

圆柱结构的 流动诱发振动

Shoei-Sheng Chen

冯振宇 张希农 译



石油工业出版社

0552623

TB12
040

号S80字登报 (京)

的流动诱发振动

Shoei-Sheng Chen

冯振宇 张希农 译

张景绘 校



石油大学 0413823



石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书全面系统地论述了圆柱结构的流动诱发振动问题。全书共分11章,对各种圆柱结构在流体中的动态特性做一详细讨论。第1章概括地介绍了流体诱发振动现象、机理以及一些预备知识;第2~4章分别介绍了静止流体中的单圆柱体,多圆柱体和圆柱壳体;第5章讨论了输送流体的管道;第6章介绍了轴向流动中的单圆柱体和圆柱系;第7~9章分别讨论了横向流动中的单圆柱体、圆柱系和双圆柱体;第10章深入探讨了圆柱结构的流体弹性不稳定性;第11章介绍了设计的一般准则,提出了消除振动的方法。为了便于读者阅读,本书提供了大量图表。

本书可供力学、航空航天、能源、化工、动力、海洋工程、建筑等领域的科研人员,技术人员、教师和研究生参考。

圆柱结构的流动诱发振动

Shoei-Sheng Chen

冯振宇 张希农 译

张景绘 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京三环印刷厂排版

北京三环印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米16开本213/8印张 532千字 印1—1500

1993年10月北京第1版 1993年10月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0894-7/TE·836

定价: 17.00元

译者序

随着科学技术和国民经济的发展,流体诱发的结构振动问题越来越受到人们的重视。目前,在实际中存在着大量的流体诱发振动问题,其中航天、化工、能源、建筑、动力等领域尤其如此。而这些问题中的一大类属于圆柱结构的流体诱发振动。S.S.Chen博士所著的《圆柱结构的流体诱发振动》一书,对工程中最常见的圆柱结构的流体诱发振动问题做了全面系统的论述。我们认为这是一本学术水平和应用价值都较高的专著,愿意把它介绍给我国的读者。

本书的内容非常丰富,书中对各种圆柱结构(单圆柱体、双圆柱体、圆柱系、圆柱壳体、输流管道)在静止流体和流动流体中的振动特性进行了详细的讨论,特别是对圆柱结构的动力不稳定性做了深入的探讨。本书所引用的材料是美国阿肯纳国家实验室在这方面的最新研究成果,而且本书还对前人在这方面的工作及成果做了总结和介绍。可以说本书的内容代表了当代国际上在这个领域的研究水平。书中的大量图表和研究成果可供我国学者直接利用和参考,其研究方法也值得我国学者学习和借鉴。

本书的前言,第1~5章由张希农翻译;冯振宇翻译了第6~11章和附录。全书由张景绘教授审校。

由于我们学识有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

译者

目 录

前言	(1)
术语表	(2)
第1章 绪论	(6)
1.1 流体诱发振动问题的例子	(6)
1.2 无量纲数	(8)
1.3 线性化流体力分量	(10)
1.4 流体诱发振动机理	(12)
参考文献	(15)
第2章 静止流体中的单圆柱体	(18)
2.1 引言	(18)
2.2 一个简单的例子——无限理想流体中单圆柱体的振动	(18)
2.3 壁面附近的圆柱体	(20)
2.4 可压缩无粘性流体环域中的圆柱体	(20)
2.5 无限可压缩无粘性流体中的圆柱体	(24)
2.6 不可压缩粘性流体同心圆环域中的圆柱体	(27)
2.7 不可压缩粘性流体偏心圆环域中的圆柱体	(31)
2.8 同心环域内两相流中的圆柱体	(32)
2.9 流体中两端支承的圆柱体的自由振动	(33)
2.10 无限流体中圆柱体振动的非线性影响	(34)
2.11 三维流场对在流体中振动的圆柱体的影响	(35)
2.12 有限长粘性圆环域中的圆柱体	(36)
2.13 应用举例	(38)
2.14 结束语	(40)
参考文献	(40)
第3章 静止流体中的多圆柱体	(42)
3.1 引言	(42)
3.2 一个简单的例子——无限理想流体中两平行圆柱体的振动	(42)
3.2.1 运动方程	(42)
3.2.2 自由振动	(44)
3.3 基于二维势流理论在流体中振动圆柱系的附加质量矩阵	(46)
3.3.1 公式和解	(46)
3.3.2 互易关系	(49)
3.3.3 坐标变换	(51)
3.3.4 圆柱系的复合运动	(52)
3.3.5 数值例子	(54)
3.4 理想流体中的圆柱系动力学	(56)
3.4.1 运动方程	(56)

