

文章编号 1004-924X(2015)10-2895-07

风洞模型主动抑振器的设计与实验

刘 巍^{*}, 毕晓丹, 贾振元, 刘伟国
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要:研究了风洞模型主动振动的抑制原理,并结合叠堆式压电陶瓷作动器的压电效应设计了一套并联式主动抑振器。首先,针对模型支杆系统及其动力学特征,分析了支杆抑振原理,提出了一种基于叠堆式压电陶瓷作动器的风洞模型抑振器。然后,构建了抑振器实时控制系统,针对其驱动位移滞后的特点,研究了基于 PD 调节器的控制方法。最后,搭建了地面实验平台,利用锤击法和激振法对抑振器进行了地面实验。实验结果表明:抑振器具有提高支杆系统阻尼的能力,对风洞模型在俯仰和偏航两个方向上的抑振效果明显,特别是俯仰方向上,抑制器工作后系统阻尼比可由 0.009 提高到 0.092,抑振后剩余振幅比例约为 25%。试验结果验证了该风洞模型主动抑振器的可行性与有效性。

关键词:风洞试验;主动振动抑制;主动抑制器;压电陶瓷作动器;支杆振动

中图分类号:V211.74 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152310.2895

Design and experiment on active damper of wind-tunnel model

LIU Wei^{*}, BI Xiao-dan, JIA Zhen-yuan, LIU Wei-guo

(College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

^{*} Corresponding author, E-mail: lw2007@dlut.edu.cn

Abstract: The active damping concept of a wind-tunnel model was researched and a parallel type active damper was designed based on the piezoelectric effect of a stacked piezoelectric ceramic actuator. According to sting support system and its aerodynamic characters, the sting damping principle was analyzed and the active anti-vibration structure with piezoelectric ceramic stack actuators was proposed based on the anti-vibration principle. Then, a real-time control system was equipped for the anti-vibration structure. Aiming at the characteristics of displacement hysteresis, a control program based on a PD regulator was proposed. Finally, a ground experiment platform was built and the hammering method and vibration method were utilized to do experiment for the active damper. The experimental results show that the active sting damper improves the damping ratio of the sting and shows higher damping vibration abilities on both pitch and yaw directions, especially on the pitch direction. When the damper is involved the system, the damping ratio of the system increases from 0.009 to 0.092 and the remained vibration amplitude is about 25%. The experimental results demonstrate the effectiveness and feasibility of the sleeve-type active damper.

Key words: wind-tunnel test; active vibration control; active damper; piezoelectric ceramic actuator; sting vibration

收稿日期:2015-05-07;修订日期:2015-06-10.

基金项目:航空科学基金重点资助项目(No. 2012ZA26001)

1 引言

风洞模型实验是航空飞行器设计、制造与定型的重要环节,准确稳定的风洞模型实验数据可为航空飞行器空气动力学特性研究提供重要的实验基础^[1]。为了满足高机动性要求,新一代飞行器必须在大攻角飞行条件下具备可靠的气动性能,由于大攻角飞行极具危险性,因此必须在风洞试验中充分研究飞行器气动性能,这对风洞攻角试验技术提出了较高要求^[2]。风洞试验中常见的尾部支撑形式多用于风洞模型的大攻角试验和跨声速试验,但尾撑形式的模型系统(包括弯刀、支杆、测力天平、模型)为典型的悬臂结构,其系统刚度低,一阶固有频率为 10~15 Hz,这与风洞气流的脉动频率接近,容易产生耦合,从而引起模型的大幅值、低频振动^[3]。该振动会影响风洞测力天平的正常工作,导致数据测量的不准确,严重时还会损坏模型系统,对风洞运行的安全造成威胁^[4-5]。因此,研究切实有效的风洞模型系统振动抑制方法,对提高风洞试验的攻角范围、数据测量的准确性具有重要意义。

目前,模型振动抑制的方法主要有被动式和主动式两类。美国航空航天局的 W. B. Igoe 等人在 1968 年提出了安装在模型头部的被动式阻尼器^[6],该装置最大能在俯仰方向实现抑制振幅的峰值和均方根值接近 50%,但由于该装置在不同的实验条件下的性能相差较大,且安装在模型内部,导致试验结果偏离实际情况。德国人 R Freymann 于 1989 年提出了安装于支杆位置的被动抑振装置^[7],该抑振装置能实现多个自由度的振动抑制(包括俯仰、偏航和滚转),最佳条件下俯仰方向抑振效果可达 50%,但该系统需要较大的调谐质量块,导致支杆体积过大,严重影响风洞试验段气流特性,造成结果失真。美国航空航天局从 2007 年开始研制内嵌于模型支杆的压电作动器,在针对某型号模型的一系列实验中,2011 年相继开发出 3 套主动抑振系统,抑振后剩余振幅可达原振幅的 27%,将可靠试验的最大攻角由 6°提高至 12°^[1,8-9]。

