

文章编号:1674-8190(2014)03-397-07

某型飞机操纵系统钢索滑轮组动摩擦特性研究

王培群¹, 郑凤翥², 王培凌³

(1. 中航飞机股份有限公司 汉中飞机分公司, 汉中 723213)

(2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(3. 中航飞机股份有限公司 汉中飞机分公司, 汉中 723213)

摘要: 为研究某型飞机操纵系统国产钢索滑轮组与进口钢索滑轮组动摩擦特性的差异, 在参考国内外相关文献资料和工程实践的基础上, 就该操纵系统中拟采用的进口钢索滑轮组进行动摩擦特性的研究。运用经典力学理论的基本原理, 通过与系统中正在使用的国产钢索滑轮组动摩擦特性的对比分析, 并对试验中取得的数据运用 Labview 软件和频谱分析软件进行处理。结果表明: 该进口钢索滑轮组的动摩擦力较小、刚度较大, 符合工程设计的需要。研究结果为该型飞机操纵系统钢索滑轮组的设计改进提供工程依据。

关键词: 操纵系统; 钢索滑轮; 动摩擦力; 频谱分析

中图分类号: V227+.6

文献标识码: A

Dynamic Friction Characteristics Analysis for Rope Pulley of a Certain Type of Aircraft Control System

Wang Peiqun¹, Zheng Fengzhu², Wang Peiling³

(1. Hanzhong Branch, AVIC Aircraft Corporation, Ltd., Hanzhong 723213, China)

(2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. Hanzhong Branch, AVIC Aircraft Corporation, Ltd., Hanzhong 723213, China)

Abstract: In order to study the differences of dynamic friction characteristics between domestic rope pulley and imported rope pulley in certain aircraft control system, and provide data support and engineering reference for the improvement of rope pulley design in the control system, based on relevant domestic and abroad paper materials and engineering practice, the dynamic friction characteristics of imported rope pulley is analyzed, which will be adopted in this control system. Applying basic principles of classical mechanics theory, comparative analysis of dynamic friction characteristics is made for the domestic rope pulley being used, and using Labview software and spectral analysis software the test data is processed. Result shows that the dynamic friction of imported rope pulley is small, and the stiffness is large, which meets the requirements of engineering design. It provides the reference for improvement of the control system.

Key words: control system; rope pulley; dynamic friction; spectrum analysis

0 引言

摩擦是一个比较复杂的现象, 不同状态下其特性有很大的差异, 人们至今也未完全洞悉其机

理^[1]。而摩擦作为影响飞机操纵系统刚度的因素, 备受国内外研究者的重视。飞机操纵系统的刚度是指飞机操纵系统在各种载荷作用下抵抗变形的能力, 这种载荷大多以动载荷为主, 因此飞机操纵系统的刚度多指动态刚度。飞机操纵系统的主要作用是通过操纵飞机操纵面来控制飞机的飞行姿态, 是飞机最重要的系统之一^[2], 其工作性能直接影响飞机的操纵性和稳定性。近年来, 随着国内外

收稿日期: 2014-04-17; 修回日期: 2014-06-10

通信作者: 郑凤翥, zlfz19881021@163.com

对飞行品质的不断深入研究,进一步提出了必须全面地研究人一操纵系统—飞机所组成的闭环系统的动态特性^[3]。从机理上分析,摩擦是两个接触表面上的无数个微小凸体相互挤压、搓动的过程。在往复滑动中,滑动表面之间的滑动速度和方向会随时间和位置的不同发生改变,当有滑动表面直接接触时,表面上微小凸体接触式的金属表面接触区出现撕裂、破碎和挤出,形成磨粒,这些变化会导致摩擦振动和撞击^[4],动摩擦的这种随机波动性将严重影响飞行员对操纵系统的准确把握。

陈光雄等^[5-7]研究了金属往复滑动摩擦振动机理及摩擦振动的时频特性,认为摩擦振动系统为线性系统且可近似为简谐振动;P. L. Ko^[8]研究了外部干扰对摩擦振动的影响,并从理论上得出通过施加适当频率和振幅的外部激励,可以减少摩擦振动,进而减小钢索张力的波动;Wang Y F 等^[9]和 Ashesh Saha 等^[10]从理论角度证实了利用外部激励的方法来控制摩擦振动及抑制自激振动的方法是可行的。

