

流体诱发振动

〔美〕 R. D. 白菜文斯 著



52.721
164

流体诱发振动

〔美〕 R.D. 白莱文斯 著

吴恕三 王觉 等译



机械工业出版社

流体诱发振动是近年来在国际上获得较大发展的一门学科，目前国内在这方面有很多工作要做，但还缺少一本系统介绍这方面知识的书籍。

本书对各种不同的流体诱发振动按不同的机理从原理上进行了系统的探讨，介绍了有关计算，并用一些实例加以说明。另外，还对几个有关的专门问题：结构阻尼，旋涡脱落诱发的声，有流动的管道，海上船舶的运动等问题作了较详细和较深入的阐述。本书有一定的实用价值。

本书可作为力学、动力、船舶、石油化工、土建等专业的科技人员和教学人员以及高等院校高年级学生的参考书籍。

flow-induced vibration

R. D. Blevins

VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY 1977

* * *

流体诱发振动

〔美〕R. D. 白莱文斯 著

吴恕三 王觉 等译

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $12 \frac{1}{8}$ · 字数 315 千字

1983年4月北京第一版·1983年4月北京第一次印刷

印数 0, 001—4, 600 · 定价 2.25 元

*

科技新书目： 48-107

统一书号：15033·5491

译序

2165/04
流体诱发振动是近年来在国际上获得较大发展的一门学科。国内在这方面有很多工作要做。目前还缺少一本系统介绍这方面知识的书籍。为了满足读者的需要，我们将R. D. 白莱文斯 (Blevins) 所著的《流体诱发振动》一书译出，以供有关人员参考使用。

本书作者在美国通用原子能公司、加利福尼亚工学院和海军船舶研究发展中心的工程实践和科学研究活动中，搜集了大量流体诱发振动的事例，并分门别类按不同的类型和原理作了分析和讨论。尽管本书是一本专著，却写得趣味盎然，引人入胜。

在近若干年的工程实践中，大海的波涛曾毁坏了美国新泽西海岸外面的德克萨斯近海钻井4号塔。这是脉动流诱发振动的一个典型实例。匠心独具的纽约塔科马海峡悬索桥竟然由于空气动力学上的原因造成了破坏^①，这也是工程技术史上耸人听闻的实例。与流体诱发振动有关的工程实例很多：悬空输油管道的断裂，烟囱的倒塌，潜艇望远镜的折断，高耸的化工塔类设备的振动，以及电线的轰鸣等等。我国制造的动力锅炉的管式空气预热器在佳木斯、下花园、高井、秦皇岛等地的电厂里都曾发生过流体诱发的振动和噪声，严重时甚至无法投入运行^②。汽轮机冷凝器也曾发生过管子振动^③。不少锅炉喷水减温器喷头曾发生了疲劳断裂。这些都是同一物理现象的不同表现，而换热器设计师一直在寻求预见性的防止振动的设计导则，看来还得进行许多工作。

① 见本书第6章第1节和第4章第6节。

② 见锅炉透平学会第二届年会论文集，《锅炉管式空气预热器的振动和噪音》一文(作者：吴恕三、洪邦发)。

③ 见《机械工程手册》第72篇第10章。

I

本书由吴恕三（序，第1、3章，附录D）、荆志彪（符号说明，第2、4章，附录A、B和C）、王觉（第5、9章和索引）、徐仁德（第6章和第7章的第5节及以后各节）、王孟浩（第7章的第5节以前各节和第10章）和俞锡章（第8、11章）分头译出，由吴恕三对照原文全部作了校阅。由于本书涉及的学科多，专业广，我们在理解和译文处理上必有错误和欠妥之处，诚恳希望读者指出。

译者

一九八一年一月

著 者 序

一些受到流体作用的工程结构，往往会发生振动。为了给机械、土木建筑和船舶工程师和大学生在分析这些振动问题时提供一些解析工具，编写了这本书。书中力图介绍结构振动和流体力学机理方面的若干知识。因为这本书基本上是入门性质的，所以在附录里提供了连续结构振动问题的综述，同时也编写了有关随机振动理论的某些说明性材料。书的内容是按激发振动的流体力学动态机理的不同而不是按工程结构的类型编排的，因为任何一种结构都可能由于几种不同机理而发生流动诱发振动。

