

GONGCHENG LIUTILIXUE

Shiyan Jiaoxue Zhidao

工程流体力学

实验教学指导

王利军 高云鹏 李淑梅 晁阳 编

中国矿业大学出版社

第 1 章 绪论

1.1 工程流体力学的发展概况
1.2 工程流体力学的研究对象和任务
1.3 工程流体力学的研究方法

工程流体力学实验 教学指导

王利军 高云鹏 李淑梅 晁 阳 编

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

实验作为工科教学的重要内容、重要方法,在学生对知识掌握、理解和研究方法、实验技能以及创新精神的培养方面有着重要的作用。本书分为演示实验、操作性实验和进阶实验三个部分,共 24 个流体力学实验,着重介绍了工程流体力学实验设计方法和实验数据处理等内容。

本书可作为工程流体力学课程的配套教材,也适用于单独开设的工程流体力学实验课,可根据不同专业的教学大纲选用相应的实验项目。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学实验教学指导 / 王利军等编. —徐州:

中国矿业大学出版社, 2016. 6

ISBN 978-7-5646-3139-0

I. ①工… II. ①王… III. ①工程力学—流体力学—
实验—高等学校—教学参考资料 IV. ①TB126-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 134950 号

书 名 工程流体力学实验教学指导

编 者 王利军 高云鹏 李淑梅 晁 阳

责任编辑 陈 慧

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 7.75 字数 148 千字

版次印次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价 16.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

流体力学是一门重要的技术基础课程,它以流体为主要对象研究液体运动的规律以及流体与边界的相互作用,是高等学校许多理工科专业的必修课。能源与动力工程、机械设计、环境工程、暖通工程、采矿工程、安全工程、矿物加工工程等专业都将流体力学(水力学)作为必修课之一。

该课程的教学内容纷繁丰富,其特点是理论性和综合性比较强,概念抽象,难以理解,同时又有明确的工程应用背景。它是连接前期基础课程和后续专业课程的桥梁。课程教学的主要任务是使学生掌握流体力学的基本概念、基本理论和解决水力学问题的基本方法,具备一定的实验技能,为后续课程的学习打好基础,培养分析和解决工程实际中有关流体力学问题的能力。

实验研究是古老而有效的研究方法,是促进流体力学发展的重要手段,能够直接解决生产中的复杂问题,能发现流动的新现象,它与理论分析、数值计算和工程验证是研究流体力学的主要方法。虽然出现了一些新的研究方法,但是实验方法仍是检验与深化研究成果的重要手段,现代实验技术的迅猛进展,更促进了工程流体力学及现代水力学的蓬勃发展。

本书所涉及的实验共 24 个,包含了演示实验、流体静力学实验、流体动力学实验、阻力测量实验、紊流实验以及流体力学创新实验等。本书编写分工如下:演示实验由晁阳编写,流体静力学实验和流体动力学实验由高云鹏编写,阻力测量实验和紊流实验由李淑梅编写,进阶实验由王利军编写,全书由王利军统稿。

本书参考了相关教材、实验指导书、著作和论文,在此一并感谢。由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2016 年 4 月

目 录

第一编 演示实验	1
实验一 流谱流线演示实验	3
实验二 流动演示实验	6
实验三 静压传递自动扬水演示实验	13
实验四 紊动机理演示实验	16
实验五 自循环虹吸原理演示实验	20
第二编 操作性实验	23
实验六 流体静力学实验	25
实验七 伯努利方程实验	29
实验八 雷诺实验	34
实验九 沿程阻力实验	37
实验十 动量定律实验	43
实验十一 毕托管测速实验	48
实验十二 文丘里流量计实验	51
实验十三 局部阻力实验	55
实验十四 孔口与管嘴实验	59
实验十五 空化机理实验	63
实验十六 水击综合实验	68
实验十七 堰流实验	72
实验十八 水跃实验	77
实验十九 消能池实验	82
实验二十 消能坎(墙)实验	87
实验二十一 挑流消能实验	92

第三编 进阶实验	97
实验二十二 PIV 单相流场测试	99
实验二十三 PIV 两相流场测试	106
实验二十四 高速摄像系统运动测试	112
附录 实验守则	117
参考文献	118

