第 41 卷 第 4 期 力 学 进 展 Vol. 41 No. 4
2011 年 7 月 25 日 ADVANCES IN MECHANICS July 25, 2011

钝体绕流的分隔板控制技术研究进展*

张 力[1,2,†] 丁 林[1]

[1] 重庆大学动力工程学院, 重庆 400044

[2] 重庆大学新型微纳器件与系统技术国家重点学科实验室, 重庆 400044

摘 要 钝体是工程中一种常见结构, 流体绕过钝体时产生的旋涡脱落易诱发结构振动, 进而导致结构破坏. 钝体后安装分隔板是一种典型的被动控制技术, 分隔板推迟钝体尾流区剪切层之间的相互作用, 进而有效改变钝体后旋涡脱落及尾迹特性, 延长结构寿命, 并且可以利用钝体–分隔板结构进行能量收集. 本文全面回顾了利用分隔板进行流动控制和能量收集的研究及应用现状, 分析了分隔板长度及分隔板与钝体的距离对钝体受力情况和旋涡脱落频率的影响, 比较了各种不同形状的钝体在安装分隔板后的受力和尾迹特性, 并指出利用钝体–分隔板结构设计能量收集系统是扩展清洁能源开发利用的一个研究重点.

关键词 分隔板, 钝体, 旋涡脱落, 流动控制, 能量收集

1 前 言

钝体后旋涡脱落会在结构表面形成周期性脉动作用力, 易形成涡致振动, 这将导致钝体结构寿命缩短, 并增大噪声和阻力. 目前, 已有大量研究控制旋涡脱落的文献, 其控制技术基本上可分为两类 [1-2]: 被动控制技术和主动控制技术. 被动控制技术通过改变钝体的形状或在流场中添加附加装置来控制旋涡脱落, 在流动控制中应用广泛, 相比主动控制更为简单, 且更容易实现 [3]. 在被动控制技术中, 安装于钝体底部顺主流方向上的分隔板是改变旋涡脱落和尾迹特性的最有效的装置之一, 它可以阻断尾流区剪切层相互作用, 抑制旋涡脱落或将其推迟至下游, 以减少钝体上的脉动力 [4-6], 而且可以减小噪声 [7] 和增加换热 [8-9]. 分隔板顺流方向长度和板前端与钝体底部的间距是影响控制性能的主要参数. 分隔板与钝体没有间距时, 钝体阻力和升力随着分隔板长度的增加而减小, 而且当长度超过一定值后, 旋涡脱落将完全受到抑制. 当分隔板长度与钝体特征尺寸相等时, 随着二者距离增加, 旋涡形成位置被推迟到分隔板下游; 当距离超过临界间距后, 旋涡形成位置将转移至分隔板与钝体之间, 使钝体受力和旋涡脱落频率升高. 另外, 钝体后脱体旋涡的产生并不总是一个不利现象, 也可对它进行利用, 国外已有部分学者开始研究利用压电片代替分隔板进行能量收集 [10-11], 以及开发出一些电磁式能量收集装置 [12-14], 能量收集的研究集中于如何加强流体作用力以提高换能效率.

2 改变分隔板长度控制钝体尾迹

实际物体的外形非常复杂, 最具有典型意义的钝体是圆柱和方柱. 安装分隔板控制钝体尾迹的问题很早就受到人们的关注, 其结构如图 1 所示, 长为 L 的分隔板安装在钝体尾迹中心线上, 分隔板前端与钝体底部的距离为 g, D 是钝体的特征尺寸.

收稿日期 : 2010-06-02, 修回日期 : 2010-12-27

* 新型微纳器件与系统技术国家重点学科实验室基金项目 (2009MS04) 资助

† E-mail: lizhang@cqu.edu.cn

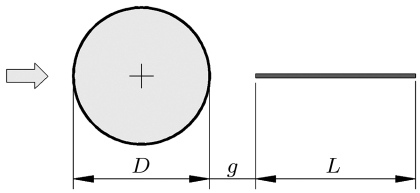

图 1 钝体后安装分隔板模型示意图

2.1 分隔板长度对圆柱绕流的影响

圆柱式钝体在实际工程中很常见, 因其无角点, 流动分离点的位置是变化的, 因此分离现象和尾迹流动特性与雷诺数 Re 有很大关系. 早在 1953 年 Roshko[15-16] 就发现将不同长度的分隔板安装在圆柱后尾迹中心线上时会出现不同的流动特征, 并直接反映在圆柱受力情况和旋涡脱落频率的改变上. 分隔板阻断了圆柱后剪切层的相互作用, 推迟或抑制旋涡形成, 从而使圆柱阻力和旋涡脱落频率发生变化.

大量研究表明, 安装在圆柱尾部的分隔板 (板柱间距 $g = 0$) 会使圆柱尾部压力增大 [17-19], 进而减小圆柱阻力, 甚至当分隔板非常短时, 阻力也会产生较大变化. Apelt 和 West 等 [17] 在实验中 ($10^4 < Re < 5 \times 10^4$) 采用的最短分隔板长度只有 $D/16$, 阻力减少了 9%. 已有研究表明, 阻力并不随着分隔板长度的增加而单调递减. 图 2 给出了不同 Re 数下阻力系数随分隔板长度的变化情况. 从图 2 中可以看出在亚临界 Re 数范围内, 当分隔板长度 L 由 0 变化到 D 时, 圆柱阻力逐渐降低 [17-18,20]; 在 $L/D = 1.0$ 时, 旋涡恰好形成于分隔板末端, 此时阻力出现最小值, 仅是普通圆柱绕流时的 69%, 而且升力有明显降低. 但低 Re 数下阻力并不是在 $L/D = 1.0$ 时最低, 同时在 L/D 由 1 变化到 2 的过程中也未出现阻力上升的情况, $Re = 100$ 时, 阻力在 $L/D = 4.5$ 时才达到最小 [3]. 导致该差异出现的主要影响因素是 Re 数, 不同 Re 数对应于不同的旋涡形成区长度 [21], 而最小阻力点所对应的分隔板长度与旋涡形成区的尺寸大致相等. 如果分隔板能够占据旋涡形成区, 旋涡脱落将受到抑制 [3,22]. 国内在该方面的研究还较为匮乏, 夏雪湍等 [6] 在研究机身后体装置时发现在飞行器上添加分隔板可有效地减少阻力; 赵静等 [19] 通过大涡模拟得出增加分隔板会使钝体阻力减少, 但升力增大的结论.

