

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.04.013

## 跨声速风洞模型主动减振系统试验研究

余立 杨兴华 寇西平 曾开春 吕彬彬

(中国空气动力研究与发展中心高速空气动力研究所, 绵阳, 621000)

**摘要:** 为解决跨声速风洞测力试验模型的俯仰振动问题, 研制了一套主动减振系统。该系统利用了模型/天平/支杆系统的响应特性, 采用主动控制方法, 以天平信号作为输入, 采用速度负反馈, 使用安装在支杆后端主动接头内的压电陶瓷作动器来抑制模型振动。地面试验结果表明, 主动减振系统使模型/天平/支杆系统的俯仰一、二阶阻尼比分别提高 20.8 倍和 12.8 倍。风洞试验结果显示, 法向力和俯仰力矩振动幅度分别下降 71.0% 和 57.5%, 风洞试验结果还表明主动减振系统对气动系数的影响相对较小。主动减振系统在多个模型的风洞试验中也得到验证, 显示出良好的减振性能和模型适应性。

**关键词:** 风洞; 模型振动; 阻尼; 压电陶瓷作动器

中图分类号: 211.7 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2019)04-0526-08

## Experiment on Active Vibration Reduction System for Transonic Wind Tunnel Model

YU Li, YANG Xinghua, KOU Xiping, ZENG Kaichun, LÜ Binbin

(High Speed Aerodynamics Research Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, 621000, China)

**Abstract:** An active vibration reduction system has been developed to solve pitch vibration problems of the force test models in transonic wind tunnel. The system, which uses piezoceramic actuators mounted into the active adapter at the sting top with balance signal as input and velocity feedback algorithm, can suppress the model vibration in an actively controlled way by exploiting the resonance properties of the model/balance/sting system. Ground test results show that the active vibration reduction system increases the first-order and second-order damping ratios of the model/balance/support system by 20.8 times and 12.8 times respectively. It is shown that vibration amplitude of normal force and pitching moment decreased by 71.0% and 57.5% respectively in wind tunnel test results. The wind tunnel test results also reveal that the active vibration reduction system has relatively little influence on the aerodynamic coefficient. In addition, the active vibration reduction system has also been verified in wind tunnel tests of multiple models, showing good vibration reduction performance and model adaptability.

**Key words:** wind tunnel; model vibration; damping; piezoceramic actuators

风洞测力试验时, 试验模型通过应变天平、尾支杆与中部支架相连。在宽频的风洞气流激励下, 模型与天平、支杆一起振动<sup>[1]</sup>。在模型、天平和支杆组成的系统中, 金属模型本身的振动频率高, 振

幅小, 其振动不予考虑, 因此, 模型振动实质上是指天平/支杆组合体的弯曲、扭转以及拉伸振动, 模型则表现为俯仰、偏航、滚转以及轴向刚体运动, 模型/天平/支杆系统的主要模态有模型俯仰、偏航、

收稿日期: 2018-05-25; 修订日期: 2018-12-10

通信作者: 余立, 男, 研究员, E-mail: yuli@cardc.cc。

引用格式: 余立, 杨兴华, 寇西平, 等. 跨声速风洞模型主动减振系统试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(4): 526-533. YU Li, YANG Xinghua, KOU Xiping, et al. Experiment on Active Vibration Reduction System for Transonic Wind Tunnel Model[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(4): 526-533.

滚转方向的支杆模态和模型俯仰、偏航方向的模型/天平模态以及轴向振动模态<sup>[2]</sup>。

在大型跨声速风洞中,模型/天平/支杆系统具有支撑频率低、结构阻尼小等特点,这将导致模型振动幅度大,严重影响试验数据质量,长时间剧烈振动还将导致天平或支杆疲劳破坏,对风洞运行安全造成严重威胁。因此,采取有效的减振措施是必要的。

文献[3]中详细描述了高动压风洞的模型振动问题,其表明需要更大的支杆阻尼来解决模型振动问题。1968年,美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)兰利的Igoe等<sup>[4]</sup>使用安装在模型内的被动阻尼器来抑制支杆模态振动。在Freymann的研究中<sup>[5]</sup>详细地描述了被动阻尼器的原理。但被动阻尼器由于不能跟随模态频率的变化,其减振效果并不理想。随着大载荷压电陶瓷作动器的出现,利用主动控制技术大幅提高支杆阻尼成为可能。2000年,Fehgren等<sup>[6]</sup>采用了在天平和支杆之间环形分布14只压电陶瓷作动器的布置方案,并在欧洲跨声速风洞(European transonic windtunnel, ETW)中开展了试验验证,主动减振系统有效地抑制了模型俯仰、偏航和轴向振动。2007年,Balakrishna等<sup>[2]</sup>采用同样的方法为ViGYAN低速风洞研制了主动减振系统,失速条件下的模型振动也得到很好地抑制。针对不同模型的需求,美国国家跨声速风洞(National transonic facility, NTF)研制了3套主动减振系统<sup>[7-10]</sup>,分别是Pathfinder I系统、通用标模(Common research model, CRM)系统和运载火箭模型(Crew launch vehicle, CLV)系统。在Pathfinder I系统中,4只5600磅压电陶瓷作动器环形分布在支杆与天平之间,又称Sting-Tip Damper,该结构能够承受较大的静态载荷,但不利于发挥减振器性能。在CRM系统中,12只11000磅压电陶瓷作动器,分为4组环形均布,并安装在远离天平位置,又称Sting-Root Damper,能够抑制大多数试验条件下的发散性振动,但未能解决某些试验条件下的模型振动问题。在CLV系统中,也使用了Sting-Root Damper,压电陶瓷作动器距离应变天平40英寸,但其具体布置形式未给出。

