



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115828773 A

(43) 申请公布日 2023. 03. 21

(21) 申请号 202211230349.5

(22) 申请日 2022.09.30

(71) 申请人 中国人民解放军国防科技大学  
地址 410073 湖南省长沙市开福区德雅路  
109号

(72) 发明人 刘强 罗振兵 李石清 周岩  
王林 邓雄

(74) 专利代理机构 长沙国科天河知识产权代理  
有限公司 43225  
专利代理师 赵小龙

(51) Int. Cl.  
G06F 30/28 (2020.01)  
G06F 30/15 (2020.01)  
F02C 7/04 (2006.01)

权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种高超声速边界层转捩延迟控制方法

(57) 摘要

本发明涉及一种高超声速边界层转捩延迟控制方法,在高超声速飞行器表面或者进气道需控制边界层转捩的区域安装复合频率合成双射流激励器,在高超声速飞行器飞行过程中,开启复合频率合成双射流激励器,复合频率合成双射流激励器通过叠加电信号的方式,生成具有第一频率特性和第二频率特性双峰值速度的复合双射流,并对高超声速飞行器的高超声速边界层进行转捩延迟控制;第一频率远小于第二频率。本方案突破了传统的转捩控制思路,利用同一流动控制装置同时对边界层内的低频模态和高频模态进行抑制,通过对边界层的修正作用和将占主导的、声波模态的能量引出到边界层外以进一步有效降低了边界层内声波模态的能量,达到转捩延迟控制的目的。

所述复合频率合成双射流激励器以第一频率合成具有第一频率特性的第一双射流并利用所述第一双射流的动量注入效应对速度剖面的修正作用来抑制第一模态



所述复合频率合成双射流激励器以第二频率合成具有第二频率特性的第二双射流并利用所述第二双射流的声波辐射作用来抑制第二模态

1. 一种高超声速边界层转捩延迟控制方法,其特征在于,在高超声速飞行器表面或者进气道需控制边界层转捩的区域安装复合频率合成双射流激励器,在高超声速飞行器飞行过程中,开启所述复合频率合成双射流激励器,其中,所述复合频率合成双射流激励器通过叠加电信号的方式,生成具有第一频率特性和第二频率特性双峰值速度的复合双射流,并对所述高超声速飞行器的高超声速边界层进行转捩延迟控制;

所述第一频率小于所述第二频率。

2. 根据权利要求1所述的高超声速边界层转捩延迟控制方法,其特征在于,所述复合双射流基于以下方式获得并对所述高超声速飞行器的高超声速边界层进行转捩延迟控制,其中包括:

所述复合频率合成双射流激励器以第一频率合成具有第一频率特性的第一双射流并利用所述第一双射流的动量注入效应对速度剖面的修正作用来抑制第一模态;以及,

所述复合频率合成双射流激励器以第二频率合成具有第二频率特性的第二双射流并利用所述第二双射流的声波辐射作用来抑制第二模态。

3. 根据权利要求2所述的高超声速边界层转捩延迟控制方法,其特征在于,所述第一频率的频率范围满足: $20\text{Hz} \leq f_1 < 1\text{kHz}$ ;

所述第二频率的频率范围满足: $2\text{kHz} \leq f_2 < 100\text{kHz}$ 。

4. 根据权利要求3所述的高超声速边界层转捩延迟控制方法,其特征在于,所述复合频率合成双射流激励器所叠加的电信号为复合频率特征的电信号;其中,所述电信号采用幅值调制、频率调制或叠加调制的方式生成。

5. 根据权利要求4所述的高超声速边界层转捩延迟控制方法,其特征在于,若所述电信号采用幅值调制或频率调制的方式生成,则所述电信号表示为:

$$\text{signal} = A_1 \sin(2\pi f_1 + \phi_1) * A_2 \sin(2\pi f_2 + \phi_2);$$

若所述电信号采用叠加调制的方式生成,则所述电信号表示为:

$$\text{signal} = A_1 \sin(2\pi f_1 + \phi_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 + \phi_2);$$