3.4.2 自由振动	(56)
3.4.3 受迫振动	(59)
3.5 一组相同的连续圆柱体在流体中振动的固有频率	(62)
3.5.1 一个等跨多支承圆柱体的固有频率	(62)
3.5.2 流体中多支承圆柱系的固有频率	(64)
3.6 理想流体耦合的两同轴圆柱体	(65)
3.6.1 问题的提法	(65)
3.6.2 频率方程	(66)
3.7 粘性流体分离的两同轴圆柱体	(70)
3.7.1 附加质量矩阵和流体阻尼矩阵	(70)
3.7.2 两同轴管的振动	(72)
3.8 可压缩无粘性流体中圆柱系的附加质量和阻尼	(75)
3.9 不可压缩粘性流体中圆柱系的附加质量和阻尼	(78)
3.10 结束语	(79)
参考文献	(79)
第4章 装有流体的圆柱壳体	(82)
4.1 引言	(82)
4.2 圆柱壳体的自由振动	(82)
4.3 装有可压缩无粘性流体的圆柱壳体的自由振动	(84)
4.4 可压缩无粘流体耦合的两壳体的动力学	(88)
4.5 粘性流体耦合的两壳体	(94)
4.6 结束语	(100)
参考文献	(100)
第5章 输送流体的管道	(102)
5.1 引言	(102)
5.2 输送流体管道的汉密尔顿原理	(102)
5.3 输送流体的直管	(104)
5.3.1 运动方程	(104)
5.3.2 自由振动和稳定性分析	(109)
5.3.3 频率特性	(111)
5.3.4 稳定性边界	(116)
5.3.5 不同参数的影响	(118)
5.3.6 实验研究	(121)
5.4 输送流体的弯管	(127)
5.4.1 运动方程	(127)
5.4.2 面外振动和稳定性分析	(130)
5.4.3 面内振动与稳定性分析	(135)
5.5 输送流体的圆柱壳体	(137)
5.6 结束语	(138)
参考文献	(138)
第6章 轴向流动中的圆柱体	(143)
6.1 引言	(143)
6.2 轴向流动中圆柱体的运动方程	(143)

6.3	轴向流动中单圆柱体的分析	(148)
6.4	动力特性	(152)
6.5	近场流动噪声	(157)
6.6	圆柱体对近场流动噪声的响应	(161)
6.7	亚临界振动的经验公式	(163)
6.8	不同流动条件的影响	(165)
6.9	轴向流动中的圆柱系	(167)
6.9.1	轴向流动中圆柱系的运动方程	(167)
6.9.2	轴向流动中圆柱系的动力特性	(168)
6.10	泄漏流动诱发振动	(169)
6.11	结束语	(171)
参考文献		(172)
第7章 横向流动中的单圆柱体		(176)
7.1	引言	(176)
7.2	流动状态	(176)
7.3	斯特鲁哈数	(178)
7.4	稳态流体力系数	(181)
7.5	脉动流体力系数	(183)
7.6	高雷诺数	(186)
7.7	湍流激励	(189)
7.8	横向流动中的运动方程	(191)
7.9	横向流动中圆柱体的响应	(195)
7.10	锁定状态下响应的预测方法	(201)
7.10.1	顺流方向振动的锁定区域	(201)
7.10.2	横流方向振动的锁定区域	(203)
7.11	各种系统参数的影响	(205)
7.12	横向流动中圆柱壳体的响应	(208)
7.13	结束语	(209)
参考文献		(209)
第8章 横向流动中的圆柱系		(215)
8.1	引言	(215)
8.2	流动状态	(216)
8.3	旋涡脱落频率	(217)
8.4	压力分布与流动速度分布	(221)
8.5	流体激振力系数	(223)
8.6	流体诱发振动分析	(233)
8.7	圆柱系的响应	(235)
8.8	声共振	(239)
8.8.1	声波沿流体柱的传播	(239)
8.8.2	声共振判据	(242)
8.8.3	声共振的消除	(242)
8.9	结束语	(243)
参考文献		(243)

