

● 林宗虎 李永光 卢家才 谢正武 苏新军 著

气液两相流旋涡脱落 特性及工程应用



化学工业出版社

气液两相流漩涡脱落特性 及工程应用

林宗虎 李永光 卢家才 谢正武 苏新军 著

化学工业出版社
·北 京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

气液两相流旋涡脱落特性及工程应用/林宗虎等著.
北京: 化学工业出版社, 2001.7
ISBN 7-5025-3277-3

I. 气… II. 林… III. 气体-液体流动-涡旋脱落-研究 IV. 0359

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 037498 号

气液两相流旋涡脱落特性及工程应用

林宗虎 李永光 卢家才 谢正武 苏新军 著

责任编辑: 陈 丽 路金辉

责任校对: 陈 静

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 9 字数 244 千字
2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—3000

ISBN 7-5025-3277-3/TQ·1374

定 价: 27.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

当流体横向流过柱体时，在一定条件下会引起柱体垂直于流动方向的振动。引起振动的原因众多，有因柱体后部发生周期性交替旋涡脱落而诱发的，也有因来流紊流度过大或来流压力不稳定造成的，且这些诱发因素往往综合产生。但发生这类振动的主要原因常是因柱体后部的周期性交替旋涡脱落引起的。

因单相流体绕流柱体诱发振动而导致工程设备事故的事例为数不少，因此对于单相流体绕流柱体并在其后部形成交替旋涡的机理已进行了长期的研究，发表了一系列论著并取得许多成果。

当气液两相流体绕流柱体时，在一定条件下也会在柱体后部产生气液两相旋涡的周期性交替脱落并诱发柱体振动。在存在气液两相流体流动的各种工程的设计不良的相变换热设备中，也时而因此导致设备泄漏或损坏事故。由于气液两相流体绕流柱体（管子）现象远比单相流体时复杂，研究难度较大，因此对于多相流体力学中这一国际前沿课题，国外也只在十余年前才开始研究。

作者等对此项目的研究工作始于 1991 年，至今已进行了 10 年。该课题由林宗虎提出并组织、指导其历届博士研究生李永光、卢家才、谢正武和苏新军共同完成的。本专著内容除了必须引述的有关单相流体绕流柱体时旋涡脱落现象的研究结果及气液两相流主要参数和流型外，主要为作者等在此 10 年中获得的第一手研究成果。其中，率先在国内外发表的主要成果有：气液两相斯特罗哈数的通用计算式；气液两相流体横掠单柱体的两相涡街稳定性研究；气液两相流体横掠多种单柱体（包括方形柱体、三角形柱体等）、顺列管束或错列管束时作用在柱体或管子表面的压力分布、脉动升力、脉动阻力及其影响因素研究；单柱体及标准排列管束会否发生两相旋涡脱落诱发振动的判别方法等。此外，在两相涡街中含气率

分布测定方法、两相脉动力测定方法以及两相涡街数值计算方法等方面也均有创新。

本专著中各章内容均由林宗虎及其研究生一起完成的，其中第一章、第二章和第八章由我执笔，第三章和第四章由李永光博士和卢家才博士共同执笔，第五章和第六章由谢正武博士执笔，第七章由苏新军博士执笔。全书由林宗虎统稿和审定。

在得出这些研究成果时，作者等得到了国家自然科学基金会（编号 59076262 和 19572052）、国家重点基础研究发展规划项目（编号 G 1999022308）的及时资助。此外还得到陕西省自然科学基金会、上海市教育发展基金会曙光计划和上海市自然科学基金会的资助。作者等在此深表谢意。