其中, $A_1$ 表示用于生成第一双射流的电信号幅值, $f_1$ 表示第一频率, $\phi_1$ 表示用于生成第一双射流的电信号相位, $A_2$ 表示用于生成第二双射流的电信号幅值, $f_2$ 表示第二频率, $\phi_2$ 表示用于生成第二双射流的电信号相位。

6. 根据权利要求5所述的高超声速边界层转捩延迟控制方法,其特征在于,所述复合频率合成双射流激励器包括:主体(1),盖板(2)和振动膜(3);

所述主体(1)为一端开口,一端封闭的中空壳体;

所述盖板(2)设置在所述主体(1)的开口端,并与所述主体(1)密封连接;

所述振动膜(3)位于所述主体(1)中,且将所述主体(1)的中空部分割为两个相互独立的第一腔体(11)和第二腔体(12);

所述盖板(2)上与所述第一腔体(11)和第二腔体(12)相对应的设置有第一开口(21)和第二开口(22);

所述振动膜(3)用于施加所述电信号并进行振动。

7. 根据权利要求6所述的高超声速边界层转捩延迟控制方法,其特征在于,在高超声速飞行器表面或者进气道需控制边界层转捩的区域安装布设多个所述复合频率合成双射流激励器;

多个所述复合频率合成双射流激励器呈阵列分布,根据需求开启不同位置的所述复合频率合成双射流激励器,实现对高超声速边界层流动的有效时序控制。

## 一种高超声速边界层转捩延迟控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及流体力学中的流动控制领域,尤其涉及一种高超声速边界层转捩延迟控制方法。

### 背景技术

[0002] 高超声速飞行器技术是21世纪航空航天技术领域新的制高点,也是众多世界大国的重大战略需求之一。高超声速飞行器在研制过程中面临着诸多困难,其中降热减阻是制约高超声速飞行器发展的难题之一。众所周知,边界层从层流转捩为湍流后,其表面摩阻与热流将提升3-5倍,从而对飞行器的气动性能、结构安全、有效载荷与航程产生极大的影响。边界层转捩与湍流问题一起被称为“百年(或世纪)难题”,由于高超声速飞行器在其飞行参数范围内恰好非常容易出现边界层转捩现象,因而高超声速边界层转捩问题与湍流问题一直是制约飞行器设计的关键基础问题。而延迟边界层转捩,可以有效减小飞行器表面摩阻、降低热防护系统重量,确保高超声速飞行器“飞得更远、有效载荷更多”。

[0003] 边界层的存在及其从物面的分离是物体在流体中运动所产生摩擦阻力和形状阻力的根源。航空航天领域中飞行器的外形设计、飞行稳定性和气动力控制,水面与水下舰船、潜艇、鱼雷的减阻降噪,交通运输工具如高速列车、汽车、船舶的外形设计与运动稳定性,桥梁、隧道、建筑物的风工程设计,国防兵器中子弹、炮弹、导弹的飞行等都会受到边界层流动状态和稳定性的影响。边界层流动控制能起到增强/减弱流动稳定性、推迟/加速转捩、抑制/促进流动分离等作用,从而实现飞行器增升、减阻、降噪、消涡、减振和隐身等功能。

[0004] 研究边界层转捩有助于理解边界层内部相干结构的相互作用机理,为建立完善的边界层流动控制理论和数学模型奠定基础,美国NASA已将其列为二十一世纪的关键技术之一。因此,采用先进流动控制技术对边界层转捩流动结构和状态进行有效控制,揭示边界层转捩控制机理,已成为流体力学和流动控制领域的研究热点。