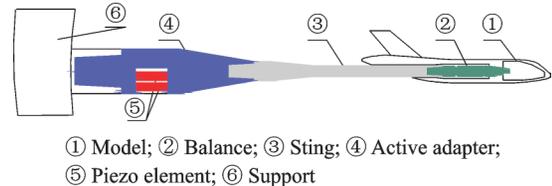
国内,陈卫东等<sup>[11]</sup>在FL-26风洞(2.4 m跨声速风洞)进行过模型减振研究,由于安装在模型头部的电动作动器受安装空间限制,功率较小,减振效果不明显。国内的一些低速风洞也开展过一些模型减振尝试<sup>[12-14]</sup>,取得了一些减振效果。

大型跨声速风洞运输机标准模型的振动特性试验结果表明,较大迎角时气流分离引起的支杆俯

仰振动是最主要振动形式,通过抑制该模态振动可以有效地解决风洞模型振动问题。在模型/天平/支杆系统的俯仰振动得到有效抑制时,可避免天平与支杆的应力超限,并提高测量数据质量,拓展试验包线。本文首先研究了主动减振系统的基本原理、结构设计与控制算法,并在地面试验中验证了模态试验与仿真的对比,实施了地面减振验证试验。结果显示,支杆模态衰减了10.5 dB,模型/天平模态衰减了10.5 dB。本文还进行了减振系统的风洞试验,研究了减振效果、主动减振系统能力和对气动系数的影响。此外,本文还研究了减振系统对不同模型/天平/支杆系统的适应能力,结果显示主动减振系统既可以应用于正常式布局模型,也可以应用于飞翼式布局模型。

## 1 系统组成及原理

主动减振系统的机械部分由被控制的模型/天平/支杆系统和内部安装压电陶瓷作动器(压电元件)的主动接头两部分组成,如图1所示,其作用原理是:当模型受到气动载荷(包括静载荷和动载荷)作用,天平和支杆的任意截面会产生动态弯矩,利用压电元件在电压激励下产生的驱动力,施加给支杆相反的力矩,从而抑制系统在垂直平面内的弯曲模态振动。



① Model; ② Balance; ③ Sting; ④ Active adapter; ⑤ Piezo element; ⑥ Support

图1 带压电元件的模型/天平/支杆系统示意图

Fig.1 Schematic of model/balance/sting system with piezo elements

模型/天平/支杆系统可以看作一个低阻尼的多自由度质量弹簧系统,在气动力和控制力作用下的运动方程可表示为

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F_A + F_C \quad (1)$$

式中: $M$ 、 $C$ 和 $K$ 为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $q$ 为系统的位移向量; $F_A$ 和 $F_C$ 分别为气动力向量和控制力向量。

压电元件及主动接头的安装位置是主动减振系统研制优先考虑的关键问题。根据对跨声速风洞模型试验测量数据的分析,对模型/天平/支杆系统动力学特性影响最大的是支杆俯仰模态,因此,抑制该模态是降低系统振动最有效、最合理的方式。由于压电驱动器输出力大,输出位移小的特点,因此将压电元件安装在支杆后端是影响支杆俯

仰模态最有效的位置。同时,压电元件位于支杆后端还具有安装空间大、接头改造量小(不涉及对模型、天平 and 支杆的改造)、测量和控制线路引出方便等优点。

主动接头的作用是容纳压电元件,它既要承受模型的静态载荷,又要有利于发挥系统的减振能力,其结构设计是主动减振系统研制的关键技术之一。主动接头由前后两段组成,如图2所示,其上部用螺栓连接,下部安装压电元件,并使用螺栓预压压电元件,上下两个弹性铰链把压电元件的轴向运动转换为支杆的俯仰运动。在设计中,为了提高系统的减振能力,一是仅在接头下部安装压电元件,二是选择大载荷、长行程的压电元件,共布置了8支,其中6支最大承载载荷为50 kN,2支最大承载载荷为78 kN,最大位移均为180  $\mu\text{m}$ ,电压范围均为0~1 000 V。在主动接头设计时,以接头强度为约束条件,以压电元件的激励能力为目标,优化了压电元件安装空间、弹性铰链位置与厚度、螺栓直径等参数。有限元分析结果表明,压电元件激励幅度超过模型试验最大振动幅度的70%,满足设计要求。