某型飞机操纵系统采用了由钢索滑轮组成的软式操纵机构,是国内首次采用国产和进口两类钢索滑轮组相混合的软式操纵系统。在调整试飞中使用的国产钢索滑轮组的动摩擦力受环境温度和结构受力变化的影响,使得钢索的张力产生较大波动,这种波动主要是由于钢索和滑轮接触面的粗糙程度和接触面积发生变化,使得钢索与滑轮接触面形式发生改变而产生的^[11]。该操纵系统钢索张力的设计值是 60 kg,钢索张力大约产生 ± 30 kg 的波动,使得该操纵系统在使用过程中的支持刚度很差,动摩擦力较大,影响了飞机的操纵品质;加之该操纵系统中钢索和滑轮组成的动摩擦点较多,这两方面的综合作用严重影响了飞行员的操纵感觉和系统的动态特性。为提高操纵系统的刚度,减小系统动摩擦力,改进设计后拟采用美国 SKF 公司生产的钢索和导向滑轮。

为了验证新设计的钢索滑轮组系统的刚度和动摩擦特性较先前操纵系统采用的钢索滑轮组系统有所改进,本文从试验方案设计、试验内容选择、试验结果分析等方面对国产钢索滑轮组和拟用的美国 SKF 公司的钢索滑轮组中的 11 种试验件进

行摩擦特性对比试验,研究其动摩擦特性,为设计改进提供理论支持。

1 试验加载方案

1.1 试验系统

该系统包括钢索 4 种,滑轮 7 种。滑轮包角 (α) 8 种,钢索载荷 7 种。在真实模拟滑轮安装状态下,取直径为 $\phi 3.2$ 和 $\phi 4$ 的钢索,依次通过三种国产滑轮 HB5-54-100-10、HB5-54-80-9、HB5-54-70-9 和四种进口滑轮 PA80/3.2、P80/4、P100-SP1 和 PA70M-SP8A9;当 α 分别为 100° 、 110° 、 120° 、 130° 、 140° 、 150° 、 160° 、 170° ,钢索张力分别为 30、40、50、60、70、80、90 kg 时,使钢索在滑轮上做近似匀速运动,研究各状态下系统的动摩擦力特性,并对数据进行分析比对。

1.2 试验方案

操纵钢索和滑轮进行动摩擦力试验的滑轮安装示意图如图 1 所示,钢索的恒定张力用垂直安装的砝码 W 模拟,钢索经滑轮后另一端用钢索运动力测量传感器和运动机构相连,进程时靠运动机构拉动重物按匀速 V 运动,回程时靠砝码自重拉动运动机构运动。

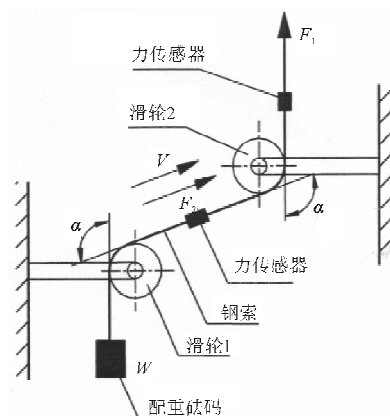


图 1 滑轮安装示意图

Fig. 1 Installation schematic of pulley

测量操纵钢索和滑轮组的动摩擦力,既要考虑钢索的张力和运动夹角,还要考虑钢索的运动速度。由于运输类飞机所需要的操纵力矩较大,在飞

行员同等操纵力情况下,该操纵系统运动机构的运动速度较慢,因此只考虑该系统在低速情况下的动摩擦特性。同时,在试验中还发现,只有低速、匀速运动才能保证钢索的动摩擦力恒定,经实际测试,采用电液伺服阀、作动器和位移传感器组成的位置反馈控制系统能保证钢索进行低速、匀速运动^[12-13]。根据伺服加载作动器的工作行程对系统运动速度经多次摸底测试,当试验运动伺服机构牵引操纵钢索以约 14 mm/s 的速度运动时,钢索滑轮组的运动基本达到匀速状态,其张力波动最小,因此试验时取 14 mm/s 的速度进行控制和采集,试验时的位移—时间记录如图 2 所示。

