

基于压电叠堆的智能风洞尾支杆结构主动抑振PD参数整定



姜帅和,张磊,黄贇,潘天越,余佳珈,沈星,王晨

南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室,江苏 南京 210016

摘要:验证飞行器气动性能往往需要进行风洞全模试验,尾支杆支撑结构设计简单、拆装便捷、对试验流场干扰低,因此全尺寸模型普遍采用尾支杆支撑形式。但其支撑刚度低、结构阻尼小,容易引发支杆-模型系统的振动。本文基于压电叠堆设计了集成于尾支杆根部的智能主动抑振结构,应用改进粒子群算法对工程上常用的比例微分(PD)控制方法进行了整定优化,改善了其参数整定所需时间长、整定效率不高的问题。控制仿真及试验结果表明,采用基于改进粒子群算法的PD控制器可降低振动信号振幅最大值为52%,缩短99.48%的调整时间,抑振效果明显,能够为风洞尾支杆主动控制提供理论及实践参考。

关键词:尾支杆支撑;改进粒子群算法;PD参数整定;主动抑振

中图分类号:V211.72

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.05.011

风洞全模试验是飞行器研制过程中不可或缺的重要环节。为避免飞行器全模的支撑结构对风洞流场产生干扰,常采用尾支杆连接方式。但在测试过程中,这种低刚度、低阻尼的支撑结构的固有频率容易与来流频率耦合,从而使支杆-模型系统在靠近失速迎角时出现有害振动。长时间、持续的振动对测试结果数据的准确性有严重影响,甚至可能导致支杆-模型系统破坏^[1]。

目前,风洞模型振动抑制的主要研究方向是基于压电的振动主动抑制^[2],通过结构和传感器、压电驱动器、控制元件的复合与组装,构成智能结构体系,使结构本身具有自感知、自驱动等能力。此类方法在不破坏支杆-模型系统原有外形的同时,具有很好的模型适应性,且不依赖精确系统数学模型的比例积分微分(PID)控制被广泛应用于尾支杆压电抑振模块的输出控制。

Hefner^[2]提出了一种集成于尾支杆末端或中段的智能主动抑振结构,主体由均匀地分布在尾支杆轴线上的6组压电叠堆作动器组成。Balakrishna等^[3]提出了分体式压电尾支杆智能主动抑振结构,可以在俯仰和偏航平面上抵消振动,并根据飞行器模型更改压电叠堆的排布,这也是目前最常用的压电风洞尾支杆主动抑振结构的原型。大连理工大

学刘伟国^[4]设计了模糊自适应PID控制器应用于智能压电尾支杆结构,同时验证了其在低温下的自适应控制性能。刘惟肖^[5]提出了一种用于变气动载荷激励的智能悬臂梁结构振动主动控制的模糊自适应PD控制方法,振动均方根值在各工况下均提高10%以上。南京航空航天大学涂凡凡^[6]对尾支杆智能压电结构一阶振动进行了控制,并验证了神经网络PID在多个指标中均明显优于传统PID。戴雨可^[7]在此研究基础上研发了多模态神经网络PID控制,并实现了至少85%、最高91.1%的标准偏差(STD)衰减,有效提高了抑振效果下限。

以上运用于智能压电尾支杆结构的PID优化控制器往往在传统PID整定参数基础上进行微调,而在PID控制器参数整定过程中,参数的选取常常耗时长、难度大。因此,通过优化算法对PID进行整定得到更优迭代初始参数对尾支杆控制器设计具有实践价值。同时,由于尾支杆系统本身能够回到平衡位置,I参数的设置对控制器效果几乎没有影响,故在此采用PD控制器进行整定。

本文采用基于改进粒子群算法的PD整定提高控制参数整定速度,避免寻优过程过早陷入局部最优,满足尾支杆主动抑振控制要求;基于dSPACE搭建控制系统,通过数值

收稿日期: 2023-11-05; 退修日期: 2024-01-18; 录用日期: 2024-03-15

引用格式: Jiang Shuaihe, Zhang Lei, Huang Yun, et al. PD Parameter tuning of wind tunnel tail support active vibration control based on piezoelectric stack[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(05): 118-124. 姜帅和,张磊,黄贇,等. 基于压电叠堆的智能风洞尾支杆结构主动抑振PD参数整定[J]. 航空科学技术, 2024, 35(05): 118-124.