实验一 液流曲线演示实验

一、实验目的和要求

(1) 通过液流的演示和观察,了解液流曲线在流体力学中的应用以及液流曲线在实际工程中的应用特点。

(2) 了解液流曲线的基本原理和方法。

(3) 观察液流曲线在工程中的应用,如液流曲线在流体力学中的应用。

二、实验装置

第一编

本实验装置由液流曲线演示仪、液流曲线记录仪、液流曲线记录仪等组成。液流曲线演示仪由液流曲线记录仪、液流曲线记录仪等组成。液流曲线记录仪由液流曲线记录仪、液流曲线记录仪等组成。液流曲线记录仪由液流曲线记录仪、液流曲线记录仪等组成。

演示实验



图 1-1 液流曲线演示装置

1—液流曲线记录仪; 2—液流曲线记录仪; 3—液流曲线记录仪; 4—液流曲线记录仪; 5—液流曲线记录仪。

本实验装置由 3 个部分组成,分别用以演示液流曲线、液流曲线记录仪、液流曲线记录仪。液流曲线记录仪由液流曲线记录仪、液流曲线记录仪等组成。液流曲线记录仪由液流曲线记录仪、液流曲线记录仪等组成。

实验一 流谱流线演示实验

一、实验目的和要求

(1) 建立势流流线和流谱的概念,了解流线、流谱在流场描述中的作用以及流线疏密程度所表征的流动特性。

(2) 了解流动示踪的基本原理和方法。

(3) 观察和理解势流的流动现象,加深对流线和流谱的理解。

二、实验装置及原理

本实验装置采用最先进的电化学方法显示流线,用狭缝式流道组成过流面,如图 1-1 所示。流动过程采用封闭式自循环形式。工作流体染色,水泵启动和灯光照明等均为一次性电控完成。它具有体积小、质量轻、演示内容丰富、图像清晰、有效显示面积比较大、操作方便、无污染、节能等优点。

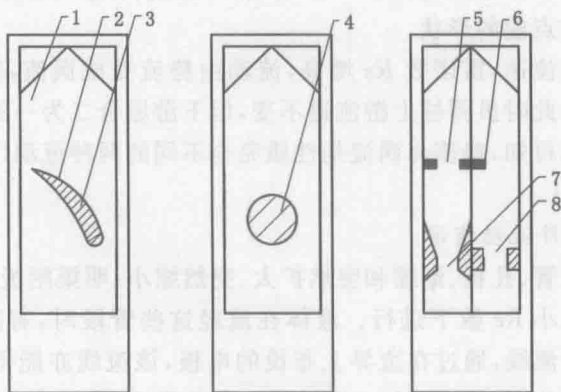


图 1-1 流谱流线显示装置

1——显示盘;2——机翼;3——孔道;4——圆柱;5——孔口;6——闸板;
7——文丘里管;8——突扩和突缩

实验装置包括 3 个显示仪,分别用以演示管流、明渠流和绕流的流谱。有的不仅可以演示流线疏密,还可以显示压力大小,如机翼绕流。

三、实验演示内容

该实验装置分别用以演示机翼绕流、圆柱绕流和管、渠过流。

1. 机翼绕流流谱演示

演示机翼绕流的流线分布。由图谱可看出,机翼背面流线较密,表明流速大,压力低;而在机翼的腹面,流线较疏,压力较高。这表明整个机翼受到一个向上的合力(称为升力)。本仪器采用下述构造能显示出升力的方向;在机翼腰部设有沟通两侧的孔道,孔道中有染色电极。在机翼两侧压力差的作用下,必有分流经孔道从机翼的腹面流向背面。这可通过孔道中染色电极释放的色素显示出来,染色液体流动的方向,即升力方向。此外,在流道出口端(上端)还可以观察到流线汇集到一处,并无交叉,从而验证流线不会重合的特性。

2. 圆柱绕流流谱演示

演示时,应将流量尽可能调小,此时因为流速很低(约为 $0.5 \sim 1.0 \text{ cm/s}$),能量损失极小,故流动可视为势流,因此所显示的流谱上下游完全对称。这与圆柱绕流势流理论基本一致;圆柱两侧转捩点趋于重合。零流线(沿圆柱表面的流线)在前驻点分成左右两支,经 90° 点($u = u_{\max}$)后在后驻点处二者又合二为一。这是由于当绕流接近于势流时,绕圆柱流在前驻点($u = 0$)压能最大, 90° 点($u = u_{\max}$)压能最小。而到达后滞点($u = 0$),动能又全转化为压能,压能又最大,故其流线又复原到驻点前的形状。