南京航空航天大学陈卫东等人与中国空气动力研究发展中心合作研究了安装在飞机模型头部空腔内的电磁式作动器,根据地面试验相关数据,

总体被控系统剩余振幅保持在 30%左右^[10]。中国空气动力研究与发展中心设备设计及测试技术研究所黎壮声等人设计了基于现场可编程门阵列(FPGA)实时控制器的主动控制系统,减振效果达到 40%以上^[11]。中国空气动力研究与发展中心的王元兴等人^[12]以及中国空气动力研究与发展中心空气动力学国家重点实验室和中国空气动力研究与发展中心低速所王学、陈陆军等人^[13]针对风洞的尾撑装置也进行了相关的振动主动控制研究,为系统有效减振奠定了基础。

至今,国内外相关学者仍在不断地探索风洞模型抑振方法,国外的研究比较系统,某些技术已经得到实际应用;而国内的多数研究仍在实验室阶段。由于被动式抑振装置受其抑振原理影响,系统的响应速度较慢,抑振效果很难进一步提高,因此近年来的相关研究主要瞄准主动振动抑制领域,其抑振效果好,反应速度快,适用范围广泛。

本文对风洞模型主动振动抑制的原理开展了研究,结合叠堆式压电陶瓷作动器的压电效应特性,设计了一套并联式主动抑振器,搭建了地面实验平台,对抑振器性能进行实验研究。

2 主动抑振器原理及结构设计

2.1 主动抑振器工作原理

采用具有定位精度高、驱动力大、响应速度快等优点的压电驱动器设计风洞模型主动振动抑制器件^[14-15]。压电陶瓷材料在进行机电耦合时,电学参数和力学参数之间的关系可由如下压电方程表征:

$$\begin{cases} \epsilon = c^E \sigma + dE \\ D = d\sigma + \epsilon^s E \end{cases}, \quad (1)$$

其中: ϵ 为应变; c^E 为电场强度恒定时的弹性柔顺常数; σ 为应力; d 为压电应变常数; E 为电场强度; D 为电位移量; ϵ^s 为应力恒定时的介电常数。

压电陶瓷叠堆由已经过极化的压电陶瓷薄片黏接而成。陶瓷片间镀上电极并用导线接出用以加载驱动电场。对于叠堆式压电陶瓷作动器,其施加电场方向和受力方向为纵向,即沿极化方向。叠堆所使用的位移输出方向也为纵向,按式(1)计算每一片陶瓷的应变:

$$\epsilon = \epsilon_{33}^E \sigma + d_{33} \cdot \frac{U}{t}, \quad (2)$$

其中: U 为陶瓷片两端施加的电压; t 为陶瓷片厚度。

对于陶瓷叠堆,忽略其中电极镀层的厚度,其伸长量为:

$$\Delta l = -\frac{c_{33}^E}{S} \cdot F + d_{33} \cdot U, \quad (3)$$

其中: Δl 为陶瓷叠堆伸长量; l 为陶瓷叠堆原始长度; S 为叠堆承载面积; F 为叠堆输出力; n 为叠堆中陶瓷片数。当完全机械自由时,即输出力 $F=0$,压电叠堆在额定电压 U_{rated} 下获得最大伸长量,即:

$$\Delta l_{\text{max}} = d_{33} \cdot n \cdot U_{\text{rated}}, \quad (4)$$

在额定电压下,式(3)可以写作:

$$\Delta l_{\text{rated}} = -\frac{F}{D} + \Delta l_{\text{max}}, \quad (5)$$

其中: $D = S/c_{33}^E l$ 为作动器刚度,其由叠堆的长度和承载面积以及压电陶瓷材料的弹性柔顺常数决定。

因此,作动器的刚度和在额定耐压下的最大输出位移为其主要性能指标。

风洞模型支杆为一典型悬臂结构,某一时刻的气动载荷作用在模型上会在垂直于支杆平面产生作用力,这个力相对于支杆方向为横力,支杆产生横力弯曲变形,在支杆与模型连接端处挠度最大,分解在俯仰和偏航 2 个方向上形成了 2 个方向上的挠度。