第9章 横向流动中的双圆柱体	(247)
6.1 引言	(247)
9.2 流体力分量	(247)
9.3 流动状态	(248)
9.3.1 并列排列的双圆柱体	(248)
9.3.2 前后排列的双圆柱体	(252)
9.3.3 交错排列的双圆柱体	(257)
9.4 流动流体中双圆柱体的响应	(259)
9.4.1 并列排列的双圆柱体	(261)
9.4.2 前后排列的双圆柱体	(264)
9.5 尾迹诱发颤振	(266)
9.5.1 下游圆柱体上的运动相关流体力	(267)
9.5.2 稳定性分析	(268)
9.6 干扰失稳	(270)
9.7 结束语	(272)
参考文献	(273)
第10章 横向流动中圆柱系的流体弹性不稳定性	(276)
10.1 引言	(276)
10.2 临界流动速度和系统参数的确定	(276)
10.3 稳定性的经验判据	(279)
10.4 数学模型	(280)
10.5 流体力系数	(282)
10.6 临界流动速度的预测	(288)
10.6.1 分析	(288)
10.6.2 两种不稳定机理	(292)
10.6.3 数值例子	(294)
10.6.4 理论结果与实验结果的比较	(297)
10.6.5 非线性响应	(300)
10.7 稳定性图	(301)
10.7.1 圆柱列	(303)
10.7.2 方阵 (90°)	(304)
10.7.3 旋转方阵 (45°)	(304)
10.7.4 三角阵 (30°)	(304)
10.7.5 旋转三角阵 (60°)	(305)
10.8 各种参数对动力不稳定性的影响	(306)
10.8.1 失谐	(306)
10.8.2 上游湍流	(307)
10.8.3 非均匀流动分布	(307)
10.8.4 管道位置	(307)
10.8.5 两相流动	(308)
10.9 结束语	(308)
参考文献	(308)
第11章 设计考虑	(313)

11.1	引言	(313)
11.2	流体诱发振动的评定	(313)
11.3	设计分析	(315)
11.3.1	固有频率、振型和模态阻尼比	(315)
11.3.2	输送流体的管道	(315)
11.3.3	轴向流动中的圆柱体	(316)
11.3.4	横向流动中的单圆柱体	(316)
11.3.5	圆柱系	(316)
11.4	流体诱发振动的比例模化	(316)
11.5	消除振动的方法	(317)
11.6	结束语	(319)
参考文献		(319)
附录A 线性阻尼系统的振动		(321)
A.1	正则化模态	(321)
A.2	具有正则化模态系统的受迫振动	(322)
A.3	具有非正则化模态系统的受迫振动	(322)
附录B 一般流体方程		(324)
B.1	不可压缩流体	(324)
B.2	线性可压缩流体	(325)
B.3	线性不可压缩流体方程	(326)
B.4	线性可压缩无粘流体	(326)
附录C 特征方程、特征函数和伴随特征函数		(327)
索引		(331)
(332)		
(333)		
(334)		
(335)		
(336)		
(337)		
(338)		
(339)		
(340)		
(341)		
(342)		
(343)		
(344)		
(345)		
(346)		
(347)		
(348)		
(349)		
(350)		
(351)		
(352)		
(353)		
(354)		
(355)		
(356)		
(357)		
(358)		
(359)		
(360)		
(361)		
(362)		
(363)		
(364)		
(365)		
(366)		
(367)		
(368)		
(369)		
(370)		
(371)		
(372)		
(373)		
(374)		
(375)		
(376)		
(377)		
(378)		
(379)		
(380)		
(381)		
(382)		
(383)		
(384)		
(385)		
(386)		
(387)		
(388)		
(389)		
(390)		
(391)		
(392)		
(393)		
(394)		
(395)		
(396)		
(397)		
(398)		
(399)		
(400)		
(401)		
(402)		
(403)		
(404)		
(405)		
(406)		
(407)		
(408)		
(409)		
(410)		
(411)		
(412)		
(413)		
(414)		
(415)		
(416)		
(417)		
(418)		
(419)		
(420)		
(421)		
(422)		
(423)		
(424)		
(425)		
(426)		
(427)		
(428)		
(429)		
(430)		
(431)		
(432)		
(433)		
(434)		
(435)		
(436)		
(437)		
(438)		
(439)		
(440)		
(441)		
(442)		
(443)		
(444)		
(445)		
(446)		
(447)		
(448)		
(449)		
(450)		
(451)		
(452)		
(453)		
(454)		
(455)		
(456)		
(457)		
(458)		
(459)		
(460)		
(461)		
(462)		
(463)		
(464)		
(465)		
(466)		
(467)		
(468)		
(469)		
(470)		
(471)		
(472)		
(473)		
(474)		
(475)		
(476)		
(477)		
(478)		
(479)		
(480)		
(481)		
(482)		
(483)		
(484)		
(485)		
(486)		
(487)		
(488)		
(489)		
(490)		
(491)		
(492)		
(493)		
(494)		
(495)		
(496)		
(497)		
(498)		
(499)		
(500)		
(501)		
(502)		
(503)		
(504)		
(505)		
(506)		
(507)		
(508)		
(509)		
(510)		
(511)		
(512)		
(513)		
(514)		
(515)		
(516)		
(517)		
(518)		
(519)		
(520)		
(521)		
(522)		
(523)		
(524)		
(525)		
(526)		
(527)		
(528)		
(529)		
(530)		
(531)		
(532)		
(533)		
(534)		
(535)		
(536)		
(537)		
(538)		
(539)		
(540)		
(541)		
(542)		
(543)		
(544)		
(545)		
(546)		
(547)		
(548)		
(549)		
(550)		
(551)		
(552)		
(553)		
(554)		
(555)		
(556)		
(557)		
(558)		
(559)		
(560)		
(561)		
(562)		
(563)		
(564)		
(565)		
(566)		
(567)		
(568)		
(569)		
(570)		
(571)		
(572)		
(573)		
(574)		
(575)		
(576)		
(577)		
(578)		
(579)		
(580)		
(581)		
(582)		
(583)		
(584)		
(585)		
(586)		
(587)		
(588)		
(589)		
(590)		
(591)		
(592)		
(593)		
(594)		
(595)		
(596)		
(597)		
(598)		
(599)		
(600)		
(601)		
(602)		
(603)		
(604)		
(605)		
(606)		
(607)		
(608)		
(609)		
(610)		
(611)		
(612)		
(613)		
(614)		
(615)		
(616)		
(617)		
(618)		
(619)		
(620)		
(621)		
(622)		
(623)		
(624)		
(625)		
(626)		
(627)		
(628)		
(629)		
(630)		
(631)		
(632)		
(633)		
(634)		
(635)		
(636)		
(637)		
(638)		
(639)		
(640)		
(641)		
(642)		
(643)		
(644)		
(645)		
(646)		
(647)		
(648)		
(649)		
(650)		
(651)		
(652)		
(653)		
(654)		
(655)		
(656)		
(657)		
(658)		
(659)		
(660)		
(661)		
(662)		
(663)		
(664)		
(665)		
(666)		
(667)		
(668)		
(669)		
(670)		
(671)		
(672)		
(673)		
(674)		
(675)		
(676)		
(677)		
(678)		
(679)		
(680)		
(681)		
(682)		
(683)		
(684)		
(685)		
(686)		
(687)		
(688)		
(689)		
(690)		
(691)		
(692)		
(693)		
(694)		
(695)		
(696)		
(697)		
(698)		
(699)		
(700)		
(701)		
(702)		
(703)		
(704)		
(705)		
(706)		
(707)		
(708)		
(709)		
(710)		
(711)		
(712)		
(713)		
(714)		
(715)		
(716)		
(717)		
(718)		
(719)		
(720)		
(721)		
(722)		
(723)		
(724)		
(725)		
(726)		
(727)		
(728)		
(729)		
(730)		
(731)		
(732)		
(733)		
(734)		
(735)		
(736)		
(737)		
(738)		
(739)		
(740)		
(741)		
(742)		
(743)		
(744)		
(745)		
(746)		
(747)		
(748)		
(749)		
(750)		
(751)		
(752)		
(753)		
(754)		
(755)		
(756)		
(757)		
(758)		
(759)		
(760)		
(761)		
(762)		
(763)		
(764)		
(765)		
(766)		
(767)		
(768)		
(769)		
(770)		
(771)		
(772)		
(773)		
(774)		
(775)		

