

## 基于连杆应变测量的起落架舱门结构健康监测

谢 帅, 张海涛, 霍幸莉, 唐 凯

(中国飞行试验研究院, 西安, 710089)

**摘要** 起落架舱门的结构完整性影响飞机起飞着陆阶段的安全, 因此, 提出了一种使用舱门连杆应变间接监测起落架舱门结构健康的方法。首先在某型运输机起落架外舱门连杆上粘贴应变计, 对起落架收放过程中的舱门气动力进行定性分析; 然后使用小波变化和傅里叶变化对连杆应变数据进行时频分析和频谱分析, 间接获取起落架外舱门的振动响应频率, 将振动响应频率作为易损探测值, 根据其变化趋势判断舱门结构损伤的演变情况, 并与舱门固有频率进行对比, 分析结构损伤的原因; 最后使用机载测试系统和监视系统, 实现飞行过程中的起落架舱门结构健康监测。结果表明: 该方法可靠有效, 可预先探测起落架舱门结构损伤, 具有推广应用价值。

**关键词** 起落架舱门; 应变测量; 结构健康监测; 振动响应频率

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.03.007

**中图分类号** V19 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)03-0050-05

### Structural Health Monitoring of Landing Gear Doors Based on Strain Measurement

XIE Shuai, ZHANG Haitao, HUO Xingli, TANG Kai

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract** The structural integrity of landing gear doors affects the safety of aircraft during takeoff and landing. In this paper, a method of indirectly monitoring the structural health of the landing gear door by using the strain of the door link is proposed. Firstly, a strain gauge is pasted on the landing gear outer door link of a certain type of transport aircraft to qualitatively analyze the aerodynamic force of the landing gear door during retraction and retraction; Then, the time-frequency analysis and frequency spectrum analysis of the connecting rod strain data are carried out by using the wavelet change and Fourier change to obtain the vibration response frequency of the outer door of the landing gear. The vibration response frequency is taken as the vulnerable detection value, and the evolution of the structural damage of the door is judged according to its change trend, and compared with the natural frequency of the door to analyze the cause of the structural damage; Finally, the airborne test system and monitoring system are used to realize the health monitoring of landing gear door structure during flight. The results show that this method is reliable and effective, which can detect the structural damage of landing gear door in advance, and has the value of popularization and application.

**Key words** landing gear doors; strain measurement; structural health monitoring; frequency of vibration

**收稿日期:** 2022-09-13

**作者简介:** 谢 帅(1991—), 男, 陕西合阳人, 工程师, 研究方向为飞机载荷与强度飞行试验。E-mail: 372758572@qq.com

**引用格式:** 谢帅, 张海涛, 霍幸莉, 等. 基于连杆应变测量的起落架舱门结构健康监测[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(3): 50-54. XIE Shuai, ZHANG Haitao, HUO Xingli, et al. Structural Health Monitoring of Landing Gear Doors Based on Strain Measurement[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(3): 50-54.

飞机在收放起落架的过程中,起落架舱门暴露于迎风气流中,复杂的绕流产生时变气动载荷,使起落架舱门处于复杂的持续受载状态,尤其在飞机大侧滑和大速度状态,主起落架舱门受机身绕流的叠加影响,受载环境变得更加复杂,起落架、起落架舱以及舱门结构部件易产生低频耦合振荡,甚至引起结构材料疲劳破坏<sup>[1]</sup>,严重影响飞行的舒适性和安全性。舱门故障导致的飞行事故时有发生<sup>[2]</sup>,舱门结构及支架疲劳受损引起的变形是舱门放下故障的因素之一<sup>[3]</sup>。正确的气动载荷输入是起落架舱门静强度和疲劳强度计算的前提条件。然而,由于技术难度大,目前国内尚未开展过起落架舱门的气动载荷测量,所以其结构完整性难以得到保障,尤其在飞行试验阶段,包含大量起落架放下构型的大侧滑及大速度试飞,起落架舱门出现结构损伤的案例层出不穷。

