗壳	2.2, 3.6
T	水轮机	1.4
TW	尾水侧	1.4, 3.5.4
u	相对于转轮出口的圆周流速	1.1, 7.2.1
11	基于参照量的单位值、标么值	1.1
1, 2	上游侧、下游侧	1.3, 1.4, 1.5, 2.2, 7.2, 7.3, 7.4
2	依据转轮的出口直径	7.2, 7.3, 7.4

缩写

CFD	计算流体动力学	2.2.1, 2.4.1, 3.1, 3.3.2, 3.3.4, 3.4.1, 3.5.1, 4.1.4, 4.2.4, 5. 3, 5.5, 6.4.3, 8.4.3.1, 8.5
DES	分离涡模拟(湍流模型)	4.2.4