当适量增大流速,雷诺数 Re 增高,流动由势流变成涡流,绕流的前后对称性就不复存在。此时虽圆柱上游流谱不变,但下游原合二为一的染色线被分开,尾流出现。由此可知,势流与涡流是性质完全不同的两种流动(涡流流谱参见流动演示仪)。

3. 管、渠构件流动演示

演示文丘里管、孔板、渐缩和突然扩大、突然缩小、明渠闸板等流段纵剖面上的流谱。演示在小 Re 数下进行。液体在流经这些管段时,有扩有缩。由于边界本身亦是一条流线,通过在边界上布设的电极,该流线亦能得以演示。同上,若适当提高流动的雷诺数,经过一定的流动起始段后,就会在突然扩大拐角处流线脱离边界,形成旋涡,从而显示出实际液体的总体流动图谱。

利用该流谱仪,还可以说明均匀流、渐变流、急变流的流线特征。如直管段流线平行,为均匀流。文丘里的喉管段,流线的切线大致平行,为渐变流。突缩、突扩处,流线夹角大或曲率大,为急变流。

应强调指出,上述各类仪器,其流道中的流动均为定常流动。因此,所显示的染色线既为流线,又是迹线和色线(脉线)。因为据定义:流线是某一瞬时的曲线,在线上任一点的切线方向与该点的流速方向相同;迹线是某一质点在某一时

段内的运动轨迹线;色线是源于同一点的所有质点在同一瞬时的连线。固定在流场的起始段上的电极,所释放的颜色流过显示面后,会自动消色,放色一消失对流谱的显示无任何干扰。

另外应注意的是,由于所显示的流线太稳定,以致有可能被误认为是人工绘制的。为消除这些误会,演示时可轻轻摇动一下流谱仪,由流线上各质点流动方向变化就可识别。

- (1) 就你观察到的现象,给流线下个定义并说明其特征。
- (2) 仅就流动现象,势流与涡流有何区别?
- (3) 急弯流和缓变流是怎样划分的?生产和生活中,你见过哪些急变流和缓变流?

实验二 流动演示实验

一、实验目的和要求

- (1) 建立或加深对各种流动现象的感性认识和理性理解；
- (2) 初步认识常见的过流部件和了解旋涡与损失的因果关系；
- (3) 加深对流动示踪技术在流体力学研究中重要性的认识。
- (4) 观察工程实际中常见的流动现象，认识常见的过流部件和绕流物体的流动特性。

二、实验装置及原理

1. 结构

本实验装置由 7 个流动演示仪组成，基本结构如图 2-1 所示。

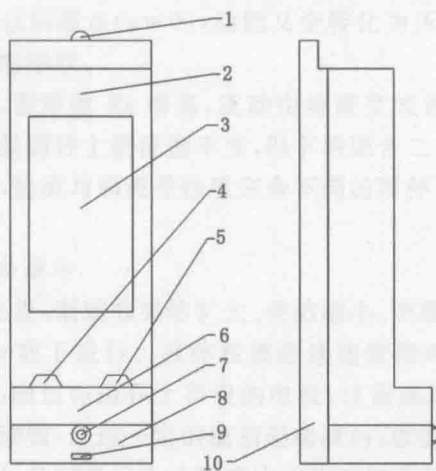


图 2-1 结构示意图

- 1——挂孔；2——彩色有机玻璃面罩；3——不同边界的流动显示面；4——加水孔孔盖；
5——掺气量调节阀；6——蓄水箱；7——可控硅无级调速旋钮；8——电器、水泵室；
9——标牌；10——铝合金框架后盖

7个流动演示仪剖面如图 2-2 所示。

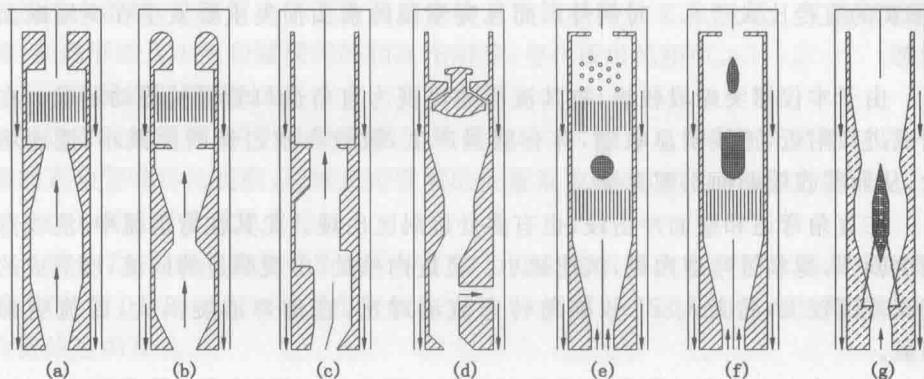


图 2-2 显示面过流道示意图

- (a) ZL-1 型收缩、扩大流动演示仪；(b) ZL-2 型文丘里流量计和孔板流量计流动演示仪；
(c) ZL-3 型弯道流动演示仪；(d) ZL-4 型阀门过流演示仪；(e) ZL-5 型柱体绕流演示仪；
(f) ZL-6 型流线体绕流演示仪；(g) ZL-7 型双稳放大流阀流动演示仪

