

后柱横向振动串列双圆柱尾迹特性

呼和敖德

(中国科学院力学研究所)

辰野正和 種子田定俊

(日本九州大学应用力学研究所)

提要 本文采用电化学显示方法和热线技术就雷诺数为 10^3 — 10^4 , 后柱横向振动串列双圆柱尾迹和涡街进行了研究。双柱间距为 $1.5 \leq s/d \leq 10$, 后柱振动振幅为 $0.1d$ 和 $0.3d$ 。首先, 本文得到了低雷诺数情况下, 串列双圆柱绕流旋涡脱落频率随柱间距和雷诺数的变化规律, 并且, 通过流谱分析, 对于出现频率间断现象给予了说明。其次, 本文着重研究了振动情况下尾迹特性。当后柱以静止双柱涡脱落频率强迫振动, 涡脱落和柱振动之间将发生连锁反应。本文实验揭示了连锁区奇特的涡街流谱——二次涡、涡的聚集和涡街伸长。

一、引言

串列双圆柱绕流问题的研究始于航空工程双翼机的出现。近些年来, 由于若干工程实践如近海工程、高层建筑、烟囱组、悬空输油管道、高压输电线以及热交换器管束等结构物的流体诱发振动问题的日益增多, 多柱体绕流问题的研究变得越来越重要。

当两个柱体相互靠近时, 由于流动相互干扰, 将引起作用在柱体上的升力、阻力等参数发生变化。这是比较复杂的问题, 从理论上处理很困难。许多学者如文献[1—3]开展了多方面的实验研究, 并取得了一定进展。关于振动柱体绕流问题的研究, 对于单柱体横向振动问题已取得了一定进展, 如 koopmann^[4] 研究了单柱体振动幅度和频率对脱落涡和柱振动之间连锁的影响。振动双柱体绕流作为模拟流动诱导物体振动在工程实践中具有重要意义。由于柱体的各种形式振动将会造成很复杂的涡街和尾迹流场, 并引起振动柱和脱落涡之间的连锁反应, 因此目前主要是开展了一些实验研究工作^[5—8]。但是, 上述复杂流动情况下涡的形成等现象的机理尚不清楚。因此, 进一步研究振动柱和脱落涡之间的连锁反应和涡街结构, 对实际应用和基础研究都很重要。

本文主要进行了以下两方面工作: (1) 涡脱落频率的间断现象和相应的涡街结构的变化规律; (2) 雷诺数、柱间距、柱振动频率和振幅对连锁区涡街结构影响关系。

二、实验设备及方法

本实验在宽 0.4 米, 深 0.4 米, 长 4 米拖曳式水槽中进行。水槽配有拖车, 由电动变速马达驱动匀速运动。实验雷诺数为 10^3 , 3×10^3 和 10^4 。其相应的速度为 1.27 厘米/秒至

本文于 1984 年 11 月 16 日收到, 由林同骥编委推荐。

15 厘米/秒。

模型为两根光滑黄铜柱,直径 $d = 1.0$ 厘米,长 30 厘米。两个柱沿来流方向纵向排列。上游柱垂直固定于拖车上,下游柱垂直悬挂固定于拖车上的振动机构上,并在横向方向给予强迫振动。振幅 a 为 $0.1d$ 和 $0.3d$ 。两个柱之间的间距(从双柱中心计算)调节范围为 $1.5 < s/d < 10$ 。

涡脱落频率用热线技术测量。热线探头置于后柱下游五倍直径处。

双柱绕流涡街流谱采用两种电化学显示方法得到。对于低雷诺数绕流问题,电解沉淀法最适宜。电解沉淀法是将锡涂于二维圆柱模型中心部位表面上,为阳极,另一块金属挂在拖车后部置于水中,为阴极。通电后,阳极将析出白色微细悬浮粒子形如白雾状,作为示踪粒子。随着流速增高,显示改用氢气泡技术,将氢气泡发生线置于双柱之前,以氢气泡作为示踪粒子。

在流动显示中光源的布局是一个关键问题。本实验采用缝隙光源,将其置于水槽侧壁随车同步运行。光从侧壁照射,相机(采用 Nikon 相机)置于顶部,两者取适当角度以达最佳效果。