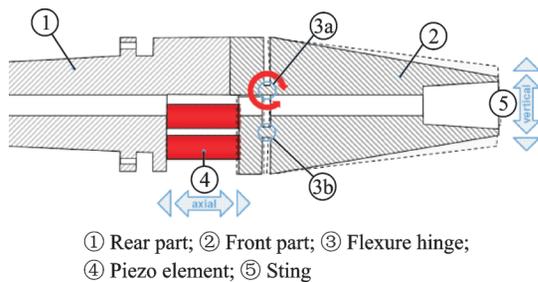


图2 主动接头示意图

Fig.2 Active adapter schematic

主动振动控制系统如图3所示。该系统利用了模型/天平/支杆系统的响应特性,首先对应变天平信号进行放大,再将放大后的天平信号进行高通滤波,滤掉应变天平信号中的静态分量,接着数字信号处理器对振动信号进行处理,处理后的信号输出到压电功率放大器,最终驱动压电陶瓷作动器使模型/天平/支杆系统产生反向振动,从而抑制结构

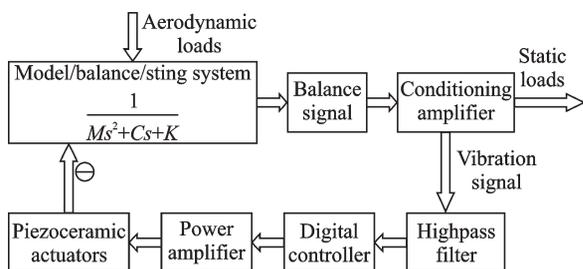


图3 主动振动控制系统

Fig.3 Active vibration control system

的振动。控制系统采用速度负反馈控制方法。高通滤波器可以滤去静态应变天平信号,使得主动减振系统只抑制系统的动态弯矩,而不会抵消静态弯矩。

控制算法的实时性和有效性是主动减振系统研制的又一关键技术。(1)未经处理的天平信号是静态部分和动态部分叠加,将数据经高通滤波后可得动态信号,从而可以只抑制天平的动态响应,而不影响天平的静态信号。(2)压电元件位于支杆后端的接头内,距离天平测量元件较远,导致压电元件驱动反相后与天平信号的振动相位不同,存在一定的滞后。另外,控制系统各环节也给驱动信号带来些许滞后,两者叠加导致系统减振性能下降。通过校核试验,准确导出压电元件驱动到天平响应之间的传递函数,计算出每个模态频率下的驱动与响应之间的相位延迟,在控制算法中予以补偿。(3)随着  $Ma$  数、速压和温度的变化,也会引起模型/天平/支杆系统的振动特性发生一些改变,从而导致控制效果的下降。控制算法中采用了自适应控制算法,可在试验过程中一定范围内动态改变控制系统增益,从而实现模型/天平/支杆系统的振动抑制。

此外,主动减振系统的研制还考虑了主动接头及压电元件的过载限制(如模型法向力不超过16 kN,俯仰力矩不超过3.4  $\text{kN}\cdot\text{m}$ )、模型振动幅度与频率范围、压电元件所处的潮湿环境、控制系统的电磁干扰等因素。

## 2 地面试验

### 2.1 模型模态试验与仿真

在进行模型模态试验时,跨声速风洞运输机标准模型通过直径为64 mm的天平及配套的直尾支杆和带压电元件的主动接头安装在中部支架上。由于加速度传感器难于布置在模型内部的天平与支杆上,试验时仅在尾翼前的机身和机翼上以及支杆等直段后段布置了传感器。图4给出了模型/天平/支杆系统在垂直平面内前两阶弯曲模态振型图。

图5给出了相应的有限元分析结果,与图4的模态试验结果相符合。由图可知,系统垂直平面内前两阶模态就是模型俯仰方向的第一、二阶弯曲模态,即本文定义的支杆俯仰模态和模型/天平俯仰模态。

### 2.2 主动控制系统地面试验

无风时开展主动减振系统性能评估,首先,完成系统安装与调试,确保各部件工作正常;然后,进

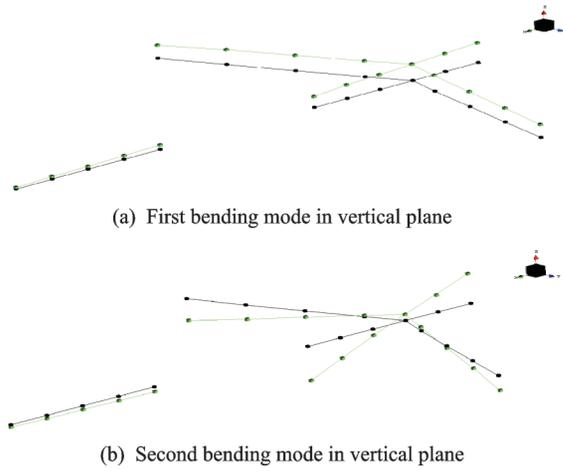
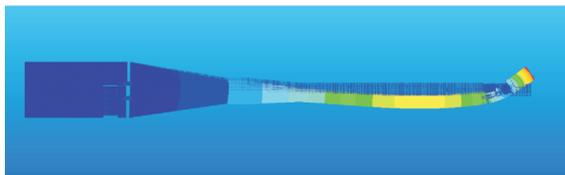