前言

目前,对流动流体中圆柱体振动特性的研究已取得了重大进展,其中包括对流体力、阻尼、稳定性边界以及一般结构响应进行分析和实验技术方面的发展。本书介绍了在静止流体、轴向流动、横向流动中的圆柱体的流体诱发振动以及对圆柱体组成的各种系统部件在设计估算过程中的分析方法和试验数据的应用。

全书内容分成五个方面:(1)绪论:第1章评述了圆柱体的流体诱发振动,包括流体诱发振动的例子、各种流体力分量、无量纲参数以及不同的激振机理。所述一般原则都可适用于不同的流动状态。(2)静止流体:第2、3、4章讨论了流体惯性和流体阻尼。各种流动理论在不同场合的应用,其主要结果是描述了流体对结构响应影响的特征,重点是对孤立圆柱体和圆柱壳体的讨论。(3)轴向流动:轴向流动能够引起亚临界振动和不稳定。第5章概述了内部流动的研究成果,而第6章讨论了外部流动。对理论结果和实验数据进行了探讨。(4)横向流动:对于横向流动,在不同条件下,不同的激振机理起主导作用。激振机理包括湍流抖振、声共振、旋涡激励和动力不稳定性。第8、9、10章分别介绍了适合于单圆柱体、双圆柱体和圆柱系的激振机理。(5)设计考虑:最后一章叙述了一般方法在系统部件设计中的应用,并介绍了避免有害振动的各种技术。此外,还讨论了适用于本学科的设计指南。