不同长度的分隔板除了对圆柱受力产生较大影响外, 还对旋涡脱落频率产生重要影响. 低 Re 数下无量纲旋涡脱落频率施特鲁哈尔数 $Sr(Sr = f_sD/U_\infty)$ 随分隔板长度增加单调递减 [3]. 图 3 所示为不同 Re 数下, Sr 数随分隔板长度的变化曲线, 当 Re 数升高至亚临界范围 ($300 < Re < 2.5 \times 10^5$) 时, 虽然此时钝体壁面上的边界层为层流, 但尾迹已经开始向湍流转变, Sr 数随着分隔板长度的变化呈上下波动.

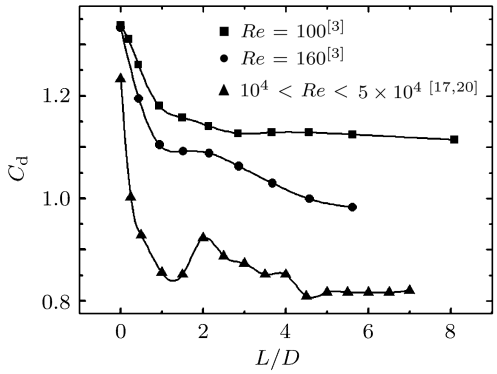

图 2 圆柱绕流时阻力系数 C_d 随分隔板长度变化

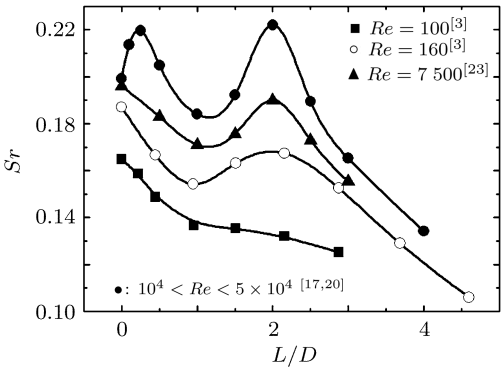

图 3 不同 Re 数下, Sr 数随分隔板长度的变化

钝体后部两个分离剪切层的相互作用是尾迹旋涡形成的决定性因素 [24-25], 利用该旋涡的形成机制可以较好地解释 Sr 数随分隔板长度的变化过程. 以 Apelt 等 [17,20] 的实验结论为例, 根据图 3 中$10^4 < Re < 5\times10^4$ 对应的 Sr 数随分隔板长度的变化曲线, 可将分隔板长度分为 5 个区域: (1) $L < 0.25D$, 分隔板使分离剪切层强度增加, 导致钝体下游剪切层相互作用加强, 从而使旋涡脱落频率增加, 表现为 Sr 数随着分隔板长度的增加而上升; (2) $0.25D \leqslant L < 1D$, Sr 值随 L 增加而降低, 此时分离剪切层长度随 L/D 增加而伸长 [26], 剪切层扩散能力增加, 强度减弱, 使旋涡脱落频率降低; (3) $1D \leqslant L < 2D$, 该区域 Sr–L/D 曲线再次上升, 此时在分隔板后缘的一侧可以观察到二次涡的形成 [3], 二次涡与该侧主旋涡旋转方向相反, 但旋涡强度相当, 二者相互作用导致 Sr 数上

升; (4) $2D \leqslant L < 5D$, Sr 数随分隔板长度增加再次下降, 由于此时分隔板较长, 剪切层的相互作用随板长增加持续减弱, 从而 Sr 数会逐渐降低; (5) $L > 5D$, 此时分隔板长度已达到临界长度, 绕流钝体的分离剪切层会再次附着在分隔板表面, 分隔板完全阻断了上下两侧剪切层的相互作用, 旋涡脱落被完全抑制. 多数研究者的结论中 Sr–L/D 曲线都可分为这 5 个不同的变化区域, 唯一的区别是由于不同的 Re 数, 各个区域的分隔板长度范围不一致, 但总体趋势是相似的.

