

流体边界层上电磁力的控制效应研究¹⁾

周本谋* 范宝春* 陈志华† 叶经方* 丁汉新* 靳建明*

* (南京理工大学动力学院, 南京 210094) † (深圳大学建筑与土木工程学院, 深圳 518060)

摘要 利用作用于流体边界层上的电磁体积力改变流体边界层的结构, 研究电磁力对流场的控制作用效果. 电极与磁极交替分布的电磁场激活板包覆在圆柱体表面置于流动的电解质溶液中, 产生的电磁力沿圆柱体表面分布, 可以改变流体边界层的结构, 从而实现对流场的控制. 用电磁屏蔽和时域控制的方法调整电磁力的时空分布参数, 圆柱绕流分离点可以在前驻点和后驻点之间变动, 产生不同的控制效果. 流体边界层上的电磁力能连续控制圆柱绕流、尾流涡街的形态. 正向电磁力具有较好的消涡、减震和减阻控制效应. 反向电磁力具有明显的增涡控制效应, 具有较强的制动控制效应, 此时圆柱体表面涡量分布的对称性和稳定性被破坏.

关键词 电磁力, 流体控制, 控制效应, 边界层, 圆柱尾迹, 圆柱绕流

引 言

流体与物体发生相对运动形成的黏性边界层, 在雷诺数较大时可能在物体表面某处脱体, 并不断产生漩涡, 在其尾部形成尾流涡街. 对于更高雷诺数的流体则有可能形成湍流, 从而使流场的结构更为复杂. 一方面, 流体边界层的分离、涡街和湍流等会导致运动物体表面受力状况的变化, 可能使物体运动受阻增大, 产生震动和噪声; 另一方面, 流体分散技术广泛应用于流体的均匀混合和液体雾化等领域.

作用于流体边界层的电磁体积力可以改变流体边界层的结构. 早在 20 世纪中叶, 人们就设想用电磁力 (Lorentz 力) 控制电解质溶液的流动^[1]. 近 10 年来, 研究人员从应用基础性研究的角度对这方面的课题进行了富有成效的研究工作, 希望利用这一简单原理方便地实现控制流体绕流的形态、消除涡流、控制噪音、减少阻力、加速流体混合、提高流体混合均匀性等目的^[2~6]. Gailitis^[1] 等设计了一种由条状电极和磁极交错布置的电磁场激活板, 将其浸入流动的弱电解质溶液中, 产生的 Lorentz 力改变了流体边界层的结构. Henoch 等^[2] 对这种电磁场中的平板边界层进行了湍流应力等方面的实验研究. Weier 等^[3] 将此类激活板包覆在圆柱两侧, 对由此形成的圆柱绕流进行了实验研究和数值模拟. Kim 等^[4] 讨论分析了一定包覆范围内电磁场激活板对圆

柱阻力变化的影响. 范宝春等^[5,6] 对不同电磁力分布情况下的圆柱尾流进行了数值模拟.

本文建立了电解质溶液中圆柱绕流问题的流体与流体边界层控制模型, 从理论分析和实验研究两个方面对流体边界层上电磁力的控制效应进行了具体的讨论.

1 电磁力作用流体边界层的控制模型

对于二维电解质溶液中的圆柱绕流问题, 当圆柱体表面 (侧表面) 包覆电磁场激活板时, 描述电磁力控制流场流动的无量纲形式的控制方程可以写为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V &= -\nabla p + \frac{2}{Re} \nabla^2 V + kNF \\ \nabla \cdot V &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, $Re = \frac{u_\infty d}{\nu}$; $N = \frac{j_0 B_0 d}{2\rho u_\infty^2}$; d 为圆柱直径; N 称为作用参数, 取值范围一般为 $N = 1 \sim 5$; u_∞ 为来流速度; ν 为流体运动学黏性系数. $j_0 = \sigma E_0$, σ 为电解质的导电率, E_0 为电场强度, B_0 为磁场强度. F 为无量纲 Lorentz 力, 方向沿圆柱侧表面切线方向, 用于消涡控制时其方向与流体沿边界层的流动方向一致 (正向电磁力), 用于增涡时其方向与流体沿边界层的流动方向相反 (反向电磁力); 用电磁场激活板包覆圆柱时, 包覆范围内 Lorentz 力随圆柱的法向距离 r 呈指数衰减, 满足^[2]

$$|F_\theta| = e^{-\alpha(r-1)}, \quad F_r = 0 \quad (2)$$

2003-10-09 收到第 1 稿, 2004-05-18 收到修改稿.