如图 1 所示,模型端所受气动载荷作用力为:

$$P = qAC + \tilde{p}A, \quad (6)$$

其中: P 为模型所受气动载荷; q 为风洞试验段流场定常压强; A 为流场与模型接触面积; C 为气动载荷系数; \tilde{p} 为接触面上脉动压强。式中前项为气动定常载荷(P_d),后项为气动脉动载荷(P_f),且后者远小于前者。模型支杆作为低阻尼弹性梁吸收气动载荷发生弯曲变形,由于脉动载荷的存在而显现出谐振特性。

主动抑振器利用驱动叠堆式压电陶瓷作动器输出的力和位移,使支杆产生反向的弯曲,消减气动脉动载荷在支杆上产生的挠度,利用作动器的高频响配合实时控制系统即可实现模型振动的抑制,如图 2(a)所示。主动抑振器中,叠堆式压电陶瓷作动器纵向安装在支杆上,并沿此方向输出力和位移,若相对的 2 个作动器输出相反,支杆一侧的纵向纤维伸长,另一侧则缩短,结合梁变形的

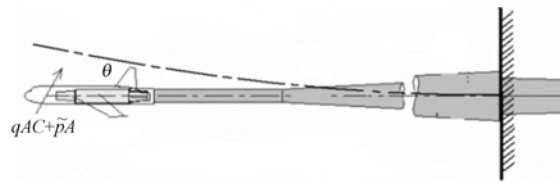
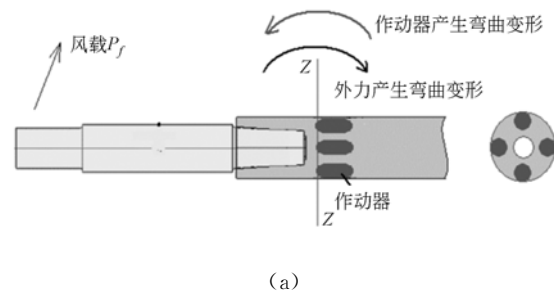


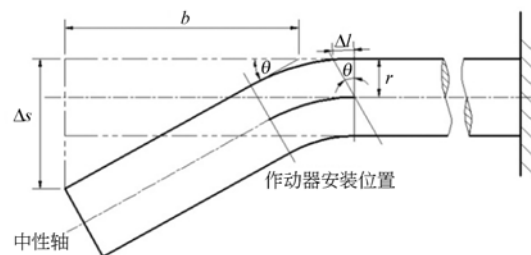
图 1 气动载荷致支杆变形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sting deformation induced by aerodynamic load

平面假设,可以认为在作动器作用的局部,支杆发生纯弯曲,其轴线即为中性轴。假设作动器的伸长量完全体现在支杆上,支杆及其它结构不产生影响变形的附加刚度,可获得抑振器变形力学模型,如图 2(b)所示。



(a)



(b)

图 2 主动抑振器工作原理及其力学模型

Fig. 2 Working principle of active sting damper and its mechanical model

设作动器作用在支杆上纯弯曲的相对转角为 θ ,由于该角较小,可以近似认为 $\sin \theta = \tan \theta$,则:

$$\tan \theta = \frac{\Delta l}{r} = \frac{\Delta s}{b}, \quad (7)$$

其中: Δl 为作动器输出位移; r 为作动器有效半径,即作动器输出点到中性轴的距离; Δs 为支杆自由端(模型重心处)位移量; b 为作动器中点到支杆自由端(模型重心处)的距离。

作动器在工作中需要直接承载天平所受气动载荷在作动器处产生的转矩,有:

$$M = P \cdot b = F \cdot r, \quad (8)$$

其中: M 为气动载荷在作动器处产生的转矩。

将式(6)和(8)带入式(7)可得作动器在额定电压下产生的支杆自由端位移量:

$$\Delta s_{\text{rated}} = -\frac{P}{D} \cdot \left(\frac{b}{r}\right)^2 + \Delta l_{\text{max}} \cdot \frac{b}{r}. \quad (9)$$