三、实验结果

1. 静止串列双圆柱

串列双圆柱绕流涡脱落频率的间断现象: 图 1 给出 $Re = 10^2, 3 \times 10^2$ 和 10^3 双柱绕

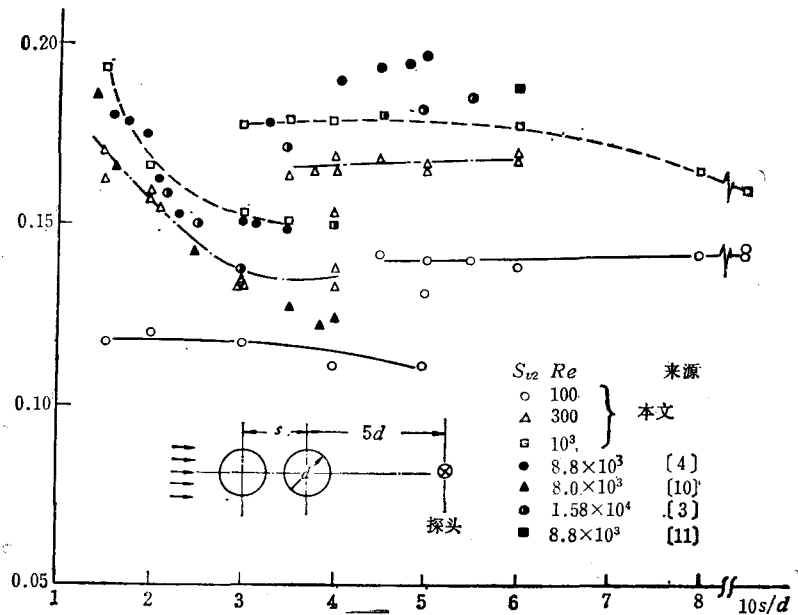


图 1 静止串列双柱绕流脱落涡斯特罗哈数 S_{v2} 随柱间距变化曲线

流,后柱涡脱落频率的热线结果和其他一些作者^[3,9,10,11]的实验。本文得到串列双柱涡脱落频率的间断现象对于 $Re = 3 \times 10^2$ 和 10^3 绕流分别出现于柱间距范围为

$$3.5 < s/d < 4.0$$

和 $3.0 < s/d < 3.5$. 这些结果以及涡脱落频率随柱间距的变化规律与 Kiya^[3], Egarashi^[9] 和 Oka^[11] 等人结果一致. 并且, 随双柱间距的缩小, 涡脱落频率出现明显的增高. 但是, 本文发现, 对于 $Re = 10^2$ 的双柱绕流, 出现频率间断现象的柱间距范围为

$$4.5 < s/d < 5.0.$$

这说明, 在小雷诺数绕流情况下, 出现频率间断的柱间距值要增大. 另一方面, 随双柱间距的缩小, 在本实验的范围内, 并未发现涡脱落频率的增高现象. 当柱间距值大于上述临界值, 斯特罗哈数随 S_{v2} 柱间距的增大趋向于单柱值.

涡街流谱 为了说明上述频率间断现象, 图版 I 照片 1 给出 $Re = 10^2$ 情况下, 涡街流谱随柱间距的变化. 对于小于临界柱间距的双柱绕流, 在后柱背后形成一对回流区, 随之形成正弦振荡的尾迹约延伸到下游几倍直径之远. 当 $s/d = 3.0$, 尾迹振荡幅度减小, 在照片可见部分不出现涡街图版 I (照片 1(b)). 这说明涡的形成区随柱间距增大而增长并且明显地长于相应的单柱值. 这种奇特的现象通过观察图版 I 照片 2 所示双柱之间的流动得以解释. 图版 I 照片 2(a) 是对应于照片 1(b) 的双柱之间流谱. 由图可见, 双柱之间形成一对环流区, 从前柱脱落的剪切层没有再附于后柱侧壁. 但是, 当前柱脱落的剪切层一旦交替再附于后柱两侧时, (照片 2(b)) 则后柱涡形成区便缩小. 在双柱间距 $s/d = 4$ 时, 前柱脱落的剪切层开始交替卷起, 并再附于后柱. 此时, 涡形成区明显缩短 (照片 1(c)). 当双柱间距 $s/d > 5$ 时, 将在前后两柱之后分别形成两个充分发展的涡街. 由此说明, 出现频率间断的柱间距是在这柱间距的流动刚刚开始形成交替脱落涡. 本文热线测量和流谱观察所得频率间断是一致的.

