

清华大学学术专著

流体激振

陈佐一 著



清华大学出版社

0353.1
C66

414967

清华大学学术专著

流体激振

陈佐一 著



00414967

清华大学出版社

1279/04
(京)新登字 158 号

内 容 提 要

本书论述了研究流体激振的振荡流体力学原理和参数多项式方法,对动力工程领域的各种流体激振问题如汽轮机的失速流激振、风力透平流体激振、轴承的油膜激振与汽封的汽膜激振、不均匀来流对转子叶片的激振以及轴系扭振与流体激振的关联等作了比较系统的研究。本书可作为有关领域的科研人员、工厂企业的工程技术人员和高等学校教师、学生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

流体激振/陈佐一著. —北京:清华大学出版社,1998

ISBN 7-302-02906-7

I. 流… I. 陈… II. 波激振动 IV. 0353.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 07161 号

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学校内, 邮编 100084)

因特网地址: www.tup.tsinghua.edu.cn

印刷者: 北京人民文学印刷厂

发行者: 新华书店总店北京科技发行所

开 本: 850×1168 1/32 印张: 12.75 字数: 331 千字

版 次: 1998 年 7 月第 1 版 1998 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-02906-7/TK·24

印 数: 0001~1500

定 价: 29.00 元

ABSTRACT

The Oscillating Fluid Mechanics Theorem and Parametric Polynomial Method for research flow induced vibration has been discussed. Systematic study on various flow induced vibration in power engineering are presented, such as stall flow induced vibration, flow induced vibration in wind turbine, oil film induced vibration of bearing, labyrinth seal flow induced vibration, un-uniform coming flow induced rotor blades vibration and the correlation between rotor system torsion vibration with flow induced vibration etc. It can be the reference book for researchers, engineers, teachers and students studying in this region.

前 言

流体激振是工程领域涉及安全性的重要问题,特别在动力工程领域,各类流体激振问题关系到机组的稳定安全运行,因而,无论是设计制造部门还是运行部门都深感对此问题进行深入分析的必要。作者及其科研合作者较长时间从事动力工程领域各类流体激振问题的研究,将这些研究成果总结出版,相信能对动力工程的设计制造和运行部门进行安全性分析提供有益的帮助。同时对于其他工程领域的流体激振问题研究也将起到借鉴的作用。

本书中的有关内容,包含了作者及其合作者的研究成果,这里要特别指出的是:文凤、钟山在风力透平流体激振方面;王继宏、王若水、戴东海、刘红在汽轮机失速流激振方面;舒红在参数多项式方法应用方面;孙永忠在轴承油膜和汽封汽膜激振方面;吴晓峰在非均匀来流对动叶的激振方面;段源远在轴系扭振与流体激振关联等方面所作的大量研究。在本书出版之际,谨向他们致以衷心的感谢。

本书得以出版,承蒙清华大学叶大均教授和中科院徐建中院士的大力推荐,并得到清华大学学术专著基金委员会的支持,在此一并表示最衷心的感谢。

作者

1997.6

主要符号表

C	阻尼系数
E	弹性模量
G	质量流量
G_0	设计质量流量
K	刚度系数
k	绝热指数
M	非定常流动力矩
n	转子转速
p	流体压力
V	流体速度矢量
V_r, V_θ, V_z	分别为速度矢量 V 在 r, θ, z 坐标上的分量
V_x, V_y, V_z	分别为速度矢量 V 在 x, y, z 坐标上的分量
W	非定常流动力对振动物体作功
w	建立在叶轮机械转子相对坐标系的速度矢量
w_r, w_θ, w_z	分别为相对速度矢量在 r, θ, z 坐标上的分量
w_x, w_y, w_z	分别为相对速度矢量在 x, y, z 坐标上的分量
α, β	相位角
μ	流体动力粘度
μ_t	湍流动力粘度
ρ	流体密度
τ	流体粘性剪应力

Φ 耗散函数
 φ 流体速度势
 Ω 转子旋转角速度
 ω 物体振动角频率

目 录

主要符号表	XIII
绪论	1
第 1 章 分析流体激振的振荡流体力学原理	4
1.1 概述	4
1.2 振荡流体力学参数的基本关系式	5
1.3 振荡流体力学的基本方程	7
1.4 振荡边界条件	15
1.5 振荡流线模型	18
1.6 流体激振稳定性判断准则	22
1.7 振荡流体力学的局部线化理论	24
第 2 章 求解振荡流场的参数多项式方法	28
2.1 概述	28
2.2 参数多项式方法的基本原理	29
2.3 参数多项式方法的特点	35
2.4 参数多项式方法的求解过程	41
第 3 章 汽轮机组在变工况条件下的失速流 激振(失速颤振)	53
3.1 概述	53

