



圆柱绕流研究进展及展望*

武玉涛, 任华堂, 夏建新

(中央民族大学 生命与环境科学学院, 北京 100081)

摘要: 圆柱绕流问题广泛存在于水利工程、建筑工程和环境工程之中。通过对前人圆柱绕流研究的成果整理和分析, 将其分为解析研究、物理模型研究和数值模拟研究3个阶段, 总结了单圆柱、双圆柱以及圆柱群绕流在流动形态和圆柱受力特性方面的研究进展。分析发现, 现有研究主要集中于简单条件下单柱和双柱的受力特性和尾流流场结构, 今后需进一步开展柱群在海洋立管、高桩码头和环境工程等复杂条件下的研究, 开发尾流形态的主动控制技术。

关键词: 圆柱绕流; 尾流特性; 受力特性

中图分类号: TV 135; U 651.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)02-0019-08

Research progress and prospects on flow across cylinder

WU Yu-tao, REN Hua-tang, XIA Jian-xin

(College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

Abstract: Flow around cylinder has widely existed in hydraulic engineering, construction engineering, and environmental engineering. Based on the previous researches, this paper summarizes the flow patterns and the force characteristics of single cylinder, two cylinders, and cylinder group by the stages of analytical research, physical model and numerical simulation. It can be found that most researches focused on the flow patterns and the force characteristics of single cylinder or two cylinders. The further research of cylinder group under more complex situations should be carried out on marine risers, high-piled wharf and environmental engineering, and develops the active control technology to control wake characteristics effectively.

Keywords: flow around cylinder; wake characteristics; force characteristic

圆柱绕流作为一种典型的钝体绕流, 普遍地存在于自然界和工程中。如水流经桥墩^[1-2]、码头高桩^[3-4]、海底运输管线^[5-6]、海洋立管^[7]、海洋钻井平台等, 本质上都是水体的圆柱绕流问题。圆柱绕流产生的尾流特性直接关系到圆柱体的受力状态, 不合理的设计会降低工程寿命甚至导致工程事故的发生。1940年11月7日, 美国华盛顿州塔克马海峡吊桥因风振致毁, 事故原因正是空气绕流形成的卡门涡街引起了桥梁共振。近年来,

随着海洋工程项目的开展, 越来越多地涉及到复杂的圆柱绕流问题。如多条立管并行的海洋采油和采矿系统。此外, 海洋中的岛屿也类似圆柱, 海流经过海岛时, 其后方往往会形成大尺度浅水尾流, 由于该区域流速降低、产生回流, 水体中的污染物会在尾流区积聚, 难以通过水流自身排出, 因而造成环境水体的局部污染^[8]。

圆柱绕流是流体力学研究中一个经典而复杂的课题。由于圆柱是非流线型物体, 尾流形态、

收稿日期: 2016-06-06

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (51479218)

作者简介: 武玉涛 (1991—), 男, 硕士研究生, 从事水利工程研究。

圆柱受力等绕流特性受到雷诺数、表面粗糙度、湍流强度、圆柱尺寸等诸多因素的影响^[9]。随着工程项目应用条件越来越复杂,圆柱扰流问题的研究也逐步深入,在此情况下,分析和总结圆柱绕流问题的研究成果对于工程设计和优化具有重要的理论意义和现实意义。根据研究手段的发展,按照解析研究、物理模型试验和数值模拟3个阶段系统归纳前人的圆柱绕流研究成果,分析了圆柱受力特性、尾流形态、多柱相互作用机制方面的成果,并讨论圆柱绕流理论的工程应用领域及未来面临的挑战。

1 圆柱绕流理论研究

1752年,达朗贝尔通过势流理论推导得出,圆柱体在大范围的静止或匀速流动的不可压缩、无黏性流体中作等速运动时,它所受到的外力之和为零,被称为达朗贝尔佯谬,对应图1a)。但现实中不存在无黏性流体,即使黏性非常小的流体,对其中运动的物体都会起作用,因为黏性使流体在物体表面产生切向应力,即摩擦阻尼。

