

离心式作动器的设计与性能分析*

朱青霞 张方 姜金辉

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016)

摘要:离心式作动器的适应频带宽、输出力大、结构简单、尺寸紧凑、重量轻、需用功率较小,很有优势。而国内基于离心式作动器的ACSR技术在直升机上的应用很少,因此,研究出一种新型的易于控制的离心式作动器很有必要。两个相同的偏心质量块同速反转时产生的离心力只有竖直方向上的,在此理论上,设计了一种输出力只有竖直方向上的新型离心式作动器,并且可以通过调节电机的角加速度轨迹对作动器输出力的幅值、相位、频率进行控制,最后基于LabVIEW对所提出的控制算法进行了仿真研究。仿真结果表明,在主动控制过程中,根据输入的目标信号,电机的角加速度轨迹进行了相关的改变,从而使得作动器的输出力信号得到了很好的控制,最终输出要求的目标信号。

关键词:离心式作动器;机械设计;LabVIEW;振动主动控制

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Design of the centrifugal harmonic force generator and analysis of performance

Zhu Qingxia Zhang Fang Jiang Jinhui

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

Abstract: The centrifugal actuator has some advantages, including large frequency bandwidth, large output, simple structure, compact size, light weight, less power and so on, so it has more advantages. However, the ACSR technology based on the centrifugal actuator is seldom applied in helicopters in domestic, therefore, it is necessary to do research on the active control algorithm about the system based on the centrifugal actuator. A new type of centrifugal actuator with one-way output force was designed, based on the theory that the direction of the centrifugal force which was generated by the same two eccentric mass blocks under the condition of reverse rotation with the same speed was vertical. And the amplitude, phase and frequency of the output force generated by the centrifugal actuator can be controlled by adjusting the angular acceleration of the servo motors. Finally, simulations were conducted using LabVIEW. The results show that in the process of active control, according to the input of the target signal, the change of the angular acceleration of the servo motors made the actuator's output signal was controlled very well, so that, the final output signal reached the target.

Keywords: centrifugal type actuator; machine design; LabVIEW; active vibration control

1 引言

直升机飞行时由于旋翼、尾桨、发动机等动部件产生的激振力^[1]的作用,所承受的振动载荷作用会引起机体的振动响应,高水平的振动有很多不利的影响,相关资料指出,直升机40%的事故都是和振动有关的^[2]。因此,抑制直升机飞行中机体的不利振动很有必要。传统减振手段

基本上是被动吸振或隔振等技术,而这些减振手段因为带宽、重量效率比等原因使得其减振效果不佳^[3]。于是国内外出现了振动主动控制技术方面的研究,它涵盖了很多学科,有动力学^[4]、计算机、控制^[5]、测试技术^[6]及材料学等。

其中结构响应主动控制(ACSR)^[7]是一种基于机身的主动控制方法,该方法将反共振概念与现代控制技术相结合,已成为直升机机体振动主动控制的研究热点。ACSR

收稿日期:2016-06

* 基金项目:机械结构力学及控制国家重点实验室(南京航空航天大学)自主研究课题(0115K01)、江苏高校优势学科建设工程基金资助项目

系统是由作动器系统、传感检测系统以及控制系统组成,可以看出,实现 ACSR 的两大关键技术是作动器和控制律设计。

本文设计研究了一种新型的离心式作动器,该作动器的离心力在水平方向上相互抵消,在竖直方向上相互叠加,合力为输出力。最后设计出的离心式作动器输出力只有竖直方向上的,并且能通过调节电机的相关参数对其输出力的3要素进行相关调整从而得到合适的减振力。最后基于 LabVIEW 编写了仿真程序,对电机角加速度轨迹进行了控制从而使得作动器的输出力得到了很好的控制。