1) 国防科工委基础性研究课题资助项目.

其中 r, θ 为极坐标 (无量纲化后, r 为实际极坐标值与圆柱半径之比), 下标表示坐标方向的分量. α 为常数, 表示电磁场在流体中渗透强度, 取值范围一般为 $\alpha = (0.65 \sim 1.25)\pi$.

k 为电磁力时空控制参数, 与作用于流体边界层上电磁力的空间分布范围和时域分布范围有关, 可以用多向开关函数 $k = k_t \times k_\theta$ 表示; 流体边界层上有电磁力控制时的 $|k_t| = 1$, 无电磁力控制时的 $k_t = 0$, 同时 k_t 的正负可代表电磁力的方向; 流体边界层上电磁场非屏蔽范围内的 $k_\theta = 1$, 电磁场屏蔽范围内的 $k_\theta = 0$; 电磁力时空控制参数表达式为

$$k_t = \begin{cases} 0, & 0 \leq t_1 \leq 500 \\ 1, & 500 < t_2 \leq 650 \\ 0, & 650 < t_3 \leq 800 \\ -1, & 800 < t_4 \leq 950 \\ 0, & 950 < t_5 \leq 1100 \end{cases} \quad (3)$$

$$k_\theta = \begin{cases} 1, & \theta_k \leq \theta \leq \theta_l \\ \dots, & \dots \\ 0, & \theta_m < \theta < \theta_n \\ \dots, & \dots \end{cases} \quad (4)$$

在 t_1 时段圆柱体相对流体运动, 逐渐形成稳定分布的流场, 在一定的雷诺数下将产生典型的尾流涡街; 在 t_2 时段加正向电磁力消涡; 在 t_3 时段取消电磁力, 恢复典型尾流涡街; 在 t_4 时段加反方向电磁力增涡; 在 t_5 时段取消电磁力, 又逐渐形成典型的尾流涡街. 有电磁力作用的液体边界层区域 k_θ 的值为

1, 没有电磁力作用的液体边界层区域 k_θ 的值为 0; 很显然, 为了分析研究最佳的有效包覆范围, 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的范围内 k_θ 的值可以是多个; 为了便于对比分析, 在通常情况下研究液体边界层上电磁力的控制效应时 (如电磁力消涡和增涡效应), 电磁场的包覆范围以来流方向取对称分布.

控制方程 (1)、电磁力时间与空间分布表示式 (2)~(4), 以及流场的初始状态和边界条件, 组成了流体边界层上电磁力控制效应问题分析研究理论模型.

2 实验装置与方法

取 $N = 1$, $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$, $u_\infty = 0.1 \text{ m/s}$, $j_0 = 10^3 \text{ A/m}^2$, $d = 0.02 \text{ m}$, 有 $B_0 = 1 \text{ T}$. 可见对于典型的流体和常规尺度而言, 要达到比较好的流体绕流控制效果, 产生电磁力的电磁场磁感应强度要达到 1 特斯拉数量级左右. 因此, 设计实验装置时应选取剩磁较大的 Nd-Fe-B (钕-铁-硼) 磁性材料.

包覆电磁场激活板的圆柱尺寸主要由磁场分布要求确定, 选取 N, S 磁极交错分布磁环的外直径为 20 mm, 每一片磁环的高度为 4 mm (或 2 mm). 这样每片包覆电极的直径也为 20 mm, 高度也为 4 mm (或 2 mm), 当流过电极 (流出或流进) 的电流为 0.25 A 左右时, 电流密度 $j_0 = 1000 \text{ A/m}^2$. 包覆电磁场激活板圆柱体由 5 对 (或 10 对) 电极和 5 对 (或 10 对) 磁极组成, 总长 80 mm, 具体结构如图 1 所示. 其中左图为表面全部包覆电磁激活板的圆柱结构图. 右上图为局部包覆电磁激活板的圆柱截面示意图, 在 θ_2 所示范围内, 液体边界层有电磁力作用 (以来

