研究论文

# 电磁力控制翼型绕流分离的增升减阻效率研究

陈耀慧\*.2) 栗保明\* 潘绪超† 刘怡昕\*

\*(南京理工大学瞬态物理重点实验室,南京 210094) \*(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室,南京 210094)

**摘要** 电磁力可有效对流体流动进行控制,增升减阻,抑制流动分离,制约其推广应用的瓶颈为控制效率问题. 为提高其控制效率,基于翼型绕流的电磁力控制,对电磁力增升减阻的控制效率问题进行数值研究.根据能量 守恒定律,推导电磁力控制能耗的比,基于升力和阻力计算节省能量.定义电磁力的控制效率为能量节省与电 磁力控制所需能耗的比值,研究不同工况下电磁力增升减阻的控制效率.发现在控制开始阶段,电磁力能量主 要消耗在增加边界层流体的动能上,电磁力控制效率非常低,但电磁力控制效率会随着电磁力工作时间的增长 而增加;电磁力控制效率随着来流速度的增加呈指数下降;通过增加电磁力激活板的输入能量可增强电磁力的 控制效果,但无法明显增加其控制效率.

关键词 电磁力,翼型绕流,流动控制,控制效率

中图分类号: O361 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-14-346

# 引 言

黏性流体经过钝体时会产生流动分离,导致阻 力和升力的脉动,产生振荡、失稳和噪声等.流动控 制按照有无能量输入的方式主要分为主动和被动控 制方法.主动控制方法指有能量输入的控制方法,比 如合成射流.电磁力 (Lorentz force) 因其控制方法可 适应各种工程实际条件而被广泛关注<sup>[1]</sup>,被认为最 有潜力的 3 种主动控制方法之一,并对其进行了大 量的实验与理论研究.

Gailitis 等<sup>[2]</sup> 是较早利用电磁力进行流动控制研 究的学者之一,他在 1961 年利用交错排布的电极和 磁极制作了一个电磁激活板,对边界层的湍流转捩 进行控制,发现电磁力可延缓湍流转捩,并可减少 边界层厚度,减少阻力.Henoch等<sup>[3]</sup>利用 Gailitis 等 <sup>[2]</sup> 设计的电磁激活板,实验研究了平板湍流边界层 的洛仑兹力控制,发现流向洛仑兹力会增加壁面的 摩擦力,减少边界层的厚度,降低边界层的湍流强 度.Berger 等<sup>[4]</sup> 对直接数值模拟了槽道湍流的洛仑 兹力控制,研究了开环和闭环控制两种方式,研究

结果显示理想壁面法向电磁力闭环控制能耗最小, 且减阻率可达 40%, 但消耗的能量仍然比节省的能 量大. Pang 等<sup>[5]</sup> 实验研究了展向振荡电磁力的湍流 减阻,发现展向振荡的电磁力可减少湍流边界的摩 擦阻力,减少幅度可达 40%. Du 等 [6] 基于直接数 值模拟方法对壁湍流的控制进行了计算实验研究, 展向行波电磁力可大幅度减少剪切力,减少幅度可 达 30%, 相对于其他控制方式, 展向行波电磁力可 使边界层变的更稳定,且可消除近壁条带.Mutschke 等 [7] 利用谱方法, 数值研究了翼型绕流分离的电磁 力控制,强度足够大的稳定电磁力可完全抑制翼型 的流动分离,振荡电磁力的频率与涡脱落的频率一 致时,可提高电磁力控制的效果,优化升力的振荡 幅度. 张辉等<sup>[8]</sup> 对圆柱绕流的电磁力控制进行了研 究,对圆柱绕流、圆柱剪切来流及其振动等问题的电 磁控制进行了大量的研究. 梅栋杰等 [9] 对槽道湍流 的展向震荡电磁力控制机理进行了实验和数值研究, 尹纪富等[10]研究了圆柱湍流绕流的控制,刘宗凯等 [11] 研究了翼型绕流的电磁力优化控制.

1) 重点实验室基金 (9140C300502130C30105) 和装备预研基金 (9140C300206150C30002) 资助项目.

