

零质量射流技术的新发展及其在流动控制中的应用*

王萌萌 林 麒

(福建省等离子体和磁共振重点实验室、厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要:零质量射流是主动流动控制的高新技术。与常规射流相比,零质量射流最突出的优点在于具有零净质量流量。在应用零质量射流进行流动控制时,不再需要常规射流中必不可少的流体输送管道与其他机械部件。新型等离子射流较传统零质量射流可以获得高能/高动量零质量射流,可应用于宏观大尺度上的主动流动控制。文中阐述传统零质量射流和新型等离子射流的产生机制,概括和分析零质量射流在主动流动控制上的应用。

关键词:零质量射流;等离子射流;主动流动控制

中图分类号:TP60 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-4801(2013)06-142-05

流动控制技术是通过对运动的流体施加力、质量、热量、电磁等物理量来改变流动状态,从而也改变运动物体的受力状态或运动状态^[1]。流动控制作为流体力学的重要分支和研究前沿,其目的是为了改善飞行器的受力状态,进而获得减小阻力、提高升力、增大稳定工作范围等效果。

流动控制实现方法分为被动控制和主动控制,被动控制是通过被动流动控制装置来改变流动环境,这种流动控制方式是预先确定的,当流场实际情况偏离设计状态时,就无法达到最佳控制效果;主动流动控制则是在物体流场中直接施加适当的扰动模式并与流动的内在模式相耦合来实现对流动的控制。主动流动控制的优势在于它能在需要的时间和部位出现,通过局部能量输入,获得局部或全局的有效流动改变,进而使飞行器飞行性能显著改善^[2]。采用新的主动流动控制技术无疑将为提高新型或下一代飞行器的气动性能带来益处,因此可实现主动流动控制的零质量射流应运而生。

与常规射流相比,常规射流中必不可少的流体输送管道在应用零质量射流进行流动控制时不再需要,这无疑会大大减少系统重量和简化操作的复杂程度^[3-6]。本文将重点介绍几种典型的零质量射流技术,并阐述它们在主动流动控制上的应用。

1 传统零质量射流

零质量射流技术的历史发展,可以追溯到20世纪后叶的声学整流效应。最先是由Rayleigh用数学方法处理孔特测尘管中的声学现象时发现的^[7]。早期学者研究发现无限大区域的声学整流

同圆柱在静止的环境中振动类似,产生了环绕物体本身的二次流动。

进入20世纪90年代,美国乔治亚理工大学的Ari Glezer教授领导的研究小组首先研制成功了一种压电膜式的零质量射流激励器^[8](见图1)。它是通过控制旋涡结构的融合来“合成”射流的。其射流结构是一系列不断向外扩展的非定常涡环(或涡对,在过涡环轴的纵向截面上,涡环成为涡对),这列非定常涡环(或涡对)是由零质量射流激励器振动膜的周期性振动工作,引起环境流体在激励器出口孔缝处周期性剪切分离向外喷射而产生的。在激励信号的一个完整周期内,通过激励器出口“流出”和“吸入”激励器腔体的流体质量流量是相同的。零质量射流激励器的工作原理如同泵,当振动膜片向下运动时,吸入空气;而当振动膜片向上运动时,把吸入的空气泵出去,形成射流。流体射出的同时带动周围的空气运动,其剪切流的作用产生了涡环。

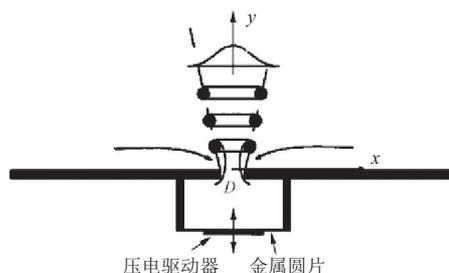


图1 压电膜式零质量射流激励器

1.1 传统零质量射流激励器

传统零质量射流激励器的结构主要由两部分组成:开孔(或缝)的激励器腔体和能动部件(提供运动能量或振动部件)。能动部件是激励器的核

*福建省自然科学基金项目(A1010014)

作者简介:王萌萌(1988-),女,硕士研究生。研究方向:等离子体应用。

心部件,它将输入的电能或其它形式的能量转化为能动部件的振动能量,并通过激励器腔体转化为零质量射流动能。根据激励器振动部件的振源不同可对它们进行分类(见图2)^[9-12]。