S.S.Chen

阿肯纳 伊利诺伊

术 语 表

a	振动振幅
c	声速
c_p	相速度
$[C]$	阻尼矩阵
$C_D(C_L)$	稳态阻(升)力系数
$C_{Dj}(C_{Lj})$	第 j 个圆柱体稳态阻(升)力系数
$C_D(C_L)$	周期脉动阻(升)力系数
$C_D(C_L)$	均方根脉动阻(升)力系数
$C_{Dj}(C_{Lj})$	第 j 个圆柱体的周期脉动阻(升)力系数
C_m	附加质量系数
C_N, C_T	阻力系数
C_S, C_{Sj}, C_{S_T}	结构的粘性阻尼系数
C_v, C_{v_j}	粘性阻尼系数
D	圆柱体直径($=2R$)
D_n	水力直径
D_0	外圆直径($=2R_0$)
E	弹性模量
E_j	壳体 j 的弹性模量
E_2, I_2, EI	圆柱体的抗弯刚度
f	振动频率
f_f	流体中的固有频率
f_{fn}	流体中第 n 阶模态的固有频率
f_s	旋涡脱落频率
f_v	真空中的固有频率
f_{vj}	真空中第 j 个圆柱体的固有频率
f_{vn}	真空中第 n 阶模态的固有频率
g	流体力分量
g_j	第 j 个圆柱体 x 方向的流体力分量
g'_j	第 j 个圆柱体 x 方向的脉动流体力分量
g_{S_T}, g_{S_j}	单位长度上的力
G	广义力或间隙
h	壳体厚度
h_j	第 j 个圆柱体 y 方向的流体力分量或第 j 个壳体的壁厚
h'_j	第 j 个圆柱体 y 方向的脉动流体力分量
i	$\sqrt{-1}$
I, I_j	惯性矩
k	波数($=\omega/c$)
k_f	流体刚度
k_s	弹簧常数
k_{sj}	圆柱体 j 的弹簧常数
K	流体的体积弹性模量或周期支承圆柱体的跨数

K	柯莱根-卡彭特参数
$[K]$	刚度矩阵
l	圆柱体长度或轴向波长
L	特征长度
m	单位长度的圆柱体质量
m'	$= m + m_a$
m_a	附加质量
m_j	圆柱体 j 的单位长度的质量
m_p	$j=1 \sim N$ 时等于 m_j , $p=N+1 \sim 2N$ 时等于 m_{p-N}
$[M]$	质量矩阵
M_a	马赫数
M_a	被排开的流体质量或一个管道内的流体质量
M_j	圆柱体 j 单位长度所排开的流体质量
M_k	运动马赫数 ($= \omega D / C$)
N	一个排列中圆柱体的数目
p	流体压力
P	间距
$\{Q\}$	广义坐标
r, θ, z	柱坐标
$\vec{r}$	位置向量
R	圆柱体的半径 ($= D/2$)、弯管的半径, 或圆柱壳体的半径
R_j	圆柱体 j 或壳体 j 的半径
Re	雷诺数
Rk	运动雷诺数 ($= \omega D^2 / \nu$)
Ro	外圆半径
St	斯特鲁哈数
t	时间
T	周期, 轴向拉力, 横向间距
TI	湍流度
u	轴向的圆柱体位移或壳体位移
$\vec{u}$	速度向量
u'	脉动速度分量
u_j	第 j 个圆柱体 x 方向的位移或第 j 个壳体的轴向位移
u_p	当 $P=1 \sim N$ 时等于 u_j , 当 $P=N+1 \sim 2N$ 时等于 u_{p-N}
U	流动速度, 在管阵中或者是自由流动速度, 或者是间隙流动速度
$\bar{U}$	平均流动速度
$\vec{U}$	流动速度向量 ($= u_r \vec{e}_r, u_\theta \vec{e}_\theta, u_z \vec{e}_z$)
U_{rc}	临界流动速度
U_i	间隙流动速度 [$= U / (1 - D/T)$]
U_r	折合流动速度 ($= U / fD$ 或 $\bar{U} / fD$)
v	$= \left(\frac{Md}{EI} \right)^{0.5} U l, \left(\frac{m_a}{EI} \right)^{0.5} U l, \left(\frac{Md}{EI} \right)^{0.5} R U,$ 或壳体的切向位移
v_j	第 j 个圆柱体 y 方向的位移或第 j 个壳体的周向位移