2 离心式作动器的工作原理

离心式作动器是通过电机带动一组偏心质量块反转,这样偏心质量块在水平方向上产生的离心力大小相等方向相反,在竖直方向上互相叠加,这样会产生一个正弦激振力,如图1所示^[8]。图中大圆表示齿轮,阴影是偏心质量块,弧形箭头是齿轮旋转方向,力 F_1 和 F_2 大小相等,方向相反,互相抵消。

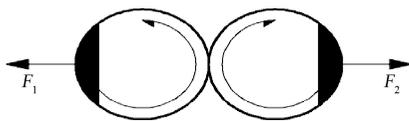


图1 离心式作动器原理

设阴影处偏心质量块质量是 m , 偏心距是 r , 旋转齿轮的角速度是 ω , 那么在齿轮旋转时每个偏心质量块产

生的离心力为:

$$f = m\omega^2 r \quad (1)$$

因为偏心质量块的反转,离心力在水平方向上互相抵消,竖直方向上互相叠加,那么这两个质量块的合力分量为:

$$\begin{cases} F_x = 0 \\ F_y = 2m\omega^2 r \sin(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

本文设计的离心式作动器系统是由两个这样的模型组成的,由控制系统发出两个不一样的信号 $\theta + \alpha$ 和 $\theta - \alpha$, 使得电机的相位提前量不一样,最终对离心作动器输出力的相位和幅值进行相关控制,使得作动器的输出力分别为:

$$\begin{cases} F_1 = 2m\omega^2 r \sin(\omega t + \theta + \alpha) \\ F_2 = 2m\omega^2 r \sin(\omega t + \theta - \alpha) \end{cases} \quad (3)$$

这两个输出力的合力为:

$$F_{total} = 4m\omega^2 r \cos\alpha \sin(\omega t + \theta) \quad (4)$$

从式(4)可知,控制输出力的幅值可以由调整控制信号中的 α 进行;控制输出力的相位可以由调整控制信号中的 θ 进行;控制输出力的频率可以由调整齿轮转动的角速度 ω 进行。最后当作动器发出的输出力的频率和相位都和振源信号的频率和相位相同,幅值相反时,两者会相互抵消,从而达到减振效果。

3 离心式作动器设计

设计的离心式作动器系统中包含的主要零件有:齿轮,质量块,支座。离心式作动器相关参数的设计准则,如表1所示。

表1 离心式作动器相关参数的设计准则

参数	公式	说明
电机转速 (rad/s)	$\omega = 2\pi f$	f 是离心式作动器的工作频率
作动器的最大输出力/N	$F_{max} = 4m\omega^2 r$	m 是单个质量块的质量, r 是质量块的偏心距
齿轮的分度圆直径/mm	$D = mz$	m 是齿轮的模数, z 是齿数

参考直11 ACSR 系统中电磁式作动器的指标要求(工作频率 19.3 Hz,最大输出力幅值 80 kg),这里为方便计算,取 $f = 20$ Hz。考虑到实际情况,设计的齿轮参数为 2.5 模、85 齿,材料是 45 号钢。综合考虑,取质量块的偏心距为 60 mm。将上面参数代入表1可得如表2所示的离心式作动器的具体设计参数。

表2 离心式作动器具体设计参数

参数	大小
电机转速 (rad/s)	125.6
作动器的最大输出力/N	800
齿轮的分度圆直径/mm	212.5
质量块的质量/kg	0.211 3

这里质量块的材料为 45 号钢,考虑到齿轮的直径及偏心距的大小,取质量块的半径为 30 mm,则可计算得到质量块的厚度大约为: $d = 9.5$ mm

综合以上,根据表2的相关参数,最终用 CATIA 作出如图2、3所示的设计。

主结构设计完后,需选择相关的驱动电机。偏心轮的转动惯量为:

$$I = 2m_{块} r_{偏心距}^2 + 2M_{齿} R_{半径}^2 = 0.163 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (5)$$