仿真及试验,将控制效果与工程整定方法结果进行对比。试验结果表明,本文方法可有效提高尾支杆振动控制PD控制器参数整定效率并可改善控制效果。

1 尾支杆振动控制系统及其原理

1.1 系统组成

集成了压电陶瓷叠堆抑振模块的尾支杆支撑结构如图1所示,飞行器全模末端连接支杆,支杆根部为压电叠堆抑振模块,支杆中段由应变片组桥作为传感器;尾支杆结构底部升降平台车在支杆未工作时提供支撑,以防止压电叠堆与应变传感器长期受力失效。

在此问题的研究中,通常将飞行器全模视为(准)刚体,支杆为弹性体,支杆-模型系统整体可简化为末端加重物的悬臂梁。

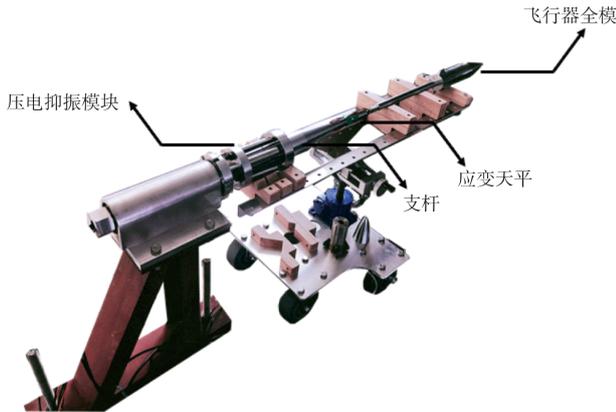


图1 尾支杆支撑结构

Fig.1 Tail support structure

在气动激励下,其振动表达式可写为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (1)$$

式中, M 、 C 与 K 分别为系统的质量、阻尼和刚度矩阵; \ddot{u} 、 \dot{u} 与 u 分别为系统的加速度、速度和位移响应矢量; F 为外载力矢量,包含流场气动力以及主动抑振系统施加的控制力。

1.2 振动控制原理

基于压电叠堆的尾支杆主动抑振方法的基本原理如图2所示。

通过将压电元件沿支杆轴线对称布局集成的驱动模块,使单独压电叠堆沿支杆轴向的输出力转化为驱动力矩做负功,从而主动耗散支杆-模型系统的振动能量以抵消气动载荷在此处产生的弯矩。基于叠堆的输出特性(输出位移小而输出力大),将驱动模块布置在尾支杆根部,采用X形排布来提高叠堆利用率。压电叠堆性能参数见表1。

振动控制系统如图3所示。传感器获取的振动信号经

滤波器等测量元件处理后被反馈到闭环控制器中,将计算获得的控制信号经功率放大器放大处理以驱动压电叠堆作动,即可达到抑制尾支杆结构振动响应的目的。

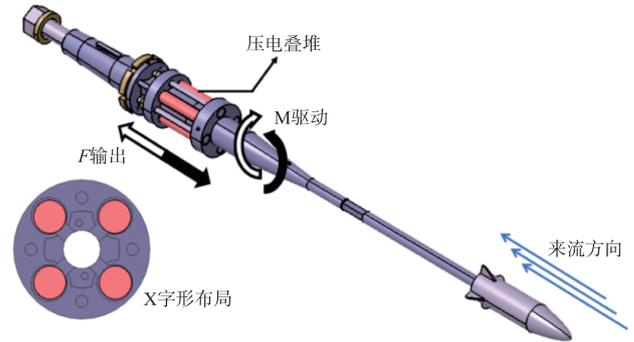


图2 尾支杆控制原理

Fig.2 Control principle of tail support

表1 压电叠堆性能参数

Table 1 Performance parameters of piezoelectric stack

参数	数值
标称行程/ μm	76
刚度/($\text{N}/\mu\text{m}$)	50
标称推力/拉力/ N	4700/700
静电容量/ μF	30
谐振频率/ kHz	12
长度/ mm	89