图 4 模型模态试验结果

Fig.4 Model modal test results



(a) Sting mode in pitch



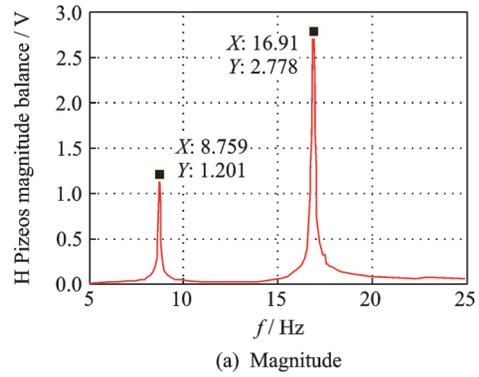
(b) Model/balance mode in pitch

图 5 有限元分析结果

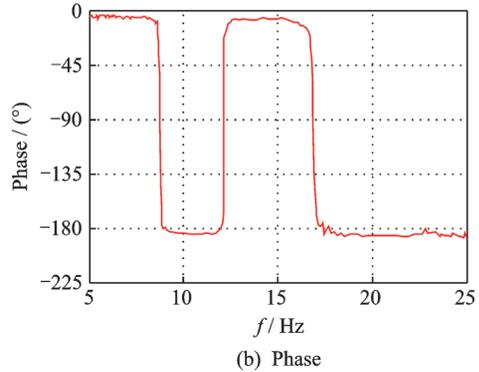
Fig.5 Finite element analysis results

行系统校核,按照功率放大器和压电元件检查、模态识别、模态解耦、控制器传递函数计算与验证的顺序进行,获得控制律设计所需参数;最后,在主动减振系统控制与不控制时,通过锤击模型来评估系统性能。模型/天平/支杆系统的传递函数获如图 6 所示。由图可知,支杆俯仰模态频率为 8.8 Hz,模型/天平俯仰模态频率为 16.9 Hz,这与模型模态试验结果是一致的。图 7 为模型受锤击时的天平响应信号。从响应曲线可看出,主动控制后,信号衰减非常快,衰减时间从不控制时的 20 s 以上到控制后约 1.5 s,说明主动减振系统具有快速抑制模型振动的能力。利用两阶正弦曲线拟合响应曲线,可得支杆俯仰和模型/天平俯仰模态的阻尼比。系统未控制时,两阶模态阻尼比分别为 0.11% 和 0.38%,控制后,分别增加到 2.29% 和 3.57%,约为不控制时的 20.8 倍和 12.8 倍,这说明主动减振系统显著提高了模型/天平/支杆系统的阻尼,达到了通过大幅增加系统阻尼来实现模型减振的目的。

对图 7(b)图的两条曲线进行傅里叶变换,得到



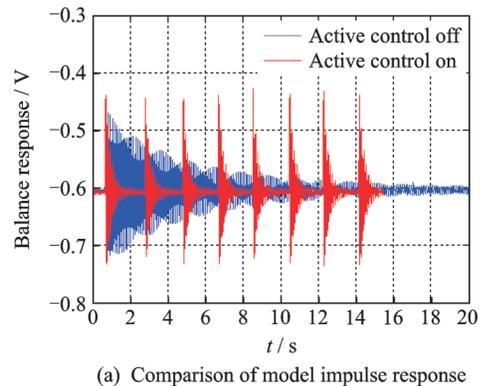
(a) Magnitude



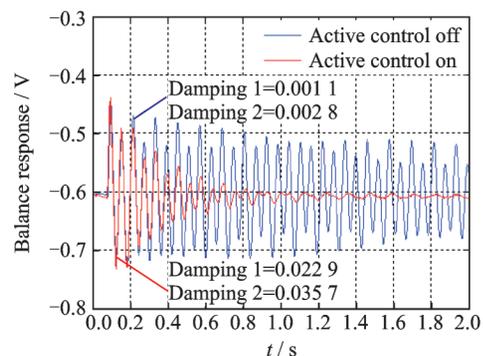
(b) Phase

图 6 传递函数

Fig.6 Transfer function



(a) Comparison of model impulse response



(b) Detailed comparison of model impulse response

图 7 敲击试验时天平响应

Fig.7 Balance responses during impulse tests

其对数频谱,如图 8 所示。主动控制后,支杆模态衰减了 10.5 dB,模型/天平模态也衰减了 10.5 dB,这说明主动减振系统能够同时较大幅度地抑制支杆俯仰和模型/天平俯仰模态振动。