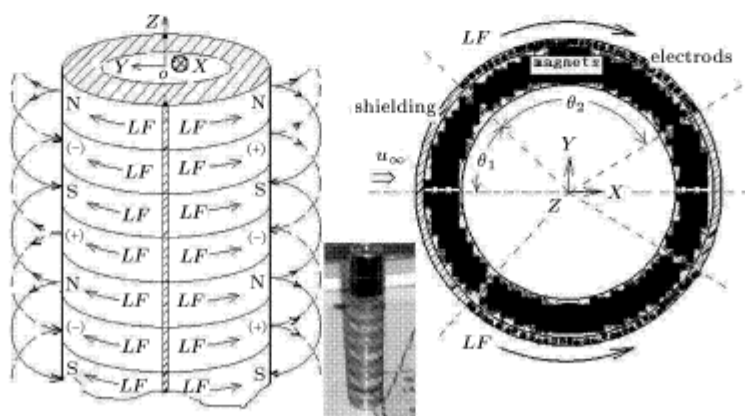


图 1 包覆电磁场激活板的圆柱体结构 (中下图为实物照片)

Fig.1 Sketch diagram of cylinder installed the electrodes and magnets for electromagnetic flow controlling
(the practicality photo located at below middle)

流方向对称分布); 其余部分电磁场被屏蔽, 相应液体边界层无电磁力作用. 电极与磁极的高度决定了液体边界层上电磁场的渗透强度, 极间间距越小, 电磁场愈集中于圆柱体表面.

电解质溶液为按照一定比例配置的硫酸铜溶液, 其密度和电导率与海水的值接近. 有机玻璃制成的液体槽, 内直径为 500 mm, 外直径为 700 mm, 深为 100 mm. 液体槽置于转盘之上, 转盘由调频调速电极驱动, 转速连续可调. 当转速为 2 转/min 时, 液体槽直径 600 mm 处的转动线速度为 0.063 m/s 左右, 包覆电磁场激活板圆柱体置入液体槽后流场的 Re 为 1260 (考虑工程应用背景, 实验研究时 Re 的取值不宜过小). 实验证明当转盘启动后 5 min 左右, 电解质溶液的流动速度即可达到稳定值. 图 2 是电磁力流体控制实验装置. 实验时, 在圆柱上游施散染料, 以形成清晰可见的圆柱绕流及尾流; 染料与电解质溶液具有相溶性, 其比重与电解质溶液接近, 当需要显示流场的流线时, 可选取扩散速度较慢的染料; 当需要显示流场的涡量分布图时, 则应选取扩散速度较快的染料进行实验. 流体的流动方向如图 1 所示的 X 轴方向, 正负电极由电流电源控制系统并联供电, 电磁场在电解质溶液中形成的电磁体积力 LF 沿圆柱体表面切向方向.

本文实验研究条件为 $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$, $u_\infty = 0.063 \text{ m/s}$, $j_0 = 10^3 \text{ A/m}^2$, $d = 0.02 \text{ m}$, $Re = 1260$.

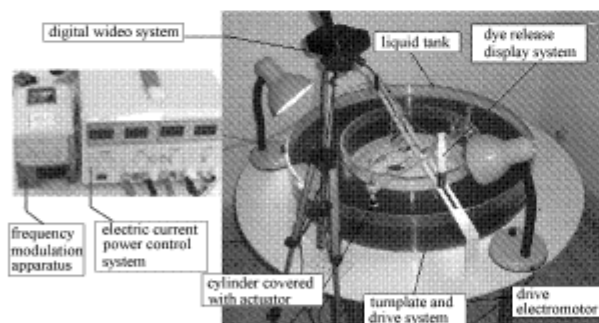


图 2 电磁力流体控制实验装置

Fig. 2 Experimental set-up of flow controlling modified by electromagnetic forces

3 数值模拟方法

在指数极坐标系 (ξ, η) 中, $r = e^{2\pi\xi}$, $\theta = 2\pi\eta$, 有守恒方程^[5]

$$H \frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial (U_r \Omega)}{\partial \xi} + \frac{\partial (U_\theta \Omega)}{\partial \eta} = \frac{2}{Re} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial \eta^2} \right) + NH^{1/2} \left(\frac{\partial F_\theta}{\partial \xi} + 2\pi F_\theta - \frac{\partial F_r}{\partial \eta} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} = -H\Omega \quad (6)$$

其中 $H = 4\pi^2 e^2 \pi \xi$, $\frac{\partial \psi}{\partial \eta} = U_r = H^{1/2} u_r$, $-\frac{\partial \psi}{\partial \xi} = U_\theta = H^{1/2} u_\theta$. ψ 和 Ω 分别为流函数和涡量, u_r 和 u_θ 分别为速度在 r, θ 方向的分量. 数值计算时, 方程 (5) 采用 ADI 格式 (alternating direction implicit), 方程 (6) 采用 FFT 格式 (fast fourier transforms).