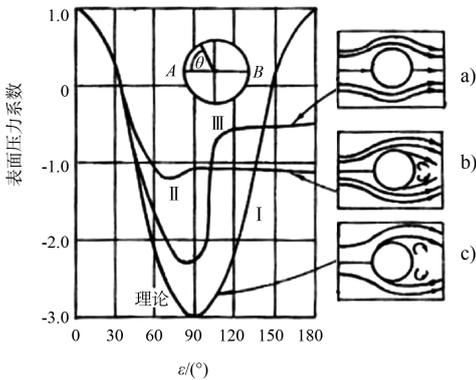


图1 圆柱表面压力系数分布^[10]

1904年,德国物理学家普朗特利用“边界层理论”解决了圆柱体绕流问题中的达朗贝尔佯谬。普朗特指出,当边界层外流压力沿流动方向增加得足够快时,与流动方向相反的压差作用力和壁面黏性阻力使边界层内流体的动量减少,圆柱表面的边界层在逆压作用下,在 $\alpha = \pm 84^\circ$ (曲线II) 或在 $\alpha = \pm 120^\circ$ (曲线III) 时就脱离物体,在圆柱体后面形成尾涡区,导致很大的能量耗散。当层流边界层在到达分离点前已转变为湍流时,由于湍

流的强烈混合效应,分离点会后移。这样,虽然增大了摩擦阻力,但压差阻力大为降低,从而减少能量损失(图1b)、c)。1908年,贝纳德在圆柱绕流试验中第一次发现柱体后方左右两侧分离出两列涡旋,涡旋间距离不变,而两排涡列间距只和物体的线尺度有关。

1911年,卡门(Karman)用理想流体复势理论对涡街的诱导速度、稳定性和阻力等做了分析。指出涡街的移动速度比来流速度小得多;涡列的排列规则有多种可能,但只有在 $h/l = 0.2806$ (h 为两涡列的间距, l 为同列涡中相邻涡的间距)时相对稳定。大约在 $Re = 40$,圆柱后部的一对旋涡开始出现不稳定摆动,如图2所示,自 $Re = 70$ 左右起,旋涡交替地从圆柱上脱落,两边的旋涡旋转方向相反,随流而下,在圆柱后面形成有一定规则的、交叉排列的涡列,即后人所称的卡门涡街。

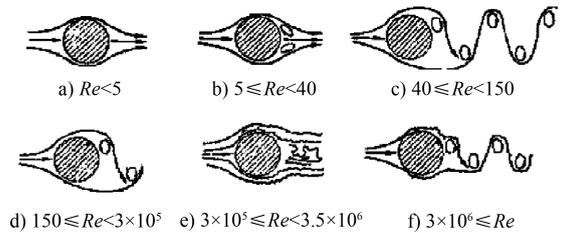


图2 单圆柱绕流流态随 Re 的变化^[11]

圆柱体上的涡以一定的频率交替释放,柱体表面上的压强分布也以一定的频率发生有规则的变化,使圆柱受到周期性变化的合力作用,其频率与涡的释放频率相同。1954年,罗斯柯(Roshko)对旋涡脱落频率的试验研究表明,旋涡脱落频率 f 与来流速度 u_0 成正比,与圆柱直径 D 成反比,即

$$f = \frac{S_r u_0}{D} \tag{1}$$

式中: S_r 为斯特劳哈尔数,用来描述旋涡脱落非定常性,也反映了绕流对柱体作用的周期性^[12],是流体绕流的重要特征参数,与雷诺数 Re 有关。当 $Re > 1000$ 时,斯特劳哈尔数近似为常数。

$$S_r = \frac{fD}{u_0} = 0.198 \left(1 - \frac{19.7}{Re} \right) \tag{2}$$

由于绕流问题为复杂的非线性流体力学问题, 理论分析只能基于一些假定进行特殊条件下的圆柱绕流性质研究。对于一般的圆柱绕流现象, 目前的理论分析尚不具备研究能力, 物理模型和原型观测是更为重要的研究手段。

2 物理模型试验

2.1 单圆柱绕流尾流形态

由于单圆柱绕流的尾流结构相对简单, 对于观察和记录的设施条件要求较低, 因此早期研究主要集中于深水单圆柱绕流。

Coutanceau^[11]采用物理模型试验首次揭示圆柱后尾流形态和雷诺数之间的对应关系。在不计流体可压缩性时, Coutanceau 指出无限长(二维)光滑圆柱的周期性尾流形态取决于 Re 数。单圆柱绕流尾流流态随 Re 数的增加依次经历蠕动流、对称驻涡回流泡、层流态涡街、涡旋由层流向紊流的过渡态、紊流态涡街、涡街消失、重现紊流涡街等阶段, 各阶段的形态见图 2。不同尾流形态对应的雷诺数范围见表 1。