支杆自由端额定位移量 Δs_{rated} 可以用来表征所设计的主动抑振器的性能。当 $\Delta s_{\text{rated}} > 0$ 时, 主动抑振器具备抑振性能; Δs_{rated} 越大, 抑振器的性能越好。在影响抑振性能的相关参数中, 气动载荷 P 为不受控制的外界因素, 最大输出位移 Δl_{max} 和刚度 D 为叠堆式压电陶瓷作动器的性能参数, 作动器与支杆自由端距离 b 和有效半径 r 为抑振器结构的安装参数。

2.2 主动抑振器结构设计

风洞试验中支杆的存在干扰了飞行器周围的流场分布, 因此, 风洞模型的支杆通常较细, 支杆强度的安全系数不高。为使叠堆式压电陶瓷作动器发挥抑振性能, 必须以合理方式将其安装在支杆中。结合国内某型号风洞试验模型支杆细和直的特点, 提出并联式结构抑振器, 如图 3 所示。主动抑振器整体结构外套于支杆上, 不对支杆结构产生任何破坏。抑振器壳体内部采用电火花线切割加工正交的 4 个腔, 4 支压电叠堆作动器分别安装在 4 个腔内, 作动器的封装外壳端由螺钉拉紧, 输出端焊接球头, 与对应的凹端紧定螺钉的凹端紧密接触, 外壳整体由两端的胀紧套胀紧在支杆上。

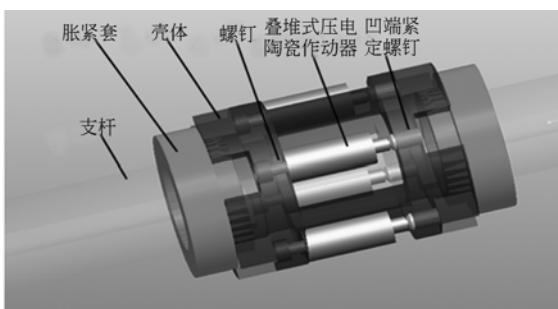


图 3 并联式抑振器结构设计

Fig. 3 Structure design of parallel-mode damper

并联式主动抑振器采用胀紧的安装方式, 便于拆装, 可以根据试验需要调整抑振器在支杆上的位置, 改变安装长径比 b/r 的值, 使作动器更好地发挥性能, 增强了抑振器在不同模型、气动载荷条件下的适应性。此外, 可以通过先安装加静载、

后预紧作动器的方式, 使静载荷更多地由支杆和抑振器壳体承担, 而抑振器主要承担气动载荷中的动载部分, 由式(9)可知, 此设计可显著增加作动器的输出能力。图 4 所示为并联式主动抑振器的实物图。

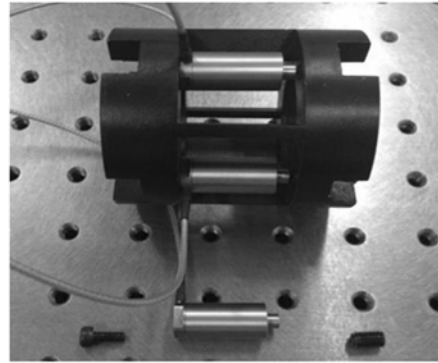


图 4 并联式主动抑振器

Fig. 4 Parallel-mode active damper

3 主动抑振器的控制系统

当气动载荷加载到模型-天平-支杆系统时, 其脉动载荷部分会引起模型振动, 而抑振器须在其振动一阶振型的 $1/4$ 个周期内吸收振动能量以阻止振幅的进一步扩大。由于抑振器需要抑制的是气动脉动载荷带来的部分变形, 因此控制系统需要实时采集模型振动幅值的变化率。在实际应用中可以使用经高通滤波器滤波处理的风洞天平采集力/力矩数据, 以反映脉动载荷引起的振动情况。主动抑振器的控制原理如图 5 所示。

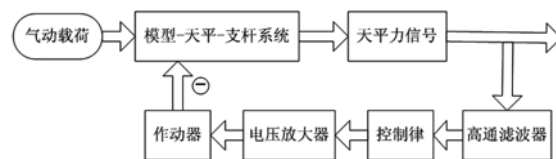


图 5 主动抑振器控制原理图

Fig. 5 Control principle of active sting damper

按上述控制原理搭建控制系统, 其中控制系统的硬件由上位机、dSPACE 实时仿真控制器和电压放大器组成。

控制程序包含输入/输出端的模数/数模转换、高通滤波、控制律、分相、限幅环节。采用 PD 调节器作为控制律。PD 调节器是相角超前校

正,微分环节反应信号的变化趋势,具有预测能力,可以为系统提供一个相位超前的信号,增加系统的稳定裕量,使系统响应速度加快,改善瞬态性能。因此可以用 PD 调节器来消减驱动信号的滞后。