这本书是八年来著者在加利福尼亚州圣地亚哥市通用原子能公司，加利福尼亚州帕莎登那市加利福尼亚工学院和马里兰州卡特洛克市海军船舶研究发展中心研究工作的总结。涉及旋涡诱发噪声和湍流诱发噪声的那些章节，是著者和T. E. 伯顿(T. E. Burton)博士讨论的结果。S. C. 程(Cheng)、S. S. 陈(Chen)博士、K. 凯尼(K. Kerney)博士、N. 萨尔维森(N. Salvesen)博士、T. 萨尔帕卡亚(T. Sarpkaya)博士、S. D. 萨弗卡尔(S. D. Savkar)博士、M. W. 万布斯甘茨(M. W. Wambsganss)博士和H. 吴(Woo)博士都提出许多有益的批评意见。A. 罗希可(A. Roshko)教授和I. 卡尔佛(I. Culver)也给予了很多帮助。如果没有W. D. 伊宛(W. D. Iwan)教授、J. L. 斯维特洛(J. L. Swedlow)和T. A. 克鲁斯(T. A. Cruse)博士这几位良师益友的指导，我是不可能完成这本书的。J. 布兰查德(J. Blanchard)把一些科学研究报告，加以精心编辑，使这本书更加完善，我要向他致谢。

本书是奉献给那些永不会知道我或你的名字的人们的。他们就是那些越过桥梁而旅行，在高楼大厦里孜孜工作和受到动力厂

供热的广大人民。这本书就是企图分析这些工程结构并使它们免于毁坏的。这些人们推动了我们的科学研究工作。而他们正是我们首先要向他们负责的。

R. D. 白莱文斯 (Blevins)

美国加利福尼亚州拉约拉市

符 号 说 明[⊖]

A_y	垂直于自由流的振动的振幅 (正负峰间位移的一半)	g	重力加速度
C_L	升力系数	k	单位长度的弹簧常数
C_D	曳力系数	m	包括所随动的流体在内的单位长度的质量
C_M	力矩系数	p	压力
C_m	惯性系数	q	动压力, $q = \rho U^2/2$
C_I	附加质量系数	r	校正函数
F	单位长度上的力	t	时间
I	面积惯性弯矩	u	通过管子的流速
I_0	极质量惯性矩	x	平行于自由流方向的位移
L	结构跨度方向的长度	y	垂直于自由流方向的位移
L_c	校正长度	z	跨度方向的长度
M	力矩	δ_r	折合阻尼, $\delta_r = 2m(2\pi\zeta)/(\rho D^2)$
Re	雷诺数	ζ	阻尼因子
S	斯特罗哈数	λ	本征值或者波长
S_r	交叉谱密度	ν	运动粘度
U	自由流速度或者管阵的最小截面处的速度	ρ	流体密度
V	结构的速度	ψ	跨度方向的振型形状
V	体积	ω	频率(弧度/秒)
X	平行于自由流的位置	上标和下标	
Y	垂直于自由流的位置		
Z	阻抗	x	平行于自由流
c	音速	y	垂直于自由流
f	频率(赫兹)		

[⊖] 此处只列出了主要的符号, 其余的符号在各个章节中规定。

目 录

著者序

符号说明

第1章 引论	1
第2章 量纲分析	4
2.1 引言	4
2.2 无量纲变量	4
2.2.1 几何特性	4
2.2.2 折合速度, 无量纲振幅	4
2.2.3 质量比	5
2.2.4 雷诺数	5
2.2.5 马赫数	6
2.2.6 阻尼因子	6
2.3 应用	7
参考文献	8
第3章 旋涡诱发振动	9
3.1 引言	9
3.2 静止圆柱体的旋涡尾流	11
3.3 斯特罗哈数	13
3.4 圆柱体运动对尾流的影响	17
3.5 旋涡诱发振动的分析	20
3.6 尾流振荡器模型	22
3.6.1 引言	22
3.6.2 模型概述	23
3.6.3 结果	27
3.7 相关模型	30
3.7.1 引言	30
3.7.2 相关模型描述	31
3.7.3 模型参量	34
3.7.4 结果	36