模型为二维层流模型, 所以数值模拟分析时 Re 的取值不宜超过 300. 由于圆柱绕流在 $150 \leq Re \leq 3 \times 10^5$ 范围内仍然是层流分离^[3], 边界层周期性脱落形成的尾流涡街形状基本上一致, 因而 $Re = 200$ 的数值模拟结果与 $Re = 1260$ 条件下的实验研究结果具有一定的可比性, 具体的研究结论也证实了这一点.

本文的计算模拟条件为: 计算步长分别为 $\Delta\eta = 0.002$, $\Delta\xi = 0.004$ 和 $\Delta t = 0.005$; $Re = 200$; $N = 2$ 和 $\alpha = \pi$.

4 边界层上电磁力的控制效应

4.1 消涡与增涡控制

在上述实验参数和计算条件下, 对稳态电磁场全包覆状态下 ($\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 180^\circ$) 的电磁力控制圆柱绕流形状进行具体研究. 实验与数值模拟结果如图 3 和图 4 所示.

(1) $0 \leq t < 500$, $LF = 0$, 不加电磁力. 启动转盘驱动装置, 实验可见逐渐形成典型的尾流涡街, 如图 3(a) 所示. 模拟显示逐渐形成典型的圆柱绕流和尾流涡街, 如图 4(a) 所示.

(2) $500 \leq t < 650$, $LF > 0$, 加正向电磁力消涡. 实验可见尾流涡街逐渐消失, 消涡效果明显, 如图 3(b), 图 3(c) 所示. 模拟显示尾流涡街逐渐消失, 消涡效果明显, 如图 4(b), 图 4(c) 所示.

(3) $650 \leq t < 800$, $LF = 0$, 取消电磁力. 实验可见又逐渐形成典型的尾流涡街, 如图 3(a) 所示. 模拟显示又逐渐形成典型的尾流涡街, 如图 4(a) 所示.

(4) $800 \leq t < 950$, $LF < 0$, 加反向电磁力增涡.