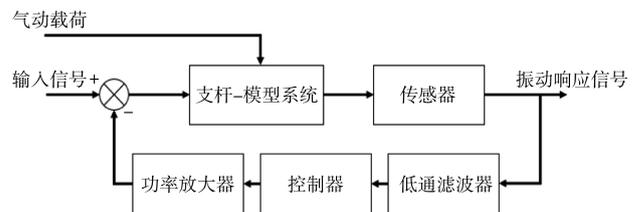


图3 振动控制系统

Fig.3 Vibration damping system

2 PD控制器及其参数整定

2.1 PID控制

PID控制通过比例控制(P)、积分控制(I)、微分控制(D)的函数关系对输入的系统偏差值计算控制量。其控制器结构如图4所示。

根据尾支杆可自动返回平衡位置的性质,I参数可以忽略,只对P、D两参数进行整定。在控制系统中,经常使用积分时间和绝对误差(ITAE)性能指标来设计最优控制器,其定义为

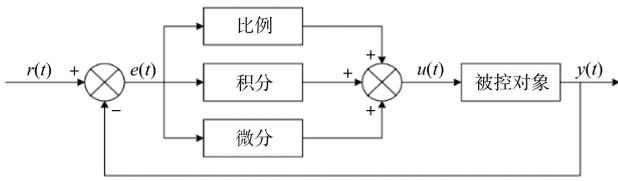


图4 PID控制器结构

Fig.4 PID controller structure

$$J_{\text{ITAE}} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (2)$$

本文考虑控制器设计性能,采用性能指标如下

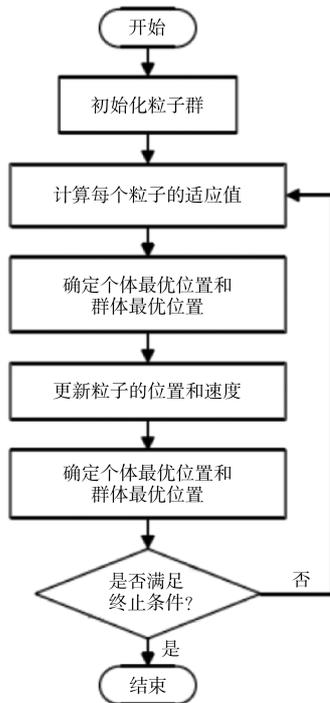
$$J_{\text{Fitness}} = \ln\left(\frac{M_p}{0.1} + 1\right) + \ln\left(\frac{T_r}{1.1} + 1\right) + \ln\left(\frac{T_p}{1.2} + 1\right) + \ln\left(\frac{T_s}{1.4} + 1\right) + \ln\left(\frac{E}{0.05} + 1\right) \quad (3)$$

式中, M_p 为标准阶跃曲线的超调量; T_r 为上升时间; T_p 为峰值时间; T_s 为调整时间; E 为稳态误差。

2.2 改进粒子群算法

粒子群算法^[8]根据鸟群觅食行为衍生而出,其核心思想是粒子群中的粒子在求解空间中探索时共享信息,使整个粒子群的运动逐渐趋向符合目标的区域,并最终得到最优解,其算法流程如图5所示^[9]。

粒子具有速度和位置两个属性,由位置对粒子移动方

图5 粒子群算法流程^[9]Fig.5 Particle swarm optimization algorithm flow^[9]

向、速度对粒子移动快慢进行描述。在未达到优化停止条件时,粒子在搜索空间中不断更新位置,并通过粒子之间的信息交流共享适应度值(由优化函数确定)高的位置,由此给各粒子施加靠近得到最优值的位置的趋势。