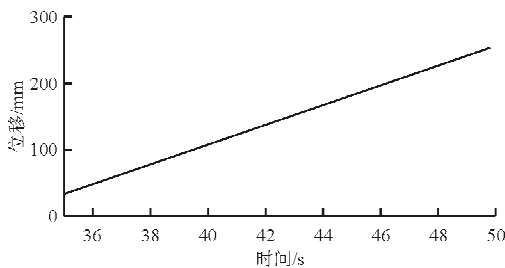


图2 钢索低速、匀速运动时的位移—时间记录图
Fig. 2 Displacement-time record chart of cable in low and uniform motion

测量钢索动摩擦力的力传感器信号经调理放大得到电压信号,与控制电液伺服作动器运动的位移传感器信号一起,经计算机的 16 位 A/D 变换器,按 1 k/sec 的采样速率得到数字量信号并进行连续存储记录,数字采集测量的精度达到 0.01%。因此,测量系统的检测精度主要取决于传感器的精度。

2 试验测量方案

操纵钢索的最大设计张力为 90 kg,选用测量精度为 0.1% F. S、量程为 100 kg 的 BK-1 测力传感器,其满量程误差为 0.1 kg,而滑轮在大运动夹角和小张力的情况下,单个钢索滑轮的动摩擦力估计在 0.1 kg 的量级,因此无法精确测量动摩擦力。根据摸底试验研究经验,为保证操纵钢索滑轮组动摩擦力的精确测量,解决试验中出现的钢索运动张力波动等问题,可采取以下测量措施:

(1) 按经典力学理论,动摩擦力与正压力和钢

索运动的速度均成正比^[14-16]。为了比较各种张力和包角状态下的动摩擦特性,试验时取一个恒定的运动速度,以便比较钢索张力、滑轮包角的变化对动摩擦力相关特性的影响。

(2) 用标准砝码 W 模拟操作钢索固有的张力值,即把钢索一端的张力值设为恒定,标准砝码经精确设计和计量单位标定,精度控制在 ± 5 g。

(3) 滑轮和钢索形成的运动包角 α 通过试验夹具精确保证。滑轮不同的运动包角 α 都在夹具上有精确的安装位置,为保证滑轮 α 角模拟的准确性,利用几何学原理在滑轮架安装平面内构建一对内错角,并通过专用角度卡板进行角度检验。

(4) 根据力的叠加原理,试验采用两套相同的滑轮组成相同钢索运动的夹角 α ,测量两组钢索滑轮的平均摩擦力 $(F_1 - W)$,消除了随机波动的误差,等于把单个钢索滑轮组的运动摩擦力 $(F_2 - W)$ 放大了两倍。

(5) 钢索的运动张力与重物重量差为运动摩擦力。试验测试中采用液压位置伺服系统通过计算机得到低速、匀速进、回程运动的过程控制,进程运动摩擦力为 $(F_1 - W)$,回程运动摩擦力为 $(W - F_2)$,用进、回程运动的钢索张力的差值,把单个钢索滑轮组的运动摩擦力放大两倍,测量两组 $(F_1 - F_2)$ 运动摩擦力放大四倍。

当钢索拉动砝码 W 匀速上升或下降时,设上升时力传感器 1 测得的力为 F_1 ,下降时力传感器 2 测得的力为 F_2 ,则钢索与滑轮上的动摩擦力 f 计算如下(滑轮包角为 α)。

$$\text{匀速上升时: } f_{\uparrow} = (F_1 - W) / 2 \quad (1)$$

$$\text{匀速下降时: } f_{\downarrow} = (W - F_2) / 2 \quad (2)$$

$$\text{系统动摩擦力: } f = (f_{\uparrow} + f_{\downarrow}) / 2 = (F_1 - F_2) / 2 \quad (3)$$

式中: f_{\uparrow} 、 f_{\downarrow} 为全过程采集时间内的平均值。

(6) 标准砝码在运动时产生一定的波动,影响了钢索滑轮组的匀速运动,钢索的运动张力也是呈现波动的,其张力波动幅度大于钢索运动的摩擦力值,波动的频率与钢索的长度值和张力值有关。因此,试验采用动态高速同步测量钢索的张力值,取单向运动行程中的张力测量值达到 1.3 万个数据作均值统计,每个试验状态重复测量三次,从而得