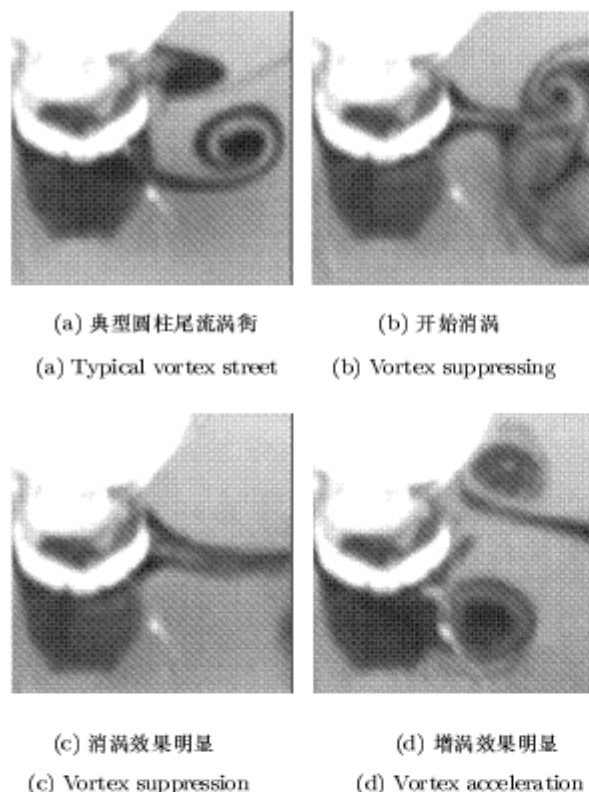


图 3 电磁力连续控制圆柱绕流态实验结果

Fig.3 Experimental results of flow field structure controlling

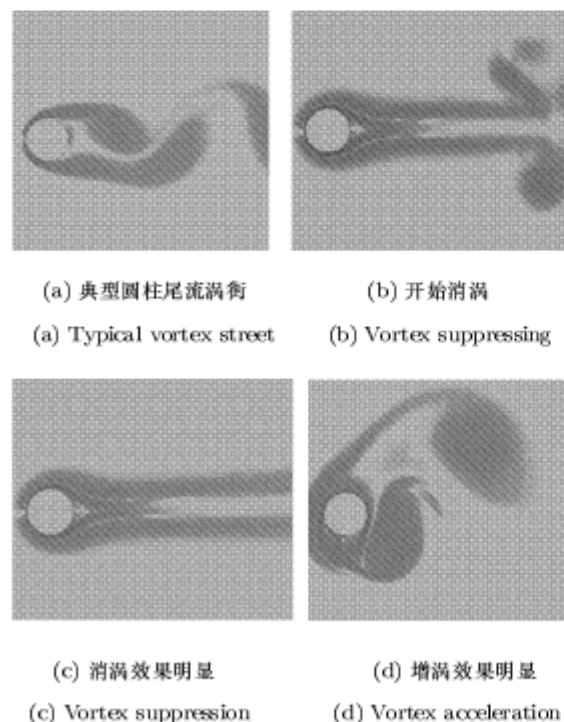


图 4 电磁力连续控制圆柱绕流态数值模拟 (涡量图)

Fig.4 Numerical simulation results of flow field structure controlling (vortex contour)

实验可见涡街迅速增大, 增涡效果明显, 如图 3(d) 所示. 模拟显示涡街迅速增大, 增涡效果明显, 如图 4(d) 所示.

(5) $950 \leq t < 1100$, $LF = 0$, 取消电磁力. 实验可见又逐渐形成典型的尾流涡街, 如图 3(a) 所示. 模拟显示又逐渐形成典型的尾流涡街, 如图 4(a) 所示.

对比上述电磁力的消涡与增涡研究结果可知, 电磁力控制圆柱绕流形态连续变化的数值模拟结果与实验研究结果有较好的可比性.

4.2 电磁力分布与作用效果

在上述有关实验条件下, 改变电磁场的包覆范围 (通过屏蔽部分表面电磁场的方法实现), 改变电磁力的时域特性, 电磁力对边界层的作用效果将发生变化. 圆柱绕流分离点的变化可以用于定量分析这种作用效果, 确定分离点位置的方法如图 5 所示. 分离点的变动范围以前驻点为起点, 沿圆柱表面变动, 最大可至后驻点. 用角度 β 表示, 其范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$. 角度值越小, 尾流涡街越大; 当 $\beta \leq 110^\circ$ 时, 尾流涡街很大; 当 $\beta \geq 150^\circ$ 时, 尾流涡街的范围明显变小; 当 $\beta \geq 165^\circ$ 时, 尾流涡街将限制在一个更小的范围内, 基本上可以认为达到较好的消涡效果. 电磁力作用下圆柱绕流分离点变动实验结果如下:

(1) 在不加电磁力的情况下, 流场达到稳态时, 可以得到 $\beta \approx 110^\circ$, 此值为典型圆柱绕流分离点位置.

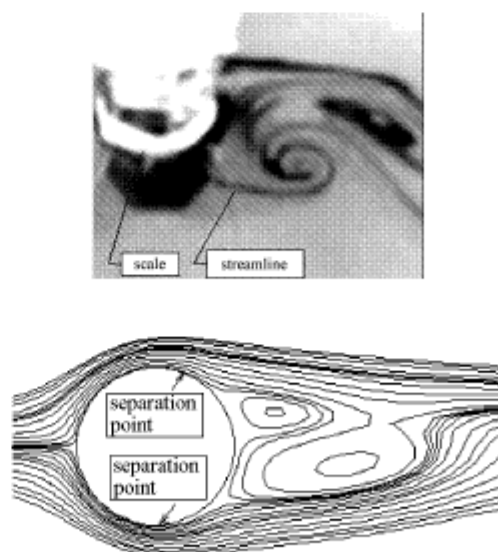


图 5 电磁力的作用效果实验

Fig.5 Experiments for the effects of flow acted by electromagnetic forces

(2) 电磁场全包覆情况下 ($\theta_1 = 0, \theta_2 = 180^\circ$), 加正向电磁力消涡, 得到 $\beta \geq 165^\circ$, 消涡效果很好; 加反向电磁力增涡, 得到 $\beta \leq 7.5^\circ$, 增涡效果很好.

(3) 电磁场部分包覆情况下, 加正向电磁力消涡. 当包覆范围未覆盖 $\beta \approx 110^\circ$ 典型圆柱绕流分离点的位置时, 得到 $\beta < 110^\circ$, 消涡效果很差; 所以, 电磁力作用于消涡时, 包覆范围应覆盖 $\beta \approx 110^\circ$ 典型圆柱绕流分离点; 通过大量的优化分析实验, 电磁场部分包覆范围为 $\theta_1 = 105^\circ, \theta_2 = 45^\circ$ 时, 得到 $\beta \geq 165^\circ$, 有很好的消涡效果; 电磁场部分包覆范围为 $\theta_1 = 105^\circ, \theta_2 = 7.5^\circ$, 即电磁场包覆范围对应的圆心角仅为 7.5° 时, 得到 $\beta \geq 120^\circ$, 亦有较好的抑制涡街的作用, 电磁力开始作用时, 原典型的圆柱尾流涡街立即中断, 分离点在电磁力的作用下后移了近 10° 后, 又逐渐形成较小范围内的尾流涡街.