3.8 旋涡诱发振动的消减	40
3.9 热电偶探头的实例	43
3.10 拖曳电缆实例	45
参考文献	49
第4章 驰振和失速颤振	53
4.1 引言	53
4.2 一个自由度结构的稳定性	55
4.2.1 平移	55
4.2.2 扭振稳定性	57
4.3 两个自由度系统的稳定性	61
4.4 一个自由度系统的响应	64
4.5 两个自由度结构的响应	70
4.6 脉动流对驰振的影响	73
4.6.1 旋涡脱落和驰振	73
4.6.2 扰动对驰振不稳定性影响	76
4.7 驰振的衰减	77
4.8 实例: 梁的驰振	77
4.9 实例: 电缆的驰振	80
参考文献	85
第5章 管排和管阵的不稳定性	87
5.1 引言	87
5.2 绕振的运动方程	89
5.3 稳定性分析	94
5.3.1 没有边界的管排	94
5.3.2 有限宽度管排	98
5.3.3 以墙壁为边界的管排	99
5.3.4 结论	101
5.4 流体力系数	101
5.5 管排的流体力系数	102
5.6 管阵的流体力系数	106
5.7 尾流诱发振动	108
5.8 喷流交替	112

V

5.9 实例: 热交换器管束的绕振	114
参考文献	116
第6章 脉动流诱发的振动	118
6.1 引言	118
6.2 顺流向作用力	118
6.3 顺流向运动的方程式	121
6.4 线性运动方程的解	122
6.4.1 零均值流量的脉动流	122
6.4.2 非零均值流量的脉动流	126
6.5 连续结构的顺流动方向响应特性	128
6.6 非线性解	130
6.7 流体作用力系数	133
6.7.1 折合速度和雷诺数的影响	133
6.7.2 结构体轴线与流向间夹角的影响	134
6.7.3 邻近效应	137
6.8 升力	137
6.9 脉动流所诱发振动的消减	140
6.10 实例: 海中管道	141
参考文献	144
第7章 湍流诱发的振动	146
7.1 引言	146
7.2 随机振动理论的要点	147
7.2.1 引言	147
7.2.2 静态原理	147
7.2.3 湍流谱	149
7.2.4 响应谱	152
7.3 平行于湍流的柔性杆的响应	156
7.3.1 引言	156
7.3.2 交叉谱密度和耦合度	156
7.3.3 预测的均方响应	160
7.4 风所诱发的振动	163
7.4.1 引言	163

7.4.2	地球的湍流附面层	163
7.4.3	风的速度谱和相关	166
7.4.4	工程结构对风的响应的预计	169
7.4.5	风洞模拟	180
7.5	湍流海面诱发的振动	182
7.5.1	引言	182
7.5.2	流体力谱	183
7.5.3	广义力的谱	183
7.5.4	均方响应	185
7.6	横向流中管阵的颤振	186
7.7	湍流诱发振动的消减	190
7.8	随机振动的统计分析	190
7.9	实例: 平行流动热交换器	201
7.10	实例: 风所诱发的建筑物振动	205
	参考文献	211
第8章	结构的阻尼	214
8.1	引言	214
8.2	流体的阻尼	217
8.2.1	第1种情况: 高雷诺数下横向流的小振幅振动	219
8.2.2	第2种情况: 静止流体中的阻尼	220
8.2.3	第3种情况: 平行流动中棒体的阻尼	224
8.3	材料的阻尼	228
8.4	结构阻尼的测量	232
8.4.1	引言	232
8.4.2	自由衰减法	234
8.4.3	带宽法	235
8.4.4	扩大因子法	237
8.4.5	响应法	238
8.4.6	实例: 松动夹持的管子的结构阻尼	238
8.5	桥梁、塔、楼房和反应堆内件的阻尼	245
8.5.1	桥梁	245
8.5.2	塔和烟囱	246

X

8.5.3 楼房	248
8.5.4 反应堆部件	248
参考文献	253
第9章 旋涡脱落诱发的声	255
9.1 引言	255
9.2 在无限流体中发射声的方程	256
9.3 有相关旋涡脱落的静止圆柱体	259
9.4 有部分相关旋涡脱落的静止圆柱体	263
9.4.1 发射声的方程	263
9.4.2 当 $\lambda \gg L$ 时发射的声	265
9.5 从振动中的圆柱体发射的声	269
9.6 当 $\lambda \gg L$ 时从振动中的圆柱体发射的声	270
9.7 以正弦曲线振型发射的声	274
9.7.1 圆柱体运动诱发的声	274
9.8 空腔中旋涡诱发的噪音	277
9.8.1 引言	277
9.8.2 空气动力产生的声	277
9.8.3 空腔中声的方程	279
9.9 拖曳电缆的实例	283
9.10 实例: 空腔中的声学共振	285
参考文献	287
第10章 有流体流动的管道的振动	289
10.1 引言	289
10.2 运动方程	290
10.3 两端铰接支承的管道跨距的自由振动	294
10.4 悬伸管道的自由振动	300
10.5 弯曲管子的研究结果	306
10.6 管道鞭击	309
10.7 实例	315
参考文献	316
第11章 海面上船舶的运动	318
11.1 引言	318