对于理想 PD 调节器,其传递函数为:

$$G(s) = K_p + K_d s, \quad (10)$$

其中: K_p 为比例系数; K_d 为微分常数。对两参数进行合理整定,可以提高抑振性能。

4 主动抑振器的地面实验

在主动抑振器进入风洞试验阶段之前,需要对其进行地面实验研究,以获得主动抑振器的抑振性能,对控制系统参数进行整定。

4.1 地面实验平台搭建

地面实验对支杆系统的模拟采用了自行制造的 $\varphi 32$ mm 支杆,如图 6 所示,支杆固支于隔震台上,省去了调整攻角的弯刀,支杆自由端连接配重盘,模拟试验中的飞行器模型。主动抑振器地面实验平台如图 7 所示。

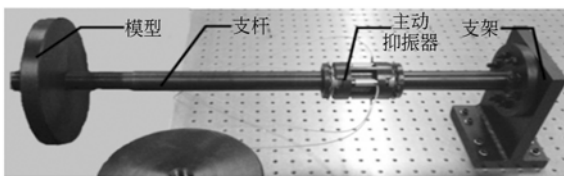


图 6 地面实验用支杆系统

Fig. 6 Model-sting system used in ground experiment

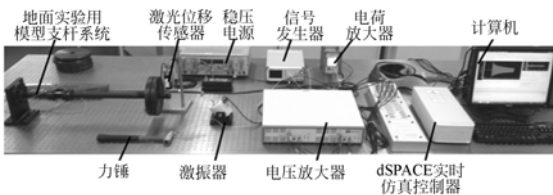


图 7 地面实验平台

Fig. 7 Ground experiment platform

在地面实验中采用激光位移传感器测量实验模型端的位移信号。对支杆振动的模拟可以由两种方式实现,一种是使用力锤锤击模型(锤击法),主动抑振器的引入相当于增加了系统的阻尼,因此通过对比主动抑振器工作前后系统阻尼比的变化,可以评价其抑振性能。另一种是使用激振器

对模型激振(激振法),比较主动抑振器介入振动系统前后的 2 个状态,获得达到新的振动状态所用时间——调整时间,和新状态振幅与原状态的比——剩余振幅比例,以此评价抑振器性能。

4.2 地面实验结果

使用地面实验系统对主动抑振器性能进行地面实验。激光位移传感器的灵敏度设为 $4 \text{ mV}/\mu\text{m}$,电压放大器的放大倍数为 $200 \text{ V}/\text{V}$,控制系统硬件的放大比例为 $0.8 \text{ V}/\mu\text{m}$ 。将主动抑振器安装于距模型端 350 mm 处,整定此时控制效果最佳的 PD 参数为 $K_p=1.3, K_d=0.015$ 。分别在抑振器工作和未工作时,使用锤击法获得俯仰方向上的模型响应及频谱如图 8 所示。

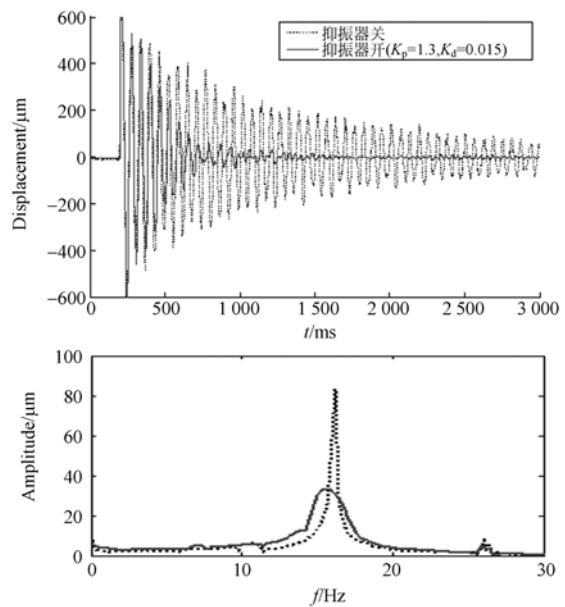


图 8 基于 PD 调节器控制的锤击法模型响应及其频谱

Fig. 8 Model response and its spectrum in hammering method based on PD regulator control