在设计阶段,开展起落架开舱构型的复杂流场计算、风洞试验和地面起落架收放试验<sup>[4-14]</sup>,对飞机的安全性与可靠性起着不容忽视的作用。但是,这3种手段均有自身的局限性。起落架开舱构型的复杂流场计算通常借助数值仿真工具,国内外常用的方法包括非定常雷诺平均(URANS)、脱体涡模拟(DES)、延迟脱体涡模拟(DDES)、大涡模拟(LES)、改进型的延迟脱体涡模拟(IDDES)、本征正交分解方法、动力学模态分解等方法,这些方法可以计算得到舱门附近的流动演化过程以及流场脉动压强分布情况<sup>[4-8]</sup>,但是未经过飞行试验验证。由于成本较高、周期较长且过程复杂,仅有极少数飞机会进行起落架风洞试验。例如:国外在美国航空航天局艾姆斯研究机构的7~10英尺(213.36~304.80 cm)口径的风洞中开展了波音777飞机的主起落架风洞试验<sup>[9]</sup>;国内在FL-13风洞中对某型飞机主起落架开展了风洞试验<sup>[10]</sup>,得到的试验数据真实可靠,但对侧滑状态下机身的绕流模拟有限。国内外在地面起落架收放试验方面研究较多,主要的气动载荷加载模拟方式有质量块加载、弹簧组加载、作动筒加载等<sup>[11-14]</sup>,但其主要目的是验证起落架的收放功能,并不研究起落架舱门的真实受载。

因此,在舱门真实气动载荷难以获取的情况下,进行起落架舱门结构健康监测是保障起落架舱门结构完整性的重要手段。本文根据某型机起落架舱门结构特点,使用应变片传感器间接获取起落架舱门的振动响应信号,将振动响应频率作为易损探测值,利用机载设备实现对起落架舱门的结构健康监测,保障了试飞安全。

## 1 起落架舱门结构应变测量

### 1.1 起落架舱门结构形式

某型飞机主起落架舱门由3块组成,分别为外

舱门,中舱门和内舱门,均采用蜂窝夹层板结构。其中,起落架外舱门通过前后2个铰链与机翼下表面相连,通过1根连杆与主起落架支柱相连,中舱门通过5根连杆与起落架支柱固定,外舱门和中舱门均随起落架的收放而同步运动。内舱门由液压作动筒控制独立开关,在起落架放下后,内舱门逐渐收起至关闭状态。本文以外舱门为例,由于在舱门上直接粘贴应变计走线复杂且距离较长,而在有铆钉密集排布的铰链上粘贴应变计空间狭小难以施工。因此选择在舱门连杆上粘贴应变计,开展起落架舱门结构健康监测研究,外舱门结构布局 and 连接形式示意图见图1和图2。

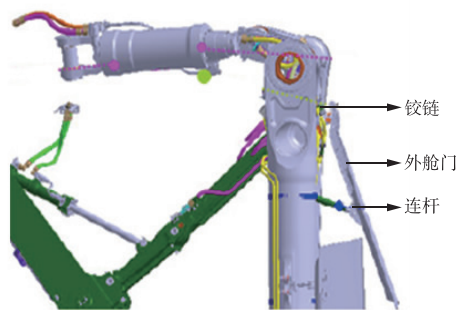


图1 外舱门结构布局示意图

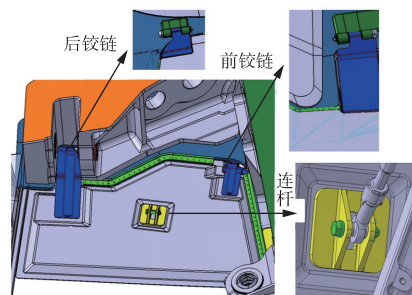


图2 外舱门连接形式示意图

### 1.2 起落架外舱门受力分析与连杆应变改装

由图2可知,外舱门共有3个受力点:前铰链、后铰链和连杆。作用于舱门表面的气动载荷由这3个受力点来共同平衡。由于舱门气动力不断变化且难以测量,因此仅进行定性受力分析。将气动载荷合力分解为垂直舱门平面的法向力和位于舱门平面内的面内力。其中,法向力对连杆铰接点产生的力和力矩由连杆垂直于舱门的力和2个铰链来平衡,此时铰链上的2排螺钉根据力矩的方向承受拉向或压向载荷;面内力对连杆铰接点产生的力和力矩由连杆平行于舱门的力和2个铰链来平衡,此时铰链上的2排螺钉承受剪切力。

由于前后铰链各有2排密集的铆钉,没有足够的贴片位置,而起落架放下状态,连杆和舱门处于固定约束状态。因此连杆可以较好地反应舱门的整体受载响应情况,选择在连杆上粘贴应变片,以实现测量起落架舱门振动响应的目的。该连杆为普通二力杆,选择在连杆中间的平直段粘贴应变计。