如果本专著的出版能对推动和发展多相流体力学理论及其工程应用有所作用，则将是作者等的最大欣慰。

西安交通大学教授

中国工程院院士

林宗虎

2001.1

内 容 提 要

本书介绍了作者 10 余年在气液两相流体绕流柱体时产生交替旋涡诱发振动的机理方面的研究成果，主要是作者的第一手资料。全书内容包括：气液两相流的主要参数和流型、气液两相横掠单根柱体的旋涡脱落特性、气液两相流横掠单根柱体时的物理模型和数值计算、气体两相流横掠顺列管束时的旋涡脱落特性、气液两相流横掠顺列管束时的物理模型数值计算、气液两相流横掠错列管束时的旋涡脱落特性及应用。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 研究流体旋涡脱落的意义	1
第二节 单相流体横掠柱体时的旋涡脱落特性研究进展	3
第三节 气液两相流体横掠柱体时的旋涡脱落特性研究内容	37
参考文献	39
第二章 气液两相流的主要参数和流型	43
第一节 气液两相流的主要参数	43
第二节 气液两相流体的流型和流型图	47
参考文献	59
第三章 气液两相流横掠单根柱体的旋涡脱落特性	60
第一节 研究目的和概况	60
第二节 单柱体的气液两相斯特罗哈数	62
第三节 气液两相流体横掠单柱体的两相涡街结构及稳定性	84
第四节 气液两相流横掠单根圆柱时的表面周向压力分布	91
第五节 气液两相流横掠单根柱体时的流体作用力	107
参考文献	127
第四章 气液两相流横掠单根柱体时的物理模型和数值计算	130
第一节 研究目的和概况	130
第二节 气液两相流体横掠柱体时的漂移流模型和数值计算	131
第三节 气液两相流体横掠柱体时的双流体模型和数值计算	149
参考文献	177
第五章 气液两相流横掠顺列管束时的旋涡脱落特性	179
第一节 研究目的和概况	179
第二节 实验设备、测量方法及数据处理	180
第三节 顺列管束的两相斯特罗哈数	182
第四节 顺列管束表面周向压力分布	188
第五节 顺列管束上的两相流体作用力	206

参考文献	226
第六章 气液两相流横掠顺列管束时的物理模型和数值计算	228
第一节 气液两相流体横掠顺列管束时的物理模型	228
第二节 气液两相流体横掠顺列管束时的数值计算	229
参考文献	240
第七章 气液两相流横掠错列管束时的旋涡脱落特性	241
第一节 研究目的及概况	241
第二节 实验设备、测量方法及数据处理	242
第三节 错列管束的两相斯特罗哈数	245
第四节 错列管束表面周向压力分布	251
第五节 错列管束上的两相流体作用力	256
参考文献	261
第八章 气液两相流旋涡脱落特性的工程应用	263
第一节 工程中应用的各种相变换热器	263
第二节 应用管束两相旋涡脱落特性防止相变换热器管束振动	271
第三节 应用柱体两相旋涡脱落特性防止插入式两相流测量仪表的 振动	274
第四节 应用柱体两相旋涡脱落特性发展气液两相涡街流量计	277
参考文献	280

第一章 绪 论

第一节 研究流体旋涡脱落的意义

流体横向流过物体的绕流现象在现实生活中是常见的，如风吹过建筑物，河水绕流过桥墩，航行中的飞机、疾驶的列车和汽车受到空气的绕流，海船受到海水的绕流等等。在工业设备中绕流现象更是经常发生，例如桥梁工程中风对桥梁的绕流，在动力和化工工程中，风对各种烟囱、锅炉房、化工反应塔和冷却塔的绕流等。特别是各种工程中应用的大量各式换热设备内存在着各种流体以多种多样的方式横向冲刷换热管束的绕流现象。此外，在海洋石油工程中，海面开采平台、钻杆、海底输油管道等都要受到海水的绕流。

当流体绕流非流线形物体（或称钝体）时，在一定流动工况下会发生物体后部的旋涡脱落现象，特别是在物体后部两侧交替产生周期性的旋涡脱落时，会诱发物体在与来流垂直的方向上产生周期性变化的流体作用力，从而使物体产生振动。