2) 陈耀慧, 讲师, 主要研究方向: 流动控制. E-mail: cyh873@163.com

2014-11-06 收稿, 2015-03-04 录用, 2015-03-09 网络版发表,

**引用格式:** 陈耀慧, 栗保明, 潘绪超, 刘怡昕. 电磁力控制翼型绕流分离的增升减阻效率研究, 力学学报, 2015, 47(3): 414-421 Chen Yaohui, Li Baoming, Pan Xuchao, Liu Yixin. Research of the control efficiency of lift increase and drag reduction base on flow around hydrofoil controlled by Lorentz force. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(3): 414-421 电磁流动控制的研究取得了丰硕的成果,然而 电磁力流动控制从 1961 年 Gailitis<sup>[2]</sup>开始到现在已经 过了半个世纪,对电磁力的控制机理进行了充分的 研究,同时对各种电磁力在减阻、抑制流动分离、湍 流转捩等方面进行了大量的研究,但这些研究都没 有涉及到电磁力的控制效率问题.Berger 等<sup>[4]</sup> (2000 年)和 Shatrov 等<sup>[12]</sup>(2007 年)对电磁控制效率进行了 研究,研究表明电磁力减阻的功耗比减阻收益大, Berger 等<sup>[4]</sup>的计算结果甚至显示展向振荡电磁力减 阻所需功耗比减阻收益大 3 个数量级,而 Shatrov 等 <sup>[12]</sup>的研究也认为展向震荡电磁力控制功耗太高并不 适合应用于流动控制,他研究结果显示流向电磁力 对可移动平板的控制效率 η 最高可达 0.8,但并没有 对电磁控制能量损耗的原因进行研究.

作者曾在文献 [13-14] 对翼型绕流的电磁力控制 机理阐述,但并未对电磁力的控制效率问题进行讨 论.为提高电磁力控制的效率,需要揭示电磁力控制 能量损耗的原因,并基于该研究结果,探讨提高电 磁力控制效率的方法.本研究基于翼型绕流的流向 电磁力控制,利用 Roger 等<sup>[15]</sup>发展的双时间步 Roe 格式对电磁力的翼型绕流控制进行数值模拟,根据 能量守能定律计算电磁力激活板的控制总能耗,基 于翼型的升力和阻力推导电磁力控制后所节省的净 能量,对电磁力控制效率进行分析,并分析焦耳热损 耗及流体动能损耗,力图找出电磁力控制能量损耗 的原因,基于该原因,探讨提高电磁力控制效率的方 法,为控制效率提升及其优化提供理论依据及技术 支持.

### 1 物理问题

为研究电磁力控制效率问题,需要对电磁力控制过程中能量的损耗进行分析,寻找出损耗较大的部分,探讨避免损耗的方法.本研究将包覆有电磁激活板的翼型浸入到弱导电液体中,研究翼型绕流的电磁力控制效率,示意图如图 1(a)所示,在翼型的表面包覆电磁激活板,产生的电磁力如图 *f*em 方向所示,其大小在壁面法向呈指数衰减<sup>[16]</sup>,来流的方向如图 1(a)中流动方向所示,电磁力弱导电液体的控制原理为电磁力作用在流体边界层上,增加壁面附近流体电磁力方向上的动量,当来流方向与电磁力方向相同时,可增强流体抵抗逆压梯度的能力,抑制流动分离,增升减阻,电磁力作用后流体流动的方向与电磁力的方向相同.

实验研究在如图 1(b) 所示的水槽中进行的,水槽的外径为 2m,内径为 1m,翼型绕流的流场用染色线显示,升阻力用压力传感器测量.



图 1 包覆电磁激活板的翼型和实验水槽

基于二维不可压缩 N-S 方程对翼型绕流的电磁 力控制进行研究,基于翼型弦长 *c* 和来流速度 *U*<sub>0</sub> 对 N-S 方程进行无量纲化

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + (\boldsymbol{u} \cdot \nabla)\boldsymbol{u} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{1}{Re}\Delta \boldsymbol{u} + \boldsymbol{f}_{\rm em}$$
(1)

$$\nabla \boldsymbol{u} = 0 \tag{2}$$

其中, u 为速度矢量, p 表示压力,  $\rho$  为密度 (常数), 雷诺数  $Re = U_0 c/v$ , v 为动力黏性系数,  $f_{em}$  为电磁 体积力源项

$$\boldsymbol{f}_{\rm em} = N(\boldsymbol{j} \times \boldsymbol{B}) \tag{3}$$

其中, N 为斯坦顿数, 定义为  $\sigma B_0^2 c / (\rho U_0)$ ,  $\sigma$  为流体 电导率, j 为电流密度矢量, 定义为  $j = E + u \times B$ , E 和 B 分别为电场和磁感应强度矢量.