在偏心质量块的角加速度最大时,电机所需的扭矩最大,即质量块的相位从 0° 到 360° 变化时,假设控制时间为 1 s,安全系数 η 取 1.2,则电机需要的最大输出扭矩为:

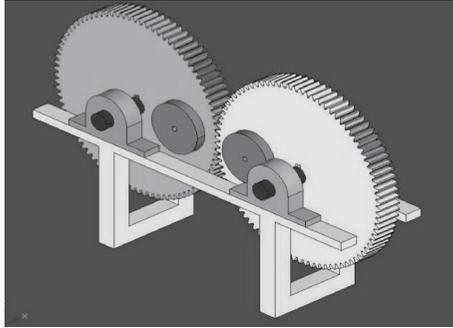


图2 离心式作动器系统的子模型三维图

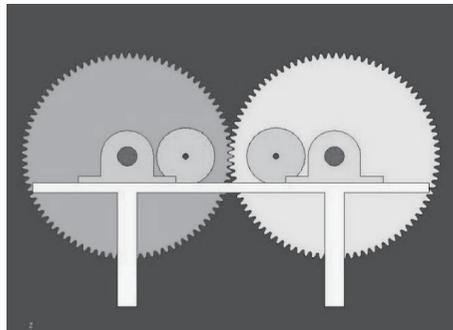


图3 离心式作动器系统的子模型主视图

$$M = I \times \omega \times \eta = I \times \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \times \eta = 2.46 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6)$$

电机需要的功率为:

$$P = M \times \omega \times \eta = 370.65 \text{ W} \quad (7)$$

经综合比较,最后选择的电机型号如表3所示。

表3 无刷伺服电机性能参数

名称	功率/W	最大转速/rpm	最大输出转矩/Nm
大小	600	6 000	4

4 离心式作动器控制算法

离心式作动器装置的工作原理如图4所示。驱动器向电机发出指令,电机带动对应的两个偏心轮反转,两组装置产生一个输出合力,安装在支架上的传感器测得振动信号并传给控制器。由控制器计算出电机相关参数的变化量并将指令传给驱动器作出相关修正使得电机作出对应的转速变化让离心式作动器装置产生最终的目标输出力。

设两组偏心轮的初相位分别为 A, B , 则式(3)中的控制信号 θ, α 分别为:

$$\begin{cases} \theta = \frac{A+B}{2} \\ \alpha = \frac{A-B}{2} \end{cases} \quad (8)$$

设最终要求离心式作动器装置产生的目标输出力为:

$$F = P \sin(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

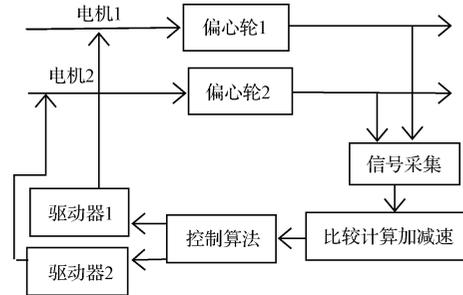


图4 离心式作动器装置工作控制原理

联立式(4)、(9)可得控制器发出的控制信号变化量为(这里做定频分析,即认为 ω 不变):

$$\begin{cases} \Delta\alpha = \alpha_{\text{目标}} - \alpha = \arccos \frac{P}{4m\omega^2 r} - \alpha \\ \Delta\theta = \theta_{\text{目标}} - \theta = \varphi - \theta \end{cases} \quad (10)$$

而控制信号 $\Delta\theta, \Delta\alpha$ 可通过电机的加减速来改变以达到目标值。具体为:

假设加减速控制时间为 T , 给出初始约束条件:

- 1) 电机加减速前后角速度不变;
- 2) 电机加减速前后输出轴扭矩为0。

可表示为:

$$\begin{cases} \omega(0) = \omega(T) = \omega \\ \dot{\omega}(0) = \dot{\omega}(T) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