如果物体后的旋涡脱落频率与物体的固有频率一致，两者发生的共振将使物体产生大幅度振动，严重时将使物体损坏。即使不发生共振，流体使物体诱发的长期振动也会引起物体材料的疲劳损伤。因此，流体对物体的诱发振动将严重影响受流体绕流的工业设备的运行可靠性和安全性。当然，由于流体流动引起的物体振动现象除旋涡脱落原因外，还可能因流体自身湍流度或来流压力不稳定等因素造成。但其中最主要的和最普遍的原因是物体后部的周期性旋涡脱落。

流体诱发柱体振动的现象在工程中较为常见。如化学工业中高空架设的管道、输电系统中过江架设的大跨度电缆、高耸的烟囱、大型冷却塔、天线、电视塔、水塔、桥梁、海底通讯电缆、潜艇的

潜望镜,海洋石油开采平台以及海底输油管道等都存在流体诱发振动问题。特别是在各种换热设备中,发生流体诱发管束振动的事例更多。

因流体绕流而导致工程设备事故的实例不少,如美国塔可马海峡悬索桥因风力而破坏^[1];美国科罗拉多州架设天然气管道时因跨度过大而在一定风速下出现振幅达 1.5~1.8m 的振动;英国渡桥电站的冷却塔群中的三个塔在强风袭击下发生倒塌事故^[2];美国哈拉姆核动力装置、布鲁克黑文高通量辐射反应堆、钠冷试验堆等的回路热交换器管束振动;日本东海村核电站、加拿大道格拉斯角核电站、法国舒兹核电站、美国三哩岛核电站、意大利特里诺核电站、瑞典林哈尔斯-3 核电站等的蒸汽发生器管束振动^[3];英国林哈尔核电站和威尔法核电站的蒸汽发生器管子漏泄事故等^[3]均属此例。其中尤以换热器管束振动事故为多,根据文献 [3] 的极不完全统计,在 1953~1983 年间,国外发生的因流体绕流而致的管束振动事故就有 32 次,国内发生的也有 12 次。

此外,也曾发生过因流体绕流而致的天线塔架倒塌、变电所输电母线振动、烟囱倒塌,悬空输油管道断裂、潜艇潜望镜折断、化工塔振动、锅炉管式空气预热器振动和汽轮机冷凝器管振动等事故。在上述这些事故实例中,造成流体绕流诱发物体振动的原因常是复杂的和综合性的,但是在物体后部发生的流体旋涡脱落往往是一个重要因素。

因此研究流体绕流时的旋涡脱落特性对于一系列工程设备在设计和运行时避免发生流体诱发振动具有十分重要的意义。特别在现代工程中,设计师力求将设备设计得紧凑和轻巧,倾向于把材料利用到极限,因而研究旋涡脱落特性对于保证现代工业设备长期运行的可靠性与安全性具有特别重要的现实意义。此外,对流体绕流时旋涡脱落特性的研究,对于深化和发展流体力学中的旋涡流动理论具有重要的学术意义。

以上论及的均为单相流体,即气体或液体绕流物体时诱发的振动问题。随着工业技术的不断发展,各种工业设备的容量及尺寸越

来越趋向于大型化,设备中的流速增高,结构更加复杂。近10年来在存在相变的换热设备中也开始出现因气液两相流体横向冲刷柱体或柱体群而诱发柱体振动的事例。曾经有报道,某压水堆核电站的一台蒸汽发生器的蒸发管与管板连接处,因管外气液两相流体的绕流引起管子振动而造成连接处泄漏的事故^[4]。在其他相变换热器中,如设计不良均有可能发生气液两相流体诱发柱体振动现象。例如,在核电站的沸水反应堆中,燃料棒束通道间的流动,即为气液两相绕流流动,此时绕流流动特性的好坏对于反应堆的防振安全设计有重要指导意义。此外,在气液两相流测量中,当气液两相流体绕流插入式测量元件时也存在诱发测量元件振动问题。在气液两相流体诱发换热器管束振动时,会造成换热器压力损失增大、管子破裂、管子相互碰撞磨损和管子弯曲变形等工况;而在诱发测量元件振动时,则会因测量元件大幅振动而严重影响测量精度和测量元件的使用寿命。这些工程实际问题促使人们对旋涡脱落诱发物体振动的研究逐渐从单相流体流动向气液两相流动方向发展。