### 1.3 起落架外舱门连杆应变分析

测量该型飞机空中放起落架、展态飞行、收起落架的全过程外舱门连杆应变,实测数据见图3。

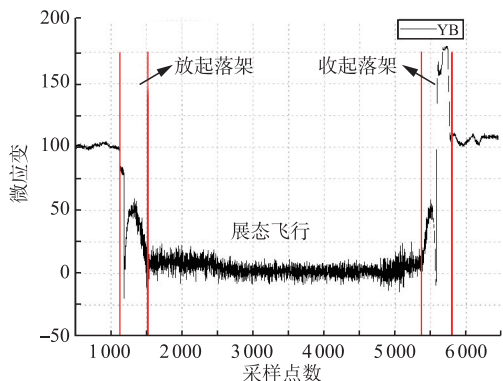


图3 起落架收放过程的外舱门连杆应变时间历程曲线

阶段1:放起落架。在内舱门开启过程中,受气流影响,外舱门连杆应变略有减小。起落架上位锁打开后,外舱门随着起落架联动放下,由于角度不断变化,在气动力的作用下,连杆应变先增大后减小。阶段2:展态飞行。起落架完全放下,外舱门完全打开,连杆应变保持稳定振荡。阶段3:收起落架。起落架下位锁开锁,外舱门随着起落架联动向上收起,由于角度不断变化,在气动力的作用下,连杆应变先增大后减小。当起落架上位锁锁定后,连杆应变瞬间增大。随着起落架舱压的稳定,连杆应变减小并稳定在未放起落架时的初始量值。

根据上述分析可知,起落架收放过程以及展态飞行阶段,起落架附近流场复杂,舱门受到交变疲劳载荷,容易产生疲劳损伤。

## 2 起落架舱门振动频率分析

按照时间先后顺序,挑选了4次大侧滑、最大起落架收放速度试飞时的起落架应变数据,根据连杆的振动频率演变趋势分析舱门的结构损伤演变趋势。首先使用小波变换对起落架收放全过程的连杆应变进行时频分析,观察应变响应频率随时间的变化;然后在频率稳定区域各挑选一段数据使用傅里叶变换进行频谱分析,确定其振动响应频率;最后与舱门固有频率对比,分析其损伤原因。

### 2.1 时频分析

小波变换具有出色的时频聚焦性以及多分辨率的特性,因此广泛应用于故障诊断领域<sup>[15-17]</sup>。对4次收放起落架全过程的外舱门连杆应变数据进行小波变换,图4~7为得到的时频图。

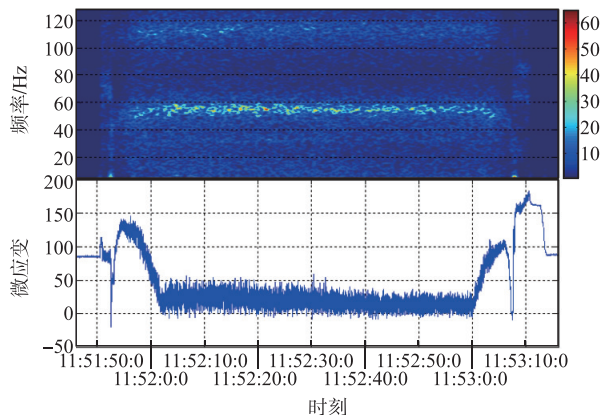


图4 外舱门连杆应变时频图(第1次收放起落架)

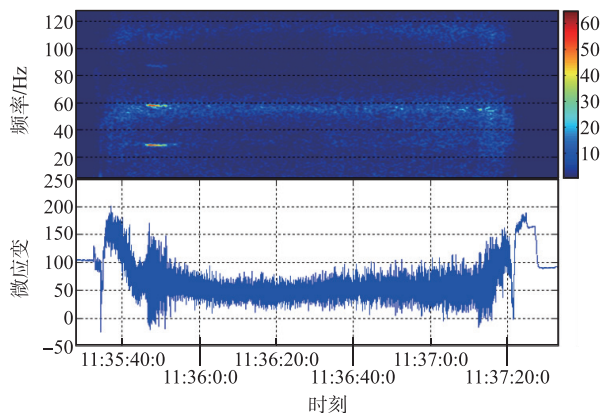


图5 外舱门连杆应变时频图(第2次收放起落架)