# 2 结果分析

为分析翼型绕流电磁力激活板的控制效率,需 要对电磁力激活板控制下的翼型绕流的能量传递过 程及其守恒进行分析.根据能量守能定律

$$UIt = Q + w_a + w_m \tag{4}$$

其中, UIt 为电能的做功总量, wa 为基于升力和阻力计算的电磁力对翼型做功, 焦耳热 Q, 流体动能为 wm.

分析式 (4) 可知, wa 为电磁力控制后能量的节 省量, Ult 为电磁力的控制所需要的总能耗, 因此电 磁力控制效率可定义为

$$\eta = \frac{w_a}{UIt} \tag{5}$$

Fig. 1 Hydrofoil cover with Lorentz force actuator and water tank

报

$$w_a = \int_0^t \boldsymbol{F}(t) \cdot \boldsymbol{S}(t) \mathrm{d}t \tag{6}$$

力

其中, F(t) 为电磁力控制后升力和阻力的合力减去控制前升力和阻力的合力, S(t) 为控制后翼型在合力方向上的净位移.

焦耳损耗率定义为

$$\eta_1 = \frac{Q}{UIt} \tag{7}$$

其中, *Q* = *I*<sup>2</sup>*Rt*, 式中 *I*<sup>'</sup> 为电磁激活板电极间的总电流, *R* 为激活板在弱导电体中的电阻.

由于电磁力对壁面流体加速导致翼面压力产生 变化,导致升力增加,阻力减少,该部分的作用已 体现在 w<sub>a</sub> 中,因此 w<sub>m</sub> 为控制区域内流体动能的增 量,该部分能量可定义为损耗,因此,流体动能损耗 率可定义为

$$\eta_2 = \frac{w_m}{UIt} \tag{8}$$

#### 2.1 数值结果验证

由于实验研究电磁力控制效率存在较大技术难 度,首先是压电传感器的力标定,其次升阻力做功的 计算问题以及流体动能损耗的计算等,因此采用数 值模拟的方法对电磁力控制效率进行研究,数值研 究的第一步需要对数值模型、方法等进行验证.

图 2 为电磁力控制下的翼型绕流流场控制结 果,图 2(a)为实验结果,图 2(b)为数值模拟结果.图 2 的第一幅图为电磁力刚开始作用时的情形,此时的 流场与无控制时类似,由前缘涡与后缘涡形成的涡 对正准备离开翼型表面.正向电磁力作用后,前缘的 流动分离点以一定的速度,沿壁面逐渐向翼型尾部



(a) 实验结果 (a) Experimental results



图 2 电磁力控制下的翼型流场

Fig. 2 Flow field of hydrofoil under the control of Lorentz force

移动,直至流动分离完全被抑制,整个过程如图2所示.电磁力的影响主要在近壁区域,随着分离点的后移,及脱体涡源的后移,边界层外缘的脉线从前缘往后缘逐渐消失,其后移速度小于壁面上分离点的后移速度.由图可知,在正向电磁力作用下,前缘涡与后缘涡脱落后,不再重新生成,流体分离完全被抑制,流场趋于稳定.数值模拟结果与实验的结果吻合的较好,呈现出一样的控制规律,验证了数值模拟程序.

图 3 为电磁力控制下的升力和阻力图,其中图 3(a)为实验结果,图 3(b)为数值模拟结果,图中显示







电磁力开始作用时,升力有个阶跃的提升,并随着时间慢慢增加,最后稳定在某一个数值,而阻力则在电磁力开始作用后,有个阶跃的减小,而后随着时间慢慢增加,最后稳定在某一个数值.数值模拟结果与实验结果吻合的较好,都呈现同一个规律,验证了数值模拟的升阻力计算.