v_{cr}	无量纲临界流动速度
V	体积
w	壳体的径向位移
w_j	第 j 个壳体的径向位移
x, y, z	笛卡尔坐标
αe	孔隙度
$\alpha_{jk}, \beta_{jk}, \delta_{jk}, \tau_{jk}$	附加质量系数
$\alpha'_{jk}, \beta'_{jk}, \delta'_{jk}, \tau'_{jk}$	流体阻尼系数
$\alpha''_{jk}, \beta''_{jk}, \delta''_{jk}, \tau''_{jk}$	流体刚度系数
$\bar{\alpha}_{jk}, \bar{\beta}_{jk}, \bar{\delta}_{jk}, \bar{\tau}_{jk}$	附加质量矩阵
$\bar{\alpha}'_{jk}, \bar{\beta}'_{jk}, \bar{\delta}'_{jk}, \bar{\tau}'_{jk}$	流体阻尼矩阵
$\bar{\alpha}''_{jk}, \bar{\beta}''_{jk}, \bar{\delta}''_{jk}, \bar{\tau}''_{jk}$	流体刚度系数
β	$= M_s / (m + M_s)$
γ_{pq}	附加质量矩阵
δ_s	斯科拉顿数 ($= 2\pi m \xi / \rho D^2$, 质量-阻尼参数)
ζ	阻尼比
$\zeta_{f' \zeta_{fj}}$	流体中的阻尼比或流体阻尼
ζ_n	第 n 阶模态的模式阻尼比
ζ_v, ζ_{vj}	真空中的阻尼比
ζ_{fpn}	流体中第 p 阶耦合模态的阻尼比
μ	绝对粘性系数
μ_p	附加质量矩阵 γ_{pq} 的特征值
μ_s	结构阻尼系数
ν	运动粘性系数或泊松比
ν_s	无量纲传播常数
ν_j	第 j 个壳体的泊松比
ρ	流体密度
ρ_s	有效密度
ρ_j	壳体 j 的密度
ρ_s	结构密度
x	复波数
τ	无量纲轴向拉力
ω	圆频率 ($= 2\pi f$)
ω_f	流体中的固有圆频率 ($= 2\pi f_f$)
ω_{fj}	第 j 个圆柱体的非耦合模态的固有圆频率
ω_{fn}	流体中第 n 阶模态的固有圆频率
ω_{fpn}	流体中耦合模态的固有圆频率
ω_v	真空中的固有圆频率
ω_{vj}	真空中第 j 个圆柱体的固有圆频率 ($= 2\pi f_{vj}$)
ω_{vn}	真空中第 n 阶模态的固有圆频率
$\omega_{vpn}, \omega_{vjn}$	真空中第 p 个圆柱体或第 j 个圆柱体的第 n 阶模态的固有圆频率
$\Omega_D(\Omega_L)$	阻(升)力的圆频率
$\Omega_{Dj}(\Omega_{Lj})$	阻(升)力方向参数的圆频率
Ω_n	第 n 阶模态的无量纲固有频率

第1章 绪 论

流体诱发振动指的是与全部浸入流体或输送流动流体结构的响应有关的各种物理现象。这个术语囊括了流体动力与结构中的惯性力、阻尼力以及弹性力之间产生相互作用的各种情况。因此,对这些现象的研究涉及到了三个学科:(1) 结构力学;(2) 机械振动;(3) 流体动力学。

自古以来,人们早已知道,在流动流体中的圆柱体会产生振动。在古希腊,人们就知道,一根导线会象风神的音乐一样,以它的固有频率随着旋涡脱落而振动。然而,直到一个世纪以前,对于一个给定直径的圆柱体,才由斯特鲁哈(Strouhal)建立了旋涡脱落频率和流动速度之间的关系式。在此之后,对流体诱发振动问题才进行了系统的研究。这个领域的早期研究,Zdravkovich (1985) 和Goldstein (1965) 做了综述。

目前,在许多领域中都存在着流体诱发的结构振动问题,包括航天工业、发电和送变电工程(透平叶片、热交换器管束、核反应堆部件)、建筑工程(桥梁、建筑物、烟囱)以及海底技术等。这些问题的发生,一般源于不适当的设计。在大多数情况下,用以特定目标所设计的机械部件或结构部件在没有适当考虑流场的影响时,就会产生振动问题。即使在设计阶段注意到了流体诱发振动问题,而对于如何消除这种有害的振动,工程师们有不同的选择,令人遗憾的是,在许多情况下,问题出在部件开始运行之后,要“解决”它通常代价昂贵。