表 1 不同 Re 数范围内的单柱绕流尾流形态

Re 数范围	流动现象及旋涡脱落状态
$Re < 5$	流动不发生分离, 没有旋涡产生
$5 \leq Re < 40$	流动从两侧分离, 在圆柱下游形成由两个对称驻涡组成的回流泡
$40 \leq Re < 150$	流动从两侧分离, 形成交替脱落的旋涡, 并保持层流状态
$150 \leq Re < 300$	旋涡内部开始由层流向湍流转捩, 分离前边界层处于层流状态
$300 \leq Re < 3 \times 10^5$	整个涡街逐渐完全转变为湍流状态, 分离前边界层仍处于层流状态
$3 \times 10^5 \leq Re < 3.5 \times 10^6$	分离前的边界层为湍流, 是湍流分离, 尾迹变窄, 旋涡脱落没有规律
$3.5 \times 10^6 \leq Re$	湍流涡街重新出现

随着观测技术的发展, 涂成旭等^[13]将粒子图像测速技术(PIV)引入到圆柱绕流物理模型研究, 测量了流场中涡的精细结构并部分揭示了涡体的变化机制。该研究发现, 尾流在横向上的影响范围随雷诺数增加而减小, 主流对涡的拉伸作

用以及涡量沿流向传播能力随雷诺数增大而增大。受到 PIV 采集频率的限制, 当雷诺数较大时, 难以捕捉到涡脱落的整个过程, 因此该试验技术只适用于小雷诺数条件。

相比于深水尾流, 底部摩擦阻力对于浅水尾流形态的影响更为显著。近些年, 由于对环境问题的关注不断升温, 岛屿等浅水尾流的运动规律以及尾流对浓度场的影响等方面成为研究热点。

梁东方等^[14]通过物理模型试验, 采用平面激光诱导荧光技术(PLIF), 在恒定来流条件下, 定量测量了圆柱形和正弦形两种岛屿的浓度场。发现相比于圆柱形岛屿, 正弦形岛屿更容易在尾流区积聚污染物质, 但污染物浓度沿流衰减得较快。为了描述这一性质, 定义尾流稳定性参数^[15]

$$S = (C_f D) / H \quad (3)$$

式中: C_f 为底部摩擦参数; H 为水深; D 为绕流物体横向尺寸。当尾流稳定性参数较大时, 将会抑制大尺度旋涡的运动, 此时尾流近区为定常的流动, 临界 S 数约为 0.2。

LI^[16]利用数字粒子图像测速技术(DPIV), 进一步量化稳定性参数 S 对正弦形浅水岛屿的影响, 提出稳定性参数的 3 个临界值。当 $S = 0.2$ 时, 尾流形态从卡门涡街转化成非稳定流; $S = 0.3704$ 时, 卡门涡街消失, 产生稳定的回流区; $S = 0.4$ 是尾流形态从非稳定流转化成稳定流。

2.2 双圆柱绕流及多圆柱绕流特性

相比于单柱, 双柱绕流的尾流存在相互作用, 形态更加复杂, 研究更具挑战性。而且双柱又可以视为圆柱群的基本组成单元, 对于柱群的研究具有至关重要的作用。因此, 双圆柱绕流问题向来是国内外学者研究的重点, 取得的研究成果也最为丰富。

根据来流方向与圆柱中心连线之间的夹角不同, 学者将双圆柱的排列方式划分为串列、并列、交错排列 3 种方式^[17](图 3)。现有研究主要集中在 3 个方面, 即: 两圆柱之间的流场特性, 圆柱后涡的脱落频率, 两圆柱之后的涡街相互作用机制, 见表 2。