3.2	失速流激振的一般分析方法·····	54
3.3	叶轮机械失速流激振的全三维数值解·····	56
3.3.1	叶轮机械全三维定常失速流场解·····	57
3.3.2	叶轮机械全三维振荡失速流场解·····	93
3.3.3	汽轮机组在变工况条件下失速流 激振的实例分析·····	98
3.4	振荡叶栅振荡流场的实验研究·····	130
第4章	风力透平叶片的流体激振·····	154
4.1	概述·····	154
4.2	能量法在风力透平叶片流体激振稳定性 分析中的应用·····	155
4.3	用速度势振幅方程法确定风力透平叶片 振动时的二元非定常气动力·····	158
4.4	风力透平叶片振动时的三元非定常气动 力与三元效应分析·····	165
4.5	用参数多项式方法求解风力透平叶片的 振荡流场和进行稳定性分析·····	175
4.5.1	理想流体振荡流场解法与稳定性 分析·····	175
4.5.2	粘性流体振荡流场解法与稳定性 分析·····	184
4.5.3	风力透平叶片振型和机械阻尼 的确定·····	192
4.6	风力透平叶片流体激振的实验研究·····	196
4.6.1	风力透平叶片流体激振试验台的 构成·····	196
4.6.2	气动参数的测量·····	199

4.6.3	实验数据处理的几个关系式·····	202
4.6.4	实验结果及分析·····	208
第5章	轴承油膜流激振分析·····	219
5.1	概述·····	219
5.2	用振荡流体力学原理分析轴承油膜激振·····	222
5.2.1	轴承的定常场和静特性计算·····	223
5.2.2	轴承动特性和流体激振稳定性分析·····	228
5.3	计算实例分析·····	236
第6章	汽封间隙流激振分析·····	255
6.1	概述·····	255
6.2	用振荡流体力学原理分析气封间隙流激振·····	264
6.2.1	汽封腔内定常流场的确定·····	264
6.2.2	用双控制体模型确定汽封特性的 方法简介·····	272
6.2.3	用振荡流体力学原理求解汽封内 的振荡流场和动特性系数·····	282
6.2.4	振荡流体力学方法与双控制体方 法求解汽封动特性的比较·····	291
6.3	计算实例·····	301
6.3.1	某汽轮机组全部汽封的流体激振 稳定性分析·····	301
6.3.2	斜齿汽封和直齿汽封静特性与动 特性的比较·····	307
6.3.3	汽封流体激振分析用于故障诊断·····	309

第 7 章 非均匀来流对转子叶片的激振	311
7.1 概述	311
7.2 尾迹流激振的实验研究	315
7.3 尾迹流激振的二维数值研究	325
7.4 用振荡流体力学理论与参数多项式方法 确定静叶尾迹作用于动叶的三维非定常 气动力	334
7.4.1 振幅方程	335
7.4.2 适用于尾迹流激振分析的振幅 参数的多项式表达式	338
7.4.3 用参数多项式方法求解振幅方程 的基本方程表达式	342
7.4.4 算例及其与实验的比较	357
第 8 章 轴系扭振与流体激振的关联研究	367
8.1 概述	367
8.2 求解轴系扭振时非定常气动力的基本方程	368
8.3 轴系扭振与流体激振关联研究的实例分析	379
参考文献	388

CONTENTS

Nomenclature	XIII
Introduction	1
Chapter 1 Oscillating Fluid Mechanics Theorem For	
Analysing Flow Induced Vibration	4
1.1 Generalization	4
1.2 Basic Relation of Parameters in Oscillating	
Fluid Mechanics	5
1.3 Basic Equations of Oscillating Fluid Mechanics ...	7
1.4 Oscillating Boundary Conditions	15
1.5 Oscillating StreamLine Model	18
1.6 Criterion On Stability of Flow Induced Vibration ...	22
1.7 Local Linerization Theory in Oscillating	
Fluid Mechanics	24
Chapter 2 Parametric Polynomial Method For	
Solving Oscillating Flow Field	28
2.1 Generalization	28
2.2 Basic Theorem of Parametric Polynomial	
Method	29
2.3 Characters of Parametric Polynomial Method	35

2.4 Solving Process of Parametric Polynomial Method	41
---	----

Chapter 3 Stall Flow Induced Vibration in Steam Turbine Under Various Performance