#### 2.2 不同来流速度的控制效率分析

将实验研究的参数代入到本研究中对电磁力的 控制效率进行计算,具体的参数为电流密度  $j_0$  为 1420 A/m<sup>2</sup>,磁感应强度  $B_0$  为 1.5 T,翼型弦长 c 为 0.1 m,电极磁极的宽度为 5 mm,电解液的密度 $\rho$  为 1.1×10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>,电解液的电导率为 10 S/m.

图 4 为相同能量输入的电磁力控制翼型绕流流 场图,图中显示,来流速度越低,翼型流动分离抑制 的效果就越好,随着速度的增大,电磁力控制效果开 始减弱,当速度来到 0.5 m/s 时,翼型的尾部出现了 流动分离,表明随着来流速度的增加,电磁力对翼型 绕流的控制效果减弱.





(b)  $U_0 = 0.3 \text{ m/s}$ 





图 5 为相同能量输入的电磁力作用下不同来流速度的升阻力变化图,升力的增幅随着来流速度的增加而减小,当速度值达到 0.5 m/s 时,升力系数的



#### 图 5 相同能量输入的电磁力作用下不同来流速度的升阻力系数

Fig. 5 Hydrofoil lift and drag coefficient with different freestream velocity under the control Lorentz force actuator with same power input

增幅不到 0.1 (图 5 (a)),阻力的降幅则表现为阻力减 少的幅度随着来流速度的增大而减小 (图 5 (b)).以 上的结果显示相同能量输入的情况下,电磁力对翼 型绕流的控制效果随着来流速度的增加而减弱.

图 6 为电磁力控制效率随时间变化图,其中  $\eta$ 为电磁力控制效率, $\eta_1$  为焦耳热损耗率, $\eta_2$  为流体 动能损耗率.研究结果显示,在最初 0.2 s 内,输入的 能量大部分损耗在流体动能损耗上,最高损耗率可 达 95%,其次损耗在焦耳热上,最高可达 28%,该结 果验证了 Shatrov 等<sup>[12]</sup> 对震荡电磁力流动控制的研 究结果,他的研究结果认为展向震荡电磁力控制功 耗太高并不适合应用于流动控制.分析图 4 的结果, 发现电磁力震荡的频率越大,能量的损耗就越高.随 着时间推移,流体动能损耗  $\eta_2$  下降,电磁力控制效 率  $\eta$  及焦耳热损耗  $\eta_1$  增加.在速度较低时,电磁力 控制效率  $\eta$  增加的幅度大于焦耳热损耗率  $\eta_1$  增加的 幅度,因此可知,电磁激活板在一个方向上稳定工作 时间越长,电磁力控制的效率就越高,其他损耗就越 低.



图 6 电磁力控制效率随时间变化图

Fig. 6 Diagram of Lorentz force control efficiency variation of with time

图 7 为控制效率随速度变化图,图中显示电磁 力控制效率与来流速度成反比例关系,来流速度越 大,电磁力控制效率 η 越小,当来流速度为 0.2 m/s 时,电磁力的控制效率 η 可达 30%,随着速度的增 加,电磁力控制效率 η 的增幅及流动动能损耗率 η<sub>2</sub> 下降的幅度呈指数减少,当速度增加到 0.5 m/s 时, 电磁力的控制效率 η 不到 1%.而流体动能损耗率与 来流速度成正比例关系,来流速度越大,流体动能损 耗就越大,当来流速度达到 0.5 m/s 时,流体动能损 耗率可达到 87%. 焦耳热的损耗 η<sub>1</sub> 与来流速度的关 系不大,大约在10%~15%之间.

报



with velocity

#### 2.3 不同电磁力控制效率分析

计算参数与上一节相同,来流速度设定为 0.5 m/s,电流密度从 1420 A/m<sup>2</sup> 开始逐渐增加. 根 据电磁力激活板的尺寸,电解液的电导率以及欧姆 公式,电阻大约为 2 Ω,每增加 1000 A/m<sup>2</sup> 的电流密 度,大约相当于增加 0.5 A 的输入电流.