图版 II 照片 3 所示为 $Re = 3 \times 10^2$ 双柱绕流涡街流谱. 结果表明: 随雷诺数增高, 在相同柱间距条件下, 涡的形成区缩小. 当两柱间距很小的情况下, 流动类似于单柱绕流, 将形成规则卡门涡街. 但是, 随柱间距增大 (但限于小于临界柱间距值) 两同排相继涡之间的纵向间距增大, 而两排涡又相互靠近, 从而形成交替变号的一系列涡 (照片 3(b)) 随柱间距增大接近上临界值, 此时涡街流谱出现畸变. 一旦, 柱间距超过上临界值, 此时双柱绕流尾迹将转变为具有一定周期性的湍流涡街 (图版 II 照片 3(c)). 众所周知, 在单柱绕流情况下, 当 $Re > 150$, 涡街将变为湍流. 但是, 本文实验表明, 在串列双柱绕流情况下, 如果柱间距小于临界值, 则尾迹的转换将受到抑制.

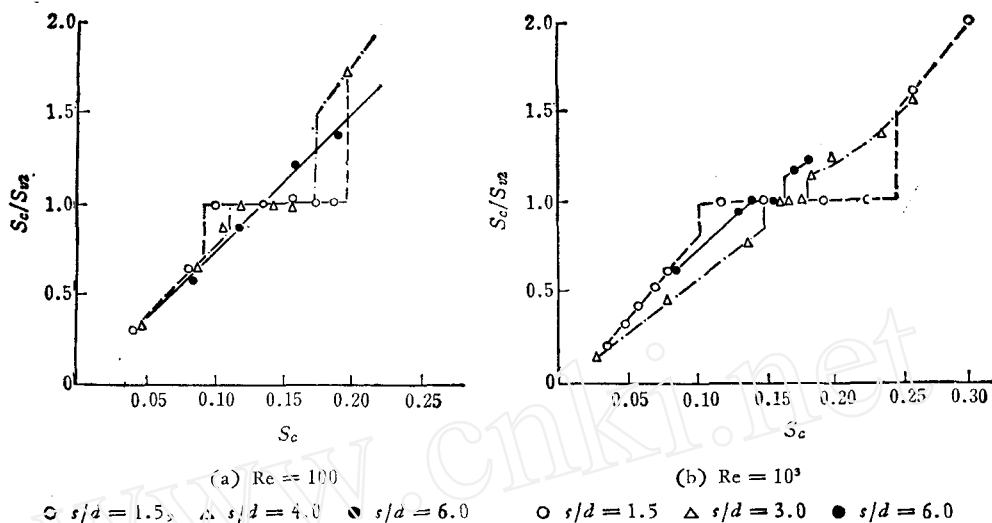
2. 后柱横向振动串列双柱绕流

连锁区 图 2 给出两种雷诺数条件下, 后柱以 $0.3d$ 振幅进行强迫振动所形成的涡脱落频率的热线测量结果. 实验表明, 当双柱间距小于某临界值, 则涡脱落和柱振动之间将发生连锁反应 (或称共振). 实验得到, 当 $Re = 10^2$, $S/d = 1.5$, 连锁区所对应的无因次速度范围为 $5.1 < v_r < 11$, ($v_r = 1/S_c$), 而对于 $Re = 3 \times 10^2$ 和 10^3 , 其范围为

$$4.5 < v_r < 10.5.$$

(其中 $S_c = df_c/u$, u 为来流速度, f_c 为柱振动频率). 很显然, 连锁区将随柱间距的增大而缩小. 当 $Re = 10^3$, 连锁区将在 $S/d = 6$, 开始消失. 但当 $Re = 10^3$ 相同情况下仍可见连锁区. 从目前结果分析, 我们认为连锁区随振幅的增大、柱间距减小或随雷诺数增大而增大.