(4) 电磁场部分包覆情况下, 加反向电磁力增涡. 电磁场部分包覆范围仅为 $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 7.5^\circ$, 即电磁场包覆范围对应的圆心角仅为 7.5° 时, 得到 $\beta \leq 7.5^\circ$, 即有很好的增涡效果.

(5) 在其它条件相同的情况下, 高度为 2mm 电、磁极的包覆电磁场作用效果优于高度为 4mm 电、磁极的包覆电磁场. 说明电磁场越集中于圆柱体表面, 电磁场渗透强度越小, 电磁力的作用效果越明显.

(6) 在其它条件相同的情况下, 当电流有效值相同时, 工频交流 (频率 50 Hz) 电磁场作用下无消涡、增涡效果; 半波整流、全波整流电磁场的消涡、增涡作用与稳态电磁场的作用效果基本相同, 但实验时电极的电解作用减弱, 有利于电极的防腐蚀保护.

4.3 阻力变化特征

单位高度圆柱表面所受合力

$$F_t = \iint p ds + \iint \tau_w ds = F_p + F_\tau \quad (7)$$

式中右侧第 1 项为压力, 第 2 项为剪切力.

x 方向的合力即为流体对圆柱的运动阻力

$$F_{tx} = F_{px} + F_{\tau x} \quad (8)$$

右侧第 1 项为压力阻力, 第 2 项为摩擦阻力.

图 6 是全包覆电磁场激活板条件下, 单位长度圆柱体所受到的阻力随时间的变化特性的计算结果. 随着圆柱体表面流体边界层上电磁力的时空作用参数变化, 压力阻力 F_{px} 和摩擦阻力 $F_{\tau x}$ 可能发生明显的变化, 从而导致阻力 F_{tx} 的明显变化.

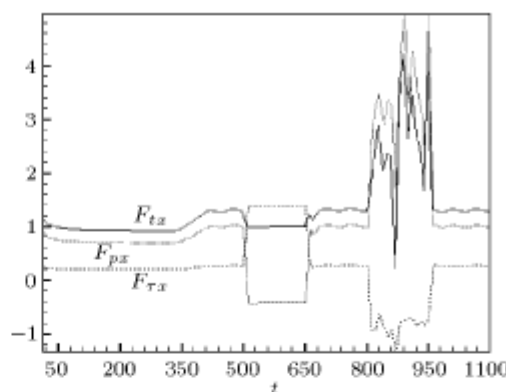


图 6 阻力控制效应

Fig.6 Control effects of controlling drag force

(1) $0 \leq t < 500, LF = 0$, 不加电磁力. 随着圆柱体与流体之间发生相对运动, 开始时 F_{tx}, F_{px} 和 $F_{\tau x}$ 相对稳定; 当 $t = 350$ 形成典型的尾流涡街时, 压力阻力 F_{px} 迅速增大, 导致阻力 F_{tx} 也迅速增大, 并与涡街频率相对应呈周期性变动, 而摩擦阻力 $F_{\tau x}$ 变化较小.

(2) $500 \leq t < 650, LF > 0$, 加正向电磁力消涡. 压力阻力 F_{px} 迅速减小至一个相对稳定的负值, 而摩擦阻力 $F_{\tau x}$ 则迅速上升至一个相对稳定的值, 导致阻力 F_{tx} 也迅速下降至一个相对稳定的值; 当压力阻力量值比摩擦阻力量值大时, 圆柱体则受到净推力的作用. 所以, 作用于流体边界层上的电磁力具有较好的减阻控制效应.

(3) $650 \leq t < 800, LF = 0$, 取消电磁力. 阻力变化情况与 (1) 中所述形成典型尾流涡街时的情况一致, 圆柱体受一定的阻力作用.