2.2 分隔板长度对其他形状钝体绕流的影响

除了圆柱外, 实际工程中还经常见到一些其他形状的钝体, 如方柱 [27-28]、半椭圆柱 [29]、半圆柱 [30-32], 甚至一些 T 型 [33] 和 H 型柱 [34] 等. 与圆柱绕流不同的是, 这些钝体的分离点大都是固定的, 相对来说其流动特性对 Re 数显得不敏感. 随着分隔板顺流方向长度的增加, 可能出现分离流再附着现象. 与圆柱尾迹分隔板控制相比, 在该类分离点固定的钝体后安装分隔板也可起到类似的尾迹控制作用. Bearman[29] 实验中采用的半椭圆即属于分离点固定的钝体, 实验观察到钝体尾部压力系数的负值 $-Cpb$ 和 Sr 数随分隔板长度的变化趋势是相似的. 在分隔板长度 $L/D < 1.5$ 时, 随着长度的增加, 旋涡脱落频率增大, Sr 值在 $L/D = 1.3$~1.5 时出现最大值; $L/D > 1.5$ 后, Sr 数随分隔板长度的增加而降低; 直到分隔板长度超过 $3D$ 时, 分离流在 $L = 2.9D$ 处再次附着于分隔板上, 旋涡脱落完全受到抑制. Nakayama 和 Noda[35] 在对 Bearman 的实验模型 [29] 进行大涡模拟 (LES) 的计算中也观察到分离流再附现象. 当分隔板长度小于再附着点位置时, 旋涡的形成被推迟到分隔板下游, 分隔板长度超过再附着点位置时, 旋涡脱落将完全受到抑制. 值得注意的是 Bearman[29] 的实验结论认为 Sr 数是随 Re 数变化的, 但是 Apelt 和 West[20] 在普通平板后安装分隔板的实验中认为 Sr 数受 Re 数的影响较小, 主要是由于 Bearman[29] 采用的半椭圆柱前部几乎是流线型, 不同 Re 数下分离剪切层的厚度不同, 而普通平板绕流后的分离剪切层厚度随 Re 数的变化不大, 所以二者结论存在差异. 总的来说, 分离点固定的钝体后安装分隔板也可起到相同的尾迹控制作用, 钝体阻力和升力随着分隔板长度的增加都会出现不同程度的减小 [31], 而且当分隔板长度超过临界长度时, 钝体后旋涡脱落总能受到抑制, 该临界长度可以通过钝体周围的压力分布以及旋涡脱落情况来判断. 以上讨论的分隔板长度对钝体后尾迹特性的影响并没有考虑分隔板与钝体之间存在间距 g 的情况, 但是值得注意的是在该类分离点固定的钝体后安装分隔板时, 如果将分隔板移向钝体下游, 使分隔板与钝体之间存在适当的间距, 此时尾迹受到的影响比分隔板长度的影响更为强烈 [27,31].

3 改变板柱间距控制钝体尾迹

3.1 不同间距时的尾迹特性

分隔板前端与钝体尾部的距离是影响分隔板尾迹控制性能的一个主要参数. 钝体后一侧的分离剪切层失稳后不断从相连的剪切层中获取涡量, 直到其强度足以将另一侧的剪切层吸引到该侧来, 此时相反的涡量切断增长中的旋涡使旋涡脱落, 所以在合适的位置安装分隔板阻止这种相互作用即可抑制旋涡脱落. 但在高 Re 数下, 虽然近尾迹的大尺度旋涡脱落被分隔板抑制, 剪切层不稳定性却仍然存在 [36-37], 旋涡在下游较远处仍有可能形成, 不过钝体受到的影响已经相当小. 当分隔板与钝体间存在间距 g 且该间距较小时, 分隔板使上下两侧剪切层延伸, 旋涡在分隔板下游形成, 如果分隔板较长则旋涡将受到抑制 [16,38]; 当 g 较大时, 旋涡在分隔板上游形成, 与普通圆柱绕流时的流场相似, 但是由于受到分隔板的影响, 旋涡则更靠近钝体尾部, 从而会使升力幅值升高, 甚至比没有分隔板的时候更高 [22,39].

大量研究表明当分隔板与钝体之间存在间距时, 长度与钝体特征尺寸相等的分隔板对尾迹的控制最为有效 [18,40-41]. 分隔板长度为 D 时, 不同 Re 数下板柱间距对 Sr 数的影响如图 4 所示. 将 $L = D$ 的分隔板安装在圆柱尾部, 与裸柱绕流时相比, 虽然旋涡脱落频率发生改变, 但旋涡并没有完全受到抑制, 将该分隔板移向圆柱下游时, 旋涡脱落频率随 g 的增大而降低, 尾部压力也随之增加. 从图 4 中可以看出, 当 g 增大到一定值时, 旋涡脱落频率将达到最低值, 尾部压力也会达到最大, 但此时旋涡脱落频率会在最低值和裸柱绕流时的频率值之间来回跳动, 该间距即为临界间距, 不同 Re 数下临界间距有所不同, 此时会发生旋涡形成位置的转移, 所以旋涡脱落频率也不稳定. 当 g 较大时, 分隔板控制作用将消失, Sr 值几乎保持恒

定, 并趋于裸柱绕流时的值. 另外, 阻力系数 $C_{\rm d}$ 值随间距 g 的变化趋势与 Sr 数的变化趋势相似 [41]. Akilli 等 [42-43] 在浅水区 (水深保持 $0.5D$) 的实验也得出了相似的结论, 阻力与旋涡脱落频率都随板柱间距变化, 而且变化趋势是相似的.