流体诱发振动所包括的现象是复杂的和多样的,有核燃料装置的亚临界振动、输电线的驰振、输送流体管道的颤振、热交换器管束的旋动(Whirling)等。近年来,对流体诱发振动已进行了广泛的研究,这是因为:首先,随着高强度材料的使用,设计的结构越来越细长,从而导致结构对振动更敏感;第二,先进的核电反应堆的发展,要求高速流体流过部件,这样就会引起有害的振动;第三,结构和流体的动力相互作用在工程力学中是引人入胜的问题之一,许多以这个学科为目标的会议和发表的众多文献,包括评论与著作,证明了对这项课题的研究还在增加(参看本章末的附加参考文献)。

从广义上说,对处于流动流体中的结构、内部有流动流体的结构,以及承受外部流动的结构,流体诱发振动这个学科包括了与这些结构的动态响应有关的全部课题。但在本书中,讨论将主要集中在圆柱结构上,着重讨论核反应堆系统部件。然而,分析的一般方法可应用于具有其他几何形状的结构部件。

1.1 流体诱发振动问题的例子

核能反应堆工业有流体诱发振动问题由来已久。表1.1是一个现场事故的记录表。表中标出了很多不同的反应堆部件,所列情况都是振动导致了部件失效,使电站停产或降低功率运行。

重要的是直到今天流体诱发振动问题仍然继续存在,这可能是由于两个原因造成的:

(1) 以前,在核电站设计中,不象反应堆物理学和热力学那样,把流体诱发振动作为整体设计的一部分。在设计中,如果对反应堆物理学和热力学这两个主要领域缺乏考虑,则可

能意味着电站完全不能工作。而诸如在流体诱发振动这样的辅助领域内设计不当,则仅仅意味着电站的可靠运行是短命的。

(2) 由于受技术发展水平的限制,在许多情况下,往往不能以令人满意的准确性来预测流体诱发振动问题。通常,由于复杂的几何特性和高雷诺(Reynolds)数,预测流体力分量是极为困难的。因此,若没有广泛的试验,预测一个特定部件的可靠性是困难的。

现在,我们来考察两个典型的例子——表1.1中的第一个和最后一个。第一个例子与一个液体金属冷却增殖反应堆有关。这个反应堆属于Enrico Fermi原子能发电站(Smith等人1964; Shin和Wambsganss 1977),它有三个平行的中间热交换器,蒸汽发生器是垂直的单壁管道直通型热交换器,管道内为水和蒸汽,壳体上为钠。在试运行试验中,运行了13天之后,有6根管道失效,全部发生在钠进出口前面。为了研究工作的需要,系统又持续运行了42天。在持续运行之后,对

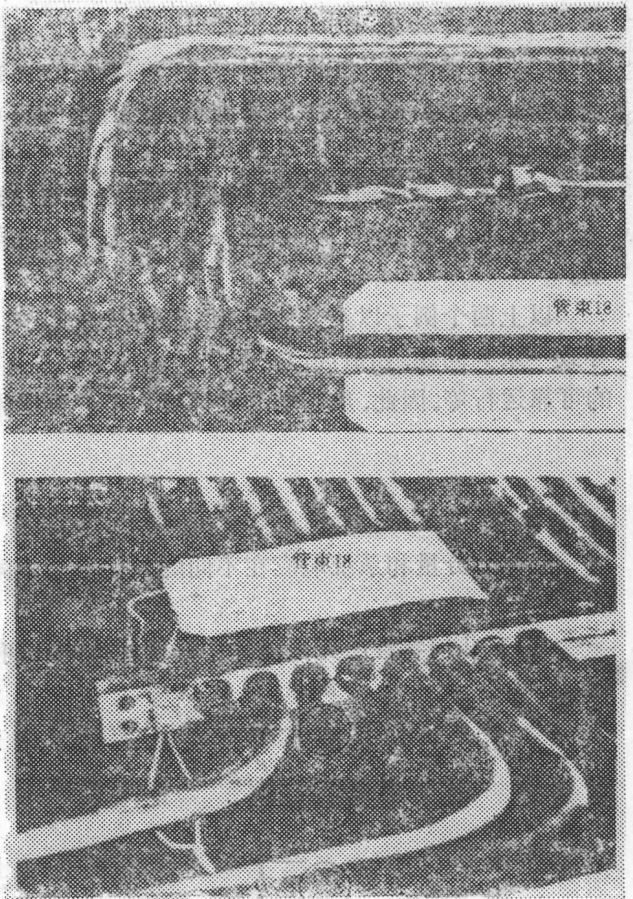


图1-1 振动损坏的蒸汽发生器管束
(Shin和Wambsganss 1977)