表2 双圆柱绕流的文献比较

作者	排列方式	间距比 (G/D)	研究成果
Zdravkovich ^[18]	双柱串联	$G/D < 3.5$	由于双柱距离较近, 柱间流体流动速度很小, 并且不同的间距比对两柱间隙中的速度分布和下游柱尾流场中的速度分布具有明显影响
Igarash ^[19]	双柱串联	$G/D > 3.5$	双柱间隙中的速度以及下游圆柱尾流场中的速度都随着 G/D 的增加而增加, 且速度均大于 $G/D < 3.5$ 时的速度
Bearman ^[20]	双柱并列	$G/D < 0.5$	涡体的脱离频率等效于两倍直径宽度的阻碍体的涡体脱离频率
		$G/D > 1$	涡体的脱离频率与单个圆柱绕流的频率相一致
		$0.5 < G/D < 1$	当圆柱间隙介于以上两者之间时, 以上两种频率均有发现
Le Gal ^[21]	双柱并列	$G/D \geq 1$	尾流间出现相互作用
		$G/D = 2$	发现双圆柱尾流产生的涡街迅速消失
		$2.5 \leq G/D \leq 4.5$	可以清楚地观测到非对称流动
Williamson ^[22]	双柱并列	$G/D = 4.5$	两条尾流的形状随时间随机发生变化, 主要有 4 种典型的尾流形状, 分别是涡脱方向相同、涡脱方向相反、左侧涡脱轨迹较窄和右侧涡脱轨迹较窄
		$1 \leq G/D \leq 5$	发现当圆柱体出现两排涡街且涡脱方向相反时, 两排涡街会相互作用合并成一个大尺度的涡街, 作者将其定义为双涡街。该双涡街和卡门涡街类似, 只不过是由涡对相互缠绕旋转形成的
Yokoi, Hirao ^[23]	双柱并列 (非等直径)	$G/D < 0.25$	两圆柱之间没有明显的间隙流, 二者以一个整体的形式形成尾流, S_v 的值很小
		$0.25 < G/D < 1.5$	流体形态发生交替偏斜的, S_v 在 2 个极值之间变化
		$G/D > 1.5$	两柱后分别形成各自的涡脱落。

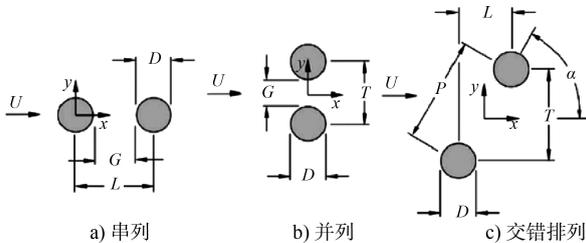


图3 双圆柱的排列方式

相比于双柱绕流, 多圆柱绕流的情况更加复杂, 这是因为圆柱的个数、圆柱相对位置以及雷诺数等因素都会对圆柱尾流的形成产生干扰, 使得流场结构和旋涡脱落形态更加多样, 耦合干扰的机理更难解释^[24]。

物理模型或原型观测能够客观反映试验条件下圆柱绕流的一些性质, 但是限于时间和资金成本, 研究对象只限于少数工况。

3 数值模拟

近 30 年来, 随着流体力学理论知识的不断完善, 以及计算机设备的推陈出新, 以 Fluent 和 CFX 等为代表的计算流体力学软件, 已经成为了科学研究的一种重要工具。数学模型的模拟能力不断提高, 一大批高精度、高适用性的数学模型

的出现, 使得可以模拟的流动类型不断丰富, 从简单的二维流动到复杂的三维流动, 从牛顿流体到非牛顿流体, 从层流到湍流, 从定常流动到不定常流动等。受益于计算流体力学 (CFD) 的迅速发展, 圆柱绕流问题在数值模拟方面也取得了巨大的成就。

3.1 单圆柱绕流的圆柱受力特性

Mdallal^[25] 利用二维非稳定 Navier-Stokes 方程, 模拟了不可压缩流体层流状态下, 圆柱绕流沿流方向上的受迫振动。其选用雷诺数 $Re = 200$ 、频率比 $f/f_0 = 0.5 \sim 3.0$ (f 为圆柱受迫振动频率, f_0 为静止圆柱绕流的旋涡释放频率) 和振幅比 $A/D = 0.1, 0.3$ (A 为振动幅度, D 为圆柱直径), 成功确定了圆柱受迫振动的锁定区间 ($f/f_0 \approx 2.0$), 锁定区间会增大圆柱受力, 并发现圆柱受迫振动的锁定区间随着振幅比的增大而扩大。因此, 在实际深海立管处在复杂的海洋环境中时, 发生涡激共振的可能性增大, 更易产生疲劳破坏。

樊娟娟等^[26] 在低雷诺数受迫振动的基础上, 进一步利用 Fluent 的动网格技术, 进行高雷诺数 ($Re = 10^5$ 和 $Re = 2.5 \times 10^5$)、大振幅比的圆柱受迫振动研究, 得到圆柱在不同振动频率时的升力系