以上论述的是流体绕流物体诱发旋涡脱落现象对工业设备的危害性方面。另一方面,在人们掌握了旋涡脱落特性后,就可以应用其特性为工业技术服务。例如,现时用于测量单相流体流量的涡街流量计就是在掌握单相流体旋涡脱落特性后研制成功的一种较为新型的流量计。在对气液两相流体旋涡脱落特性进行系统研究并掌握其规律后,也可望开发出适用于气液两相流体流量等参数测量的新仪表。

第二节 单相流体横掠柱体时的旋涡脱落特性研究进展

对单相流体绕流物体并在其后部形成旋涡脱落现象的研究已有一百多年的历史。1878年斯特罗哈(Strouhal)研究弦线在风中振动发声时发现其振动频率和风速与弦线直径之比值成正比^[5]。1年后,兰利(Rayleigh)在观察风吹琴弦振动时,注意到弦的振动不是沿着风向,而主要发生在与风垂直的方向^[6]。1908年伯纳德(Be'nard)观察到并研究了单相流体流过钝物体后在物体后部形成

的周期性旋涡脱落现象^[7]。1912 年卡门 (Von Karman) 系统地研究了涡街的形成和稳定性等问题^[8], 使钝物体绕流研究上升到一个新的高度。

国际上对单相流体绕流物体诱发振动的大规模研究工作是在 20 世纪 50 年代开始的, 至今已发表了大量研究论文, 得出了一系列研究成果。但是, 由于单相流体横向冲刷柱体的旋涡脱落现象是流体流动和柱体结构两个系统相互作用的结果, 是一种复杂的分离流动, 受到诸如流体流动工况、紊流度及柱体形式、光洁度等许多因素的影响, 不少流动现象和机理仍未得到透彻认识, 因而单相流体绕流柱体的分离流动问题仍是流体力学中的一个重要研究领域。

单相流体绕流柱体造成柱体后旋涡脱落现象的主要研究成果有以下几个方面。

一、单相流体在柱体后的旋涡形成和脱落机理

研究表明, 在实际流体中, 流体流过物体的摩擦阻力主要发生在紧靠物体表面的一个称为边界层的流体薄层中。在平板边界层中, 紧贴物体的一层流体粘在物体表面上, 流速等于零。从这一层起, 流速逐渐增加。到边界层外边界上, 流速已增加到等于或接近来流速度。由于边界层内存在较大的速度梯度, 根据内摩擦定律, 存在较大的摩擦阻力。在边界层外面, 速度梯度很小, 可以忽略摩擦阻力。边界层的厚度是沿着流动方向逐渐增厚的, 因为边界层中流速因摩擦力而沿流向减小, 只有边界层厚度更大些, 其外边界上才能达到来流速度。

当流体流过曲面物体时, 例如圆柱体, 在圆柱表面上同样存在边界层, 但此时边界层外各处流速不像平板的情况那样都接近或等于来流速度, 而是接近或等于图 1-1 所示的流过各截面的流速 u_1 、 u_2 、 u_3 ……。因而边界层外边界上各点的流速应等于流体流过各截面的流速。为方便起见, 一般规定, 边界层外边界上各点的速度应与主流体流过该点的流速相差 1%。

在圆柱体等柱体上会发生一个重要的现象, 即边界层分离。在图 1-1 中, 设来流的速度为 u 。在前驻点 A 处, 流速等于零而压力

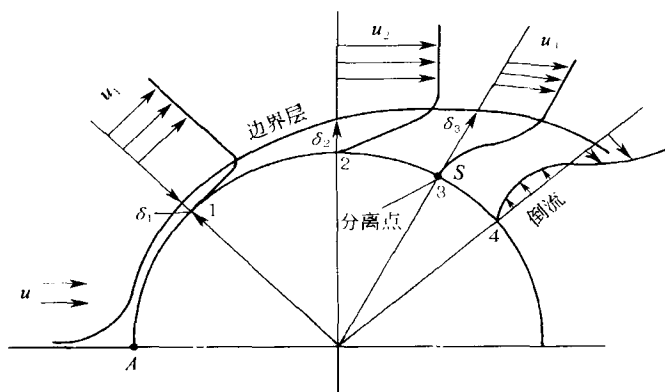


图 1-1 圆柱体表面边界层的分离 (δ 为边界层厚度)