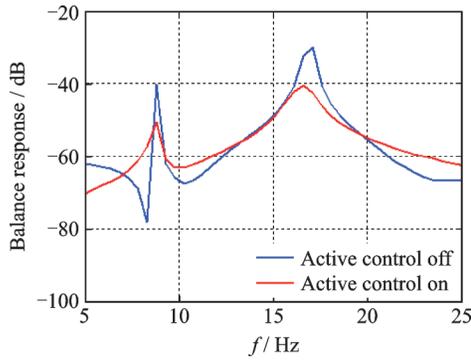
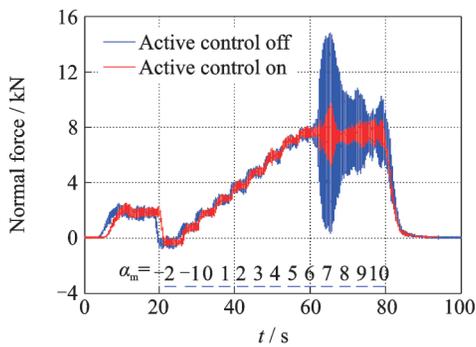


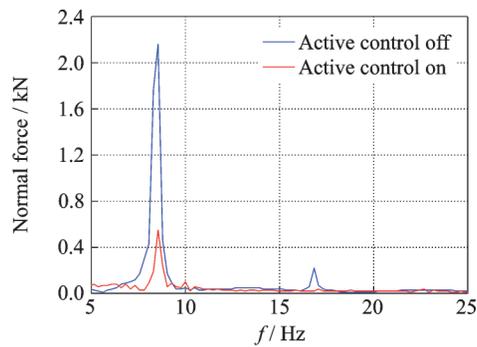
图8 频谱分析

Fig.8 Spectrum analysis

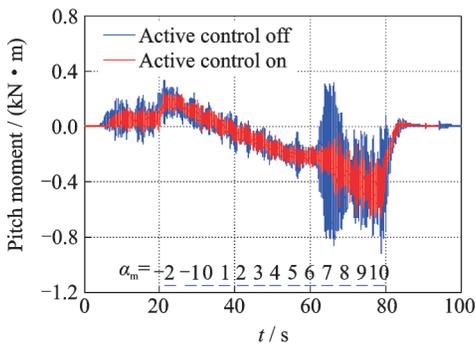
此外,试验还发现增加控制器增益,可以进一



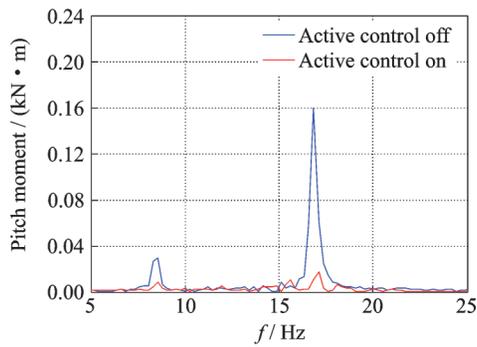
(a) Time history of normal force



(b) Spectrum of normal force



(c) Time history of pitch moment



(d) Spectrum of pitch moment

图9 标准模型减振效果

Fig.9 Vibration reduction of standard model

### 3.1 减振效果

未控制时,迎角机构角度 $\alpha_m$ 为 $7^\circ$ 时(天平弹性角约 $1^\circ$ ,实际试验迎角约为 $8^\circ$ )模型振动幅度最大,法向力峰峰值差约14.4 kN,俯仰力矩峰峰值差约1.16 kN·m。控制后,振动幅度分别下降了约71.0%和57.5%,表明系统对模型振动有比较强的抑制能力。从试验迎角为 $8^\circ$ 时幅值谱来看,控制后,支杆俯仰模态幅值降低了74.0%,模型/天平俯仰模态幅值降低了88.9%。风洞试验结果也进一步证明了主动减振系统能同时大幅降低支杆和模型/天平俯仰模态的振动。

### 3.2 主动减振系统能力

由于模型振动幅度最大情况发生在 $Ma=0.7$ 、

步提高模型振动衰减速度。但同时也发现,过大的增益会引起控制系统发散。因此选择适中的控制器增益是主动减振系统安全有效运行的关键。

## 3 风洞试验结果

运输机标准模型风洞试验在大型跨声速风洞中进行,采用了定 $Ma$ 数定总压阶梯增加试验迎角的开车方式,试验 $Ma$ 数范围0.6~0.85,转捩方式有固定转捩和自由转捩两种,开展了常压和增压试验。本文给出了 $Ma=0.7$ 、总压130 kPa、自由转捩条件下标准模型减振效果,见图9。在试验范围内,此试验条件下的模型振动幅度最大。