[0005] 常见的边界层转捩控制方法有壁面粗糙带、涡流发生器、定常射流、合成射流、壁面抽吸、壁面冷却、壁面加热等方式。其中,壁面粗糙带和涡流发生器属于被动控制方式,在特定工况下具有较好的控制效果,而当偏离设计状态时,控制效果将降低,甚至产生副作用。定常射流和壁面抽吸是主动控制方式,能拓宽控制范围,但需要流体供应及管路系统,使得结构复杂笨重。壁面冷却和壁面加热在特定工况下能够有效提高边界层流动稳定性,但其结构复杂、能耗较大、控制速度缓慢,且对飞行器载荷要求高。

[0006] 合成射流技术(Synthetic Jet)是上世纪90年代提出的一种基于旋涡运动的零质量射流技术,其具有结构紧凑、能耗低、响应快、控制灵活等优点,被认为是目前最具发展潜力的主动流动控制技术之一。在流动分离控制、改善机翼气动力、产生虚拟气动外形等边界层流动控制领域展现出了良好的应用前景。例如,中国专利CN109760818B公开了一种基于合成双射流激励器的超声速边界层转捩控制方法,在该方案中通过产生合成双射流以进行超声速边界层转捩控制。具体的,在该方案中采用喷出的双射流所形成的扰动波和射流涡

同时作用于边界层,其中扰动波能够修正边界层,射流涡能够抑制边界层中的发卡涡涡头的上抛运动和流向涡的上喷下扫运动,从而有效实现对超声速边界层转捩的“波控”与“涡控”,而这种边界层转捩控制方案只能促进转捩,达不到转捩延迟控制的目的。

## 发明内容

[0007] 本发明的目的在于提供一种高超声速边界层转捩延迟控制方法,用于实现高超声速边界层的转捩延迟控制。

[0008] 为实现上述发明目的,本发明提供一种高超声速边界层转捩延迟控制方法,在高超声速飞行器表面或者进气道需控制边界层转捩的区域安装复合频率合成双射流激励器,在高超声速飞行器飞行过程中,开启所述复合频率合成双射流激励器,其中,所述复合频率合成双射流激励器通过叠加电信号的方式,生成具有第一频率特性和第二频率特性双峰速度的复合双射流,并对所述高超声速飞行器的高超声速边界层进行转捩延迟控制;

[0009] 所述第一频率小于所述第二频率。

[0010] 根据本发明的一个方面,所述复合双射流基于以下方式获得并对所述高超声速飞行器的高超声速边界层进行转捩延迟控制,其中包括:

[0011] 所述复合频率合成双射流激励器以第一频率合成具有第一频率特性的第一双射流并利用所述第一双射流的动量注入效应对速度剖面的修正作用来抑制第一模态;以及,

[0012] 所述复合频率合成双射流激励器以第二频率合成具有第二频率特性的第二双射流并利用所述第二双射流的声波辐射作用来抑制第二模态。

[0013] 根据本发明的一个方面,所述第一频率的频率范围满足: $20\text{Hz} \leq f_1 < 1\text{kHz}$ ;

[0014] 所述第二频率的频率范围满足: $2\text{kHz} \leq f_2 < 100\text{kHz}$ 。

[0015] 根据本发明的一个方面,所述复合频率合成双射流激励器所叠加的电信号为复合频率特征的电信号;其中,所述电信号采用幅值调制、频率调制或叠加调制的方式生成。

[0016] 根据本发明的一个方面,若所述电信号采用幅值调制或频率调制的方式生成,则所述电信号表示为:

[0017]  $\text{signal} = A_1 \sin(2\pi f_1 + \phi_1) * A_2 \sin(2\pi f_2 + \phi_2)$ ;

[0018] 若所述电信号采用叠加调制的方式生成,则所述电信号表示为:

[0019]  $\text{signal} = A_1 \sin(2\pi f_1 + \phi_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 + \phi_2)$ ;

[0020] 其中, $A_1$ 表示用于生成第一双射流的电信号幅值, $f_1$ 表示第一频率, $\phi_1$ 表示用于生成第一双射流的电信号相位, $A_2$ 表示用于生成第二双射流的电信号幅值, $f_2$ 表示第二频率, $\phi_2$ 表示用于生成第二双射流的电信号相位。