最大。当流体流过圆柱体时，边界层外流体的速度在 2 点最大。根据能量守恒定律，2 点的压力最小。因之，沿圆柱体表面的流动可以分为两个区域。第一个区域在 2 点之前，在此区域中沿流动方向速度渐增而压力则逐渐减小，到 2 点时速度最大压力最小。第二个区域在 2 点以后，在此区域中沿流动方向速度渐减而压力逐渐增高。由于边界层很薄，边界层中的压力可认为等于边界层外边界上的流体压力，所以沿圆柱体表面的边界层中也具有和边界层外流体相同的压力分布规律。因此，过了 2 点后，边界层内流体质点除了受摩擦力作用外，还有与流动方向相反的压力差的作用。

边界层外的流体可近似认为是理想流体，因此没有能量损失。例如，在点 2 以后和点 1 相对称的点上，边界层外流体的流体速度和压力均能回复到和点 1 的相等。但是，在边界层内由于摩擦力作用，流体不断损失着动能。在点 3 以前，只有壁上的流速等于零。在点 3 以后，例如在点 4，由于边界层近壁处流体的动能消耗尽了，因而在后端高压作用下，除了壁上流体的流速等于零，近壁处的流体也发生停滞和倒流。边界层外流体由于没有动能损失，仍在向前流动，这样在此区域就形成流体的旋转运动，亦即形成旋涡，使流体不再贴着柱体表面流动，而是从柱体表面分离出去。柱

体后面形成的旋涡不断将有用的机械能耗费为无用的摩擦热，使旋涡区的压力降低，使之低于柱体前部的压力和旋涡区外面的压力。

通常将点 3 称为分离点 S ，因为在该点上除柱体表面上流体流速为零外，最贴近表面处的流体也开始停滞而倒流即将发生。

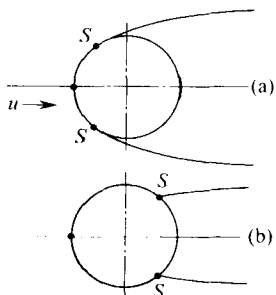


图 1-2 层流边界层与紊流边界层时的分离点位置

(a) 层流边界层时；

(b) 紊流边界层时

圆柱体上的边界层内的流态，根据雷诺数 Re 的不同可分为层流和紊流两种。 Re 数小时为层流边界层。当 Re 数增加到某值时，层流边界层会转变为紊流边界层。当边界层为层流时，圆柱体上的分离点离前驻点近些。当边界层为紊流时，由于紊流时流体质点的横向掺混使得贴近表面处的流体不易停滞，因而会使分离点向后推移，如图 1-2 所示。

二、单相流体绕流圆柱体的旋涡脱落特性

1. 旋涡脱落形式

圆柱体的边界层分离点和旋涡脱落特性与 Re 数关系密切。对不可压缩流体，光滑圆柱体的旋涡脱落形式随 Re 数（按圆柱体直径计算）的不同可有图 1-3 所示的几种式样^[8]。

由图可见，当 Re 数很低时（ $Re < 5$ ），流体贴着圆柱体流动，无分离，尾流中无旋涡。当 Re 数提高到 $(5 \sim 15) \leq Re < 40$ 时，紧贴圆柱体背后形成一对对称的稳定旋涡。当 Re 数继续提高旋涡开始拉长，一直到旋涡之一脱离圆柱体，随后另一个也脱离。这样就形成一个周期性的旋涡脱落过程，在尾流中呈现两列由交错排列的旋涡构成的涡街。在 $40 \leq Re < 150$ 时，边界层为层流，旋涡脱落为层流分离过程，因而涡街为层流涡街。到 Re 数等于 $150 \sim 300$ 时涡街就出现紊流状态。 Re 数从 300 到 3×10^5 范围内称为亚临界区，此时边界层仍为层流分离，而尾流已转变为紊流涡街。在 $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$ 范围内称超临界区，此时边界层已由层流转变为紊流