(4) $800 \leq t < 950, LF < 0$, 加反向电磁力增涡. 压力阻力 F_{px} 急剧增大, 且变动十分迅速; 摩擦阻力 $F_{\tau x}$ 则急剧下降, 且变动也十分迅速; $F_{px}, F_{\tau x}$ 的变化, 导致阻力 F_{tx} 出现急剧的变化, 圆柱体受阻急剧增大. 这种情况下, 作用于流体边界层上的电磁力控制作用非常显著, 具有很好的制动控制效应.

(5) $950 \leq t < 1100, LF = 0$, 取消电磁力. 阻力变化情况与 (1) 中所述形成典型尾流涡街时的情况一致, 圆柱体受一定的阻力作用.

4.4 升力变化特征

由式 (7), 可得 y 方向的合力即为圆柱在流场中受到的升力

$$F_{ty} = F_{py} + F_{\tau y} \quad (9)$$

该力导致涡生震动。

图 7 是全包覆电磁场激活板条件下, 单位长度圆柱体所受到的升力随时间的变化特性的计算结果。

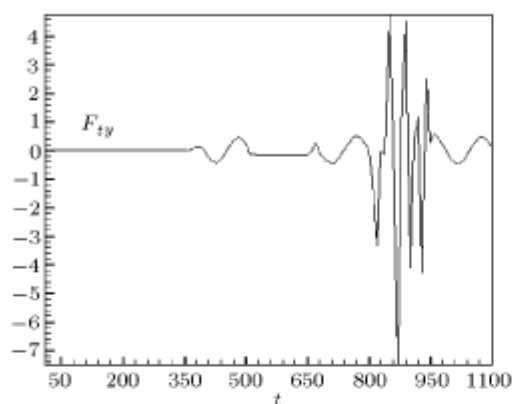


图 7 升力控制效应

Fig.7 Control effects of controlling lift force

(1) $0 \leq t < 500$, $LF = 0$, 不加电磁力。随着圆柱体与流体之间发生相对运动, F_{ty} 在开始阶段为零; $t = 350$ 开始形成典型的尾流涡街时, 升力 F_{ty} 迅速增大, 并与涡街频率相对应地明显呈周期性震荡变化。

(2) $500 \leq t < 650$, $LF > 0$, 加正向电磁力消涡。升力 F_{ty} 迅速减小至一个相对稳定的值, 周期性震荡特性消失。所以, 作用于流体边界层上的电磁力具有很好的减震效应。

(3) $650 \leq t < 800$, $LF = 0$, 取消电磁力。升力变化情况与 (1) 中所述形成典型尾流涡街时的情况一致, 圆柱体受一定的震荡升力作用。

(4) $800 \leq t < 950$, $LF < 0$, 加反向电磁力增涡。升力 F_{ty} 急剧增大, 且变动十分迅速, 作用于流体边界层上的电磁力具有非常显著的控制效应。

(5) $950 \leq t < 1100$, $LF = 0$, 取消电磁力。升力 F_{ty} 变化情况与 (1) 中所述形成典型尾流涡街时的情况一致, 圆柱体受一定的震荡升力作用。

4.5 表面涡量变化

图 8 是电磁场全包覆条件下, 圆柱体表面涡量和圆柱绕流分离点的变化情况。 γ 为从圆柱体前驻点起, 沿圆周顺时针方向的角度。表面涡量由正过渡到负或由负过渡到正的点为分离点, 说明流体边界层在此处脱体。当未加电磁力控制时, 圆柱体表面涡量基本上是以来流方向上下对称分布的, 与涡的脱落周期一致呈周期性稳定变化, 分离点为 108° ; 前驻点到分离点区域的流体边界层比较稳定, 沿圆柱表面流动基本上不随时间变化; 分离点至后驻点

间的流体边界层周期性脱落形成典型的尾流涡街; 加正向电磁力消涡时, 表面涡量具有较好的对称性和稳定性, 但涡量的绝对值明显增大, 分离点向后驻点方向移动基本达到后驻点位置。加反向电磁力增涡时, 圆柱体表面涡量分布的对称性和稳定性被破坏, 表面涡量的分布随时间迅速变化, 变化幅度很大, 可能存在多处分离点, 电磁力的控制效应十分显著。