设 $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iN})$ $i = (1, 2, \dots, N)$ 为粒子当前位置, $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iN})$ 为粒子的当前移动速度, $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iN})$ 为粒子的最优位置, 设目标函数方程为 $f(X)$, 则粒子 i 的最优位置表达式为

$$P_i^{d+1} = \begin{cases} P_i^d, & f(X_i^{d+1}) \geq f(P_i^d) \\ X_i^{d+1}, & f(X_i^{d+1}) < f(P_i^d) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $d = 1, 2, \dots, D$ 表示迭代次数。

算法运行过程中最优位置 P_g^d 表达式为

$$P_g^d = \min \{f(P_1^d), f(P_2^d), \dots, f(P_m^d)\} \quad (5)$$

粒子的状态转移方程为

$$\begin{cases} V_{ij}^{d+1} = \omega V_{ij}^d + c_1 r_1 (P_{ij}^d - X_{ij}^d) + c_2 r_2 (P_{gj}^d - X_{ij}^d) \\ X_{ij}^{d+1} = X_{ij}^d + V_{ij}^{d+1} \end{cases} \quad (6)$$

式中, 搜索空间维度 $j = 1, 2, \dots, m$; ω 为惯性权重因子; 学习因子 c_1 调控向本身最优位置移动的步长, 学习因子 c_2 调节飞向全局最优位置的步长; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 中均匀分布的随机数。

其速度转移方程包含了三个部分: 惯性部分、个体认知部分和群体认知部分。惯性部分表示粒子对自身先前运动状态的延续; 个体认知部分代表粒子自身经验, 即当前位置与其个体历史最优位置的比较; 群体认知部分代表粒子群经验, 即当前位置与群体历史最优位置的比较。

在实际应用中, 粒子群算法易陷入局部最优的问题, 在此依据当前迭代次数调整其惯性权重和学习因子, 从而达到提高算法搜索效率以及搜索效果的目的。

(1) 自适应惯性权重

惯性权重系数 ω 的取值对算法的运行速度和收敛精度有关键的影响, 其值较大时全局寻优能力强, 局部寻优能力弱^[10]。

针对传统算法惯性权重系数 ω 在迭代过程中采用定值导致对搜索速度没有推进作用的问题, 引入自适应权重数值, 对其取值范围也依据当前迭代次数进行约束, 在需要保持较好的收敛精度时取更小的值, 以提高算法后期搜寻效率。

以第 d 次算法迭代求解为例, 设置 ω 的初始最大值与最小值分别为 ω_{\max} 与 ω_{\min} , 具体自适应方法公式^[11]如下

$$\begin{cases} \omega_{\max}^d = \omega_{\max}^{d-1} - d \cdot u \cdot \omega_{\max}^d / D \\ \omega_{\min}^d = \omega_{\min}^{d-1} - d \cdot u \cdot \omega_{\min}^d / D \end{cases} \quad (7)$$

$$\omega^d = \begin{cases} \omega_{\min}^d + \frac{(f_i - \min(f_i)) * (\omega_{\max}^d - \omega_{\min}^d)}{\frac{\text{sum}(f_i)}{N} - \min(f_i)}, & f_i \leq \frac{\text{sum}(f_i)}{N} \\ \omega_{\max}^d, & f_i > \frac{\text{sum}(f_i)}{N} \end{cases} \quad (8)$$

式中, u 为自适应调整因子, f_i 为 i 粒子的适应度值。

(2) 非线性学习因子

学习因子对算法迭代过程的影响主要体现在: c_1 的增大会增强粒子针对个体寻得最优值的能力, 但同时也将付出迭代过程效率降低、易陷入局部最优解等代价; 而 c_2 的增大会增强粒子对全局最优位置的搜索能力, 虽然迭代速度会相应加快, 但可能使算法的搜索结果越过全局最优值。