振动串列双柱涡街流谱 图版 II 照片 4 给出 $Re = 10^2$, 振幅 $a/d = 0.3$ 和 $s/d = 1.5$

图 2 柱振动频率与脱落涡频率之比 ($a/d = 0.3$)

双柱绕流涡街流谱。实验表明,在低频振动情况下,所形成的涡街是规则的卡门涡街。随振动频率的增高, $S_c = 0.076$, 在近尾迹将出现对称涡,当后柱以联锁频率区下限频率振动,此时所形成的涡街的每个涡脱落周期内,相继形成两个相同符号的涡旋(照片 4(b)),随后在下游合并为交替涡街。当后柱以联锁区内频率振动,所形成的涡街是很规则的,同排两个涡之间的纵向间距缩小。当柱体以联锁区上临界频率值振动时 ($S_c = 0.19$), 近尾迹涡街规则,涡之间纵向间距达到最小值,但在下游尾迹出现不稳定,如果柱体以更高频率进行振动 ($S_c = 0.38$), 涡街和低频振动时很相似 ($S_c = 0.038$)。此时观察到相应的两柱间距流谱也彼此相似。

图版 III 照片 5 给出 $Re = 3 \times 10^2$, $a/d = 0.3$, $s/d = 1.0$ 情况下涡街。所得到的涡街流谱随振动频率的变化规律与照片 4 低雷诺数绕流相似,但是,当柱以联锁区上限值振动情况下,近尾迹为规则涡街,然后在下游涡街出现有规律的聚集和伸长。当柱以两倍于脱落涡频率振动情况下(图版 III 照片 6), 所出现的涡街非常奇特,在每两个柱振动周期内出现三个涡,一个是反时针涡,一个是顺时针涡,另有一个小的反时针涡。在下游,这三个涡排成一列出现。

小振幅振动后柱涡街特性 图版 III 照片 7 是振幅为 $0.1d$ 的情况,其他条件与照片 5 相同。两者对照非常相似,这说明在串列双柱情况下,即使后柱以较小振幅振动但仍具有大振幅振动涡街特性,这点是与单柱不同。Koopmann^[4] 单柱实验指出,当振幅 $a/d > 0.5$ 时,涡街才出现如同照片 7(b) 一样的二次现象。

图 3 是对应于照片 7 条件脱落涡频率热线测量的波型。这进一步说明了振动柱绕流联锁区涡街特殊结构的周期性变化规律。图 3(a) 对应于照片 7(a) 上三涡一周期的涡街流谱。在对应的热线测量的频率测量波型上出现的小弯曲即对应于涡街上的二次小涡。图 3(c) 对应照片 7(c), 是联锁区上临界振动频率情况下的涡街结构,表现出四涡聚集间隔一个伸长区的周期变化的涡街。

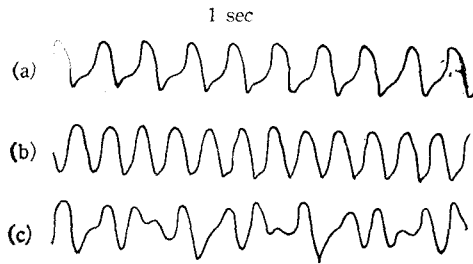


图 3 与照片 7 对应的脱落涡频率热线
测量波形曲线

$Re = 300, a/d = 0.1, s/d = 1.5$

(a) $S_c = 0.14, S_c/S_{v,2} = 1.0$ (b) $S_c = 0.187, S_c/S_{v,2} = 1.0$ (c) $S_c = 0.25, S_c/S_{v,2} = 1.0$

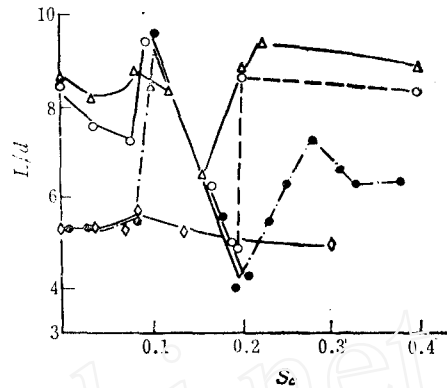


图 4 后柱横向振动串列双柱绕流涡街纵向
间距随 S_c 变化关系 $a/d = 0.3$

$Re = 190$ $\circ s/d = 1.5$ $\triangle s/d = 4.0$ $\diamond s/d = 6.0$
 $Re = 300$ $\bullet s/d = 1.5$