[0021] 根据本发明的一个方面,所述复合频率合成双射流激励器包括:主体,盖板和振动膜;

[0022] 所述主体为一端开口,一端封闭的中空壳体;

[0023] 所述盖板设置在所述主体的开口端,并与所述主体密封连接;

[0024] 所述振动膜位于所述主体中,且将所述主体的中空部分割为两个相互独立的第一腔体和第二腔体;

[0025] 所述盖板上与所述第一腔体和第二腔体相对应的设置有第一开口和第二开口;

[0026] 所述振动膜用于施加所述电信号并进行振动。

[0027] 根据本发明的一个方面,在高超声速飞行器表面或者进气道需控制边界层转捩的区域安装布设多个所述复合频率合成双射流激励器;

[0028] 多个所述复合频率合成双射流激励器呈阵列分布,根据需求开启不同位置的所述复合频率合成双射流激励器,实现对高超声速边界层流动的有效时序控制。

[0029] 根据本发明的一种方案,通过生成的复合双射流以期在较宽频率范围内实现对不稳定波的抑制,达到更好的转捩延迟控制目的。尤其是首次通过将声波能量引出到边界层外降低第二模态能量(国际上首次发现)、并结合通过剖面修正作用抑制第一模态扰动波的方式,为转捩延迟控制提供了一种新的思路,并达到了对边界层内不同频率范围扰动波的有效控制,更好的实现了转捩延迟控制目的。

[0030] 根据本发明的一种方案,本发明通过低频合成双射流的动量注入效应将对边界层速度剖面进行修正,速度型更加饱满,抵抗流动稳定性的能力增加;通过高频合成双射流的高频吹吸作用将在控制为主引入一道压缩波,边界层内的声波扰动将沿着压缩波辐射到边界层外,进而降低边界层内声波扰动的能量,通过上述控制过程,实现了对宽频率范围扰动波的抑制,达到更好的转捩延迟控制目的。

[0031] 根据本发明的一种方案,本发明的方案突破了传统的转捩控制思路,利用同一流体控制装置同时对边界层内的低频模态和高频模态进行抑制,通过对边界层的修正作用和将占主导的、声波模态的能量引出到边界层外,以进一步有效降低了边界层内声波模态的能量,达到转捩延迟控制的目的。

## 附图说明

[0032] 图1示意性表示根据本发明的一种实施方式的高超声速边界层转捩延迟控制方法的流程框图;

[0033] 图2示意性表示根据本发明的一种实施方式的复合频率合成双射流激励器的主视图;

[0034] 图3示意性表示根据本发明的一种实施方式的复合频率合成双射流激励器的截面图;

[0035] 图4示意性表示根据本发明的一种实施方式的复合频率特征的电信号图。

## 具体实施方式

[0036] 为了更清楚地说明本发明实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对实施方式中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施方式,对于本领域普通技术人员而言,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0037] 在针对本发明的实施方式进行描述时,术语“纵向”、“横向”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“顶”、“底”、“内”、“外”所表达的方位或位置关系是基于相关附图所示的方位或位置关系,其仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此上述术语不能理解为对本发明的限制。

[0038] 结合图1、图2和图3所示,根据本发明的一种实施方式,本发明的一种高超声速边

界层转捩延迟控制方法,在高超声速飞行器表面或者进气道需控制边界层转捩的区域安装复合频率合成双射流激励器,在高超声速飞行器飞行过程中,开启复合频率合成双射流激励器,其中,复合频率合成双射流激励器通过叠加电信号的方式,生成具有第一频率特性和第二频率特性双峰值速度的复合双射流,并对高超声速飞行器的高超声速边界层进行转捩延迟控制;在本实施方式中,第一频率小于第二频率。

[0039] 结合图1、图2和图3所示,根据本发明的一种实施方式,复合双射流基于以下方式获得并对高超声速飞行器的高超声速边界层进行转捩延迟控制,其中包括:

[0040] 复合频率合成双射流激励器以第一频率合成具有第一频率特性的第一双射流并利用第一双射流的动量注入效应对速度剖面的修正作用来抑制第一模态;以及,复合频率合成双射流激励器以第二频率合成具有第二频率特性的第二双射流并利用第二双射流的声波辐射作用来抑制第二模态。在本实施方式中,通过低频的第一双射流的动量注入效应对边界层速度剖面进行修正,速度型更加饱满,抵抗流动稳定性的能力增加,通过高频的第二双射流的高频吹吸作用将在控制为主引入一道压缩波,边界层内的声波扰动将沿着压缩波辐射到边界层外,进而降低边界层内声波扰动的能量。

[0041] 通过上述设置,通过生成的复合双射流以期在较宽频率范围内实现对不稳定波的抑制,达到更好的转捩延迟控制目的。

[0042] 根据本发明的一种实施方式,第一频率的频率范围满足:几十赫兹至几百赫兹;例如,在本实施方式中,第一频率的频率范围可采用 $20\text{Hz} \leq f_1 < 1\text{kHz}$ ;而第二频率的频率范围满足:几千赫兹~几十千赫兹;例如,在本实施方式中,第二频率的频率范围可采用 $2\text{kHz} \leq f_2 < 100\text{kHz}$ 。

[0043] 通过上述设置,使得第一频率与第二频率之间具有明显的区分范围,进而可有效保证所采用的电信号的生成精度和所生成的复合双射流的性能稳定,进而达到更好的转捩延迟控制效果。

[0044] 如图4所示,根据本发明的一种实施方式,复合频率合成双射流激励器所叠加的电信号为复合频率特征的电信号;其中,电信号采用幅值调制、频率调制或叠加调制的方式生成。

[0045] 在本实施方式中,若电信号采用幅值调制(AM)或频率调制(FM)的方式生成,则电信号表示为:

$$[0046] \text{signal} = A_1 \sin(2\pi f_1 + \phi_1) * A_2 \sin(2\pi f_2 + \phi_2)$$

[0047] 若电信号采用叠加调制的方式生成,则电信号表示为:

$$[0048] \text{signal} = A_1 \sin(2\pi f_1 + \phi_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 + \phi_2)$$

[0049] 其中, $A_1$ 表示用于生成第一双射流的电信号幅值, $f_1$ 表示第一频率, $\phi_1$ 表示用于生成第一双射流的电信号相位, $A_2$ 表示用于生成第二双射流的电信号幅值, $f_2$ 表示第二频率, $\phi_2$ 表示用于生成第二双射流的电信号相位。

[0050] 在本实施方式中,该电信号的幅值、频率、相位可以根据不同飞行条件和控制需求进行实时调节,具有方便灵活的优势。

[0051] 通过上述设置,实现了在复合频率特征的电信号的驱动下,本发明的复合频率合成双射流激励器更加准确快速的产生具有低频特性和高频特性双峰值速度的射流。

[0052] 结合图2和图3所示,根据本发明的一种实施方式,复合频率合成双射流激励器包

括:主体1,盖板2和振动膜3。在本实施方式中,主体1为一端开口,一端封闭的中空壳体。在本实施方式中,盖板2设置在主体1的开口端,并与主体1密封连接;振动膜3位于主体1中,且将主体1的中空部分割为两个相互独立的第一腔体11和第二腔体12;在本实施方式中,盖板2上与第一腔体11和第二腔体12相对应的设置有第一开口21和第二开口22;振动膜3用于施加电信号并进行振动,以实现第一腔体11和第二腔体12的变化进而通过第一开口21和第二开口22合成复合频率的复合双射流。

[0053] 在本实施方式中,振动膜3为压电陶瓷片,其振动是采用压电驱动方式,因此易于电参数控制。

[0054] 通过上述设置,本发明的复合频率合成双射流激励器工作时只需消耗电能,通过电信号输入即可方便实现激励器的启动和频率控制,且工作频带宽、响应迅速因此易于电参数控制。