为在保证搜索迭代速度的同时防止粒子群陷入局部最优解, 使用具有非线性的学习因子更新方式, 具体对学习因子的确定方法公式如下

$$\begin{cases} c_1^d = \alpha \sin\left(\left(1 - \frac{d}{D}\right) \frac{\pi}{2}\right) + \beta \\ c_2^d = \alpha \cos\left(\left(1 - \frac{d}{D}\right) \frac{\pi}{2}\right) + \beta \end{cases} \quad (9)$$

式中, α 取值为 2, β 取值为 0.5。

2.3 基于改进粒子群算法的 PD 整定

基于改进粒子群算法优化 PD 控制器参数整定的流程如图 6 所示^[12]。

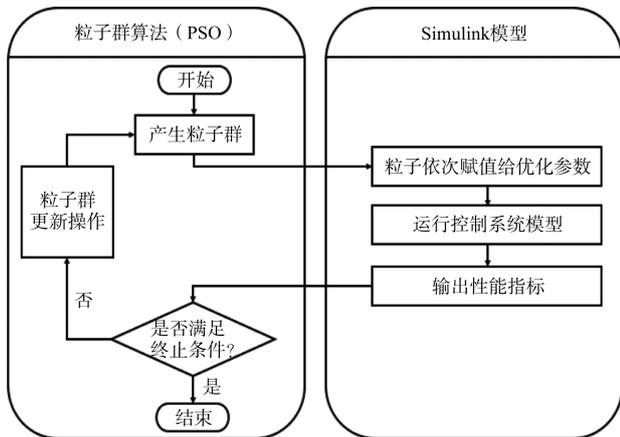


图 6 基于改进粒子群算法整定 PD 参数流程^[12]

Fig.6 PD parameter tuning process based on improved particle swarm optimization algorithm^[12]

初始化粒子群后, 将各个粒子位置值赋值给 Simulink 控制系统模型中 PD 控制器的 P、D 两个优化参数, 根据运行 Simulink 模型获得的性能指标输出判断是否结束迭代^[12-13]。构建的 Simulink 模型如图 7 所示。

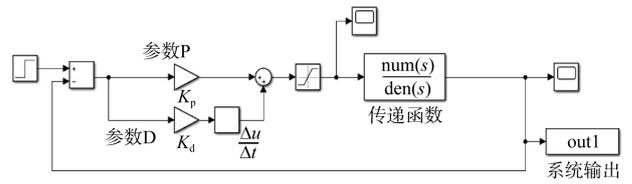


图 7 PD 参数整定 Simulink 模型

Fig.7 PD parameter tuning Simulink model

3 数值仿真

综合考虑整定时长、优化效果等因素, 改进粒子群算法整定 PD 参数相关参数设定见表 2。图 8 所示为整定过程中 PD 参数迭代情况, 最终整定 PD 参数见表 3。

表 2 改进粒子群仿真参数

Table 2 Improved particle swarm simulation parameters

参数	数值
N 群体个体数目	24
ω_{\max} 惯性权重最大值	0.9
ω_{\min} 惯性权重最小值	0.5
c_1 学习因子 1	2
c_2 学习因子 2	2
D 最大迭代次数	10
m 搜索空间维度	2
u 自适应调整因子	0.5