图 8 为电磁力控制的翼型绕流流场,图中显示,当输入的电流密度为 1420 A/m<sup>2</sup> 时,翼型的背风面后缘还会产生流动分离,但随着电流密度的增加,翼型后缘的流动分离逐渐被抑制 (图 6(c) ~ 图 6(d)),结果表明增加电磁力激活板的能量输入,可以



图 8 不同电磁力控制的翼型绕流流场 Fig. 8 Flow field of hydrofoil under the control of different Lorentz force 提高电磁力的控制效果.

图 9 为不电磁力作用下翼型的升阻力系数图, 结果显示,随着电磁力激活板能量输入的增加,翼型 的升力逐渐增加(图 9(a)),而翼型的阻力则无明显变 化(图 9(b)),原因为电磁力导致的阻力减小被电磁力 产生的表面摩擦力所抵消.





Fig. 9 Hydrofoil lift and drag coefficient under the control of different

Lorentz force

图 10 为电磁力控制效率 η 随输入电流密度变化 图, 图中显示在电流密度小于 5 500 A/m<sup>2</sup> 时,随着电 流密度的增加,电磁力控制效率有明显增加,但电磁 力控制效率不超过 5%;当电流密度超过 5 500 A/m<sup>2</sup> 时,能量输入的增加导致的电磁力控制效率 η 的增 加非常微小,在5500 A/m<sup>2</sup>到9920 A/m<sup>2</sup>之间的电磁 力控制效率 η 的增加几乎为零.



图 10 电磁力控制效率随输入电流密度变化图

Fig. 10 Diagram of Lorentz force control efficiency variation of with electric current density

## 3 结 论

在翼型背风面流体边界层中形成的流向电磁 力,可有效抑制流动分离,提高翼型的升力减小阻力. 阻碍其推广应用的瓶颈为较为低下的控制效率,为 提高电磁力的控制效率,本文基于能量守恒定律, 推导了电磁力控制效率计算公式,基于该公式研究 了电磁力控制效率,分析电磁力损耗原因,发现了以 下结论:

(1) 电磁力控制开始阶段,电磁力激活板主要能 耗为焦耳热及流体动能损耗,证明展向震荡电磁力 能耗过高,该结论与 Berger 等<sup>[4]</sup>和 Shatrov 等<sup>[12]</sup>的 研究结果相吻合,展向振荡电磁力能耗过高的原因 为大部分电磁力的能量都用于改变流体的运动方向.

(2) 电磁力控制效率随着时间增加而逐渐增长, 电磁力稳定工作时间越长,电磁力控制效率越高.

(3) 电磁力的控制效率随着来流速度的增加呈指 数减小.

(4) 增加电磁力激活板的能量输入,可有效增强 电磁力的控制效果,但无法有效的提升电磁力的控 制效率.

以上研究分析了电磁力控制效率低下的原因及 其随着来流速度和时间的变化,下一步工作将研究 如何提升电磁力的控制效率.

#### 参考文献

- 1 Pulugundla G, Heinicke C, Karcher C, et al. Lorentz force velocimetry with a small permanent magnet. *European Journal of Mechanics* - *B/Fluids*, 2013, 41: 23-28
- 2 Gailitis A, Lielausis O. On the possibility of drag reduction of a flat plate in an electrolyte. *Appl Magnetohydrodyn Trudy Inst Fisiky AN Latvia SSR*, 1961, 12: 143
- 3 Henoch C, Stace J. Experimental investigation of a salt water turbulent boundary layer modified by an applied streamwise magnetohydrodynamic body force. *Physics of Fluids*, 1995, 7: 1371-1383
- 4 Berger TW, Kim J, Lee C, et al. Turbulent boundary layer control utilizing the Lorentz force. *Physics of Fluids*, 2000, 12: 631-649
- 5 Pang J, Choi K-S. Turbulent drag reduction by Lorentz force oscillation. *Physics of Fluids*, 2004, 16: L35
- 6 Du Y, Symeonidis V, Karniadakis G. Drag reduction in wallbounded turbulence via a transverse travelling wave. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, 457: 1-34
- 7 Mutschke G, Gerbeth G, Albrecht T, et al. Separation control at hydrofoils using Lorentz forces. *European Journal of Mechanics* -*B/Fluids*, 2006, 25: 137-152
- 8 Zhang H, Fan BC, Chen ZH, et al. Electro-magnetic control of shear flow over a cylinder for drag reduction and lift enhancement. *Chinese Physics B*, 2013, 22: 104701
- 9 梅栋杰, 范宝春, 陈耀慧等. 槽道湍流展向振荡电磁力控制的实验 研究. 物理学报, 2010, 59: 8335-8342 (Mei Dongjie, Fan Baochun,