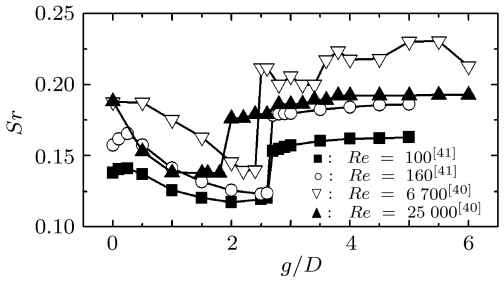

图 4 不同 Re 数下 Sr 数随板柱间距 g 的变化

对于半圆柱 [31,44] 和方柱 [27] 绕流, 分隔板与钝体尾部之间的距离也是影响尾迹特性的一个重要参数. 近尾迹旋涡形成区长度随间距的增加而伸长, 升力和阻力也存在不同程度降低, Sr 数随 g 的变化趋势与圆柱绕流时相似. 当板柱间距超过临界距离后, 分隔板对尾迹特性的影响急剧减弱. 另外, 分隔板长度固定时, Hasan 和 Budair[27] 发现方柱后旋涡脱落频率随间距的变化与 Re 数无关, 而且 Sr 数的最小值出现在 $g/D=0$ 处, 他们实验中的 Re 数范围是 12 000 ~ 24 000. 但在 Mansingh 等 [45] 的实验中, Sr 数在 $3 \leqslant g/D \leqslant 5$ 之间才出现最小值, 这与 Hasan 和 Budair[27] 实验结论存在较大差异. 引起该差异的原因主要有两个, 一是 Re 数, Mansingh 等 [45] 实验中采用的 Re 数仅为 1 200, 比 Hasan 等 [27] 实验中的 Re 数低得多; 二是钝体形状有所不同, Mansingh 等 [45] 实验钝体为长方柱, 但 Hasan 等 [27] 实验采用的是正方柱, 钝体侧边长度不同.

3.2 板柱临界间距

随着分隔板与钝体间距 g 由小变大, 必然存在一个临界间距, 在该位置会产生旋涡形成位置的转移, 而且 Sr 数会在两个不同的值之间来回跳跃变化 [16]. 临界间距 $g_{\rm cr}$ 是判断旋涡形成位置转移的重要参数, 对钝体后尾迹控制起到重要作用, 如果板柱间距超过临界间距, 则钝体后安装分隔板不能起到预期的控制作用. Hwang 等 [41] 对安装在临界位置附近的分隔板的钝体尾迹特性做了详细分析, 他们的模型中 $g_{\rm cr}$ 在 $2.6D \sim 2.7D$, 当分隔板安装在 $g=2.6D$ 时, 即板柱间距略小于临界间距时, 分隔板能有效抑制近尾迹旋涡的形成, 柱体两侧分离剪切层之间的相互作用被隔断, 从而使阻力明显减少. 此时在分隔板与圆柱之间的瞬时涡量场在流向上随时间变化几乎保持对称, 这就意味着垂直流向的压力分布也存在该准对称情况, 所以使圆柱受到的升力出现明显降低. 当分隔板布置在间距刚好超过临界间距时, 即 $g=2.7D$ 时, 柱后分离剪切层变得不稳定, 导致周期性交替旋涡产生, 圆柱附近的压力场与没有分隔板时相似, 此时也就存在较大的阻力和升力.

Re 数是影响临界间距的一个重要参数. $Re=$ 14 500 时, 圆柱后旋涡形成区长度约为 2.2 D [46], Roshko[16,38] 实验中的分隔板长度为 $1.14D$, 而临界间距为 $2.71D$. 可见 $g_{\rm cr}$ 比没有分隔板时的钝体后旋涡形成区域的尺寸稍长. 另外, 旋涡形成区长度是随 Re 变化的 [47], 这意味着 $g_{\rm cr}$ 随 Re 数的变化而变化. Ozone[40] 发现随着 Re 数由 67 00 增加到 17 000, $g_{\rm cr}$ 变小, 即随 Re 增大, 临界位置越靠近圆柱. 但是, Re 在 17 000 和 25 000 之间时, 临界位置几乎不变, 可见当 Re 数超过 17 000 后, Re 数对临界间距的影响已经变得很小. 目前并没有相关文献得出计算临界间距的方法, 只能通过实验加以判断, 常以压力系数或 Sr 数突变点来确定; 或者临界间距仅是一个范围, 在该范围内都会出现旋涡形成位置的转移.

4 其他分隔板构型系统

安装在钝体后尾迹中心线上的分隔板通过阻止剪切层的相互作用控制钝体后的旋涡脱落, 由此可推测将分隔板安装在其他位置时, 如果能干扰钝体后两侧剪切层的相互作用, 则该分隔板也可用来控制尾迹特性. 不同的来流条件以及实际结构形状等都会使这种非对称的绕流情况出现. 目前, 部分研究者已经开展了偏离尾迹中心线安装分隔板的研究, 并取得一些进展, 其结构如图 5 所示.

将分隔板安装在偏离尾迹中心线 z 处, 在合适的位置该分隔板也可以抑制脱体旋涡的形成, 达到控制尾迹特性的目的 [40]. 图 6 所示为方柱绕流中分隔板偏离中心线不同距离时的 Sr 数随间距 g 的变化情况, 从图中可以看出当分隔板偏离尾迹中心线的距离 z 较小时, 旋涡脱落频率随 g 的变化与中心线安装分隔板时相似, 钝体后两侧剪切层可被有效分开, 此时钝体尾部压力随间距 g

的变化也有相似的曲线; 当 z 超过一定临界值后 ($z/D = 1.1$), 此时的分离剪切层都出现在分隔板一侧, 无法阻止二者相互作用, 分隔板尾迹控制作用就会消失 [40,48]. 临界距离 $z_{\rm cr}$ 的值应与普通钝体绕流时的尾迹宽度相当, 因此 Re 数、钝体形状及其特征尺寸等都会对 $z_{\rm cr}$ 产生重要影响.