数、旋涡释放规律以及特定条件下的锁定区间。在锁定状态时, 升力系数曲线呈现单一幅值变化, 旋涡释放频率受圆柱的振动频率影响; 非锁定状态时, 升力系数曲线出现“拍频”现象, 旋涡释放频率同时受到静止圆柱绕流的旋涡释放频率和圆柱受迫振动频率的影响。

3.2 双圆柱绕流及多圆柱绕流特性

双圆柱绕流流态主要受雷诺数、间距比、水流攻角和直径比等因素影响。Prasanth^[27]利用有限元法模拟了雷诺数 $Re = 100$ 时, 二维层流串列等直径双圆柱绕流。将双圆柱串列绕流与单一圆柱绕流进行了比较, 通过定性比较发现, 上游圆柱与单一圆柱绕流情况相似。但相比于单一圆柱绕流, 锁定区间的涡脱频率与圆柱固有振动频率相差较大。下游圆柱由于受到上游圆柱尾流的影响, 在横向和纵向上都表现出很大的振动幅度, 最大振幅可达到 $1.1D$ 。

滕丽娟等^[28-29]利用 Fluent 软件选取 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 在雷诺数 $Re = 20\ 000$ 条件下模拟了等直径圆柱绕流间距比和水流攻角对于阻力和升力的影响。当 $G/D = 1.75$, 水流攻角 α 分别为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 的条件下, 双圆柱阻力随着水流攻角的增大而增大, 当处于双柱并列状态时阻力达到最大; 当双柱串列时, 下游圆柱阻力为负值, 两柱升力合力为零; 当双柱错置和并列时, 两圆柱阻力均为正值, 各圆柱的升力合力均不为零, 当处于双柱并列状态时升力合力最大。

在等直径多圆柱绕流的基础上, 近年来进一步开展了不等直径双柱绕流的数值研究。此处列举了 5 篇具有代表性的关于不等直径双圆柱绕流的文献, 通过比较发现随着小柱直径与大柱直径之比 d/D 的增大, 大柱的 S_{vr} 值增大, 时均升力减小, 平均阻力增大; 小柱的 S_{vr} 值减小, 时均升力增大, 平均阻力的变化趋势不稳定 (表 3)。

表 3 不等直径双圆柱绕流的文献比较

作者	Re	G/D	d/D	$\alpha / (^\circ)$	研究成果
高洋洋 ^[30]	300	0.2~4.0	1/3~1.0	0	两柱的平均阻力系数均随着直径比 d/D 的增大而增大, 大柱的 S_{vr} 值随着直径比 d/D 的增大而增大, 小柱的 S_{vr} 值随着直径比 d/D 的增大而减小
Zhao ^[31]	500	0.05~1.0	0.25	0~180	小柱存在, 相比于单圆柱, 大圆柱的涡脱频率降低, 小圆柱的涡脱频率增加。
Kun Yang ^[32]	400~2 400	0.1~0.5	0.2	0	间距比 G/D 越小, 小柱对大柱的影响越大, 反之则越小
于定勇 ^[33]	3 900	0.1~2.5	0.5、1.0	0	间隙流偏斜对大柱的影响小于对小柱的影响, 且随着 d/D 的增大, 间隙流偏斜对大柱的影响越来越大
Zhao ^[34]	50 000	0.05~0.2	0.1~1.0	0~180	随着 d/D 的增大, 大柱的平均阻力增大、时均升力减小, 小柱的时均升力增大、平均阻力的变化趋势不稳定

在双圆柱绕流数值模拟研究的基础上, 张爱社等^[35]利用有限元方法进一步对等边三角形布置的等直径三圆柱绕流问题进行了研究。结果显示, 当圆柱呈正“品”字布置时, 如果间距比小于某一临界值, 就会出现明显的偏流现象, 若大于该临界值, 则不再出现偏流现象; 当圆柱呈倒“品”字布置时, 在任何间距比下, 流动状态相对于来流均呈对称分布。

在尾流区置入附属小圆柱, 可以对主圆柱绕流的流场结构以及受力特性产生影响。相关研究

表明附属小圆柱对主圆柱的影响程度主要取决于附属小柱的位置、大小、个数以及雷诺数变化等因素。

Kuo 等^[36]在低雷诺数 $Re = 80$ 条件下, 将两个并列小圆柱置入尾流区, 发现并列控制柱可以有效地抑制涡街的产生, 并使主圆柱的升力系数降低了 70%~80%, 压力阻力减小也很明显。