2. 工作原理

该仪器以气泡为示踪介质。狭缝流道中设有特定边界流场,用以显示内流、外流、射流元件等多种流动图谱。半封闭状态下的工作液体(水)由水泵驱动自蓄水箱 6(图 2-1)经掺气后流经显示板,形成无数小气泡随水流流动,在仪器内的日光灯照射和显示板底板的衬托下,小气泡发出明亮的折射光,清楚地显示了小气泡随水流流动的图像。由于气泡的粒径大小、掺气量的多少可由阀 5 任意调节,故能使小气泡相对水流流动具有足够的跟随性。显示板设计成多种不同形状边界的流道。因而,该仪器能十分形象、鲜明地显示不同边界包括分离、尾流、旋涡等多种流动图谱。

三、实验演示内容

1. 收缩、扩大流动演示

该实验用 ZL-1 型收缩、扩大流动演示仪进行,用来演示逐渐扩散、逐渐收缩、突然扩大、突然收缩、壁面冲击、直角弯道等平面上的流动图像,模拟串联管道纵剖面流谱。

在逐渐扩散段可看到由边界层分离而形成的旋涡,且靠近上游喉颈处,流速越大,涡旋尺度越小,紊动强度越高;而在逐渐收缩段,无分离,流线均匀收缩,亦无旋涡。由此可知,逐渐扩散段局部水头损失大于逐渐收缩段。

在突然扩大段出现较大的旋涡区,而突然收缩段只在死角处和收缩断面后

的前口附近出现较小的旋涡区。表明突扩段比突缩段有较大的局部水头损失(缩扩的直径比大于0.7时例外),而且突缩段的水头损失主要发生在突缩断面后部。

由于本仪器突缩段较短,故其流谱亦可视为直角进口管嘴的流动图像。在管嘴进口附近,流线明显收缩,并有旋涡产生,致使有效过流断面减小,流速增大,从而在收缩断面出现真空。

在直角弯道和壁面冲击段,也有多处旋涡区出现。尤其在弯道流中,流线弯曲更剧烈,越靠近弯道内侧,流速越小。且近内壁处,出现明显的回流,所形成的回流范围较大,将此与ZL-2圆角转弯流动对比,直角弯道旋涡大,回流更加明显。

旋涡的大小和紊动强度与流速有关。这可通过流量调节观察对比,例如流量减小,渐扩段流速较小,其紊动强度也较小,这时可看到在整个渐扩段有明显的单个大尺度涡旋;反之,当流量增大时,这单个大尺度涡旋随之破碎,并形成无数个小尺度的涡旋,且流速越高,紊动强度越大,则涡旋越小。可以看到,几乎每一个质点都在其附近激烈地旋转着。又如,在突扩段,也可看到旋涡尺度的变化。据此清楚表明:紊动强度越大,旋涡尺度小,几乎每一个质点都在其附近激烈地旋转着。由于水质点间的内摩擦越厉害,水头损失也就越大。

2. 文丘里流量计和孔板流量计流动演示

该实验用ZL-2型文丘里流量计和孔板流量计流动演示仪来完成。主要演示文丘里流量计、孔板流量计、圆弧进口管嘴流量计以及壁面冲击、圆弧形弯道等串联流道纵剖面上的流动图像。

在流动实验中观察到,文丘里流量计的过流顺畅,流线顺直,无边界层分离和旋涡产生。在孔板前,流线逐渐收缩,汇集于孔板的孔口处,只在拐角处有小旋涡出现,孔板后的水流逐渐扩散,并在主流区的周围形成较大的旋涡区。由此可知,孔板流量计的过流阻力较大;圆弧进口管嘴流量计入流顺畅,管嘴过流段上无边界层分离和旋涡产生;在圆形弯道段,边界层分离的现象及分离点明显可见,与直角弯道比较,流线较顺畅,旋涡发生点少。