利用对数衰减率法计算图中 2 条曲线的对数衰减率和阻尼比。抑振器未工作时,模型振动的对数衰减率为 0.054,阻尼比为 0.009;抑振器介入支杆系统工作时,模型振动的对数衰减率提高到了 0.580,阻尼比提高到了 0.092。由频谱曲线分析可知,在支杆系统的自然震荡频率上信号衰减了 8 dB。

在同样的实验条件和控制参数下,在俯仰方向上进行激振法实验,得到主动抑振器开始工作前后的模型响应曲线如图 9 所示。

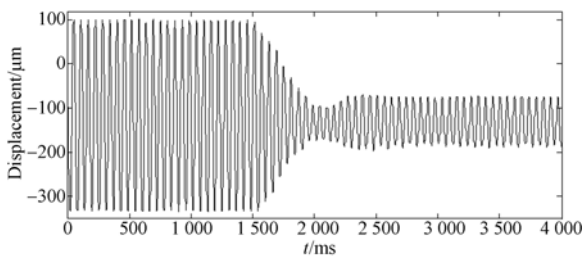


图 9 基于 PD 调节器控制的激振法模型响应

Fig. 9 Model response in vibration method based on PD regulator control

支杆原振幅峰-峰值为 $440 \mu\text{m}$, 抑振器于约 1500 ms 处介入系统后, 支杆振幅开始衰减, 约在 2000 ms 处, 支杆振动稳定, 稳定后剩余振幅约为 $110 \mu\text{m}$ 。经计算, 在该实验条件下, 主动抑振器的抑振调整时间为 500 ms , 剩余振幅比例为 25.0% 。

此外, 分别使用锤击法和激振法测试偏航方向上主动抑振器性能。整定 PD 参数为 $K_p = 1.5$, $K_d = 0.005$ 。锤击实验中, 抑振器未工作时, 模型振动的对数衰减率为 0.151 , 阻尼比为 0.024 ; 抑振器介入支杆系统工作时, 模型振动的对数衰减率提高到了 0.396 , 阻尼比提高到了 0.063 , 在支杆系统的自然震荡频率上信号衰减了 7.5 dB 。激振实验中, 主动抑振调整时间约为 700 ms , 抑振后剩余振幅比例为 28.2% 。

将所设计主动抑振器的上述实验结果与 NASA 所制主动抑振器 (ViGYAN active sting damper) 在 NACA0012 模型上的地面实验结果对比, 如表 1 所示^[8]。

参考文献:

- [1] 战培国, 赵昕. 风洞试验模型技术新发展[J]. 航空科学技术, 2011(5): 8-11.
ZHAN P G, ZHAO X. New development of model techniques for wind tunnel test [J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2011, (5): 8-11. (in Chinese)
- [2] ERICKSON G E. High angle-of-attack aerodynamics [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1995, 27(1): 45-88.

表 1 2 种主动抑振器的地面实验结果对比

Tab. 1 Comparison of ground experiment results between two active sting dampers

抑振器/ 实验方向	对数衰减率 (抑振器开/关)	阻尼比 (抑制器开/关)	调整 时间	剩余振 幅比例
本文抑振 器/俯仰	0.580/0.054	0.092/0.009	500 ms	25.0%
ViGYAN/ 俯仰	0.498/0.05	0.082/0.008	700 ms	27%
本文抑振 器/偏航	0.396/0.151	0.063/0.024	700 ms	28.2%
ViGYAN/ 偏航	0.409/0.123	0.065/0.02	/	/

地面实验结果表明: 本文所设计的主动抑振器的性能达到国外同级别主动抑振器的抑振性能, 抑振器设计合理, 安装及控制方法可行。

5 结 论

本文设计了基于叠堆式压电陶瓷作动器的主动并联式结构抑振器, 配合基于 PD 调节器的实时控制系统, 实现了对支杆俯仰和偏航 2 个方向振动的抑制。使用锤击法和激振法对抑振器进行地面实验研究, 在俯仰方向上, 抑振器介入支杆系统后, 系统阻尼比由 0.009 提高到 0.092 , 抑振后剩余振幅比例约为 25% ; 偏航方向上, 抑振器介入支杆系统后, 系统阻尼比由 0.024 提高到 0.063 , 抑振后剩余振幅比例约为 28.2% 。本文的研究工作对风洞模型的振动抑制技术具有一定的参考意义, 未来的研究工作可以着眼于风洞试验环境条件对抑振器性能的影响, 探究抑振器在风洞中工作的稳定性和可靠性。