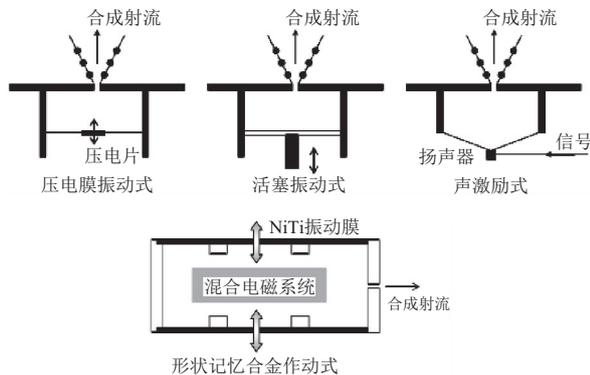


图2 传统零质量射流激励器分类

图2所示的各类零质量激励器各具优缺点。压电膜振动式激励器结构简单、工作频带宽、响应迅速,但射流能量与金属膜片和压电晶体的装配关系紧密,加工要求高;活塞振动式激励器能够提供高能射流,但需要电机及相关传动装置,系统构造复杂,质量大;声激励式激励器利用声学整流效应,需要发声装置,工作噪音大;形状记忆合金振动式射流能量高,但工作频率低,构件工作寿命短。

1.2 传统零质量射流的应用

零质量射流技术的优越特点,使其在流动控制方面具有十分广阔的应用前景,已成为各国航空航天领域和空气动力学界的研究热点^[13,14]。综合国内外零质量射流技术的研究现状,零质量射流技术在流动控制中的应用研究主要涉及:流动分离及气动力控制、射流矢量控制等方向^[1,6]。

Gilarranz 等人设计了一种活塞式零质量射流激励器,其射流最大速度可达到 100 m/s,并将其用于机翼边界层分离流动控制。研究结果显示,小攻角时由于流动未发生分离,激励器对气动性能没有明显影响;攻角增大后,激励器可使上翼面的流动分离延迟,最大升力系数提高 80%以上,失速攻角从 12° 提高到 18°^[15,16]。Lee 和 Hong 等人对无外部来流的零质量射流激励器流场和有外部来流时的逆压梯度边界层分离控制进行了实验研究,结果显示激励频率是影响边界层分离控制的一个重要因素。实验还表明,要实现有效的流动控制,要求激励器出口零质量射流速度不能太小^[17]。

2003年,美国国防高级研究计划署在 XV-15 型试验飞机的全尺寸飞行试验中开展了微型自适

应流动控制的研究。测量结果表明,在飞机盘旋时,用零质量射流控制机翼的局部分离气流可以使机翼阻力减少 14%^[20]。美国 NASA 兰利研究中心正在进行一项名为“The Aircraft Morphing Program”,构想一种没有控制舵面的新型飞行器,利用小巧的诸如零质量射流激励器等控制器件来代替传统的控制舵面,从而实现飞行器的飞行控制^[21]。

Smith 等人对零质量射流激励器实现宏观低速流矢量控制进行了实验研究,实验在空气环境中进行,零质量射流与主流的动量比为 1:35。实验表明,激励器工作时,主流偏转约 30°;宏观主流的平均偏转角度随着主流速度增大而单调减小,而矢量推力是增大的^[18]。国防科技大学的罗振兵和夏智勋等人设计了零质量双射流激励器腔体、出口喉道、外部流场作为单连域计算处理的吹/吸型边界模型——X-L 模型,对其数值模拟后的结果显示,零质量双射流激励器可控制边界层流动,通过改变激励器出口倾角可以实现对边界层内速度型“饱和”程度的控制^[19]。

零质量射流激励器的应用需求决定了激励器发展的两个主要方向。一是零质量射流激励器的小型、微型化,其关键是对微尺度气动问题的研究和微制造工艺技术;二是开展新型零质量射流激励器研究以满足零质量射流在不同领域的应用要求,如在宏观大尺度上流动主动控制,需要宽频域、高动量、高强度的零质量射流激励器。微米/纳米制造技术^[22]的长足发展,为零质量射流激励器的微型化提供了广阔的发展空间,微型阵列激励器的批量制造及应用将成为可能。为了获得高能/高动量零质量射流,发展了新型的等离子体射流激励器。

2 等离子体射流

等离子体射流放电类型主要有介质阻挡放电和火花放电等。

2.1 介质阻挡放电

介质阻挡放电是绝缘介质插入放电空间的一种气体放电^[23,24],这种放电表现为很均匀、漫散和稳定、貌似低气压下的辉光放电,但是实际上它是由大量细微的快脉冲放电通道构成的。

介质阻挡放电电极结构较常见的为板状式,因其射流的产生不需要腔体而有别于传统零质量射流激励器,结构如图3所示。将电介质板上下

表面的电极与高压交流电源相连接,等离子体激励器表面附近的空气在强电场作用下被电离,等离子体中的离子在空间不均匀电场的作用下,向电场梯度方向进行定向运动,离子在定向运动的过程中与环境空气分子碰撞,发生动量交换,诱导激励器表面的空气发生定向运动,通过向边界层注入能量改变其空气动力特性^[25]。