涡街的尺度 图 4 给出 $Re = 10^2$ 和 3×10^2 双柱绕流涡街纵向间距随柱振动频率的变化曲线。实验结果表明,在柱振动频率小于联锁区下限值的情况下,涡纵向间距随柱振动频率出现不规则变化。当柱振动频率达到联锁区下限值,此时涡街纵向间距达到最大值。在联锁区内,涡街纵向间距值随振动频率线性下降,在联锁区上限处达到最小值,但是,当柱振动频率一旦超过联锁区上限值,涡街的纵向间距又突然增大,并趋向于一个固定值。在联锁区内,雷诺数对涡街纵向间距影响不明显。但在其它情况下,涡的纵向间距随雷诺数增大而减小。不同振幅实验结果表明,振幅对涡街纵向间距影响很小。

四、结 论

对后柱横向振动串列双柱进行热线测量和流动显示研究得到以下结果:

1. 静止双柱 对 $Re = 10^2, 3 \times 10^2$ 和 10^3 绕流,涡脱落频率的间断现象分别发生于柱间距 $4.5 < s/d < 5, 3.5 < s/d < 4.0$ 及 $3.0 < s/d < 3.5$ 。并给出相应的流谱变化规律。

实验结果揭示出串列双柱绕流,尾迹的转换受到抑制的现象。

2. 当后柱以静止双柱涡自然脱落频率进行振动时,涡脱落频率和柱振动之间产生联锁反应。随柱间距增大或振幅减小,联锁区缩小。在联锁区内,形成的涡街很规则,但在联锁区上、下限出现有规律的二次涡、涡的聚集和涡街的伸长等现象。

感谢语 作者感谢石井、幸治先生在实验方面的协助,感谢岡岛、厚教授多次有益的讨论。

参 考 文 献

[1] Zdravkovich, M, M., Trans. A. S. M. E. J. Fluids Engng., 12(1977), 618.

- [2] Okajima, A., *Bull. J. S. M. E.*, **22** 166 (1979), 504.
[3] Kiyama, M., Arie, M., Tamura, H and Mori, H., *Trans. A. S. M. E., J. Fluid Engng.*, **102** (1980), 166.
[4] Koopmann, G. H., *J. Fluid Mech.*, **28**(1967), 501.
[5] Zdravkovich, M. M., *Flow-induced structural vibration* Ed. E. Naudascher, Springer Berlin (1974), 631.
[6] Tanida, Y., Okalima, A. and Watanabe, Y., *J. Fluid Mech.*, **61** (1973), 769.
[7] King, R. and Johns, D. J., *J. Sound Vib.*, **45**, **2**(1976), 259.
[8] Zdravkovich, M. M., *International conference on Flow induced Vibration in Fluid Engineering*. England, September 14—16 (1982).
[9] Igarashi, T., *Bull. J. S. M. E.*, **24** 188 (1981), 323.
[10] Ishigai, S., Nishikawa, E., Nishimura, K. and Cho, K., *Bull. J. S. M. E.*, **15** (1972), 949.
[11] Oka, S., Kostic, Z. G and Sikmanovic, S., *International Seminar On Recent Developments in Heat Exchangers Trogir*, (1972).

WAKE STRUCTURE BEHIND TANDEM CIRCULAR CYLINDERS WHEN THE DOWNSTREAM CYLINDER OSCILLATES

Huhe-Aode

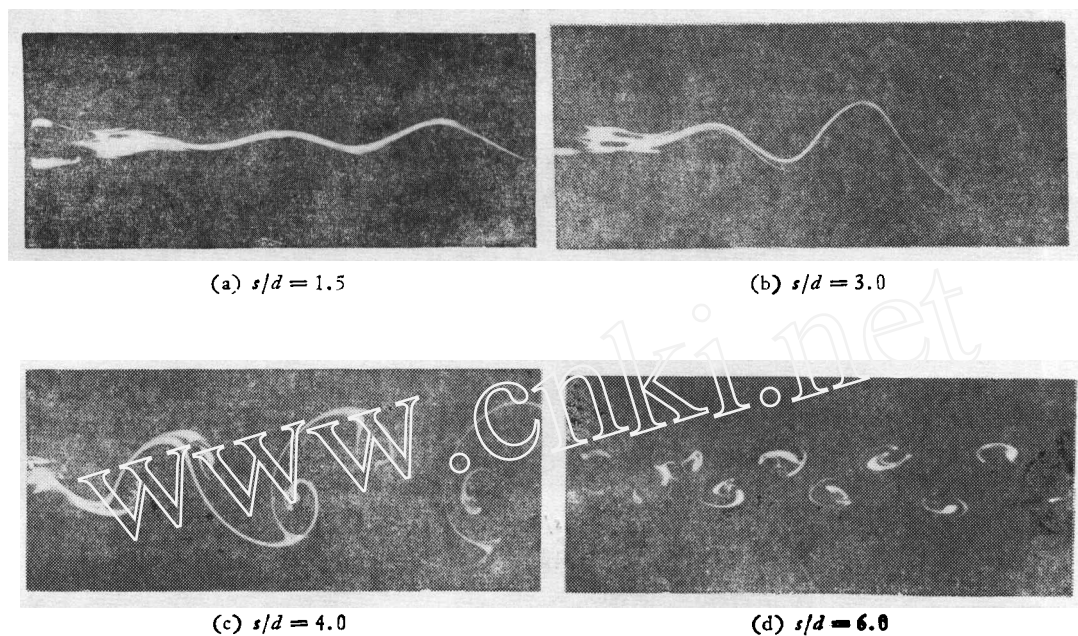
(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