到钢索运动时波动的张力均值。

(7) 测试系统采用高精度力传感器, NI 数据采集卡和计算机组成闭环控制系统对力信号进行动态采集。采集信号由 NI 数据采集卡进行高速采集, 然后存储到工控计算机硬盘上进行处理和保存。采集系统分辨率为 24 位, 采样速率为 1 kHz, 力传感器信号的测量误差为 0.1%, 测试原理框图如图 3 所示。

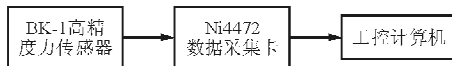


图 3 测试原理框图

Fig. 3 Block diagram of test principle

(8) 在相同的试验状态下用等精度的测量仪器对同一个参数进行 n 次测量, 测量值的权数 P 与方差 σ^2 成反比。对同一状态进行 n 次测量, 其测量数据的期望值能够提高测量的精度为 $1/\sqrt{n}$ 。试验中每次对摩擦力进程和回程测量次数 n 都达到 1.3 万个数据进行均值统计, 使精度为 0.1%, 即 0.1 kg 的测力传感器和数据采集卡组成的计算机摩擦力测量系统的精度提高 100 倍, 达到 0.001%, 即测量精度由 100 g 提高到 1 g, 满足钢索滑轮动摩擦力测量的要求。

3 试验内容

取包角为 150° 的滑轮运动夹角, 钢索最小张力值为 30 kg 时, 进行试验测量验证, 操纵钢索运动进程和回程时的运动张力波动记录值分别如图 4~图 5 所示, 运动张力的频谱特性如图 6 所示。

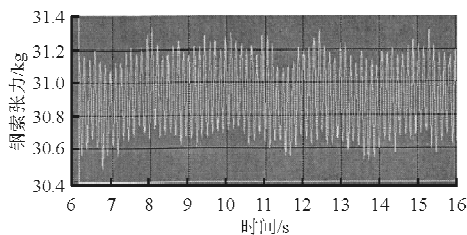


图 4 钢索张力为 30 kg、进程运动速度为 14 mm/s 时的张力-时间记录图

Fig. 4 Tension-time record chart(30 kg cable tension, 14 mm/s process velocity)

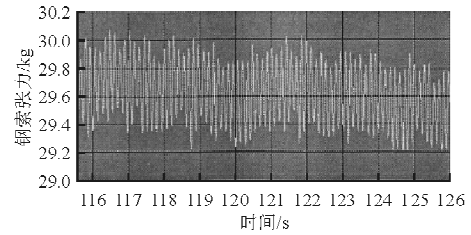


图 5 钢索张力为 30 kg、回程运动速度为 14 mm/s 时的张力-时间记录图

Fig. 5 Tension-time record chart(30 kg cable tension, 14 mm/s return velocity)

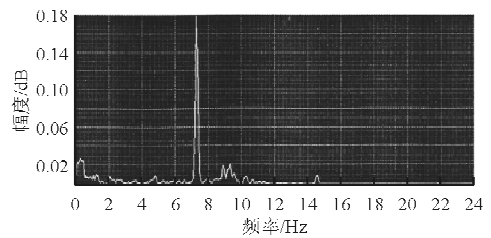


图 6 钢索张力为 30 kg 时钢索运动张力频谱特性图

Fig. 6 Cable movement tension spectrum chart of 30 kg tension

从图 4~图 6 可以看出, 操纵钢索运动时的张力以主频 7.25 Hz 的频率做谐波振动, 钢索的张力越大则作谐波振动的频率越高。

测量数据通过 Labview 处理程序进行低通滤波、比较放大、除去干扰信号后, 经频谱分析程序将有用信号进行回放和频谱分析, 最后给出系统测量的均值作为测量数据。频谱分析程序如图 7 所示。