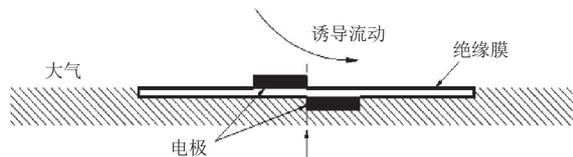


图3 介质阻挡放电激励器

M.P.Pater 等开展了在 1303 型无人驾驶飞行器的机翼上布置等离子体激励器的风洞实验^[26]。结果表明,等离子体激励器通过利用机翼前缘涡和尾缘涡,能在很大的攻角范围内显著改变飞行器的升力和阻力。

南京航空航天大学的史志伟等做了介质阻挡放电等离子体激励器对飞翼布局飞行器气动力的作用实验^[27]。结果表明,在飞行器不同位置布置不同的激励器,可以实现对飞行器滚转、偏航及俯仰力矩的控制;改变激励电压,实现了对气动力矩的比例控制等。

厦门大学的林麒等利用介质阻挡放电等离子体抑制翼尖涡进行了风洞试验研究^[28]。结果表明,在机翼翼梢的上下表面处布置等离子体激励器,通过等离子体产生的定向诱导气流对流场注入能量,可以有效地延缓翼梢流动分离,增加升力,提高升阻比,抑制翼尖涡。

近年来国内外纷纷开展介质阻挡放电在流动控制方面的应用研究,但结果表明介质阻挡放电形成的诱导气流射流速度量级很小,只有当外部流动速度很低($<30\text{ m/s}$)时才可以产生较为有效的控制作用^[29-31]。同时,由于电离氧化效果,使得激励器电极和绝缘平板受到限制^[32],绝缘平板的使用寿命还与其材质息息相关,这些都制约了介质阻挡激励器的发展和使用。

2.2 火花放电

火花放电的射流因其激励方式不采用振动能量而不同于传统的零质量射流。火花放电激励器没有活动的部件,其常见结构是由含内置电极的密闭金属腔体和出口小孔组成。最早的火花放电激励器是由约翰霍普金斯大学应用物理实验室设

计的^[33],其结构如图4a所示。

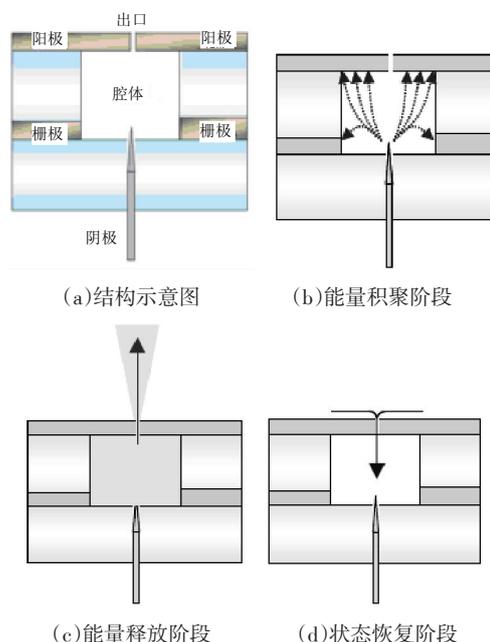


图4 火花放电零质量射流激励器工作原理

火花放电产生零质量射流的原理是,在密闭腔体中放电造成腔内气体升温膨胀增压迫使气体从唯一的出口向外挤出,从而在激励器腔体出口处形成零质量射流。

火花放电激励器的一个工作周期包括三个阶段:能量积聚阶段、能量释放阶段、状态恢复阶段,如图4b-4d所示。在能量积聚阶段,放电作用将电源激励输入的电能转化为腔内气体的内能,气体温度急剧升高,压力也随之迅速上升,腔体内充满了高温高压气体;能量释放阶段,腔内的高温高压气体在出口小孔处挤出形成零质量射流;状态恢复阶段,随着气流的排放腔体内温度与压力迅速下降,出现负压,吸入外界气体,腔内气体恢复初始状态。

据约翰霍普金斯大学的Cybyk等人称采用这种激励器得到的最大射流速度高达 500 m/s ^[34],为对超声速气流进行控制提供了可能。

法国的ONERA中心对火花放电激励器改进后,实验和数值模拟得出火花放电射流可对噪声及亚音速分离进行有效控制,同时,根据装置参数的不同,可以得到不同的高速、高频射流^[35]。

德克萨斯大学奥斯汀分校的Noel T.Clemens等人对改进后的火花放电激励器(见图5)进行了相应的特性研究^[36]。结果显示,由于这种激励器产生的射流频带宽、速度高,可应用于超声速流动控制。