张洪军等^[37]研究了附属小圆柱对并列双圆柱尾流流场的影响, 试验结果表明, 当并列双圆柱与控制小圆柱距离较近时, 小圆柱对旋涡脱落和

流场的控制作用非常明显；当距离较远时，小圆柱对于狭窄流的抑制效果不明显，使其对流场的控制作用大为降低。

Muddada^[38]在主圆柱后方放置两个可以旋转的小圆柱，旋转柱紧贴于主圆柱后方，在 $Re = 100 \sim 300$ 条件下，采用有限体积法和 SIMPLE 算法对其进行数值模拟。当 $u_c/u_0 = 2.0$ (u_c 为小圆柱的旋转速度) 时，主圆柱后方的尾流停止产生涡街，该方法可以有效地抑制涡街的生成。

目前，关于旋涡脱落控制技术的研究已经取得了一些成果，并逐步出现了以主动控制和被动控制为主的流动分离控制技术^[39]，如在圆柱体尾部加装分离隔板或在尾流区置入控制圆柱等控制技术。相关研究表明^[40-43]：分离隔板的长度、分离隔板与来流的夹角以及分离隔板与圆柱的间距，都会对旋涡脱落的始点、脱落的频率和绕流的升阻力系数产生重要影响。

4 工程应用和未来研究展望

4.1 海洋平台或高桩码头的建设

目前用于海上资源开采的石油钻井平台或深水码头多采用桩式支撑结构，其支撑点为一系列桩柱，且桩以直立式和斜立式配合，垂直桩用于支撑平台及其上负荷的重力或垂向冲击力，而斜桩可以承受水平力的冲击。

海洋平台或高桩码头的建设和已有的多柱绕流研究具有一定的差异性。目前，对此问题的研究主要集中在桩体本身的受力特性和桩群对水流速度的影响两方面，相关研究还需进一步深入。以后应加强如下研究：1) 量化桩群的布置方式对桩群整体受力的影响，优化桩群布置方式；2) 研究桩群中不同位置桩体的受力差异，为不同位置桩体设计参数提供依据；3) 研究波浪、潮汐、海流非恒定流动对于桩体受力的影响；4) 研究斜桩和直桩组合条件下垂向和水平向的作用力特性。

除桩体本身受到的冲击力以外，圆柱绕流对圆柱周边局部流场的改变会使河床或海床局部冲

刷程度加剧，从而影响工程结构的稳定性，导致桥梁等水工建筑损毁。目前相关研究主要通过物理试验，探究不同桩群排列形式、不同水深和不同来流速度等条件下，圆柱桩群对床底冲淤影响。但由于绕流现象会在床底冲刷部位产生大量旋涡，导致水沙运动状态复杂化。因此，需要结合水沙动力学特征，从机理上解释不同影响条件与冲刷特性的关系。

4.2 海洋管线建设

海洋管线是目前海上原油或矿石水力输送的主要方式，处于流动水体环境下的管道其本质也为圆柱绕流问题。按照形状管道可以分为直管和弯管；而按照材质，管道也可以分为硬管和软管。同时，接近海底的管道周围流速和泥沙浓度在垂向表现出较强的梯度，且来流方向可以和管道呈任意角度。

目前，已经开展了与床面接触管线和悬浮管线两种布置方式的绕流研究，并分析了管线与床面之间的距离变化对流场分布的影响。但是关于此类问题的研究主要集中在流体流经硬管后涡旋形态和流场结构的变化。海洋管线的设计要求针对圆柱绕流加强如下方面的研究：对于软管，需要加强圆柱受力特性和其形状之间的耦合关系；对于弯曲段管道，加强圆柱在轴线不同曲率条件下的受力特性；针对管线的近海底特性，进一步加强剪切流动条件下不同来流方向含沙流体环境下的圆柱体绕流特性。

4.3 海洋立管

海洋输流立管是海面与海底井口间的主要连接件，是海洋基础结构的关键组成部分，作为海面与海底的一种联系通道。对于深海立管，立管长度大，垂向流速分布不均匀，因此对立管抗弯能力要求很高。立管在波浪及海流的作用下易发生涡激振动，涡激振动是深水立管设计的一个主要控制因素。