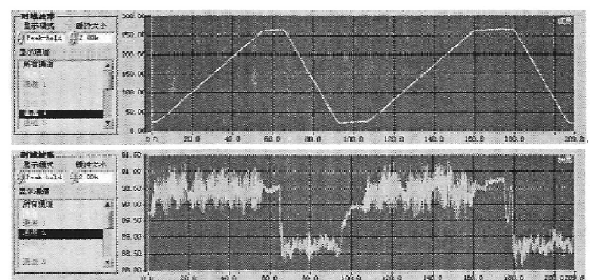


图 7 数据频谱分析程序

Fig. 7 Data spectrum analysis procedures

4 试验结果

按照经典力学中摩擦力与正压力及摩擦面积均成正比的理论, 本文只研究相同钢索直径、不同钢索张力、不同钢索包角对钢索滑轮组动摩擦特性

的影响,对不同直径的钢索动摩擦力数据不再做分析比对。取直径 $\phi 3.2$ 的 1Cr18Ni9Ti 钢索、型号为 PA70M-SP8A9 的进口钢索滑轮组为研究对象,其张力和运动摩擦力测试数据如表 1 所示。钢索张力、 α 角与摩擦力特性曲线如图 8 所示。

表 1 钢索 1Cr18Ni9Ti 与滑轮 PA70M-SP8A9 组合时钢索运动张力与动摩擦力对照表

Table 1 Cable tension and dynamic friction table under the combination of rope 1Cr18Ni9Ti and pulley PA70M-SP8A9

动摩擦力/ kg	α 角	100°	110°	120°	130°
30	张	0.271 7	0.256 7	0.239 2	0.210 8
40	力	0.300 0	0.280 0	0.258 3	0.238 3
50	/	0.328 3	0.310 8	0.285 0	0.269 2
60	kg	0.361 7	0.338 3	0.321 7	0.302 5
70		0.381 7	0.370 8	0.347 5	0.325 0
80		0.420 0	0.400 0	0.380 8	0.364 2
90		0.451 7	0.441 7	0.417 5	0.399 2

动摩擦力/ kg	α 角	140°	150°	160°	170°
30	张	0.202 50	0.183 0	0.163 3	0.138 3
40	力	0.228 30	0.225 0	0.183 3	0.163 3
50	/	0.252 00	0.236 0	0.214 0	0.198 3
60	kg	0.281 67	0.265 0	0.246 7	0.228 3
70		0.305 83	0.293 0	0.275 9	0.250 0
80		0.341 67	0.325 0	0.305 0	0.286 7
90		0.375 83	0.360 0	0.338 3	0.326 7

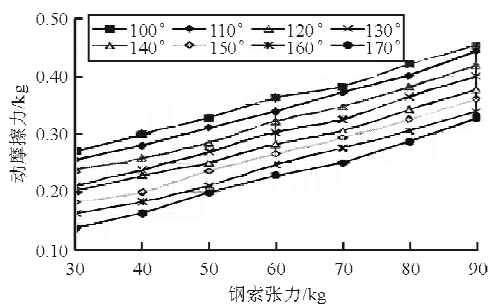


图 8 钢索张力、 α 角与摩擦力特性曲线(进口)
Fig. 8 Friction characteristic curve of different cable tension and angle α (imported)

另取直径 $\phi 3.2$ 的 20# 钢索、型号为 HB5-54-70-9 的国产钢索滑轮组为研究对象,其张力和运动摩擦力测试数据如表 2 所示。钢索张力、 α 角与

摩擦力特性曲线如图 9 所示。

表 2 钢索 20# 与滑轮 HB5-54-70-9 组合时钢索运动张力与动摩擦力对照表

Table 2 Cable tension and dynamic friction table under the combination of rope 20# and pulley HB5-54-70-9

动摩擦力/ kg	α 角	100°	110°	120°	130°
30	张	0.412 0	0.380 8	0.352 0	0.312 0
40	力	0.457 0	0.440 0	0.416 7	0.388 0
50	/	0.522 0	0.490 8	0.440 8	0.415 0
60	kg	0.574 0	0.528 0	0.498 3	0.479 0
70		0.617 0	0.576 0	0.543 3	0.521 0
80		0.663 0	0.642 0	0.612 0	0.578 0
90		0.715 0	0.687 0	0.673 0	0.643 0

动摩擦力/ kg	α 角	140°	150°	160°	170°
30	张	0.295 0	0.274 0	0.224 0	0.208 0
40	力	0.360 8	0.326 0	0.293 0	0.251 0
50	/	0.393 3	0.354 0	0.347 0	0.303 0
60	kg	0.458 3	0.446 0	0.409 0	0.356 0
70		0.496 7	0.482 0	0.458 0	0.415 0
80		0.556 7	0.546 0	0.488 0	0.458 0
90		0.605 0	0.582 0	0.547 0	0.505 0