M. Tatsuno, S. Taneda

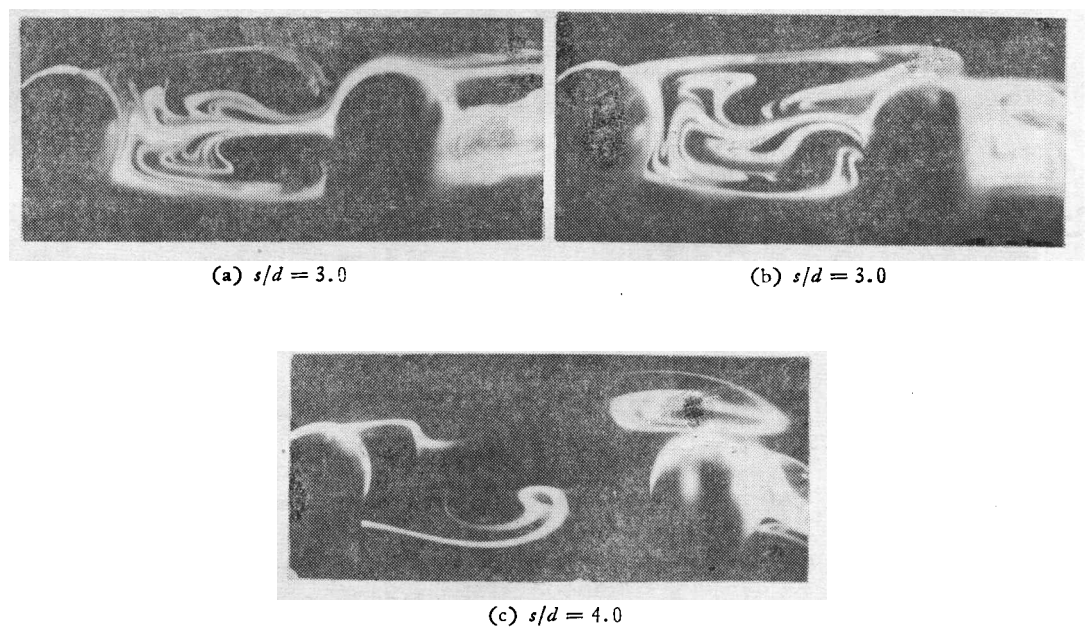
(*Research Institute for Applied Mechanics Kyushu University, Japan*)