在时间 T 内,电机的相位增量为

$$\Delta\psi = \int_0^T \omega(t) dt - \omega T \quad (12)$$

其中电机的角速度轨迹可以由一个5次多项式来实现,假设这个多项式为:

$$\omega(t) = t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (13)$$

联立式(11)、(12)、(13)求解可得:

$$\begin{aligned} \omega(t) = & t^5 + \left(\frac{30\Delta\psi}{T^5} - 2.5T\right)t^4 + \\ & \left(-\frac{60\Delta\psi}{T^4} + 2T^2\right)t^3 + \left(\frac{30\Delta\psi}{T^3} - 0.5T^3\right)t^2 + \omega \end{aligned} \quad (14)$$

从式(14)可以看出确定控制时间 T 和相位增量 $\Delta\psi$ 后就能得到角速度轨迹。对电机1而言,需要的相位增量是 $\Delta\psi_1 = \Delta\theta + \Delta\alpha$; 对电机2而言,需要的相位增量是 $\Delta\psi_2 = \Delta\theta - \Delta\alpha$ 。将 $\Delta\psi_1, \Delta\psi_2, T$ 分别代入式(14),即可得到对应电机的角速度轨迹。

5 基于 LabVIEW 的控制仿真算例

LabVIEW 是美国 NI 公司研发的程序开发软件,采用图形化的编程语言,它的程序模块功能强大,配套接口硬件齐全,是编写测试、控制、诊断程序的理想选择^[9-11]。而在 LabVIEW 平台上对电机的运动进行控制很方便^[12]。本节根据上文提出的控制策略,利用 LabVIEW 平台编写了相关的控制仿真程序。

5.1 仿真程序

应用 LabVIEW 编写的控制算法仿真程序如图 5 所示。

5.2 仿真与结果

假设离心式作动器的初始控制信号 $\theta = 0, \alpha = 0$, 即

初始输出力为一个幅值 800 N, 频率 20 Hz, 相位 0° 的正弦力, 经过控制器的控制后, 目标输出力为一个幅值 400 N, 频率 20 Hz, 相位 90° 的正弦力。设置采用频率为 1 024 Hz, 在 1 s 时开始控制, 控制时间为 1 s, 仿真后得到的结果如图 6 所示。