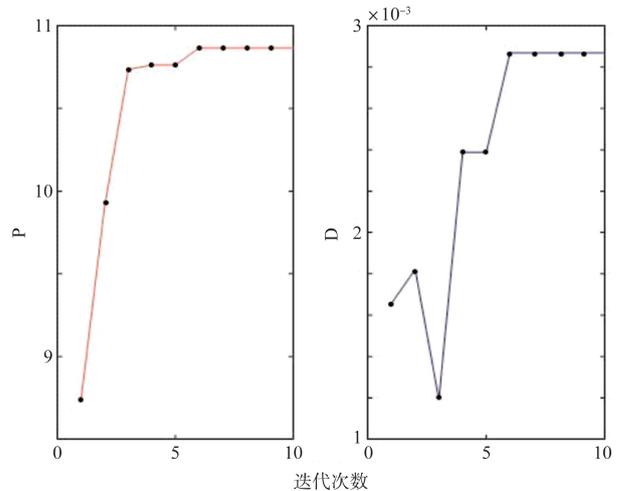


图 8 PD 参数迭代

Fig.8 PD parameters iteration

表 3 PD 整定参数

Table 3 PD tuning parameters

参数	工程	改进粒子群
P	13	10.87
D	0.001	0.0029

假设无外负载干扰,根据识别系统获取系统传递函数后,通过仿真软件对其在工程整定与改进粒子群算法整定的PD控制器下进行仿真,结果如图9所示。

仿真结果显示,在未控制情况下,尾支杆振动自由衰减需近59s,而改进粒子群算法参数整定的PD控制器在0.8s内实现振动衰减,比工程整定PD控制器快约0.52s,且最大振幅衰减约为42%,优于工程整定PD控制器近22%的最大振幅衰减。

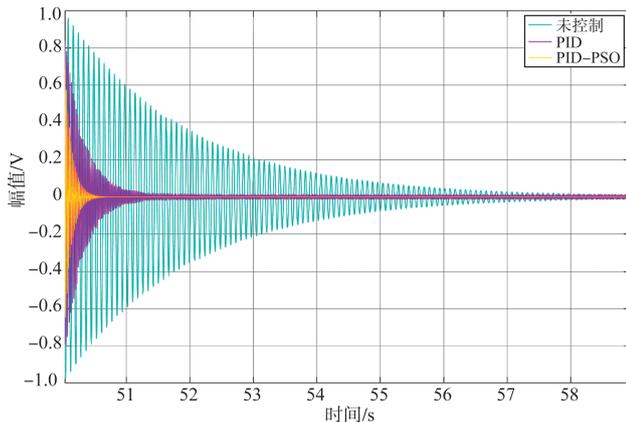


图9 PD控制器效果对比仿真

Fig.9 PD controller effect comparison simulation

4 试验验证

使用基于dSPACE搭建压电驱动器的风洞全模主动抑振系统,验证整定算法设计PD控制器的有效性与稳定性。试验平台如图10所示。

试验使用等强度瞬态激励,尾支杆系统在未控制、工程整定PD控制器控制、改进粒子群算法整定PD控制器控制三种情况下的衰减曲线对比如图11所示。

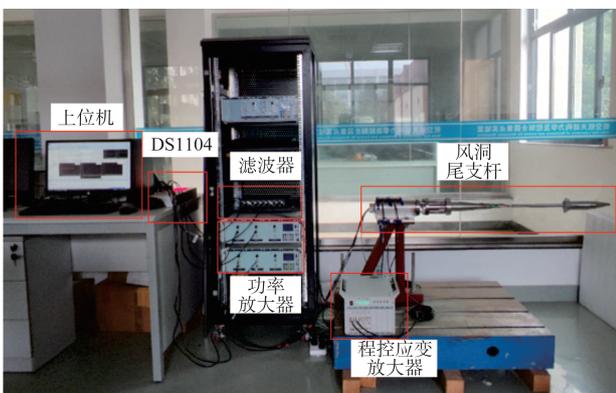


图10 尾支杆抑振系统试验平台

Fig.10 Tail support vibration suppression system test platform

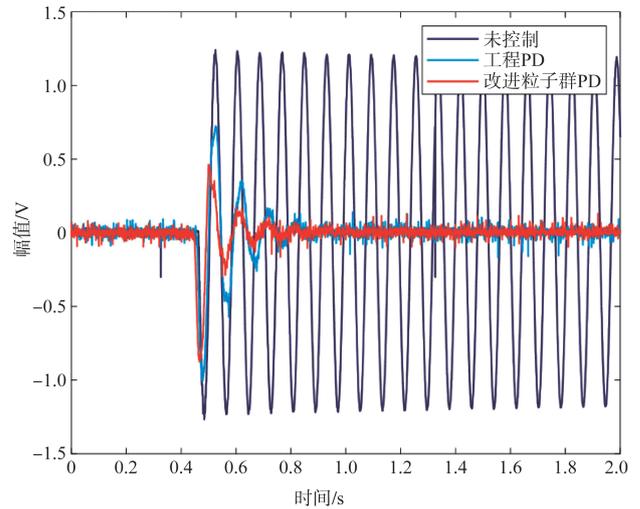


图11 PD控制器效果试验对比

Fig.11 PD controller effect test comparison

由图11可以看出,在工程整定PD控制器控制、改进粒子群算法整定PD控制器控制下,天平获取的振动信号振幅最大值分别降低20%、52%,调整时间由153s显著降至0.8s左右,稳态误差均在设计要求范围5%以内。