由上可了解三种流量计结构、优缺点及其用途。如孔板流量计结构简单,测量精度高,但水头损失很大,作流量计损失大是缺点,但有时将其移作他用,如在工程上的孔板消能又是优点。另外从型1或2的弯道水流观察分析可知,在急流段测压管水头不按静水压力的规律分布,其原因何在?这有两方面的影响因素:①离心惯性力的作用;②流速分布不均匀(外侧大,内侧小并产生回流)等。该演示仪所显示的现象还表征某些工程流况,如下三例:

(1) 孔板式有压隧道的泄洪消能

如黄河小浪底电站,在有压隧道中设置了五道孔板式消能工,使泄洪的余能在隧道中消耗,从而解决了泄洪洞出口缺乏消能条件的工程问题。其消能的机理、水流形态及水流和隧洞间的相互作用等,与孔板出流相似。

(2) 圆弧形管嘴过流

进口流线顺畅,说明这种管嘴流量系数较大(约为 0.98)。可将此与 ZL-1 型的直角管嘴对比观察,理解直角管嘴的流量系数较小(约为 0.82)的原因。

(3) 喇叭形管道取水口

结合 ZL-1 型的演示可帮助学生了解为什么喇叭形取水口的水头损失系数较小(约为 0.05~0.25,而直角形的约为 0.5)的原因。这是由于喇叭形进口符合流线型的要求。

3. 弯道流动演示

该实验用 ZL-3 型弯道流动演示仪演示 30° 弯头、直角弯头、 45° 弯头以及非自由射流等流段纵剖面上的流动图像。

由显示可见,在每一转弯的后面,都因边界层分离而产生旋涡。转弯角度不同,旋涡大小、形状各异。在圆弧转弯段,流线较顺畅,该串联管道上,还显示了局部水头损失叠加影响的图谱。在非自由射流段,射流离开喷口后,不断卷吸周围的流体,形成射流的紊动扩散。在此流段上还可以看到射流的“附壁效应”现象。

综上所述,该仪器可演示的主要流动现象为:

(1) 各种弯道和水头损失的关系。

(2) 短管串联管道局部水头损失的叠加影响。这是计算短管局部水头损失时,各单个局部水头损失之和并不一定等于管道总局部水头损失的原因所在。

(3) 非自由射流。据专业的不同可分别侧重于紊动扩散、旋涡形态或射流的附壁效应等。对热工和化工一类,则可侧重于紊动扩散和介质传输。对暖通专业和安全工程专业则可侧重于通风口布置对紊流掺混均匀度的影响等。

4. 阀门过流演示

该实验主要演示 30° 弯头、分流、合流、 45° 弯头、YF 溢流阀、闸阀等流段纵剖面上的流动图谱。其中 YF 溢流阀固定,为全开状态,蝶阀活动可调。实验装置为 ZL-4 型阀门过流演示仪。

由显示可见,在转变、分流、合流等过流段上,有不同形态的旋涡出现。合流涡旋较为典型,明显干扰主流,使主流受阻。闸阀半开,尾流旋涡区较大,水头损失也大。蝶阀全开时,过流顺畅,阻力小,半开时,尾流紊动激烈,表明阻力大且易引起振动。蝶阀通常做检修用,故只允许全开或全关。YF 溢流阀结构的流态均较复杂,详如下所述。

YF 溢流阀广泛用于液压传动系统。其流动介质通常是油,阀门前后压差可高达 3.15×10^7 Pa,阀道处的流速每秒可高达二百多米。本装置流动介质是水,为了与实际阀门的流动相似(雷诺数相同),在阀门前加一减压分流,该装置能十分清晰地显示阀门前后的流动形态;高速流体经阀门喷出后,也产生一较大的旋涡环带。在阀后,尾迹区大而复杂,并有随机的卡门涡街产生。经阀芯芯部流过的小股流体也在尾部产生不规则的左右扰动,调节过流量,旋涡的形态仍然不变。

该阀门在工作中,由于旋涡带的存在,必然会产生较激烈的振动,尤其是阀芯反弧段上的旋涡带,影响更大,由于高速紊动流体的随机脉动,必然要引起旋涡区真空度的脉动,这一脉动压力直接作用在阀芯上,引起阀芯的振动,而阀芯的振动又作用于流体的脉动和旋涡区的压力脉动,因而引起阀芯的更激烈振动。显然这是一个很重要的振源,而且这一旋涡带还可能引起阀芯的空蚀破坏。另外,显示还表明,阀芯的受力情况也不太好。