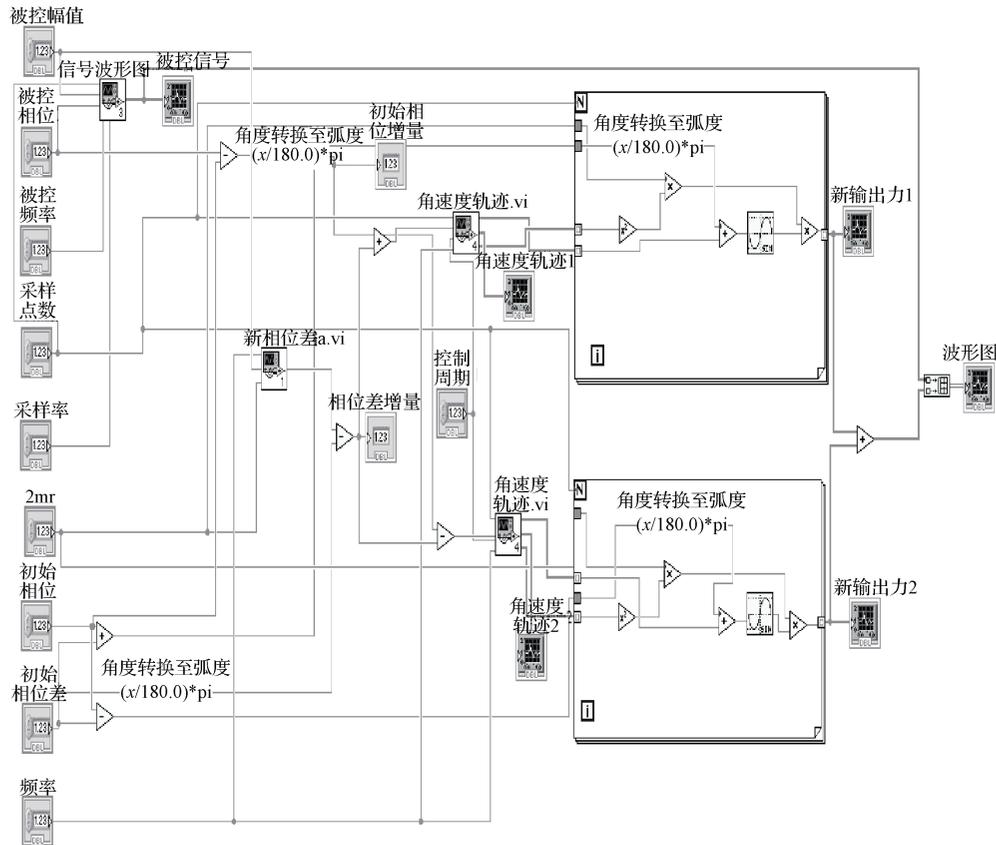


图 5 基于 LabVIEW 的控制算法仿真程序

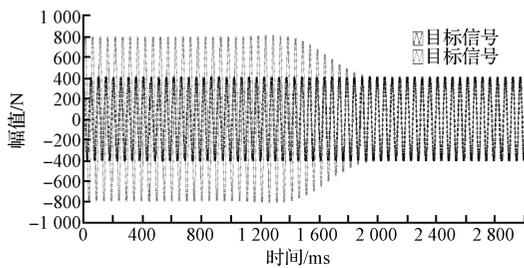


图 6 控制仿真结果 1

在时间 0~1 s 内, 控制器未进行控制时, 波形图局部放大图如图 7 所示。

在时间 1~2 s 内, 控制器进行控制时, 波形图局部放大图如图 8 所示。

在时间 2~3 s 内, 控制器完成控制时, 波形图局部放大图如图 9 所示。

从图 7 可以看出, 未经过控制时, 作动器的原始输出力信号和目标输出力信号是不同的, 一个幅值为 800 N,

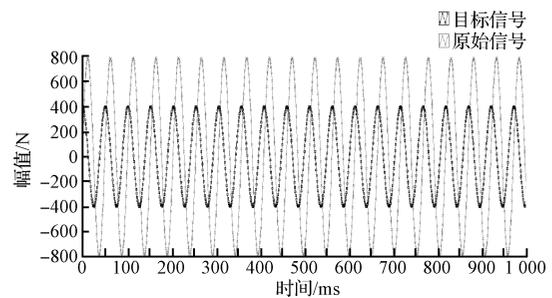


图 7 0~1 s 局部放大图 1

初相位为 0° , 另一个幅值为 400 N, 初相位为 30° 。经过编写的仿真程序控制后, 得到如图 8 所示波形, 可以看出, 原始信号的幅值和相位开始发生变化, 在 1.7 s 左右, 原始输出力的相位和目标信号的相位重合, 在 2 s 左右原始输出力的幅值和目标信号的幅值重合, 最终经过控制后作动器的输出力达到预期的控制效果, 如图 9 所示。