Abstract

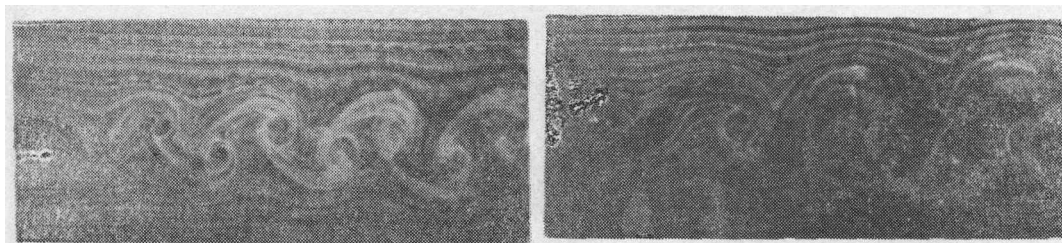
Wake structure behind two circular cylinders in tandem arrangement was investigated experimentally by means of a hot-wire anemometer and flow visualization techniques at Reynolds numbers ranging from 10^2 to 10^5 . The spacings between the axes of the two cylinders were varied in the range $1.5 \leq s/d \leq 10$. In the first place, the vortex shedding frequencies behind the tandem circular cylinders were measured at low Reynolds numbers and various spacings between two cylinders. The mechanism of the discontinuous phenomenon of the vortex shedding frequencies was explained by studying the flow patterns. Next, when the downstream cylinder was forced to vibrate sinusoidally at frequencies near that of the natural shedding for two stationary cylinders, the vortex shedding was locked in frequency. Flow visualization revealed that there were peculiar flow patterns—secondary vortices, the elongation and contraction of the vortex streets at the two limits of the locked regions.