- [3] 杨恩霞. 大攻角张线-尾撑组合支撑设备的设计 [J]. 机械工程师, 2005 (7): 113-114.
YANG E X. Design of combination support equipment with string support and sting support at high angles of attack [J]. *Mechanical Engineer*, 2005 (7): 113-114. (in Chinese)
- [4] BUEHRLE R D, YOUNG Jr C P, BALAKRISHNA S, et al.. Experimental study of dynamic interaction between model support structure and a high speed research model in the national transonic facility [J]. *AIAA Paper*, 1994: 94-1623.

- [5] 付密果,刘源,崔敏亮,等. 空间飞行器用金属橡胶减振器[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1174-1182.
FU M G, LIU Y, CUI M L, *et al.*. Metal-rubber vibration absorber for aircraft [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1174-1182. (in Chinese)
- [6] IGOE W B, CAPONE F T. Reduction of wind-tunnel-model vibration by means of a tuned damped vibration absorber installed in a model [J]. *NASA TM*, 1968.
- [7] FREYMANN R. Passive and active damping augmentation systems in the fields of structural dynamics and acoustics [J]. *AIAA Journal*, 1989, 1196: 348-361.
- [8] BALAKRISHNA S, HEATHER H, BUTLERu D H, *et al.*. Development of a wind tunnel active vibration reduction system [J]. *AIAA Paper*, 2007, 961.
- [9] BALAKRISHNA S, BUTLER D, ACHESON M, *et al.*. Design and performance of an active sting damper for the NASA common research model [C]. *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA (submitted for publication)*. 2011.
- [10] 陈卫东,邵敏强,杨兴华,等. 跨声速风洞测力模型主动减振系统的试验研究[J]. 振动工程学报, 2007, 20(1): 91-96.
CHEN W D, SHAO M Q, YANG X H, *et al.*. Experimental evaluation of an active vibration control system for wind tunnel aerodynamic models [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2007, 20(1): 91-96. (in Chinese)
- [11] 黎壮声,王帆,王生利,等. 风洞模型振动主动控制系统研制[J]. 中国空气动力学学会测控技术专委会第六届四次学术交流会论文集, 2013.
LI ZH SH, WANG F, WANG SH L, *et al.*. The development of active control system for the model of wind tunnel of vibra [J]. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 2013. (in Chinese)
- [12] 王元兴,陈万华,杨兆宜. 声学引导风洞主动减振系统研制[J]. 中国空气动力学学会测控技术专委会第六届四次学术交流会论文集, 2013.
WANG Y X, CHEN W H, YANG ZH Y. The development of active vibration control system based on acoustic guide in a wind tunnel [J]. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 2013. (in Chinese)
- [13] 王学,陈陆军,黄勇,等. 低速风洞模型振动主动控制仿真研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(5): 14-19.
WANG X, CHEN L J, HUANG Y, *et al.*. Active control method for model vibration in a low speed wind tunnel [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(5): 14-19. (in Chinese)
- [14] 陈辉,谭永红,周杏鹏,等. 压电陶瓷执行器的动态模型辨识与控制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 88-95.
CHEN H, TAN Y H, ZHOU X P, *et al.*. Identification and control of dynamic modeling for piezoceramic actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 88-95. (in Chinese)
- [15] 唐可洪,阚君武,彭大江,等. 压电叠堆泵驱动的新型直线马达[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 114-119.
TANG K H, KAN J W, PENG T J, *et al.*. Novel linear motor driven by piezostack pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 114-119. (in Chinese)

作者简介:



刘巍(1979—),男,内蒙赤峰人,博士,副教授,博士生导师,2007年于大连理工大学获得博士学位,主要从事精密测量、精密控制、微执行器、微机器人等方面的研究。E-mail:lw2007@dlut.edu.cn



毕晓丹(1990—),女,辽宁大连人,硕士,2012年于大连交通大学获得学士学位,主要从事功能材料与智能控制等方面的研究。E-mail:bxid@mail.dlut.edu.cn

(本栏目编辑:马健)

(版权所有 未经许可 不得转载)