11.2 无前进速度时的稳定性和固有频率	320
11.2.1 引言	320
11.2.2 稳定性	321
11.2.3 横摇固有频率	323
11.2.4 纵摇固有频率	324
11.2.5 升沉的固有频率	325
11.3 水静力诱发的船舶运动	326
11.3.1 引言	326
11.3.2 横摇	327
11.3.3 升沉	331
11.3.4 纵摇	334
11.3.5 综合	336
11.4 细长船舶的薄片理论	337
11.5 实例:箱式船舶的横摇稳定性	342
参考文献	345
附录	346
附录 A 振型分析	346
附录 B 主座标	352
附录 C 声的气动力源	357
附录 D 若干未解决的课题	361
索引	363

第1章 引 论

绕流过小自单簧管的簧片，大到摩天大楼的各种各样工程结构的流体流动，既可以造成对人们有用的振动，也能够造成破坏性的振动事故。风使树叶婆娑作响，使风铃叮当，也可以把庄稼连根拔起，把整个种群毁灭。使海藻叶子摇曳的海流，能把海洋钻探平台摧毁在茫茫大海里。冷却增殖反应堆芯部的液态钠能够破坏屏蔽，并使反应堆芯部突然熔化。近年来，设计师们都倾向于把材料利用到极限，使得各种结构越来越轻巧和更富有挠性，因此上面说的那些流动诱发振动，就愈来愈显得重要。

为了描述这些流动诱发振动，一门新的行话正在形成。譬如，在加拿大被冰裹的输电线在稳定的风里“驰振”；悬挂海洋测震检波器的拖曳电缆以预测的频率“琴鸣”；在流动速度高于某一个临界速度时，热交换器里密排管阵的管子会沿着扁圆形轨道“绕振”。每一种这样的振动，是由于彼此悬殊的流体力学动态机理而引起的。这些不同的流体力学动态机理，可以按流动和工程结构的性质，如图 1-1 所示的那样来进行分类。

本书要考察不良绕流体工程结构中由亚音速流动诱发的各种振动现象。所谓不良绕流体工程结构，是指流动会在很大一部分结构表面上脱离开的那种结构。绝大多数民用工程结构，像桥梁或热交换器管子都是不良绕流体结构。这种结构的主要目的，并不如飞机零件那样要获得什么升力或者要使曳力降到最小值，而是承受载荷，输送流体或者提供传热面积的。从空气动力学的观点来看，它们并不是最佳化的。通常都只把流动诱发振动问题当作第二位的设计特性来考虑，至少是要等到出现一次事故后，才会加以认真对待。