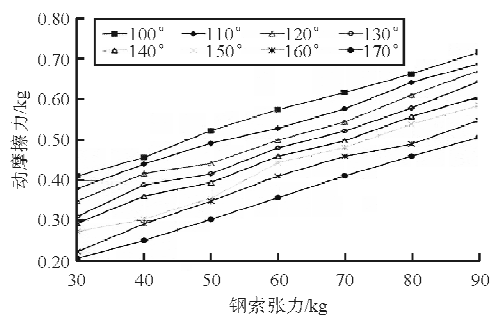


图 9 钢索张力、 α 角与摩擦力特性曲线(国产)
Fig. 9 Friction characteristic curve of different cable tension and angle α (domestic)

以上两组试验数据表明:在钢索张力恒定的情况下,直径为 $\phi 3.2$ 的 1Cr18Ni9Ti 钢索、型号为 PA70M-SP8A9 的进口钢索滑轮组的动摩擦力与直径同为 $\phi 3.2$ 的 20# 钢索、型号为 HB5-54-70-9 的国产钢索滑轮组的动摩擦力属同一数量级,但进口钢索滑轮组的动摩擦力比国产滑轮组的动摩擦力要小,且支持刚度也较好。

5 试验结果分析

5.1 动摩擦力和钢索张力的关系

在钢索直径相同的情况下,系统的动摩擦力的大小随钢索张力的增大而增大,随钢索 α 角的增大而减小;而钢索材质对系统动摩擦力的影响不明显。动摩擦力与钢索张力特性曲线如图10所示。

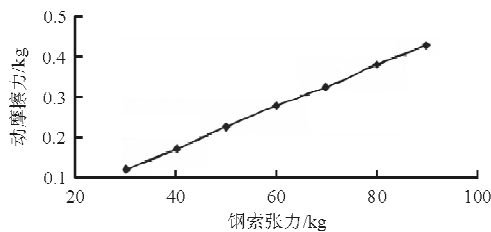


图10 动摩擦力与钢索张力特性曲线

Fig. 10 Characteristic curve of dynamic friction and cable tension

5.2 动摩擦力和钢索滑轮运动夹角的关系

在运动张力相同的情况下,取一组钢索滑轮组,作运动夹角从 $100^\circ \sim 170^\circ$ 变化时,钢索滑轮运动夹角与动摩擦力特性曲线如图11所示,系统的动摩擦力大小随钢索滑轮运动夹角的增大而减小。

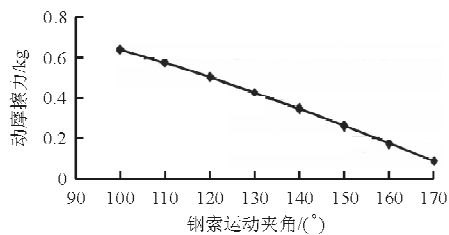


图11 动摩擦力与钢索滑轮运动夹角特性曲线

Fig. 11 The characteristic curve of dynamic friction and rope pulleys movement angle α

6 结论

拟采用的进口钢索滑轮组的动摩擦力随运动夹角和钢索张力的变化而变化的线性相关性较好,证明该钢索滑轮组的刚度较大,其原因主要是采用进口钢索滑轮组后,钢索与滑轮间的动摩擦力减小,由此引起的操纵系统局部波动减弱。采用该进口钢索滑轮组的操纵系统能有效地改善飞行员的操纵感觉和系统的动态特性,满足工程使用的设计