照片 1 静止串列双柱涡街流谱(电沉淀法), $Re = 100$

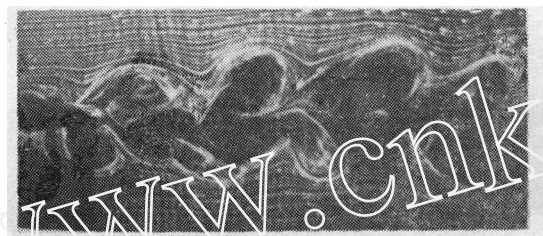


照片 2 静止串列双柱绕流双柱区间流场。(电沉淀法) $Re = 100$



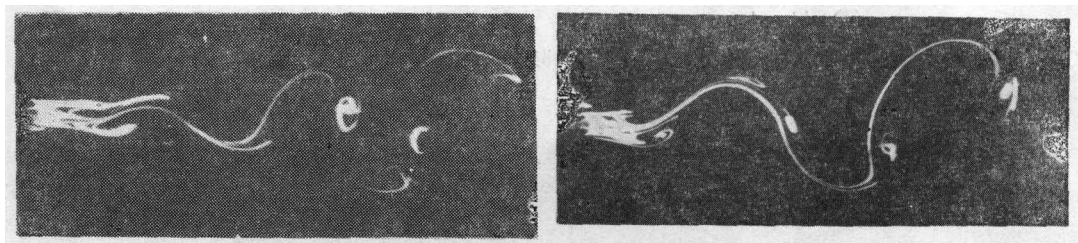
(a) $s/d = 1.5$

(b) $s/d = 3.0$



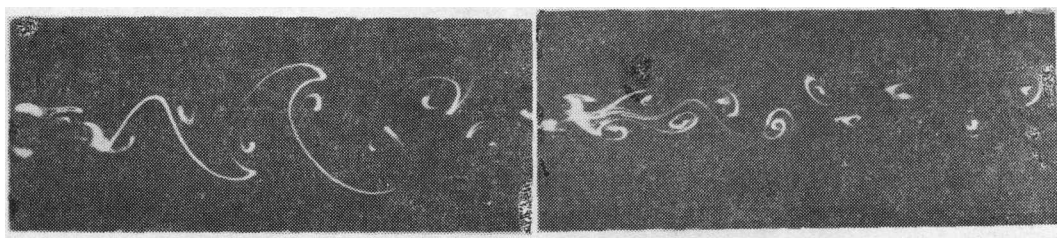
(c) $s/d = 6.0$

照片 3 静止串列双柱涡流谱(氢气泡法) $Re = 300$



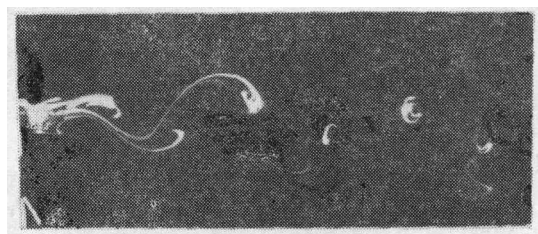
(a) $S_c = 0.038, S_c/S_{v2} = 0.32$

(b) $S_c = 0.10, S_c/S_{v2} = 1.0$



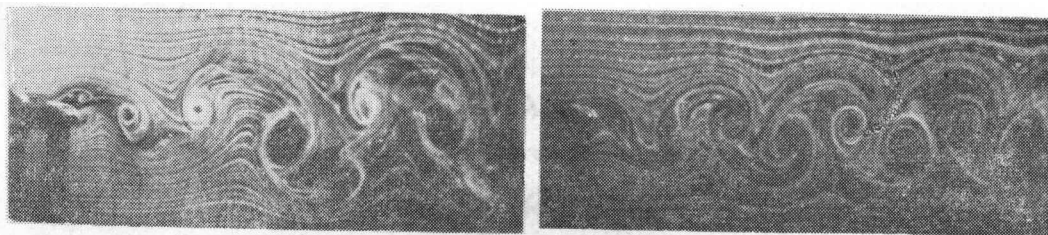
(c) $S_c = 0.178, S_c/S_{v2} = 1.0$

(d) $S_c = 0.19, S_c/S_{v2} = 1.0$



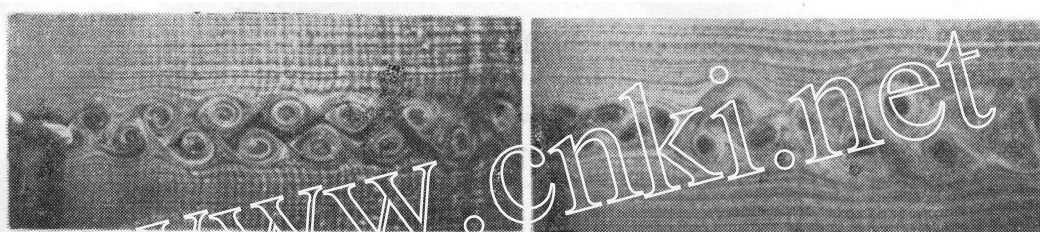
(e) $S_c = 0.38, S_c/S_{v2} = 3.0$

照片 4 后柱横向振动串列双柱绕流涡流谱(电沉淀法).
 $Re = 100, a/d = 0.3, s/d = 1.5$



(a) $S_c = 0.12, S_c/S_{v_2} = 1.0$

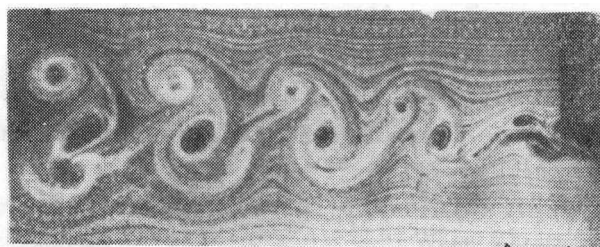
(b) $S_c = 0.175, S_c/S_{v_2} = 1.0$



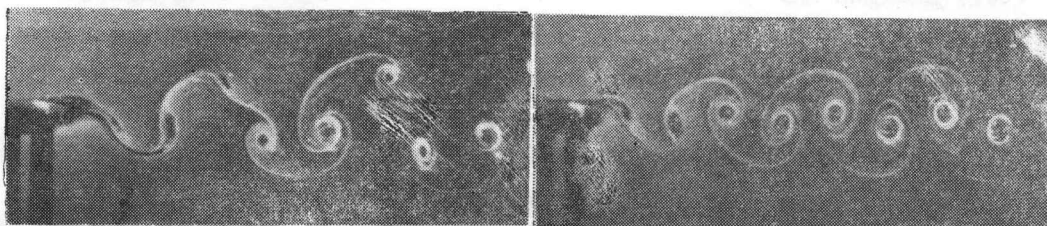
(c) $S_c = 0.22, S_c/S_{v_2} = 1.0$

(d) $S_c = 0.24$

照片 5 后柱横向振动串列双柱绕流涡街流谱。(氢气泡法) $Re = 300, a/d = 0.3, s/d = 1.0$



照片 6 后柱高频振动涡街结构 $Re = 300, a/d = 0.3, s/d = 1.5, S_c = 0.32, S_c/S_{v_2} = 2.0$



(a) $S_c = 0.14, S_c/S_{v_2} = 1.0$

(b) $S_c = 0.187, S_c/S_{v_2} = 1.0$



(c) $S_c = 0.25, S_c/S_{v_2} = 1.0$

照片 7 小振幅振动串列双柱涡街流谱。(氢气泡法)
 $Re = 300, a/d = 0.1, s/d = 1.5$