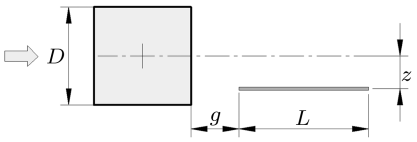

图 5　偏置分隔板示意图

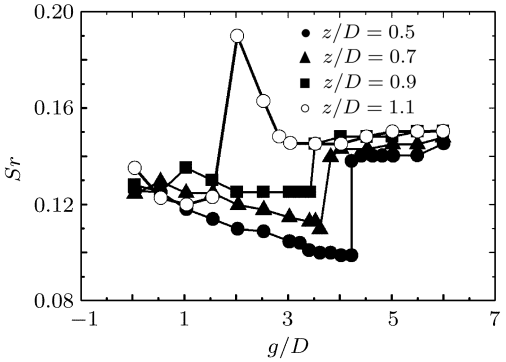

图 6　方柱绕流中分隔板偏离中心线时 Sr 随 g 的变化 [40]

另外, 将分隔板垂直流向安装也能达到控制钝体尾迹的目的. 垂直于流向安装的分隔板会使钝体后尾迹变得非常宽, 钝体两侧剪切层分离后会分别流向垂直分隔板两端. 此时分隔板与钝体尾部之间也存在 $g_{\rm cr}$, 该临界位置随分隔板长度增加而向下游移动 [18]. 当 $g < g_{\rm cr}$ 时, 旋涡脱落仍可受到抑制, 而且在一定情况下会使钝体升力增加, 此种情况对于研究如何提高钝体升力是有利的, 但是值得注意的是, 升力的提高往往也伴随着阻力的升高 [49].

除了安装在钝体下游的分隔板外, 安装在上游的分隔板也有助于改善钝体的受力情况. 上游分隔板能使钝体驻点附近的压力降低, 并且具有使钝体尾部压力升高的二次效应 [50]. 下游分隔板的作用主要是能抑制钝体后近尾迹旋涡形成, 从而使尾部压力升高. 实际工程中如果希望抑制钝体旋涡脱落, 同时安装上下游分隔板也是一种有效的被动控制措施.

以上讨论的模型中钝体和分隔板都是固定不动的, 但在实际工程中, 当旋涡脱落频率接近钝体结构的自振频率时, 将会产生同步或者锁定现象, 此时结构会发生大幅振动, Bearman [51] 和 Williamson 等 [52] 曾详细总结了涡致振动的各方面特征. Assi 等 [53] 对于圆柱后安装分隔板这种特殊结构产生涡致振动时的特征做了详细分析. 将圆柱和分隔板限制在可横向运动时, 会出现强有力的横向驰振, 并且强度随来流速度增加而增强. 如果分隔板可绕圆柱自由旋转, 当分隔板长度 L 在 $0.5D \sim 1.5D$ 时, 分隔板会稳定在偏离顺流中心线 $\pm 20°$ 的位置, 出现双稳态结构, 旋涡产生后流向下游不会返回引起涡致振动, 但此时存在较大的横向升力. 针对这种双稳态结构, 在圆柱后 $\pm 20°$ 的位置各安装一个分隔板, 则横向升力可有效抵消而抑制涡致振动 [53].

与 Assi 等 [53] 不同的是, Shukla 等 [54] 将分隔板铰接在圆柱体尾部进行绕流实验, 模型如图 7 中的示意图所示. 圆柱固定, 分隔板在非稳定的流体力作用下可绕铰接点转动, 因此分隔板并不能完全消除上下两侧剪切层的相互作用. 图 7 为该模型分隔板末端振幅随板长的变化情况. 在分隔板质量足够小时, 分隔板呈周期性振动, 振幅随板长增加缓慢降低, 分隔板末端位移最高可达 $0.45D$; 当板长 L 超过 $4D$ 时振幅会出现陡降, 长分隔板运动规律性不强, 主要是由于此时沿流向的多个旋涡同时作用在分隔板上, 尾流旋涡运动与长分隔板振动不再同步, 压力方向不一致所致.

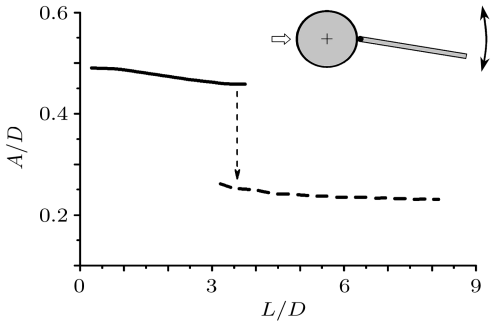

图 7　铰接分隔板末端振幅随板长的变化

5　利用分隔板进行能量收集

目前, 利用流体绕流钝体时产生的脱体旋涡激励结构振动收集环境能的研究正在兴起. 钝体后安装分隔板的发电模型也受到许多研究者的关注. 具有代表性的是电磁式和压电式换能器. 能量

收集装置的研究倾向于如何扩大流体在分隔板上的作用力, 提高能量收集效率.

电磁式装置主要是利用钝体后的悬臂柔性分隔板在足够高的流速下失稳而发生颤振, 进而切割磁感线进行能量收集. 在合适的结构参数下, 该装置的输出功率可与传统风涡轮发电机相匹敌, 但目前该技术也只是提出了理论模型 [12]. 值得注意的是柔性板在合适的质量和刚度下才会产生有规律颤振 [55], 同时也是该技术的一大难点所在. 相比之下, 压电式能量收集装置更容易实现. 图 8 所示为一种典型的由锆钛酸铅 (PZT) 材料制成的压电式分隔板能量收集装置 [11], 用压电片代替钝体后的分隔板, 流体绕流钝体在钝体两侧产生交替脱落的旋涡, 旋涡沿流向向后移动导致分隔板两侧出现压力差, 使压电分隔板产生结构变形, 进而利用压电效应将流体动能转换为可以利用的电能.