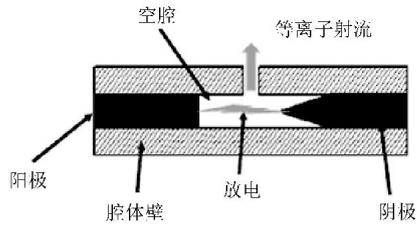


图5 德克萨斯奥斯汀分校改进激励器

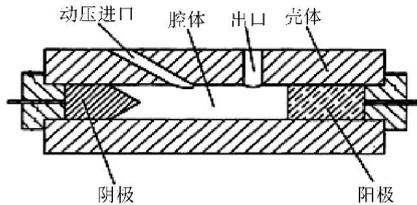


图6 动压式高能合成射流激励器

国防科技大学的罗振兵等人设计了一种动压式高能合成射流激励器(见图6)^[37],该激励器利用高速流动环境动压增压,使激励器腔体大气稠密化,解决稀薄气体环境下射流激励器无法工作的

问题,同时提高了出口射流量等。

火花放电射流激励器采用电信号控制,体积小且射流响应速度快。但腔体温度及压力变化大,工作电压高,因此对构件材料要求较高。目前火花放电射流激励器存在的最大困难是如何能够提高射流频率和维持长时间工作。

3 结语

本文对传统零质量射流和新型等离子射流的产生机制进行了阐述。与常规射流相比,零质量射流最突出的优点在于具有零净质量流量,而新型等离子射流较传统零质量射流可以获得高能/高动量零质量射流,可应用于宏观大尺度上的主动流动控制。目前,新型等离子射流真正在主动流动控制上的应用还有一些实际问题需要解决,例如电极和激励器材料的选择,电源电压和频率的选择等。随着国内外研究的深入,相信不久的将来这些问题都将会得到解决。

参考文献

- [1] 李斌斌.合成射流激励器及在主动流动控制中的应用[D].南京:南京航空航天大学,2008.
- [2] 战培国,程娅红,赵昕.主动流动控制技术研究[J].航空科学技术,2010(5):5-6.
- [3] Smith B L and Glezer A, The Formation and Evolution of Synthetic Jets, *Phys. Fluids*, 1998, 10(9): 2281-2297.
- [4] 罗振兵.合成射流流动机理及应用技术研究[D].长沙:国防科技大学,2002.
- [5] B.L. Smith, G.W. Swift, A comparison between synthetic jets and continuous jets, *Experiments in Fluids*, 2003, 34:467~472.
- [6] 沙江.零质量射流及其在流场主动控制中的应用探讨[D].南京:南京航空航天大学,2007.
- [7] Anwar Ahmed and Zafar Bangash, BIFURCATION AND CONNECTIVITY IN SYNTHETIC JET VORTEX TRAIN, *AIAA*: 2001~3031.
- [8] Yogen U, Ryan H, Rajat M, et al, A Jet Formation Criterion for Synthetic Jet Actuators, *AIAA2003 ~ 0636*, 2003.
- [9] Smith B L, and Glezer A. The Formation and Evolution of Synthetic Jets, *Phys. Fluids*, 1998, 10(9): 2281 ~ 2297.
- [10] Gilarranz J L, Traub L W, Rediniotis O K. Characterization of a Compact, High Power Synthetic Jet Actuator for Flow Separation Control, *AIAA2002-0127*.
- [11] 顾蕴松,明晓.应用 PIV 技术研究“零质量”射流的非定常流场特性[J].实验流体力学,2005,19(1):83-86.
- [12] Liang Y, Kuga Y, Taya M. Design of membrane actuator based on ferromagnetic shape memory alloy composite for synthetic jet applications[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, 125: 512-518.
- [13] 罗振兵,夏智勋.合成射流技术及其在流动控制中应用的进展[J].力学进展,2005,35(2):220-234.
- [14] 罗振兵.合成射流/合成双射流机理及其在射流矢量控制和微泵中的应用研究,[博士学位论文],国防科技大学,2006.
- [15] Gilarranz J L, Traub L W, Rediniotis O K. A new class of synthetic jet actuators part I design, fabrication and bench top characterization[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2005, 127: 367-376.
- [16] Gilarranz J L, Traub L W, Rediniotis O K. A new class of synthetic jet actuators part II application to flow separation control [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2005, 127: 377-387.
- [17] Hong G, Lee C, Ha Q, Effectiveness of synthetic jets enhanced by instability of T-S waves, *AIAA*: 2002-2832.
- [18] Smith B L, Glezer A. Jet vectoring using synthetic jets[J]. *J. Fluid Mech.*, 2002, 458: 1-34.
- [19] 王林,刘冰,夏智勋,等.不同出口倾角合成双射流流动特性及边界层控制[J].推进技术,2010,31(6):757-762.
- [20] Sang Boon Kim, Wooram Hong et al. Separation Control Mechanism of Airfoil Using Synthetic Jet. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2007, 21: 1367~1375.

(下转第150页)