总压130 kPa和自由转捩条件下时,因此也是主动减振系统的功率放大器输出最大情况,如图10所示。由图可知,压电元件的偏置电压为360 V,电压最大使用范围为190~540 V,按照功率放大器

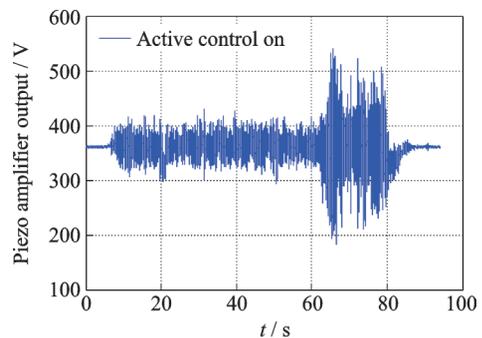


图10 压电放大器输出

Fig.10 Piezo amplifier output

最大输出电压 800 V 来看,系统能力最大使用仅为 44%,这说明主动减振系统还有足够能力抑制更大幅度的模型振动。

### 3.3 对气动系数的影响

图 11 给出了  $Ma=0.7$ 、总压 130 kPa 和自由转

换条件下,主动减振系统控制与不控制时模型气动系数  $C_L, C_D, C_m$  及差异。由图可知,模型振动对气动系数有一定影响,最大差异发生在模型振动幅度最大的试验迎角  $8^\circ$  时,其他迎角气动系数的差异相对较小。

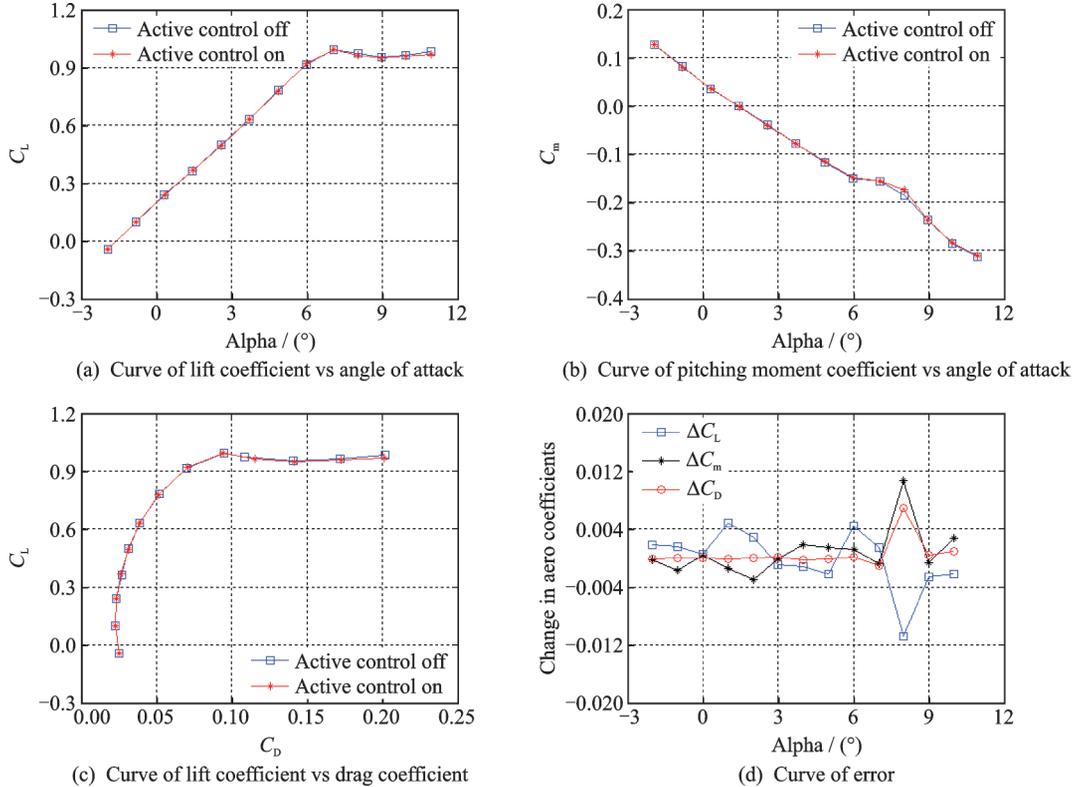


图 11 主动控制对气动系数的影响

Fig.11 Influence of active control on aerodynamic coefficients

## 4 模型适应性

为了进一步检验主动减振系统性能和适应能力,针对不同模型/天平/支杆系统开展了风洞试验。试验采用定  $Ma$  数定总压连续变迎角的开车方式,试验  $Ma$  数范围 0.6~0.85。试验结果表明,两种布局飞机模型均取得了良好的减振效果。

第 1 期试验采用了由某正常式布局飞机模型、直径为 86 mm 的应变天平 and 相应的斜尾支杆组成的试验系统。由地面振动试验结果可知,该系统的支杆俯仰模态频率为 6.8 Hz,模型/天平模态频率为 19.3 Hz。