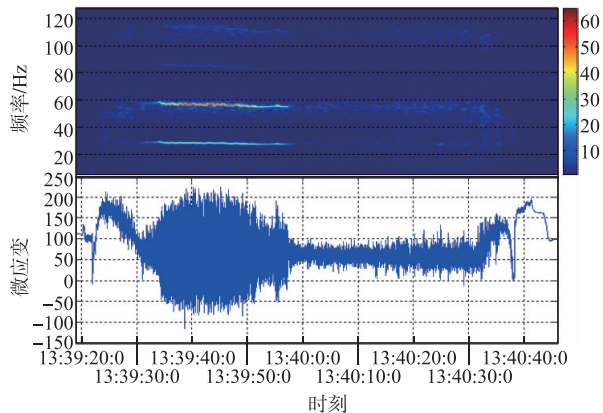


图6 外舱门连杆应变时频图(第3次收放起落架)

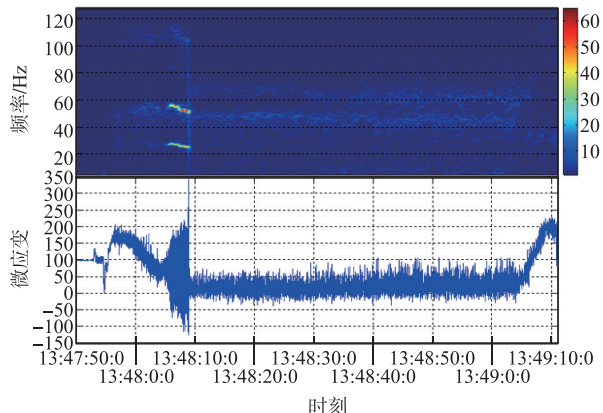


图7 外舱门连杆应变时频图(第4次收放起落架)



从图 4~7 可以看出: 第 1 次起落架收放过程中存在 1 个稳定的频率成分, 但频带较宽; 第 2 次起落架收放过程中, 在起落架放下之后的短时间内, 出现 2 个稳定的频率成分, 频率集中; 第 3 次起落架收放过程中的频率成分与第 2 次类似, 但持续时间更长; 第 4 次起落架收放过程中, 在起落架放下之后的短时间内, 频率出现下降趋势。

### 2.2 频谱分析

根据时频分析结果, 在频率稳定区域各挑选一段数据使用傅里叶变换进行频谱分析, 确定起落架外舱门的振动响应频率, 分析结果见图 8~11。

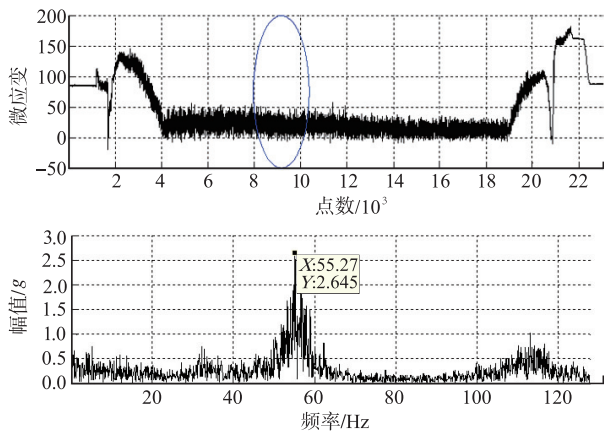


图 8 外舱门连杆应变频谱图(第 1 次收放起落架)

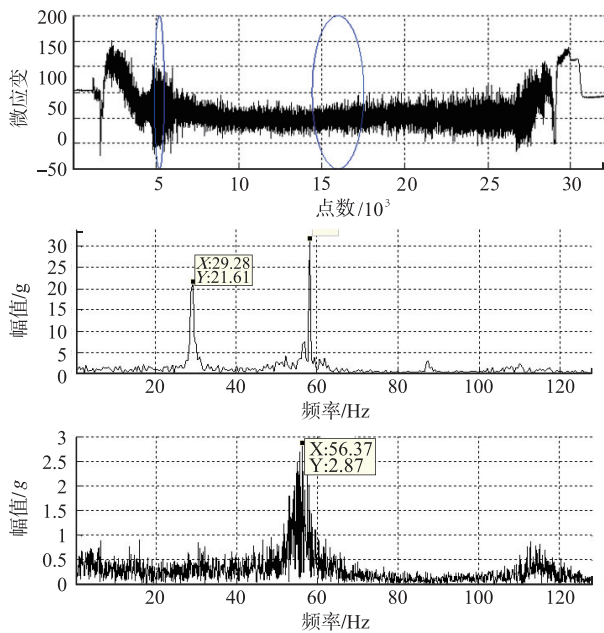


图 9 外舱门连杆应变频谱图(第 2 次收放起落架)