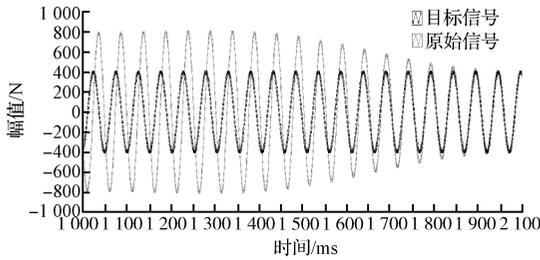


图8 1~2 s局部放大图1

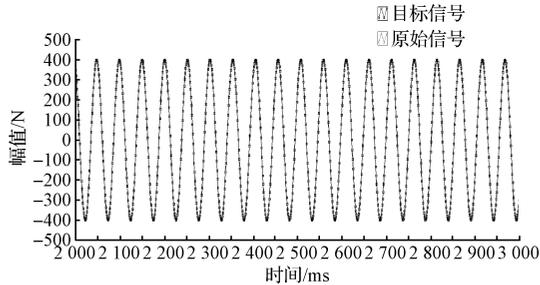


图9 2~3 s局部放大图1

假设离心式作动器的初始控制信号 $\theta = 0, \alpha = 30^\circ$, 即初始输出力为一个幅值692.8 N, 频率20 Hz, 相位 0° 的正弦力, 经过控制器的控制后, 目标输出力为一个幅值400 N, 频率20 Hz, 相位 180° 的正弦力。设置采用频率为1 024 Hz, 在1 s时开始控制, 控制时间取1 s, 仿真后得到的结果如图10所示。

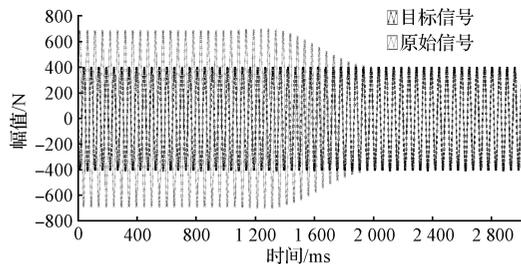


图10 控制仿真结果2

在时间0~1 s内, 控制器未进行控制时, 波形图局部放大图如图11所示。

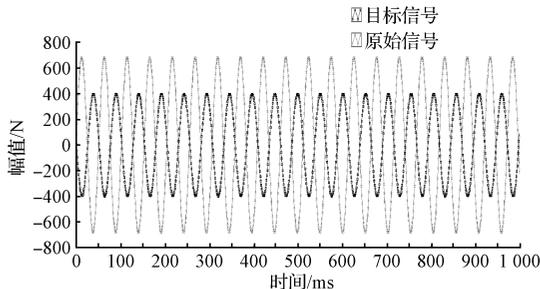


图11 0~1 s局部放大图2

在时间1~2 s内, 控制器进行控制时, 波形图局部放大图如图12所示。

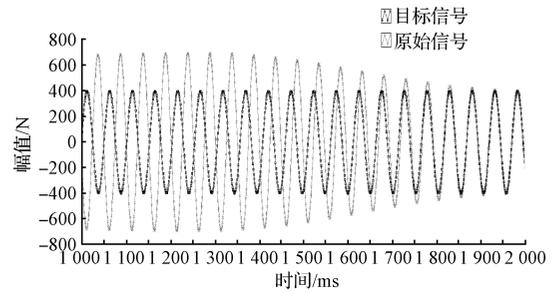


图12 1~2 s局部放大图2

在时间2~3 s内, 控制器完成控制时, 波形图局部放大图如图13所示。

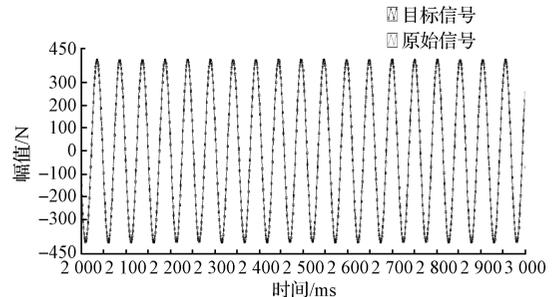


图13 2~3 s局部放大图2

从图11可以看出, 未经过控制时, 作动器的原始输出力信号和目标输出力信号是不同的, 一个幅值为692.8 N, 初相位为 0° , 另一个幅值为400 N, 初相位为 180° 。经过编写的仿真程序控制后, 得到图12, 可以看出, 原始信号的幅值和相位开始发生变化, 在1.8 s左右, 原始输出力的相位和目标信号的相位重合, 在2 s左右原始输出力的幅值和目标信号的幅值重合, 最终经过控制后作动器的输出力达到预期的控制效果, 如图13所示。