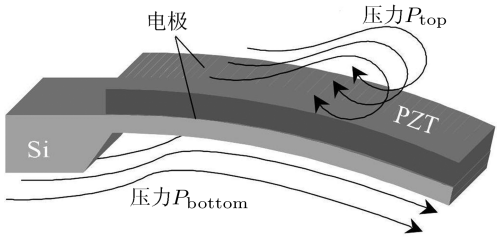

图 8 悬臂梁换能器 [11]

由前面的分析可知, 当分隔板与钝体之间没有间距 g 时, 分隔板长度就成为影响钝体后旋涡形成的主要因素, 从而影响流体作用在分隔板上的力的大小, 进而影响能量收集效率. 另外, 压电式能量收集装置中所采用的分隔板压电材料应具有足够的柔韧度, 在流体作用力下才能产生足够变形, 从而将流体动能转变为电能. 由于压电式换能器的结构类似游动中的鳗鱼, 所以也称为 “鳗鱼式” 压电能量收集装置. 当旋涡脱落频率与压电 “鳗鱼” 的运动频率相匹配时可达最大输出功率 [56], 水流速度为 0.5 m/s 时, 利用该装置输出的峰值电压可达3 V[57]. 图 9 所示的聚偏氟乙烯 (PVDF) 旗帜理论输出功率密度可达 11∼32 W/m^2[11].

当压电片分隔板长度 L 较长时, 沿流向的多个旋涡同时作用在分隔板上, 压力方向不一致, 导致压电片部分向上弯曲部分向下弯曲. 这样, 压电片不同部位产生的电荷将相互中和, 而解决此问题的方法是在压电片上沿流向布置交错电极, 如图 9 所示, 但是交错电极会明显降低压电片的能量收集效率 [58], 所以较长的压电片将限制能量收集效率. 为了解决该问题, 可将分隔板的长度 L 限制在一个旋涡直径或钝体特征尺寸 D 内, 实验发现短压电分隔板的输出功率明显高于长压电片 [59-60]. 可见分隔板长度、来流速度以及压电分隔板的材料都是影响压电分隔板式换能器能量收集效率的主要因素.

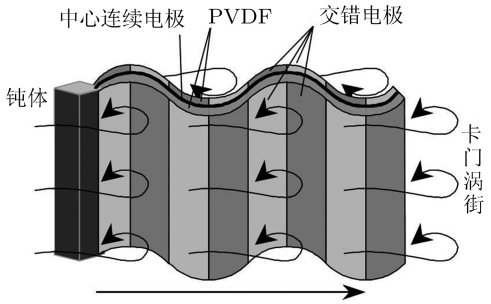

图 9 PVDF 旗帜换能器 [11]

如果将压电分隔板式换能器堆栈排列, 并设计为发电系统置入河流中, 其功率密度可达到 68.1 W/m^3, 远高于传统风涡轮发电机的 34 W/m^3[11]. 可见压电分隔板在能量收集方面具有相当大的发展潜能. 自然界中流动现象是普遍存在的, 而且较低的流速即可激励压电悬臂梁振动, 并将机械能转化为电能进行利用. 利用钝体后安装分隔板这种结构收集流体动能将成为扩展清洁能源开发利用的一个研究重点, 而且一旦实现低速流动下的分隔板振动控制, 将极大扩展自然界能源的利用范围.

6 结 语

(1) 钝体后安装分隔板, 结构设计简单, 价格低廉, 在尾迹控制中受到人们的青睐, 是一种有效的被动控制技术. 与主动控制技术相比, 虽然被动控制不需要外加能量, 但是在达到控制旋涡脱落的目的时, 却往往伴随流体动力性能的消耗.

(2) 分隔板结构尺寸是影响钝体尾迹旋涡脱落控制性能的主要参数, 通过简单改变分隔板长度或板柱间距, 即可达到改变流场结构、影响流体动力特性的目的. 但钝体尾迹中心线上布置的分隔板具有明显的方向依赖性. 针对该类结构模型, 今后宜更多地开展可动分隔板或钝体周围其他位置布置分隔板的研究.

(3) 实际工程中的钝体形状多种多样, 而目前的研究多集中在圆柱与方柱, 研究结论在拓展到

其他钝体形状时还存在不少困难. 目前分隔板的研究仅仅考虑单个钝体绕流尾迹控制, 而实际情况下钝体往往以群组形式出现, 应进一步深入该方面的研究.

(4) 分隔板的研究集中于解决实际工程问题, 注重直观的流体动力学性能, 而基础理论研究很少. 下一步的研究重点应放在分隔板的控制机理甚至其他控制技术的理论基础上.

(5) 钝体后布置分隔板模型的数值计算研究进展较缓, 二维数值模拟成果较为丰富, 至于分隔板三维绕流问题的研究迄今尚未成熟, 还处于初级研究阶段.

(6) 利用钝体尾迹中心线上布置分隔板进行流体动能收集是扩展清洁能源开发利用的一个研究重点, 而该模型目前研究重点在减少或者抑制旋涡脱落, 今后的工作需进行更多关于如何实现提升流体作用力、提高能量收集效率的研究.