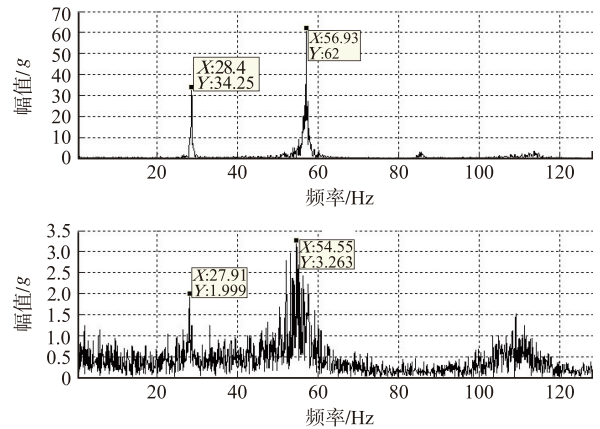
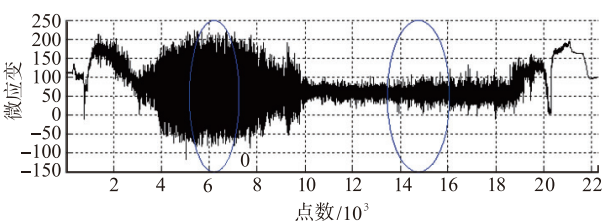


图 10 外舱门连杆应变频谱图(第 3 次收放起落架)

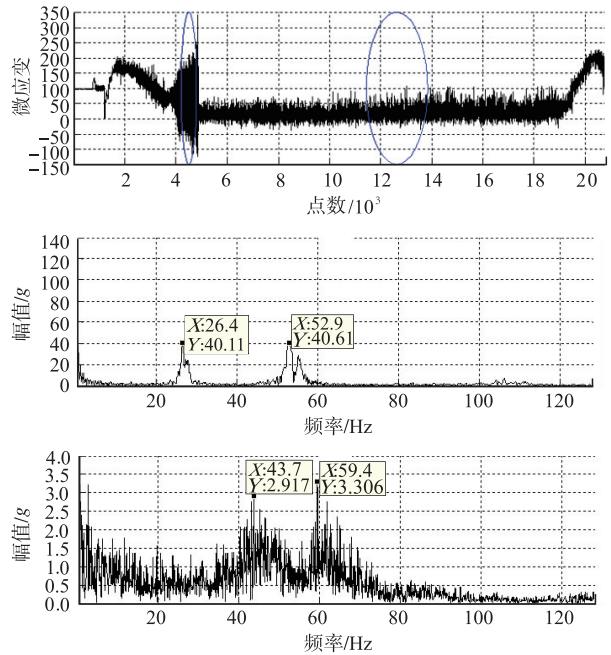


图 11 外舱门连杆应变频谱图(第 4 次收放起落架)

从图 8~11 可以看出: 起落架外舱门结构在第 1 次起落架放下之后的频率成分频带较宽; 第 2 次起落架放下之后出现 2 个稳定的频率成分, 分别为 29.28 Hz 和 58.14 Hz; 第 3 次起落架放下之后的频率成分与第 2 次相比, 量值有所减小, 分别为 28.4 Hz 和 56.93 Hz; 第 4 次起落架放下之后的频率更小, 分别为 26.4 Hz 和 52.9 Hz。

### 2.3 损伤原因分析

通过有限元计算, 得到的起落架舱门的固有频率, 见表 1。其中, 1 阶模态的振型为绕连杆接头的扭转; 2 阶模态的振型为绕前后铰链轴的上下弯曲; 3 阶模态为绕后铰链的弯曲。

表 1 起落架外舱门固有频率

序号	模态名称	频率/Hz
1	1 阶模态	30.875
2	2 阶模态	56.485
3	3 阶模态	112.240

将外舱门的固有频率和飞行中的振动响应频率进行对比,可知:第2次起落架放下之后,起落架舱门出现了前2阶模态的低频耦合振荡;第3次起落架放下之后,起落架舱门振动频率降低,表明起落架舱门刚度降低,此时结构内部已经出现损伤;第4次起落架放下之后,起落架舱门振动频率继续降低,表明此时结构内部损伤加剧,直至发生结构断裂,与实际情况一致,第4次放起落架时起落架舱门前铰链断裂。外舱门经受交变气动载荷后,前铰链最先出现断裂,是因为前铰链结构尺寸较小,铰链合页薄且螺钉数量少,在3个受力点中疲劳寿命最短。