Condition (Stall Flutter).....	53
3.1 Generalization	53
3.2 General Analysis Method of Stall Flow Induced Vibration	54
3.3 Three Dimensional Numerical Solution of Stall Flow Induced Vibration in Turbomachinery	56
3.3.1 Three Dimensional Steady Stall Flow Solution in Turbomachinery	57
3.3.2 Three Dimensional Oscillating Flow Solution in Turbomachinery	93
3.3.3 Analysis Example On Stall Flow Induced Vibration in Steam Turbine Under Various Performance Condition	98
3.4 Experimental Research On Oscillating Flow Field of Vibrating Cascade	130

Chapter 4 Flow Induced Vibration in Wind

Turbine Blades	154
4.1 Generalization	154
4.2 Application of Energy Method to Analyse Stability of Flow Induced Vibration in Wind Turbine	155
4.3 To Determine Two Dimensional Unsteady	

	Aerodynamic Force of Vibrating Wind Turbine Blades Using the Velocity Potential Amplitude Method	158
4. 4	Three Dimensional Unsteady Aerodynamic Force of Vibrating Wind Turbine Blades and Analysis of Three Dimensional Effect	165
4. 5	To Solve Oscillating Flow Field of Wind Turbine Blades Using Parametric Polynomial Method and To Analyse Its Stability	175
4. 5. 1	Solving Method of Inviscid Oscillating Flow And Stability Analysis	175
4. 5. 2	Solving Method of Viscid Oscillating Flow And Stability Analysis	184
4. 5. 3	To Determine Vibration Mode And Mechanic Damping of Wind Turbine Blades	192
4. 6	The Experimental Research On Flow Induced Vibration of Wind Turbine Blades	196
4. 6. 1	Composition of Experimental Apparatus On Flow Induced Vibration In Wind Turbine Blades	196
4. 6. 2	Measurement of Aerodynamic Par- ameters	199
4. 6. 3	Some Relations of Experimental Data Processing	202
4. 6. 4	Experimental Results And Its Anal- ysis	208

Chapter 5 Analysis On Oil Film Induced Vibration In Bearing	219
5.1 Generalization	219
5.2 To Analyse Oil Film Induced Vibration in Bearing Using Oscillating Fluid Mechanics Method ...	222
5.2.1 Calculation of Steady Flow Field And Static Character	223
5.2.2 Dynamic Character And Stability Analysis On Flow Induced Vibration of Bearing	228
5.3 Analysis Examples of Calculation	236

Chapter 6 Analysis Of Labyrinth Seal Flow Induced Vibration	255
6.1 Generalization	255
6.2 To Analyse Labyrinth Seal Flow Induced Vibration By Oscillating Fluid Mechanics Method	264
6.2.1 Determination of Labyrinth Seal Steady Flow	264
6.2.2 Simple Introduction On Determining Method of Labyrinth Seal Characters By Two Control Model	272
6.2.3 To Solve Oscillating Flow Field And Dynamic Character Coefficients of Labyrinth Seal Using Oscillating Fluid Mechanics Theorem	282
6.2.4 Comparison of Labyrinth Seal Dynamic	

	Characters Between Oscillating Fluid Mechanics Method And Two Control Model Method	291
6. 3	Examples of Calculation	301
6. 3. 1	Stability Analysis of Flow Induced Vibr- ation In Full Labyrinth Seals of A Steam Turbine	301
6. 3. 2	Comparison of Static and Dynamic Characters Between Straight and Oblique teeth	307
6. 3. 3	Application On Trouble Diagnosis Using Flow Induced Vibration Analysis of Laby- rinth Seal	309

Chapter 7 Ununiform Comining Flow Induced

	Rotor Blades Vibration	311
7. 1	Generalization	311
7. 2	Experimental Research On Wake Flow Induced Vibration	315
7. 3	Two Dimensional Numerical Research On Wake Flow Induced Vibration	325
7. 4	To Determine Three Dimensional Unsteady Aero- dynamic Force in Rotor Blades due to the Wake Flow of Stator Blades Using Oscillating Fluid Mechanics Theory and Parametric Polynomial Method	334
7. 4. 1	Amplitude Equations	335
7. 4. 2	Polynomial Representation of Amplitude	

	Parameters Suited For Analysis On Wake Flow Induced Vibration	338
7. 4. 3	Basic Equation Representation To Solve Amplitude Equations Using Parametric Polynomial Method	342
7. 4. 4	Calculated Example and Comparison With Experimental Results	357
Chapter 8	Research On Correlation Between Rotor System Torsion Vibration and Flow Induced Vibration	367
8. 1	Generalization	367
8. 2	Basic Equations For Solving Unsteady Aerody- namic Force due To The Rotor System Torsion Vibration	368
8. 3	Analytical Examples of Correlation Between Ro- tor System Torsion Vibration And Flow Induced Vibration	379
Reference		388