图 12 给出了某正常式布局模型在  $Ma=0.7$ 、总压 130 kPa 和固定转换条件下的减振效果。由图可知,模型的振动得到较好地抑制。从模型俯仰运动停止后的振动幅值谱来看,控制后,支杆俯仰模态幅值降低了 74.4%,模型/天平俯仰模态幅值降低了 76.6%,系统对模型俯仰方向的前两阶模态均有较强的抑制能力。

第 2 期试验采用了由某飞翼式布局飞机模型、

直径为 52 mm 的应变天平 and 相应的 V 型尾支杆组成的试验系统。由地面振动试验结果可知,该系统的支杆俯仰模态频率为 8.8 Hz,模型/天平模态频率为 19.0 Hz。

图 13 给出了飞翼式布局模型在  $Ma=0.7$ 、总压 130 kPa 和固定转换条件下的减振效果。由图可知,模型的振动也得到了较好地抑制。从模型俯仰运动停止后的振动幅值谱来看,控制后,支杆俯仰模态幅值降低了 82.3%。由图还可知,模型/天平俯仰模态振动不明显,控制后,模型振动幅度几乎不变。

## 5 结 论

大型跨声速风洞模型主动减振系统经过了标准模型试验检验以及在两个模型上的应用,其减振能力和适应能力得到了验证。(1)主动减振系统能同时抑制支杆俯仰和模型/天平俯仰模态振动,大幅提高模型/天平/支杆系统的阻尼。主动控制后,支杆俯仰和模型/天平俯仰模态阻尼增加 10 倍以