分离，分离点向后移动，旋涡脱落变成不规则且尾流宽度也因分离点后移而变窄。最后当 $Re \geq 3.5 \times 10^6$ 后，周期性旋涡脱落和紊流涡街又重新建立，这一 Re 数范围称为高超临界区。

2. 涡街的稳定条件

绕圆柱体流动产生涡街的特点是流体在圆柱体两侧，周期性地、交替地向下游释放旋涡，形成两列交错排列的旋转方向相反的涡街。由于涡的相互作用和流体的扰动。这样的涡街通常是不稳定的。卡门曾对涡街的稳定条件作了专门研究^[8]。他假定流体为理想流体，圆柱体无限长，各个旋涡都是垂直于流动方向的势涡，其环量均相等，且两列旋涡的旋转方向相反，旋涡外的流动均为势流。在这些假定下，利用平面势流的方法，经数学推导，发现只有当旋涡按图 1-4 所示方式排列，且两列旋涡的间距 h 和同列涡中相邻两涡的间距 l 之比 $h/l = 0.281$ 时，涡街才是稳定的，因此 h/l 值称为涡街稳定性特征参数。这种涡街有时也称为卡门涡街。实验证实，实际稳定涡街的 h/l 值与卡门的计算值非常接近。

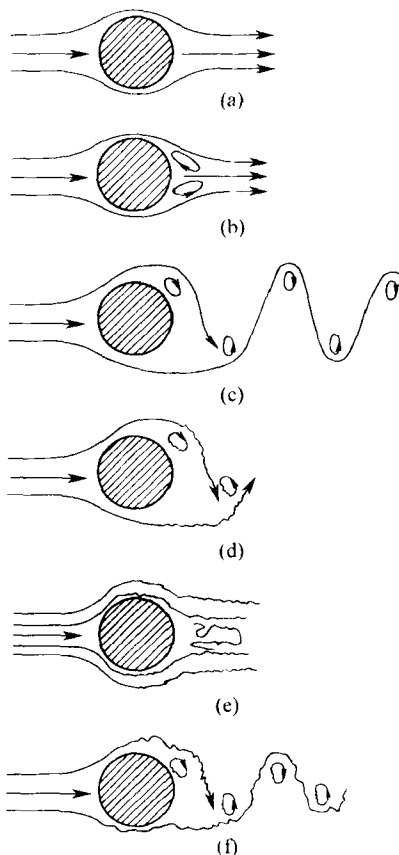


图 1-3 Re 数不同时圆柱体的旋涡脱落形式

- (a) $Re < 5$ ，无分离流动；(b) $(5 \sim 15) \leq Re < 40$ ，尾流中有 - 对稳定的旋涡；
- (c) $40 \leq Re < 150$ ，层流涡街；(d) $150 \leq Re < 300$ ，旋涡内部向紊流过渡；
- $300 \leq Re < 3 \times 10^5$ ，紊流涡街；(e) $3 \times 10^5 \leq Re < 3.5 \times 10^6$ ，层流边界层变为紊流分离，尾流变狭窄且不稳定；(f) $3.5 \times 10^6 \leq Re$ 重新建立紊流涡街

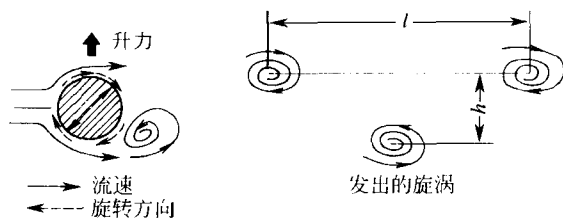


图 1-4 卡门涡街示意图

研究表明, 由于涡群的相互作用, 涡街除了以来流速度 u 向下游流动外, 又以一定流速流向柱体。因而涡街向下游流动的绝对速度小于来流速度 u , 具体数值由试验方法确定。