从上述仿真结果可以看出, 在控制时间(1~2 s)内, 作动器的输出力相位, 幅值都能达到目标所需的相位, 幅值, 由此可以说明本节设计的控制算法具有良好的控制效果。

6 结论

本文基于两个相同的偏心质量块同速反转时产生的离心力水平方向互相抵消, 竖直方向互相叠加的原理, 给出了一种新的离心式作动器的设计方案, 包括设计偏心质量块、选择对应齿轮及驱动电机型号等。最后对关于离心式作动器的输出力编写了相关控制算法并作了相关仿真分析, 仿真结果表明, 通过控制电机角加速度的改变可以改变控制信号中的 α, θ , 从而改变了作动器的输出力的幅值、相位, 最后使得作动器输出目标信号, 这样, 当离心式作动器用于振动主动控制时, 可以根据采集到的振动信号经过上述的控制算法在主动控制后使得作动器输出力信号的频率、相位和振动信号的频率、相位相同, 幅值与振动信号

的幅值相反,两者相互抵消,从而达到减振的目的。同时仿真结果也验证了基于 LabVIEW 的控制算法具有良好的控制效果,相对于前人基于 Simulink 的控制算法而言,LabVIEW 作为图形化编程语言,更直观、更易理解掌握。

参 考 文 献

- [1] 成其荣,张方,姜金辉. 基于 LabVIEW 算法作动器时滞的试验研究[J]. 国外电子测量术, 2014, 33(3): 68-71.
- [2] 刘孝辉,徐新喜,白松,等. 军用直升机振动与噪声控制技术[J]. 直升机技术, 2013(1):67-72.
- [3] 张永孝,李强. 直升机结构响应主动控制技术工程化应用研究[J]. 飞行力学, 2015, 33(4):371-375.
- [4] 邝昊,黄毅,王佳茜. 基于 CompactRIO 的变姿态超长柔性臂架振动主动控制系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(增刊 1):87-92
- [5] 蒋新花,丁德宝,沈庆宏. 应用于桥梁结构健康监测的低噪声振动测量系统实现[J]. 电子测量技术, 2014, 37(2):116-119
- [6] WANG H J, XING F, YOU ZH. Study of high-precision earth sensor with triple-FOV[J]. Instrumentation, 2014, 1(2):23-29
- [7] LIU L, PATT D, FRIEDMANN P P. Simultaneous vibration and noise reduction in rotorcraft using aero-elastic simulation[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2006, 51(2):127-140.
- [8] 游小亮. 用于振动主动控制的离心式作动器关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
- [9] 张鑫,李冬梅,黄元庆. 基于 LabVIEW 的阵列式传感器数据采集系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1399-1401.
- [10] 孟武胜,朱剑波,黄鸿,等. 基于 LabVIEW 数据采集系统的设计[J]. 电子测量技术, 2008, 31(11): 63-65.
- [11] 王健,梁志剑,马铁华,等. 基于 LabVIEW 的容栅扭矩测试系统设计[J]. 中国测试, 2015(11):78-81.
- [12] 王海霞,颜桂定,李宝辉,等. 直线电机运动控制系统的软件设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(3):264-269.

作 者 简 介

朱青霞,1991 年出生,硕士研究生,主要研究方向为振动控制与振动利用。

E-mail: qingxia_zoe@qq.com

张方,1962 年出生,博士,教授,主要研究方向为复杂结构动载荷识别、机械结构动力学、噪声与振动控制、振动信号数据分析、振动测试虚拟仪器设计。

E-mail: zhangf@nuaa.edu.cn

姜金辉,1981 年出生,博士,副教授,主要研究方向为振动测试与数据处理、动载荷识别、虚拟仪器设计与实现。

E-mail: jiangjinhui@nuaa.edu.cn