根据物理学法则和经验数据等基本资料，构作出工程结构在

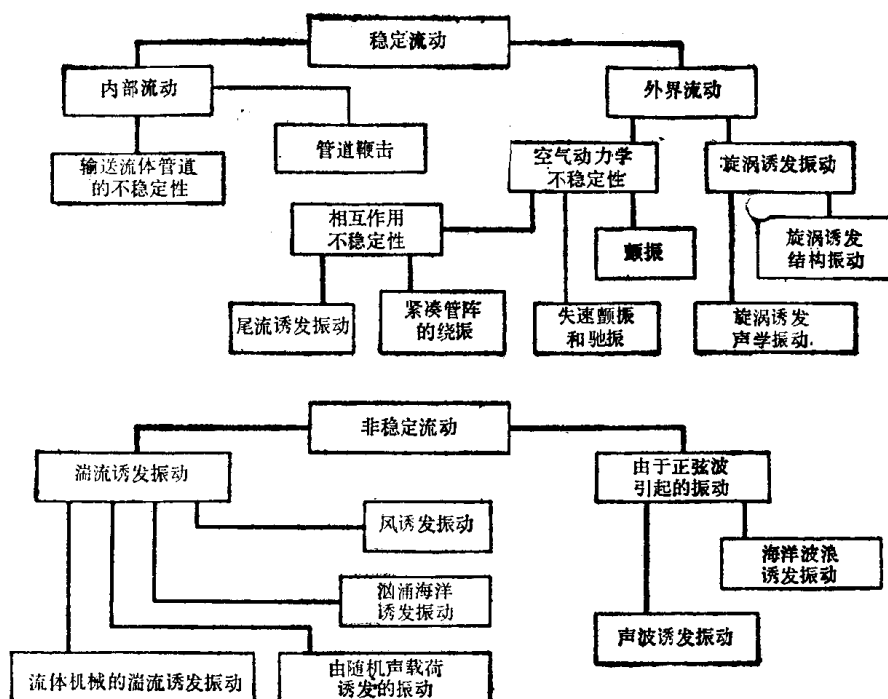


图1-1 流动诱发振动的分类

流动中响应的模型（图 1-2）。这些模型首先导出一个解法，然后给出一种预测。人们就可以拿预测和新的实验数据进行比较。新数据和预测之间的误差反映了这个模型的不足之处。从第 2 章到第 5 章，是讨论在稳定流动中工程结构的响应。第 6 和第 7 章是研究脉动流和湍流对工程结构的影响。在第 8 章里，分别用解析和实验方法考察了工程结构的阻尼，它是阻止流动诱发振动最根本的机理。在第 9 章里，研究了由漩涡脱落发生的空气动力性质的声，而在第 10 章里，讨论了内部流动对管道的影响。最后，在第 11 章里，研究了一个特殊性问题，海洋上的船舶运动。

流体流动和工程结构是相互作用的两个系统，而它们之间的相互作用是动态的。流体作用在结构上的力把这两个系统联结在一起。流体力使工程结构变形，而工程结构变形时，它就改变了它和流动之间的方位，于是流体力也可能有变化。在某些情况下，

譬如海水汹涌冲刷过船舶钢板，激发船体钢板振动时，流体力并不受结构位置改变的影响。在另外一些情况下，譬如冰层覆裹的输电线在稳定的风里的振动，流体力就完全由工程结构和流体流动之间的相对方位和相对速度所决定了。

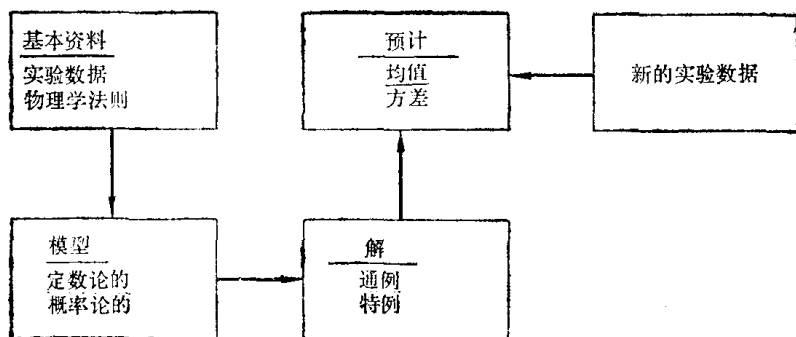


图1-2 评价各种数学模型的规则系统

为工程结构和流体分别构造了数学模型。由于大多数工程结构在载荷增加时，变形是近乎线性的，所以工程结构是以线性振荡器作为模型的。流体的模型就更为微妙复杂了。由于对作用在任意不良绕流体结构上的流体力并不存在着一个精确而又普遍适用的模型，流体模型就得依靠升力、曳力或表面压力的试验测量值的非线性外插法，工程结构和流体模型之间的动态相互作用就用非线性振荡器方程来描述。如果结构的振型或自由度不止一个，例如平移和扭转，就需要好几组的方程式来描述这个系统。在某些情况里，譬如湍流激发振动时，因为流体力取决于上游形成湍流的区域，而并不依存于结构的方位，时间就以明显的函数形式出现在方程式里。如果流体力完全取决于结构的位置，譬如管阵中的绕振，那时时间就以不明显的函数形式出现在方程式里。可惜的是，通常流体力都包含一次非线性。结果，很少能得到通解。本书大多数情况下解的是特例，并且对数值结果和测量得到的试验参数都予以信赖。不过，也有许多若干组合的参数已经证明在很多类型的问题中是有用的，这些无量纲参数在第2章里讨论。