5. 柱体绕流演示

本实验用 ZL-5 型柱体绕流演示仪演示明渠逐渐扩散、单圆柱绕流、多圆柱绕流及直角弯道等流段的流动图像。圆柱绕流是该型演示仪的特征流谱。

由显示可见,单圆柱绕流时的边界层分离状况、分离点位置、卡门涡街的产生与发展过程以及多圆柱绕流时的流体混合、扩散、组合旋涡等流谱,可分述如下:

(1) 驻点

观察流经驻点的小气泡,可见流速的变化由 $v_0 \rightarrow 0 \rightarrow v_{\max}$,流动在驻点上明显停滞(可结合说明能量的转化及毕托管测速原理)。

(2) 边界层分离

结合显示图谱,说明边界层、转捩点概念并观察边界层分离现象,边界层分离后的回流形态以及圆柱绕流转捩点的位置。

边界层分离将引起较大的能量损失。结合渐扩段的边界层分离现象,还可说明边界层分离后会产生局部低压,以致有可能出现空化和空蚀破坏现象,如文氏管喉管出口处(参见空化机理实验仪说明)。

(3) 卡门涡街

圆柱的轴与来流方向垂直。在圆柱的两个对称点上产生边界层分离后,不断交替在两侧产生旋转方向相反的旋涡,并流向下游,形成冯·卡门(Von Karman)“涡街”。

对卡门涡街的研究,在工程实际中有很重要的意义。每当一个旋涡脱离开柱体时,根据汤姆逊(Thomson)环量不变的定理,必然在柱体上产生一个与旋

涡所具有的环量大小相等方向相反的环量,由于这个环量使绕流体产生横向力,即升力。注意到在柱体的两侧交替地产生着旋转方向相反的旋涡,因此柱体上的环量的符号也交替变化,横向力的方向也交替地变化,这样就使柱体产生了一定频率的横向振动。若该频率接近柱体的自振频率,就可能产生共振,为此常采取一些工程措施加以解决。

应用方面,可制成涡街流量计,从圆柱绕流的图谱可见,卡门涡街的频率不仅与 Re 有关,也与管流的过流量有关。若在绕流柱上,过圆心打一与来流方向相垂直的通道,在通道中装设热丝等敏感测量元件,则可测得由于交变升力引起的流速脉动频率,根据频率就可测出管道的流量。

卡门涡街引起的振动及其实例:观察涡街现象,说明升力产生的原理。那么绕流体为何会产生振动以及为什么振动方向与来流方向相垂直等问题也就迎刃而解了。作为实例,如风吹电线,电线会发出共鸣(风振);潜艇行进中,潜望镜会发生振动;高层建筑(高烟囱等)在大风中会发生振动等。其根源概出于卡门涡街。

(4) 多圆柱绕流

多圆柱绕流被广泛用于热工中的传热系统的“冷凝器”及其他工业管道的热交换器等。流体流经圆柱时,边界层内的流体和柱体发生热交换,柱体后的旋涡则起到混掺作用,然后流经下一柱体,再交换再混掺,换热效果较佳。另外,对于高层建筑群,也有类似的流动图像,即当高层建筑群承受大风袭击时,建筑物周围也会出现复杂的风向和组合气旋,即使在独立的高建筑物下游附近,也会出现分离和尾流。这应引起建筑师的重视。

6. 流线体绕流演示

用 ZL-6 型流线体绕流演示仪可演示明渠渐扩、桥墩形钝体绕流、流线体绕流、直角弯道和正、反流线体绕流等流段上的流动图谱。

桥墩形柱体绕流,该绕流体为圆头方尾的纯形体,水流脱离桥墩后,形成一个旋涡区——尾流。在尾流区两侧产生旋向相反且不断交替的旋涡,即卡门涡街。与圆柱绕流不同的是,该涡街的频率具有较明显的随机性。

演示中还发现:

(1) 非圆柱体绕流也会产生卡门涡街。

(2) 对比观察圆柱绕流和钝体绕流可见:前者涡街频率 f 在 Re 不变时也不变;而后者,即使 Re 不变 f 也随机变化。由此说明了为什么圆柱绕流频率可由公式计算,而非圆柱绕流频率一般不能计算的原因。

解决绕流体的振动问题途径有三:① 改变流速;② 改变绕流体自振频率;③ 改变绕流体结构形式,以破坏涡街的固定频率,避免共振。如北京大学力学