3. 斯特罗哈数

斯特罗哈数是一个表明旋涡脱落特性的相似准则数, 用符号 St 表示。 St 数与柱体形状和 Re 数有关, 其计算式为

$$St = \frac{fw}{u} \quad (1-1)$$

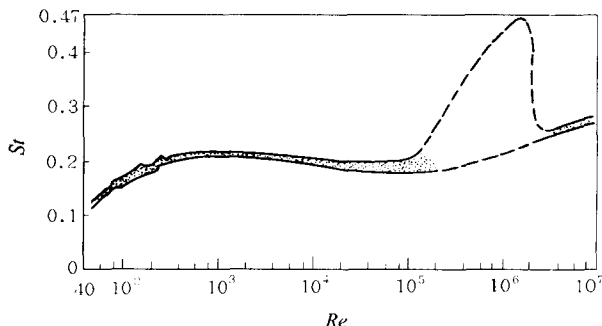
式中 f ——涡街旋涡脱落频率, Hz;

w ——发生涡街柱体的迎流面宽度, m;

u ——来流速度, m/s。

对于圆柱体而言, 柱体迎流面宽度即等于圆柱体直径。

图 1-5 示有试验得出的圆柱体的斯特罗哈数 St 和雷诺数 Re 之

图 1-5 圆柱体的 St 数与 Re 数的关系曲线

间的关系曲线。由图可见，当流体流动工况处于亚临界区范围时，即 $300 \leq Re < 3 \times 10^5$ 时，圆柱体的 St 数几乎保持为 0.2 的定值。在超临界区内， St 数增大，增大值与来流的紊流强度有关，紊流强度高则 St 数高。在此区域中，旋涡脱落不规则，较难精确测定其 St 数。当流体流动工况处于高超临界区时，即 $Re \geq 3.5 \times 10^6$ 时， St 数又趋向于 0.27 的常数。

4. 发生涡街时圆柱体表面上的受力及压力分布

当流体横向冲刷圆柱体时，来流作用在柱体上的作用力可分为与来流方向垂直的脉动升力和与来流方向一致的阻力。前者的时间平均值一般为零，而后的均不为零。脉动升力主要是由于涡街形成时旋涡交替自柱体脱落而使柱体两侧压力产生脉动而造成的。图 1-4 示有因旋涡脱落而造成脉动升力的原理示意图。图中，当圆柱体下方产生旋涡时，由于来流是均匀流动，其环量为零，由此作为旋涡旋转的反作用必然在圆柱体周围产生一个逆环流，如图中虚线所示。这样，圆柱体的上方速度将大于下方速度，而圆柱体下方压力将大于上方压力。从而使圆柱体受到一个方向与来流方向垂直的升力。此后当旋涡在圆柱体上方形成且顺时针方向旋转时，则由于同样原因，会在圆柱体上形成一个方向相反的升力。这样周而复始，就会使圆柱体产生振动。

阻力主要是流体绕流圆柱体时由于表面摩擦阻力和圆柱体前后压差造成的。脉动升力是随着旋涡脱落的进程随时间变化的，阻力由于旋涡脱落的影响也存在脉动。

脉动升力和阻力的合成形成圆柱体表面上的总作用力。随着涡街形成和旋涡脱落的进程，作用在圆柱上的总作用力的大小和方向是随着时间在不断变化的。

为了便于比较各研究人员的试验结果，一般应用无量纲的脉动升力系数 C_L' ，脉动阻力系数 C_D' 和时均阻力系数 C_D 来表明脉动升力、脉动阻力和时均阻力值。

脉动升力系数 C_L' 应用脉动升力值的均方根值来无量纲化，可按式计算：