参 考 文 献

1 Zdravkovich M. Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1981, 7(2): 145-189

2 Choi H, Jeon W, Kim J. Control of flow over a bluff body. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008, 40: 113-139

3 Kwon K, Choi H. Control of laminar vortex shedding behind a circular cylinder using splitter plates. *Physics of Fluids*, 1996, 8(2): 479-486

4 Eckelmann H. Bluff-body Wakes, Dynamics and Instabilities. Berlin: Springer-Verlag, 1993.364

5 Fiedler H E, Fernholz H H. On management and control of turbulent shear flows. *Progress in Aerospace Sciences*, 1990, 27(4): 305-387

6 夏雪瀚, 麻树林. 机身后体装置对阻力的影响. 航空学报, 1991, 12(8): 435-438

7 You D, Choi H, Choi M, et al. Control of flow-induced noise behind a circular cylinder using splitter plates. *AIAA Journal*, 1998, 36: 1961-1967

8 Razavi S, Farhangmehr V, Barar F. Impact of a splitter plate on flow and heat transfer around circular cylinder at low reynolds numbers. *Journal of Applied Sciences*, 2008, 8(7): 1286-1292

9 Tiwari S, Chakraborty D, Biswas G, et al. Numerical prediction of flow and heat transfer in a channel in the presence of a built-in circular tube with and without an integral wake splitter. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(2): 439-453

10 Carroll C B. Energy harvesting eel. Ocean Power Technologies,Inc., Pennington, NJ, US Patent No.:US 6,424,079 B1, 2002-07-23

11 Pobering S, Schwesinger N. A novel hydropower harvesting device. In: Proceedings of International Conference on MEMS, Banff, Canada, 2004. 480-485

12 Tang L S, Paidoussis M P, Jiang J. Cantilevered flexible plates in axial flow: energy transfer and the concept of flutter-mill. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 326(1-2): 263-276

13 Bernitsas M M, Ben-Simon Y, Raghavan K, et al. The VIVACE converter: model tests at high damping and Reynolds number around 10^5. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2009, 131(1): 011102

14 Bernitsas M M, Raghavan K, Ben-Simon Y, et al. VIVACE (vortex induced vibration aquatic clean energy): a new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2008, 130(4): 041101

15 Roshko A. On the development of turbulent wakes from vortex streets. National Aeronautics And Space Administration Washington DC, Report 1191, 1954

16 Roshko A. On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies. National Aeronautics And Space Administration Washington DC, Technical Note 3169, 1954

17 Apelt C J, West G S, Szewczyk A A. The effects of wake splitter plates on the flow past a circular cylinder in the range $10^4 < Re < 5 \times 10^4$. *Journal of Fluid Mechanics Digital Archive*, 1973, 61(01): 187-198

18 Kawai H, Discrete vortex simulation for flow around a circular cylinder with a splitter plate. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33(1-2): 153-160

19 赵静, 潘树春, 吕林, 等. 带横隔板圆柱扰流的三步有限元大涡模拟. 中国海上油气, 2009, 21(5): 347-351

20 Apelt C J, West G S. The effects of wake splitter plates on bluff-body flow in the range $10^4 < Re < 5 \times 10^4$. Part 2. *Journal of Fluid Mechanics Digital Archive*, 1975, 71(01): 145-160

21 Schaefer J W, Eskinazi S. An analysis of the vortex street generated in a viscous fluid. *Journal of Fluid Mechanics Digital Archive*, 1959, 6(02):241-260

22 Lin S, Wu T. Flow control simulations around a circular cylinder by a finite volume scheme. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 1994, 26(3): 301-319

23 Cimbala J, Garg S. Flow in the wake of a freely rotatable cylinder with splitter plate. *AIAA Journal*, 1991, 29: 1001-1003

24 Gerrard J H. The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies. *Journal of Fluid Mechanics Digital Archive*, 1966, 25(02): 401-413

25 Cardell G. Flow past a circular cylinder with a permeable splitter plate: [Dissertation]. Pasadena: California Institute of Technology, 1993.1-212

26 Anderson E, Szewczyk A. Effects of a splitter plate on the near wake of a circular cylinder in 2 and 3 dimensional flow configurations. *Experiments in Fluids*, 1997, 23(2): 161-174

27 Hasan M, Budair M. Role of splitter plates in modifying cylinder wake flows. *AIAA Journal*, 1994, 32(10): 1992-1998

28 Rathakrishnan E. Effect of splitter plate on bluff body drag. *AIAA Journal*, 1999, 37(9): 1125-1126

29 Bearman P W. Investigation of the flow behind a two-dimensional model with a blunt trailing edge and fitted with splitter plates. *Journal of Fluid Mechanics*, 1965, 21: 241-255

30 Cruz A S, David L, Pecheux J, et al. Characterization by proper orthogonal decomposition of the passive controlled wake flow downstream of a half cylinder. *Experiments in Fluids*, 2005, 39(4): 730-742