要求。还可在此基础上,采用该类钢索滑轮组对操纵系统做进一步的优化升级。同时,以该钢索滑轮组为研究对象,提升国内相关技术的研究水平。

参考文献

- [1] 江秋斐. 变温环境下气缸静-动低值摩擦力的测试方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
Jiang Qiufei. Under variable temperature environments cylinder low static and dynamic friction test methods research [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] 杜仲, 刘德胜, 许将军. CESSNA172R 飞机飞行操纵钢索故障原因分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(2): 155-159.
Du Zhong, Liu Desheng, Xu Jiangjun. Analysis on failure cause of flight control cable in CESSNA172R aircrafts[J]. Journal of safety Science and Technology, 2014, 10(2): 155-159. (in Chinese)
- [3] 许佩扬. 飞机纵向操纵系统动态特性的分析方法[J]. 西北工业大学学报, 1978(1): 155-162.
Xu Peiyang. Longitudinal analysis of aircraft operated system dynamics[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1978(1): 155-162. (in Chinese)
- [4] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 350-351, 499-501, 302-331.
Wen Shizhu, Huang Ping. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 350-351, 499-501, 302-331. (in Chinese)
- [5] 陈光雄, 周仲荣. 金属往复滑动摩擦振动形成机理的实验研究和分析[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(6): 425-429.
Chen Guangxiong, Zhou Zhongrong. An experiment investigation on mechanism of generation of friction-induced vibration under reciprocation sliding[J]. Tribology, 2001, 21(6): 425-429. (in Chinese)
- [6] 陈光雄, 周仲荣. 摩擦振动的时频特性[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 1-5.
Chen Guangxiong, Zhou Zhongrong. Time-frequency characteristics of friction-induced vibration[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(2): 1-5. (in Chinese)
- [7] 陈光雄, 周仲荣, 石心余. 金属往复滑动摩擦噪声源的识别[J]. 摩擦学学报, 2002, 22(2): 147-149.
Chen Guangxiong, Zhou Zhongrong, Shi Xinyu. Identification of the friction-induced noise source of a metal rubbing pair[J]. Tribology, 2002, 22(2): 147-149. (in Chinese)
- [8] Ko P L, Marie-Claude Taponat, Rodolphe Pfaifer. Friction-induced vibration-with and without external disturbance[J]. Tribology International, 2001, 34(1): 7-24.
- [9] Wang Y F, Wang D H, Chai Y F. Active control of friction-induced self-excited vibration using adaptive fuzzy systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(17): 4201-4210.

- [10] Ashesh Saha, Pankaj Wahi. Delayed feedback for controlling the nature of bifurcations in friction-induced vibrations [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, 330(25): 6070-6087.
- [11] 林肖芬, 董操. 飞机操纵系统与液压系统动态特性的综合分析研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 1994, 26(5): 602-607.
Lin Xiaofen, Dong Cao. Comprehensive analysis of aircraft control systems and hydraulic systems dynamics[J]. *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Newspaper*, 1994, 26(5): 602-607. (in Chinese)
- [12] 杨力, 仇玲玲, 白玉兴, 等. 国产直丝陶瓷托槽摩擦力性能的研究[J]. *北京口腔医学*, 2008, 16(4): 188-190.
Yang Li, Qiu Lingling, Bai Yuxing, et al. A study of the friction characteristics of the domestic straight-wire ceramic bracket[J]. *Beijing Journal of Stomatology*, 2008, 16(4): 188-190. (in Chinese)
- [13] 张百海, 程海峰, 马延峰, 等. 气缸摩擦力特性实验研究[J]. *北京理工大学学报*, 2005, 25(6): 484-486.
Zhang Baihai, Cheng Haifeng, Ma Yanfeng, et al. Study on friction characteristics of pneumatic cylinders[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2005, 25(6): 484-486. (in Chinese)
- [14] 和兴锁. 理论力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
He Xingsuo. *Theoretical mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [15] 单颖春, 朱梓根. 平面接触圆运动摩擦力的解析与数值计算[J]. *航空动力学报*, 2002, 17(4): 447-450.
Shan Yingchun, Zhu Zigen. Theoretical and numerical methods for solving friction force of circular motion in contact plane[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2002, 17(4): 447-450. (in Chinese)
- [16] 王顺, 王文中, 胡元中, 等. 点接触润滑粗糙表面滑动摩擦力的预测研究[J]. *摩擦学学报*, 2007, 27(2): 152-155.
Wang Shun, Wang Wenzhong, Hu Yuanzhong, et al. Prediction reach of point contact lubricated sliding friction of rough surfaces[J]. *Tribology*, 2007, 27(2): 152-155. (in Chinese)

作者简介:

王培群(1973—),男,本科,工程师。主要研究方向:飞机地面静强度试验技术。

郑凤鸾(1988—),男,硕士,助理工程师。主要研究方向:飞行器可靠性、适航性与维修性。

王培凌(1972—),男,本科,高级工程师。主要研究方向:非金属材料检测及其性能。

(编辑:马文静)