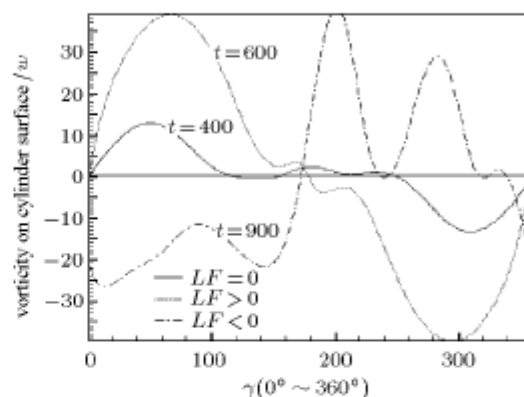


图 8 表面涡量变化

Fig.8 Vortex contour distributed on the cylinder surface

5 结 论

作用于电解质溶液中流体边界层上的电磁体积力用于流体控制, 具有比较明显的控制效应。圆柱体表面包覆电磁场产生的电磁力沿圆柱体表面分布时, 可以连续控制圆柱绕流、尾流涡街的形态变化, 具有较好的消涡与增涡控制效果。用电磁屏蔽和时域控制的方法调整电磁力的时空分布参数, 圆柱绕流分离点可以在前驻点和后驻点之间变动, 产生不同的控制效果。边界层上电磁力方向与流体流动方向一致时, 电磁力具有较好的减震、减阻控制效应; 边界层上电磁力方向与流体流动方向相反时, 电磁力具有较强的制动控制效应, 此时圆柱体表面涡量分布的对称性和稳定性被破坏。

参 考 文 献

- Gailitis A, Lielausis O. On a possibility to reduce the hydrodynamical resistance of a plate in an electrolyte. *Applied Magnetohydrodynamics*, 1961, 12: 143~146
- Henoch C, Stace J. Experimental investigation of a salt water turbulent boundary layer modified by an applied streamwise magnetohydrodynamic body force. *Phys Fluid*, 1995, 7(6): 1371~1382
- Weier T, Gerbeth G, Posdriedch O, et al. Experiments on cylinder wake stabilization in an electrolyte solution by

- means of electromagnetic forces localized on the cylinder surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1998, 16: 84~91
- 4 Kim Seong-jae, Lee Choung-mook. Investigation of the flow around a circular cylinder under the influence of an electromagnetic force. *Experiments in fluids*, 2000, 28: 252~260
- 5 陈志华, 范宝春. 包覆电磁场激活板的圆柱尾迹的数值研究. 力学学报, 2002, 34(6): 978~983(Chen Zhihua, Fan Baochun. Numerical investigation on wake of cylinder covered with electro-magnetic actuator. *Acta Mechanica Sinica*, 2002, 34(6): 978~983(in Chinese))
- 6 范宝春, 姜孝海, 叶经方. 电磁力的消涡与减阻. 兵工学报, 2003, 24: 74~77(Fan Baochun, Jiang Xiaohai, Ye Jingfang. Vortex suppression and resistance reduction by magnetohydrodynamic force. *Acta Armamentarii*, 2003, 24: 74~77(in Chinese))

FLOW CONTROL EFFECTS OF ELECTROMAGNETIC FORCE IN THE BOUNDARY LAYER¹⁾

Zhou Benmou* Fan Baochun* Chen Zhihua[†] Ye Jingfang* Ding Hanxin* Jin Jianming*

^{*}(Institute of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

[†](College of Architecture & Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract The controlling effects of flow caused by electromagnetic body forces have been conducted. The key parameters of control experiments have been confirmed by the theoretical analysis and the numerical simulation. The electrodes and the magnetic poles are flush mounted on the cylinder surface side by side in the order of magnet N-pole, positive(negative) electrode, magnet S-pole, negative(positive) electrode, and so on. The cylinder covered with electro-magnetic actuator is immersed in the flowing electrolyte solution. The electromagnetic body forces, which localized on the circular cylinder surface, have been used to modify the boundary layer of flow and control the flow field structure. By means of the electro-magnetic shielding and the time-region control methods, the separation points of the circular-cylinder flow are moving between the front stay point and the back stay point as the varieties of the space-time distribution parameters of the electromagnetic forces, and it brings different control effects. The electromagnetic force modified on the boundary layer is convenient to controlling the flow field structure of the circular-cylinder flow and the cylinder wake, and it is achieved the obvious effects of the vortex suppression and the vortex acceleration. There are provided with the preferable effects of the oscillation absorption and the drag reduce while the positive electromagnetic forces processed. There are existed very strong effects of damping control while the negative electromagnetic forces processed, at that time the characteristics of symmetry and stability of the vorticity distribution on the cylinder surface are destroyed.

Key words electromagnetic force, flow control, control effect, boundary layer, cylinder wake, circular-cylinder flow

Received 9 October 2003, revised 18 May 2004.

1)The project supported by the National Defense Fundamental Research Fund.