目前，大量研究集中在改变管体表面形状或在管体周围置入扰动体，从而改变圆柱绕流的流

场分布和受力特性,达到抑制涡激振动的目的。但是对于深海立管,其外部环境十分复杂,很难通过物理模型还原真实水体环境,在数值模拟方面也同样面临着类似的难题。因此,如何真实有效地模拟复杂的深海水体环境,成为了深海立管研究亟需解决的难题。

4.4 环境工程

污染物在水域中受到岛屿或水工建筑物等障碍后,由于绕流作用会聚集于障碍物后形成重污染区。污染排放区多位于河流、湖泊或浅海地区,水深较小,绕流特性为典型的浅水绕流,同时油污或高温水等特殊污染物的排放会导致流体呈现为垂向分层流动,不同深度流速分布具有明显的差异性,甚至具有明显垂向流速。

目前,圆柱绕流在环境工程领域的研究还处于起步阶段,在传统的水力学领域中,更多集中在圆柱绕流受力特性和流场结构的研究,而在环境领域,圆柱绕流对污染物浓度场的影响将备受关注。针对环境工程中圆柱绕流的特殊性,今后需要加强如下方面的研究:研究圆柱绕流流场对于污染物浓度场的影响;研究不同底部摩擦力条件下圆柱绕流的影响,为不同性质的河床或海床条件下障碍物附件的污染物浓度分布提供依据;研究分层流体的绕流特性,确定障碍物附近污染物的平面聚集特性和垂向聚集特性。

4.5 圆柱绕流的工程措施

圆柱绕流的核心问题是绕流过程中圆柱的受力和流场的改变。采用适当的措施主动改变圆柱的受力和流场分布、实现兴利除弊具有重要的意义。

为了避免因圆柱受力使工程结构产生疲劳,国内外许多学者提出对绕流形成的涡街进行有效控制和消除。对于主被动控制技术的研究还不够深入,今后需要加强如下方面的研究:研究控制柱在不同放置方位以及控制柱群不同排列方式下,对于流场的控制;研究尾流隔板在不同水流攻角条件下,对尾流的影响;基于被动技术的研究,

开发有效可行的主动控制技术,从而避免涡激对工程结构造成损坏。

5 结语

1) 现有文献通过势流理论和边界层理论,揭示了卡门涡街等简单现象的物理机制,得到涡列的排列方式和脱落频率等方面的规律。

2) 现有文献基于物理模型观测和数学模型,揭示了不同雷诺数条件下圆柱的受力特性和尾流形态,并对双柱不同布置方式下柱体受力的相互作用及响应尾流的形态进行了分析研究。

3) 现有研究主要集中于均质流体的条件下的深水绕流,涉及圆柱形状和流体性质相对简单。

4) 建议今后开展以下复杂条件下的研究:海洋工程中桩体、管线、立管的圆柱绕流问题;环境工程中绕流导致的浓度场分布研究;开发尾流主动控制技术实现圆柱绕流形态和圆柱受力的人为调整。

参考文献:

- [1] 何国建,方红卫,府仁寿.桥墩群对河道水流影响的三维数值分析[J].水动力学研究与进展: A 辑, 2007, 22(3): 345-351.
- [2] JIN J, MENG B. Computation of wave loads on the superstructures of coastal highway bridges [J]. Ocean engineering, 2011, 38(17-18): 2 185-2 200.
- [3] 李文文.高桩码头桩群对河道水流特性影响的试验研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学, 2005.
- [4] 邓绍云.圆柱桩群局部冲刷特性试验[J].水运工程, 2011(10): 15-19.
- [5] LIANG D, CHENG L, LI F. Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents [J]. Coastal engineering, 2005, 52(1): 43-62.
- [6] 陈醇浩,朱志夏.基于 Fluent 的海底管线附近流场分析[J].上海交通大学学报, 2012(3): 458-462.
- [7] SONG J N, LU L, TENG B, et al. Laboratory tests of vortex-induced vibrations of a long flexible riser pipe subjected to uniform flow [J]. Ocean engineering, 2011, 38(11): 1 308-1 322.