Chen Yaohui, et al. Experimental investigation on turbulent channel flow utilizing spanwise oscillating Lorentz force. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59: 8335-8342 (in Chinese))

- 10 尹纪富, 尤云祥, 李巍等. 电磁力控制湍流边界层分离圆柱绕流场 特性数值分析. 物理学报, 2014, 63: 044701 (Yin Jifu, You Yunxiang, Li Wei, et al. Numerical analysis for the characteristics of flow control around a circular cylinder with a turbulent boundary layer separation using the electromagnetic force. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 044701 (in Chinese))
- 11 Liu ZK, Zhou BM, Liu HX, et al. Numerical investigation on feedback control of flow around an oscillating hydrofoil by Lorentz force. *Fluid Dynamics Research*, 2013, 45: 035502
- 12 Shatrov V, Gerbeth G. Magnetohydrodynamic drag reduction and its efficiency. *Physics of Fluids*, 2007, 19: 035109
- 13 陈耀慧, 范宝春, 陈志华等. 翼型绕流电磁控制的实验和数值研究. 物理学报, 2008, 57: 648-653 (Chen Yaohui, Fan Baochun, Chen Zhihua, et al. Experimental and numerical inve stigations on the electro-magnetic control of hydrofoil wake. Acta Physica Sinica, 2008, 57: 648-653 (in Chinese))
- 14 陈耀慧, 董祥瑞, 陈志华等. 翼型绕流的洛仑兹力控制机理. 物理 学报, 2014, 63: 034701 (Chen Yaohui, Dong Xiangrui, Chen Zhihua, et al. Control of flow around hydrofoil using the Lorentz force. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 034701 (in Chinese))
- 15 Rogers SE, Kwak D, Kiris C. Steady and unsteady solutions of the incompressible Navier-Stokes equations. *AIAA Journal*, 1991, 29: 603-610

(责任编委:林建忠) (责任编辑:刘希国)

# RESEARCH OF THE CONTROL EFFICIENCY OF LIFT INCREASE AND DRAG REDUCTION BASE ON FLOW AROUND HYDROFOIL CONTROLLED BY LORENTZ FORCE <sup>1)</sup>

Chen Yaohui<sup>\*,2)</sup> Li Baoming<sup>\*</sup> Pan Xuchao<sup>†</sup> Liu Yixin<sup>\*</sup>

\*(National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China) †(Ministerial Key Laboratory of ZNDY, University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract** Lorentz force can control the flow of low-conduction fluid effectively, increasing lift and reducing drag, suppressing flow separation; however, the problem of control efficiency is the main bottleneck to restrict its application. In order to enhance its control efficiency, numerical simulation research had been carried out base on the flow control around hydrofoil using Lorentz force. Energy consumption of Lorentz force control had deduced on the basis of the law of conservation of energy; the amount of saving energy had calculated by using the lift and drag of hydrofoil. The control efficiency of the Lorentz force is defined as the ratio between saved power and used power. The control efficiency of lift increase and drag reduction under different working conditions had been studied. The results had shown that the control efficiency of Lorentz force index decrease with the increase of inflow velocity, and increase with the control time increase the input energy of Lorentz force actuator can enhance the control effect of Lorentz force, but cannot increase the control efficiency distinctly.

Key words Lorentz force, flow around hydrofoil, flow control, control efficiency

- 1) The project was supported by the Key Laboratory Fund (9140C300502130C30105) and Equipment pre-research fund (9140C300206150C30002).
- 2) Chen Yaohui, lecturer, research interests: flow control. E-mail: cyh873@163.com

Received 6 November 2014, accepted 4 March 2015, available online 9 March 2015.