[0055] 根据本发明的一种实施方式,在高超声速飞行器表面或者进气道需控制边界层转捩的区域安装布设多个复合频率合成双射流激励器;多个复合频率合成双射流激励器呈阵列分布,根据需求开启不同位置的复合频率合成双射流激励器,实现对高超声速边界层流动的有效时序控制。

[0056] 上述内容仅为本发明的具体方案的例子,对于其中未详尽描述的设备 and 结构,应当理解为采取本领域已有的通用设备及通用方法来予以实施。

[0057] 以上所述仅为本发明的一个方案而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

所述复合频率合成双射流激励器以第一频率合成具有第一频率特性的第一双射流并利用所述第一双射流的动量注入效应对速度剖面的修正作用来抑制第一模态



所述复合频率合成双射流激励器以第二频率合成具有第二频率特性的第二双射流并利用所述第二双射流的声波辐射作用来抑制第二模态

图1

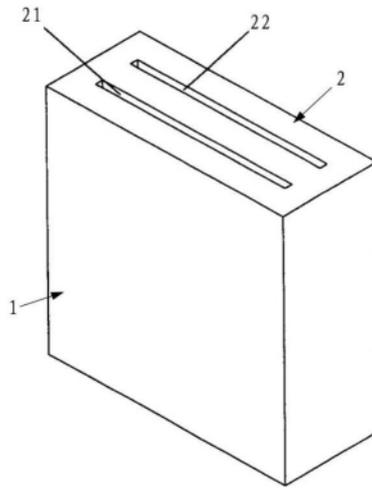


图2

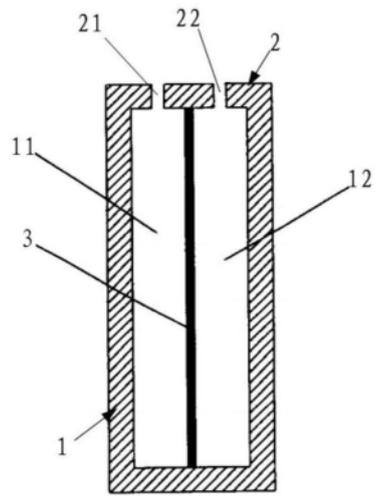


图3

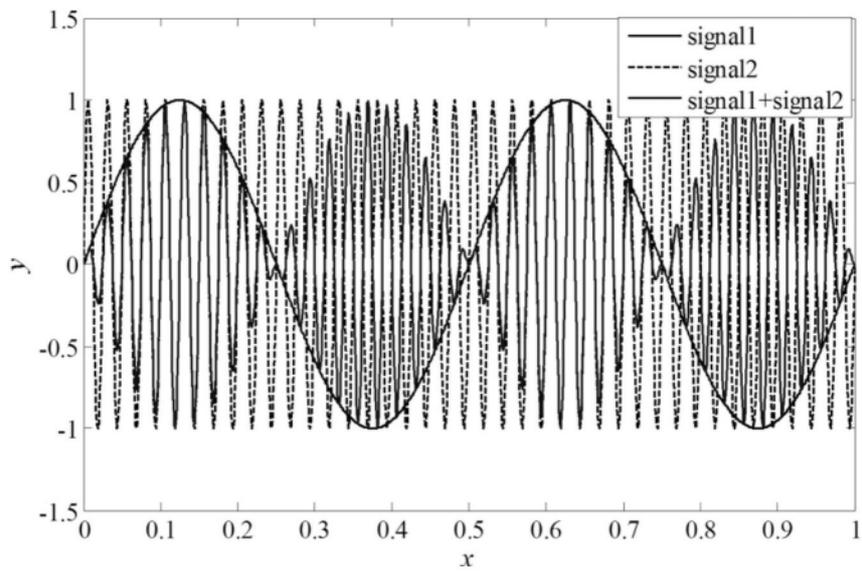


图4