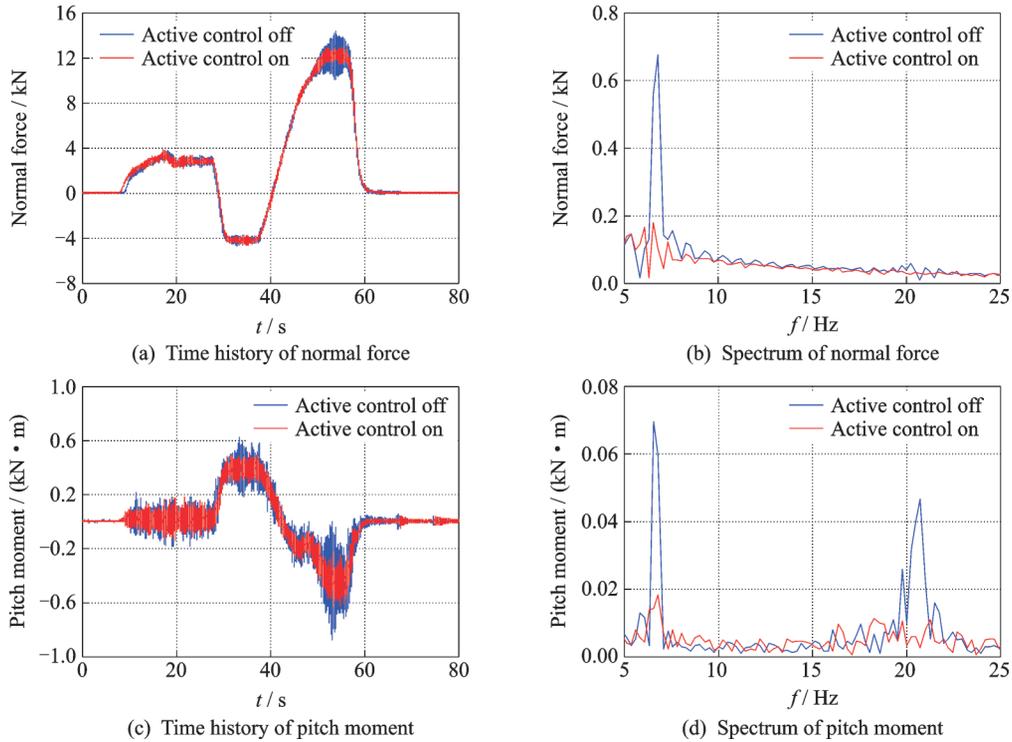


图12 正常式布局模型减振效果

Fig.12 Vibration reduction of common configuration plane model

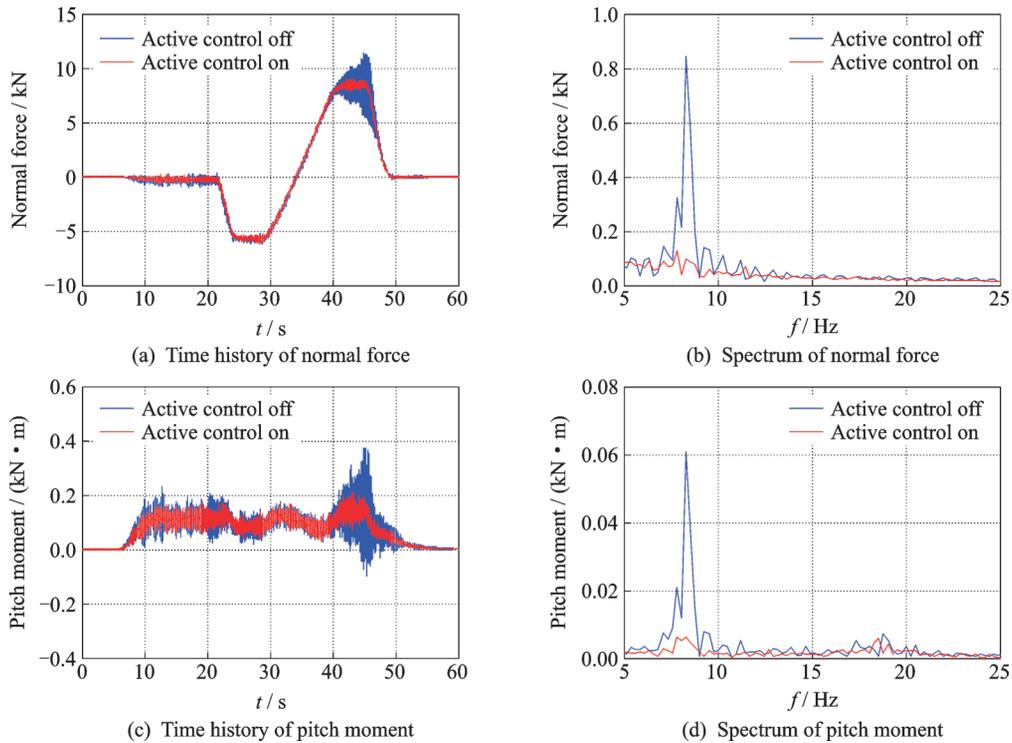


图13 飞翼式布局模型减振效果

Fig.13 Vibration reduction of flying wing configuration plane model

上。(2)风洞试验时,主动减振系统能大幅降低标准模型振动幅度,在系统能力使用不超过50%情况下,支杆俯仰模态和模型/天平模态降低幅度超过70%。(3)主动减振系统成功应用于某正常式布局飞机模型和某飞翼式布局飞机模型风洞试验,其减振效果明显,性能良好。

参考文献:

[1] 恽起麟. 试验空气动力学[M]. 北京:国防工业出版社, 1991: 197-198.  
YUN Qilin. Experimental aerodynamics[M]. Beijing: National Defend Industry Press, 1991: 197-198.

- [2] BALAKRISHNA S, HOULDEN H, BUTLER D, et al. Development of a wind tunnel active vibration reduction system[C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada:[s.n.], 2007: 961.
- [3] YOUNG J R C, POPERNACK J R T, GLOSS B. National transonic facility model and model support vibration problems[C]//16th Aerodynamic Ground Testing Conference. Seattle, WA:[s.n.], 1990: 1416.
- [4] CAPONE F J, IGOE W B. Reduction of wind-tunnel-model vibration by means of a tuned damped vibration absorber installed in the model[R]. Washington D C: NASA, 1968: 1-28.
- [5] FREYMANN R. Passive and active damping augmentation systems in the fields of structural dynamics and acoustics[C]//30th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Mobile, AL:[s.n.], 1989: 1196.
- [6] FEHREN H, GNAUERT U, WIMMEL R, et al. Validation testing with the active damping system in the European transonic wind tunnel[C]//39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada:[s.n.], 2001: 610.
- [7] BALAKRISHNA S, BUTLER D, WHITE E, et al. Active damping of sting vibrations in transonic wind tunnel testing [C]//46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada:[s.n.], 2008: 840.
- [8] 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 Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida:[s.n.], 2011: 953.
- [9] ACHESON M, BALAKRISHNA S. Effects of active sting damping on common research model data quality[C]//49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida:[s.n.], 2011: 878.
- [10] RIVERS M B, BALAKRISHNA S. NASA common research model test envelope extension with active sting damping at NTF[C]//32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference. Atlanta, GA:[s.n.], 2014: 3135.
- [11] 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 Weidong, SHAO Minqiao, YANG Xinghua, 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.
- [12] 陈万华, 王元兴, 沈星, 等. 压电叠堆主动减振的神经网络PID实时控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(4): 587-593.
- CHEN Wanhua, WANG Yuanxing, SHEN Xing, et al. Neural network PID real-time control for active vibration reduction using piezoceramics stacks[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(4): 587-593.
- [13] 沈星, 涂凡凡, 陈金金, 等. 风洞悬臂杆结构主动减振系统的研究[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(3): 414-419.
- SHEN Xing, TU Fanfan, CHEN Jinjin, et al. Study of active damping system for the cantilever sting in wind tunnel based on piezoelectric actuators[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(3): 414-419.
- [14] 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 Xue, CHEN Lujun, HUANG Yong, 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.

(编辑:刘彦东)