基于地面试验平台,验证了智能压电尾支杆系统在瞬态激励的作用下各控制器的效果。试验结果表明,改进粒子群算法整定PD控制器能较好地实现尾支杆的振动控制,整定效率高,且各项指标均得到了改善。

5 结论

本文基于改进粒子群算法对风洞尾支杆的减振PD控制器参数整定问题进行了研究,将工程整定PD控制器与改进粒子群算法整定PD控制器进行了试验研究与对比分析。通过研究,得到以下结论:

(1)基于改进粒子群的PD控制器较工程整定PD控制器可降低振动信号振幅最大值为52%,缩短99.48%的调整时间,相较工程整定PD控制器抑振效果更优。

(2)该研究为风洞尾支杆振动抑制系统PD控制器提供了参数整定方法,对结合神经网络等算法的PD控制器初始迭代参数设计具有一定的参考意义^[14-22]。

AST

参考文献

[1] 张磊,姜帅和,黄赞,等. 基于压电驱动器的风洞全模试验主动抑振研究进展[J]. 应用力学学报,2022,39(4):10.

Zhang Lei, Jiang Shuaihe, Huang Yun, et al. Research progress of active vibration suppression based on piezoelectric actuator

- in wind tunnel full model test [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2022, 39(4):10.(in Chinese)
- [2] Hefer G. Wind tunnel model support with vibration detection balance and counter vibration means: U. S., US19960622379[P]. 2023-10-11.
- [3] 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, 2007: 961.
- [4] 刘伟国. 支杆式风洞模型主动振动抑制控制方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
Liu Weiguo. The study on control methods of the active vibration reduction system of wind-tunnel model with sting support[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [5] 刘惟肖. 基于能量模糊的风洞支杆模型振动控制研究[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
Liu Weixiao. Research on vibration control of wind tunnel support rod model based on energy fuzzy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.(in Chinese)
- [6] 涂凡凡. 人工神经网络在压电主动减振系统中的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
Tu Fanfan. Application research of artificial neural network in piezoelectric active vibration damping system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.(in Chinese)
- [7] 戴雨可. 风洞尾支杆主动减振系统设计及其试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020.
Dai Yuke. Design and experimental study of active vibration damping system for tail support rod of wind tunnel[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.(in Chinese)
- [8] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. *IEEE International Conference on Network*, 1995:1942-1948.
- [9] 王桂林, 向林川, 孙帆. 粒子群优化协同克里金法在确定山地斜坡土层厚度中的应用[J]. *土木建筑与环境工程*, 2018, 40(6):60-66.
Wang Guilin, Xiang Linchuan, Sun Fan. Application of particle swarm optimization and Kriging method in determining soil layer thickness on mountain slopes[J]. *Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2018, 40(6):60-66.(in Chinese)
- [10] 任子武, 伞冶, 陈俊风. 改进 PSO 算法及在 PID 参数整定中应用研究[J]. *系统仿真学报*, 2006(10):2870-2873.
Ren Ziwu, Shan Ye, Chen Junfeng. Research on improved PSO algorithm and its application in PID parameter tuning[J]. *Journal of System Simulation*, 2006(10):2870-2873.(in Chinese)
- [11] 袁晓玲, 陈宇. 自适应权重粒子群算法在阴影光伏发电最大功率点跟踪(MPPT)中的应用[J]. *中国电力*, 2013, 46(10):85-90.
Yuan Xiaoling, Chen Yu. Application of adaptive weight particle swarm optimization in shadow photovoltaic maximum power point tracking(MPPT)[J]. *China Electric Power*, 2013, 46(10):85-90.(in Chinese)
- [12] 张静, 张瑞青. 基于改进 PID 算法的 CFB 锅炉床温控制[J]. *中国新技术新产品*, 2020(12):43-45.
Zhang Jing, Zhang Ruiqing. CFB boiler bed temperature control based on improved PID algorithm [J]. *China New Technology and New Products*, 2020(12):43-45. (in Chinese)
- [13] 金翠云, 王建林, 马江宁, 等. 改进的 PSO 算法及其在 PID 控制器参数整定中的应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2010, 24(2):141-146.
Jin Cuiyun, Wang Jianlin, Ma Jiangning, et al. Improved PSO algorithm and its application to PID controller parameter tuning [J]. *Chinese Journal of Electronic Measurement & Instrument*, 2010, 24(2):141-146.(in Chinese)
- [14] 牛泽岷, 尹乔之, 孙浩, 等. 模糊 PID 控制对轮橇式起落架飞机滑行减振的影响研究[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(10):74-83.
Niu Zemin, Yin Qiaozhi, Sun Hao, et al. Study on the influence of fuzzy PID control on taxiing damping of wheel-sled landing gear aircraft[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(10):74-83.(in Chinese)
- [15] 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(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(3):414-419.(in Chinese)
- [16] 王泓杰, 王晨, 沈星. 典型智能材料结构疲劳可靠性问题研究进展[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(3):52-64.
Wang Hongjie, Wang Chen, Shen Xing. Research progress on