表1.1 有流体诱发振动问题的美国能源反应堆的现场记录

年 份	反应堆类型	部件与结构
1962	液体金属燃料增殖反应堆(LMFBR)	蒸汽发生器管道
1962~63	沸水反应堆(BWR)	导管螺栓
1964~65	沸水反应堆	芯部热防护罩
1965以前	加压冷却反应堆(PWR)	控制棒叶片
1968~72	加压冷却反应堆	热防护罩
1969	沸水反应堆	喷射泵装置
1970~77	加压冷却反应堆	蒸汽发生器管道与反振动棒
1971~75	加压冷却反应堆	燃料棒-拐角燃料装置
1972	加压冷却反应堆	芯内测试喷管与导管
1972	沸水反应堆	喷射泵固定装置
1972~77	沸水反应堆	给水泵装置
1973	加压冷却反应堆	芯部圆筒支承
1974	沸水反应堆	喷射泵限制器
1974~75	沸水反应堆	芯内测试管与燃料通道
1976	加压冷却反应堆	蒸汽发生器管道
1980~82	加压冷却反应堆	燃料栓
1981~84	加压冷却反应堆	蒸汽发生器管道——预热段

装置进行检查,发现另外39根管道泄漏。图1-1显示了由于振动引起的管道之间的相互碰撞和管道与支承碰撞产生的磨损而造成的典型的管道损坏。这种振动是由钠流动诱发的。

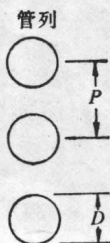
最近,一蒸汽发生器有效满负荷运行了仅3000小时之后就发生了泄漏,对此已引起多方重视 (Reisch 1982; Christopher 1982)。在瑞典的Ringhals 3号反应堆中发现了几十根蒸汽发生器管道有磨损,其厚度减小到了原来的10%。这种泄漏发出了一个信号,类似设计的一系列其他反应堆电站将开始进入一个多事故的阶段。问题的根源是清楚的,就是流体诱发振动。

以上两个例子以及其他引人注意的失败例子 (Paidoussis 1980) 表明,流体诱发振动会导致一系列问题,如造成经济损失、增加维修工作量,特别是涉及到反应堆的安全性以及电站的可靠运行等。因此,反应堆的设计者们不会再把流体诱发振动作为一个辅助设计来考虑了。

1.2 无量纲数

流体力分量和系统响应在不同的条件下与不同的系统参数有关。本节讨论一些经常使用的参数。

(1) 几何特性: 无限流体中一圆柱体的几何特性可以由它的长度与直径比来描述



$$\frac{l}{D} = \frac{\text{长度}}{\text{直径}} \quad (1.1)$$

在有限区域中,如果一圆柱体被包围在一个大的圆形壳体中,则需要的第二个无量纲参数是直径比,即

$$\frac{D_0}{D} = \frac{\text{壳体直径}}{\text{圆柱体直径}} \quad (1.2)$$

在一组圆柱体中,圆柱体的排列形式是很重要的。例如,不同的圆柱体排列 (见图1-2) 由间距与直径比来描述

$$\frac{P}{D} = \frac{\text{间距}}{\text{直径}} \quad (1.3)$$

此外,还应考虑圆柱体的表面条件。如装有翅片的管道,以表面粗糙度与圆柱体直径之比来表示。

(2) 质量比: 圆柱体质量与除以

$\frac{\pi}{4}$ 的被排开的流体质量之比是

$$\frac{m}{\rho D^2} = \frac{\text{圆柱体单位长度的质量}}{\text{流体密度} \times \text{圆柱体直径}^2} \quad (1.4)$$

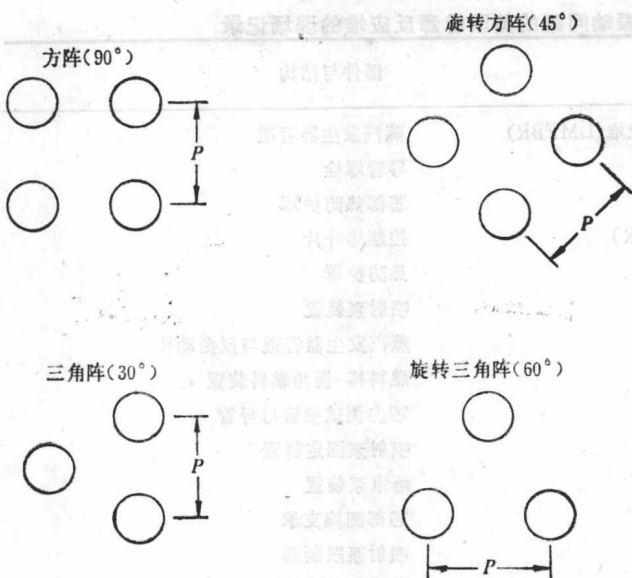


图1-2 管道排列