31 Farhadi M, Sedighi K, Fattahi E. Effect of a splitter plate on flow over a semi-circular cylinder. *Journal of Aerospace Engineering*, 2010, 224(3): 321-330
32 Texier A, Santa Cruz Bustamante A, David L. Contribution of a short separating plate on the control of the swirling process downstream a half-cylinder. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 26(5): 565-572
33 Alam M M, Sakamoto H, Zhou Y. Effect of a T-shaped plate on reduction in fluid forces on two tandem cylinders in a cross-flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94(7): 525-551
34 Nakamura Y. Vortex shedding from bluff bodies with splitter plates. *Journal of Fluids and Structures*, 1996, 10(2): 147-158
35 Nakayama A, Noda H. LES simulation of flow around a bluff body fitted with a splitter plate. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 85(1): 85-96
36 Unal M F, Rockwell D. On vortex formation from a cylinder. Part 2. Control by splitter-plate interference. *Journal of Fluid Mechanics Digital Archive*, 1988, 190: 513-529
37 Unal M F, Rockwell D. On vortex formation from a cylinder. I. The initial instability. *Journal of Fluid Mechanics*, 1988, 190: 491-512
38 Roshko A. On the wake and drag of bluff bodies.*J. Aeronaut. Sci*, 1955, 22: 124-132
39 Mittal S. Effect of a "slip" splitter plate on vortex shedding from a cylinder. *Physics of Fluids*, 2003, 15(3): 817-820
40 Ozone S. Flow control of vortex shedding by a short splitter plate asymmetrically arranged downstream of a cylinder. *Physics of Fluids*, 1999, 11(10): 2928-2934
41 Hwang J Y, Yang K S, Sun S H. Reduction of flow-induced forces on a circular cylinder using a detached splitter plate. *Physics of Fluids*, 2003, 15(8): 2433-2436
42 Akilli H, Sahin B, Tumen N F. Suppression of vortex shedding of circular cylinder in shallow water by a splitter plate. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2005, 16(4): 211-219
43 Akilli H, Karakus C, Akar A, et al. Control of vortex shedding of circular cylinder in shallow water flow using an attached splitter plate. *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME*, 2008, 130(4): 041401
44 Boisaubert N, Texier A. Effect of a splitter plate on the near-wake development of a semi-circular cylinder. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1998, 16: 100-111
45 Mansingh V, Oosthuizen P. Effects of splitter plates on the wake flow behind a bluff body. *AIAA Journal*, 1990, 28: 778-783
46 Bloor M S. The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics Digital Archive*, 1964, 19(02): 290-304
47 Noca F, Park H G, Gharib M. Vortex formation length of a circular cylinder ($300 < Re < 4000$) using DPIV. In: Bearman P W, Williamson C H K. eds. Proceedings of Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibration, Washington DC, USA, 1998-06-21-25, ASME-FED, 1998. 1-7
48 Ozono S. Vortex suppression of the cylinder wake by deflectors. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(1-2): 91-99
49 童秉纲, 张炳暄, 崔尔杰. 非定常流与涡运动. 北京: 国防工业出版社, 1993. 320-322
50 Hwang J Y, Yang K S. Drag reduction on a circular cylinder using dual detached splitter plates.*Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(7): 551-564
51 Bearman P. Vortex shedding from oscillating bluff bodies. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1984, 16(1): 195-222
52 Williamson C H K, Govardhan R. Vortex-induced vibrations. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004, 36: 413-455
53 Assi G R S, Bearman P W, Kitney N. Low drag solutions for suppressing vortex-induced vibration of circular cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 2009, 25: 666-675
54 Shukla S, Govardhan R N, Arakeri J H. Flow over a cylinder with a hinged-splitter plate. *Journal of Fluids and Structures*, 2009, 25: 713-720
55 Connell B S H, Yue D K P. Flapping dynamics of a flag in a uniform stream.*Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 581(1): 33-67
56 Allen J J, Smits A J. Energy harvesting eel. *Journal of Fluids and Structures*, 2001, 15: 629-640
57 Taylor G W, Burns J R, Kammann S M, et al. The energy harvesting eel: a small subsurface ocean/river power generator. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 539-547
58 Sodano H A, Inman D J, Park G. Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(10): 799-807
59 Pobering S, Schwesinger N. Power supply for wireless sensor systems. IEEE Sensors, Lecce, Italy, 2008-10-26-29, IEEE Xplore, 2008. 685-688
60 Pobering S, Ebermeyer S, Schwesinger N. Generation of electrical energy using short piezoelectric cantilevers in flowing media. In: Ahmadian M, Ghasemi-Nejhad M N, eds. Proceedings of SPIE, San Diego,California, USA, 2009-08-02-06, SPIE, 2009, 7288: 728807

CNKI 优先出版编码: lxjz2010-059

REVIEW ON THE CONTROL OF FLOW OVER A BLUFF BODY USING SPLITTER PLATES*

ZHANG Li[1,2,†]　DING Lin[1]

[1] College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China
[2] National Key Laboratory of Fundamental Science of Micro/Nano-Device and System Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract　Bluff bodies are widely used in engineering. The vortex shedding behind bluff bodies can induce vibration and thereby cause structural damage. Adding a splitter plate downstream of a bluff body is an efficient passive control technique. The interaction between shear layers is postponed by the splitter plate. Then vortex shedding and near wake interaction of the bluff body are controlled efficiently, and then the service life of structure will be extended. The body-plate configuration can also be used for energy harvesting. This article presents the current state of wake controlling and power harvesting by setting splitter plates around bluff bodies. The effects of splitter plates on the frequency and mechanical characteristics are analyzed for different shapes of bluff bodies are analyzed. In addition, the development trend of bluff body-splitter plate configuration and the research emphases are also suggested in this paper, and the energy harvesting system which originates from this configuration is pointed out as an important tendency for clean energy utilization.

Keywords　splitter plate, bluff body, vortex shedding, flow control, energy harvesting

张力, 男, 1956 年生, 工学博士, 重庆大学动力工程学院教授、博士生导师, 能源与环境研究所所长. 教育部高校能动学科热动专业教指委委员, 中国电力教育协会能动学科教学委员会副主任, 中国工程热物理学会理事, 重庆大学校学术委员, 动力工程与工程热物理学科学术带头人, 重庆市热能工程学科学术技术带头人. 长期从事多相流与燃烧, 热能动力及可持续能源技术的教学与科研工作. 研究兴趣: 气固多相流动, 化石燃料清洁燃烧与环境保护, 低品位燃料能源化技术及系统, 微尺度高能量燃烧技术及装置, 工业领域用能过程节能技术. 主持国家、国际合作、省部级科研项目 10 余项, 获国家科技进步奖二等奖 1 项, 省部级科技奖一等奖 1 项、二等奖 2 项, 获中国专利 7 项, 在国内外学术刊物及会议发表论文 70 多篇 (SCI、EI 收录 40 多篇).

* The project supported by the National Key Laboratory of Fundamental Science of Micro/Nano-Device and System Technology (2009MS04)
† E-mail: lizhang@cqu.edu.cn