- fatigue reliability of typical smart material structures [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022,33(3):52-64.(in Chinese)
- [17] Zhou Mengde, Liu Wei, Wang Qinqin, et al. A decoupled unified observation method of stochastic multidimensional vibration for wind tunnel models[J]. *Sensors*, 2020, 20(17):4694.
- [18] Yu Yi, Shen Xing, Huang Yun. Multidimensional system identification and active vibration control of a piezoelectric-based sting system used in wind tunnel[J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020:8856084.
- [19] Song G, Schmidt S P, Agrawal B N. Experimental robustness study of positive position feedback control for active vibration suppression[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2002, 25(1):179-182.
- [20] Omid E, Mahmoodi S N, Shepard W S. Vibration reduction in aerospace structures via an optimized modified positive velocity feedback control[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 45:408-415.
- [21] 张文博,陈明绚,沈星. 基于神经网络的风洞尾支杆减振系统[J]. *南京航空航天大学学报*, 2018, 50(2):276-281.
Zhang Wenbo, Chen Mingxuan, Shen Xing. Damping system for sting used in wind tunnel based on neural network[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2018, 50(2):276-281.(in Chinese)
- [22] 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(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(4):587-593.(in Chinese)

PD Parameter Tuning of Wind Tunnel Tail Support Active Vibration Control Based on Piezoelectric Stack

Jiang Shuaihe, Zhang Lei, Huang Yun, Pan Tianyue, Yu Jiajia, Shen Xing, Wang Chen

State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: Verifying the aerodynamic performance of the aircraft often requires a full-model experiment of wind tunnel. The cantilever sting is generally used for full model support on account that the structure of the tail support is simple, convenience in assembly and low interference in experimental flow fields. But it also has the characteristics of small support stiffness and low structural damping, which is prone to the vibration of the sting-model system. The PD controller is often used to control the vibration of the tail support. However, there are some problems such as long time required for parameter tuning, low tuning efficiency. Therefore, the improved particle swarm optimization algorithm is applied to optimize PD parameter tuning. The control simulation and experimental results show that the PD controller based on the improved particle swarm optimization algorithm can effectively suppress the tail-support vibration, which can provide theoretical and practical reference for the active control of wind tunnel tail-support.

Key Words: wind tunnel tail support; improved particle swarm optimization algorithm; PD parameter tuning; active vibration control