- [8] 晏智锋. 浅水尾流流动特征及污染物输移扩散特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [9] 龙天渝. 流体力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [10] 吴望一. 流体力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2004.
- [11] COUTANCEAU M, DEFAYE J R. Circular cylinder wake configuration: A flow visualization survey [J]. Applied mechanics reviews, 1991, 44(6): 225-305.
- [12] 郝鹏, 李国栋, 杨兰, 等. 圆柱绕流流场结构的大涡模拟研究[J]. 应用力学学报, 2012, 29(4): 437-443.
- [13] 涂程旭, 王昊利, 林建忠. 圆柱绕流的流场特性及涡脱落规律研究[J]. 中国计量学院学报, 2008, 19(2): 98-103.
- [14] 梁东方, 李玉梁, 江春波, 等. 岛屿尾流近区浓度的分布特性[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(8): 117-120.
- [15] 梁东方, 李玉梁, 陈嘉范. 半岛浅水尾流近区流动特性的实验研究[J]. 自然科学进展, 2004, 14(4): 431-435.
- [16] LI L, LI Y, CHEN J. Experimental study of turbulent wake behind a sine shaped island in a shallow-water layer[J]. Journal of tsinghua science and technology, 2002, 7(3): 251-253.
- [17] SUMNER D. Two circular cylinders in cross-flow: A review [J]. Journal of fluids and structures, 2010, 26(6): 849-899.
- [18] ZDRAVKOVICH M M. Flow induced oscillations of two interfering circular cylinders [J]. Journal of sound & vibration, 1985, 101(4): 511-521.
- [19] IGARASHI T. Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem : 1st report [J]. Jsme international journal, 1981, 24: 323-331.
- [20] BEARMAN P W, WADCOCK A J. The interaction between a pair of circular cylinders normal to a stream [J]. Journal of fluid mech, 1973, 61(3): 499-511.
- [21] LE G P, CHAUVE M P, Lima R, et al. Coupled wakes behind two circular cylinders [J]. Physical review A, 1990, 41(8): 4 566-4 569.
- [22] WILLIAMSON C H K. Evolution of a single wake behind a pair of bluff bodies [J]. Journal of fluid mech, 1985, 159: 1-18.
- [23] YOKOI Y, HIRAO K. Vortex shedding and vortex formation from a pair of in-line forced oscillating parallel arranged two circular cylinders [J]. Journal of fluid science & technology, 2009(4): 401-414.
- [24] 杨纪伟, 滕丽娟, 胥战海. 多圆柱绕流旋涡脱落和流场形态概论[J]. 人民长江, 2009, 40(3): 66-68.
- [25] AI-MALLAL Q M, LAWRENCE K P, KOCABIYIK S. Forced streamwise oscillations of a circular cylinder: Locked-on modes and resulting fluid forces[J]. Journal of fluids and structures, 2007, 23(5): 681-701.
- [26] 樊娟娟, 唐友刚, 张若瑜, 等. 高雷诺数下圆柱绕流与大振幅比受迫振动的数值模拟 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2012, 27(1): 24-32.
- [27] PRASANTH T K, MITTAL S. Flow-induced oscillation of two circular cylinders in tandem arrangement at low Re [J]. Journal of fluids and structures, 2009, 25(6): 1 029-1 048.
- [28] 滕丽娟, 张志伟, 武燕蕾. 湍流模型下双柱绕流升阻力系数数值模拟 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2009, 26(2): 51-54.
- [29] 滕丽娟. 不同排列方式下的双圆柱、三圆柱绕流数值模拟[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2009
- [30] 高洋洋. 多柱体系统静止绕流与涡激振动的试验及数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [31] ZHAO M, CHENG L, TENG B, et al. Numerical simulation of viscous flow past two circular cylinders of different diameters [J]. Applied ocean research, 2005, 27(1): 39-55.
- [32] YANG K, CHENG L, AN H, et al. The effect of a piggyback cylinder on the flow characteristics in oscillatory flow [J]. Ocean engineering, 2013, 62(2): 45-55.
- [33] 于定勇, 崔肖娜, 唐鹏. 并列双圆柱绕流的水动力特性研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015(5): 107-113.
- [34] ZHAO M, CHENG L, TENG B, et al. Hydrodynamic forces on dual cylinders of different diameters in steady currents [J]. Journal of fluids and structures, 2007, 23(1): 59-83.
- [35] 张爱社, 张陵. 等边布置三圆柱绕流的数值分析[J]. 应用力学学报, 2003, 20(1): 31-36.