### 3 起落架舱门结构健康监测

通过上节的分析可知,将起落架舱门振动频率作为易损探测值,通过观察其变化趋势,即可实现对起落架舱门整体结构的健康监测。监测原理为:①第*i*次起落架收放过程的连杆应变;②时频分析;③频谱分析;④振动频率;⑤判断是否减小;⑥减小,确认为结构损伤;⑦不减小,返回①。

利用该型飞机的机载数据采集系统和机上监控系统(或地面遥测系统),实现对起落架舱门的结构健康监测。使用机载数据采集系统采集起落架收放过程中的应变数据,并将数据实时发送至机上监控系统(或地面遥测系统),使用预先嵌入的程序进行振动频率的快速识别与比对。当发现频率有减小趋势时,发出结构损伤预警,此时由机上工程师或地面监控人员告知机组返场降落,落地后立刻对起落架舱门进行目视检查 and 无损检测,以确定结构损伤的具体位置。

### 4 结语

本文通过在某型飞机上开展基于连杆应变的起落架舱门结构健康监测研究,得到以下结论:舱门连杆应变可以反映起落架舱门的实际振动情况;基于小波变换和傅里叶变化的时频分析和频谱分析,可以有效获取起落架舱门的振动频率与变化趋势;将振动频率作为易损探测值,可以实现结构损伤的提前探测;使用一个应变传感器即可实现起落架舱门的结构健康监测,占用的试飞资源极少,但产生的试飞效益巨大,具有推广应用价值。

#### 参考文献

[1] 鄢荣,何逸文,李凯翔,等.起落架开舱构型自激振

荡预测公式改进与分析[J].航空学报,2022,43(12):226140.

- [2] ZUCCA G, DI FRANCESCO V, BERNABEI M, et al. Failure Investigation: In Flight Loss of a Main Landing Gear Door of a Transport Aircraft[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2017, 3: 553-561.
- [3] 游凡.主起落架舱门放下影响因素研究[J].科技视界,2017(5):114-115.
- [4] LAZOSB S. Mean Flow Features around the Inline Wheels of Four-Wheel Landing Gear[J]. *AIAA Journal*, 2002, 40(2): 193-198.
- [5] VENKATAKRISHNAN L, KARTHIKEYAN N, MEJIA K. Experimental Studies on a Rudimentary Four-Wheel Landing Gear[J]. *AIAA Journal*, 2012, 50(11): 2435-2447.
- [6] SKOPINSKI T H, AIKEN W, HUSTON W B. Calibration of Strain-Gage Installations in Aircraft Structures for the Measurement of Flight Loads[J]. *Technical Report Archive & Image Library*, 1952: 505-529.
- [7] DÜPOW H, BLOUNT G. A Review of Reliability Prediction[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 1997, 69(4): 356-362.
- [8] YONSU N, SUNG K H. Force Control System Design for Aerodynamic Load Simulator[J]. *Control Engineering Practice*, 2002,10(5): 549-558.
- [9] HORNE W, JAMES K, STORMS B. Flow Survey of the Wake of a Commercial Transport Main Landing Gear[C]// *AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference & Exhibit*. Reston, Virigina: AIAA,2002:2407.
- [10] 张速成,魏省三,张鸣,等.起落架收放气动载荷研究[J].航空学报,1987,8(12):572-577.
- [11] 沈凤林.飞机液压起落架电液伺服加载系统的研究[D].西安:西北工业大学,2002:1-2.
- [12] 樊蕊.某型客机主起落架收放动力学分析及试验方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2012:50-54.
- [13] 袁朝辉,崔海云.起落架气动负载模拟系统力矩控制[J].液压与气动,2004(3):23-26.
- [14] 阎杰,赵晓蓓.电液伺服加载系统数学模型的建立及有效性分析[J].航空学报,1998,19(1):50-53.
- [15] 赵学智,陈统坚,叶邦彦,等.小波包分析在轴承早期故障诊断中的应用[J].振动·测试与诊断,2003,23(4):243-246.
- [16] 钟先友.旋转机械故障诊断的时频分析方法及其应用研究[D].武汉:武汉科技大学,2014:7-8.
- [17] 刘星宇.基于小波时频变换和可变形卷积神经网络的滚动轴承故障诊断[D].兰州:兰州理工大学,2020:21-27.

(编辑:姚树峰)