

机场环境对某型民用飞机辅助动力装置振动的影响研究

吕金华,张发富,张强

(中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院,上海 200120)

摘 要:辅助动力装置是民用飞机的重要设备,其振动不仅受到自身转子特性的影响,还受到机场环境的影响。通过试验研究机场风向、温度对辅助动力装置振动的影响,发现辅助动力装置的振动能量和轴向激振力在顺风下较大,但是径向激振力在侧风下较大;在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,辅助动力装置的振动能量和前轴承处转子激振力随着温度升高而增大,但是后轴承处转子激振力在常温下最大,在低温下最小。

关键词:飞机;辅助动力装置;振动;试验;风向;温度

中图分类号:0327 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)04-0224-05

Influence Analysis on Airport Environment on Vibration of Civil Aircraft APU

LYU Jinhua, ZHANG Fafu, ZHANG Qiang

(Commercial Aircraft Corporation of China Ltd., Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 200120, China)

Abstract: Auxiliary power unit (APU) is an important equipment of civil aircraft, and its vibration is affected not only by its own rotor characteristics, but also by airport environment. Based on the experimental study of the influence of wind direction and temperature on the vibration of APU, it is found that the vibration energy of APU and the axial exciting force is larger in the downwind, and the radial exciting force is larger in the crosswind. In the range of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, the vibration energy and the exciting force at the front bearing increase with the increase of temperature, but the exciting force at the rear bearing is the largest at room temperature and the smallest at low temperature.

Keywords: aircraft; auxiliary power unit; vibration; experiment; wind direction; temperature

0 引言

目前我国航空事业的飞速发展,除了可直接为飞机提供动力的主发动机外,还涌现出以辅助动力装置(auxiliary power unit, APU)为代表的各种新型航空动力装置。从原理上来说,辅助动力装置相当于一台小型的燃气涡轮发动机,主要功能有:地面起动主发动机、飞机地面运转或维护时提供电源、为飞机环控系统提供压缩空气源、驱动飞机的液压系统、空中停车时提供应急电源或起动主发动机等,其技术复杂程度与飞机主发动机相当。航空辅助动力装置主要作用是给主发动机提供起动时所需要的功率,尤其当飞机的主发动机在高空运行时发生故障,航空辅助动力装置能够提供主发动机快速起动所必需的液压、电源等辅助能源,有力地保障了飞机的飞行安全^[1-2]。

对于航空辅助动力装置而言,振动是一个非常重要的监控参数,振动信号的大小可以反映出航空辅助动力装置运行情况的好坏。在工程应用中,航空辅助动力装置绝大部分故障的产生首先都是因为发生了振动故障。振动异常除了会使零件损坏之外,还透露了航空辅助动力装置中潜在故障的信息,如不及时加以检查、排除,就有造成严重

恶果的可能^[3]。辅助动力装置振动不仅与其本身转子设计有关,还受到其使用环境如温度、侧风等因素的影响。

国外主机供应商如霍尼韦尔通过环境模拟试验研究温度、海拔高度等环境因素对辅助动力装置振动的影响,但是由于各国对航空辅助动力装置的振动研究还处于保密阶段,相应的技术文献资料较少。目前国内主要通过仿真分析环境因素对航空发动机转子振动的影响,如艾书民通过热-结构耦合模型研究温度场对转子系统振动特性的影响^[4-5],但是缺少试验研究。本文通过实机地面试验研究机场风向、温度对辅助动力装置振动能量的影响。

1 传感器布置

本文采用在辅助动力装置机匣布置压电加速度计的方式测量辅助动力装置的振动。根据某型辅助动力装置结构,在其齿轮箱顶部加装3个加速度计以测量前轴承处转子轴向、垂向和侧向的振动。由于空间位置的限制,在涡轮机匣上部只能布置1个加速度计,以测量后轴承处转子径向的振动^[6]。

加速度计采样率为8192 Hz,满足Shannon采样定理,可以有效采集辅助动力装置的振动数据^[7]。

2 振动数据处理

机械振动可以用振动位移、速度、加速度 3 个互相关联的参数表示,其中速度反映物体的振动能量,加速度反映物体的振动惯性力^[8]。本文使用振动速度方均根值(有效值 V_{RMS})反映辅助动力装置的振动能量,同时使用辅助动力装置工作转速下的加速度值反映辅助动力装置的转子激振力。

2.1 振动速度有效值

振动速度有效值 V_{RMS} 为速度对时间的平均,计算公式如式(1)所示,其数值大小可以恰当地评价转子的平衡质量和运转状态的好坏。

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n}} \quad (1)$$

式中: V_{RMS} 为振动速度有效值; V_i 为每个采样点的振动速度; n 为每 0.1 s 的采样点数^[9]。

2.2 傅里叶变换

基于傅里叶变换的频域分析是目前比较成熟且使用最广泛的航空发动机振动信号处理方法,可以将复杂的非平稳时域信号转换为稳定和清晰的频域信号。对于时域信号 $x(t)$,若 $x(t)$ 满足狄氏条件,在 $(-\infty, +\infty)$ 上可积,则 $x(t)$ 的傅里叶变换为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

式中: $F(\omega)$ 为傅里叶变换后的频域信号; $x(t)$ 为振动时域信号^[10]。

2.3 振动数据处理流程

本文对加速度传感器采集得到的振动信号处理流程如图 1 所示。

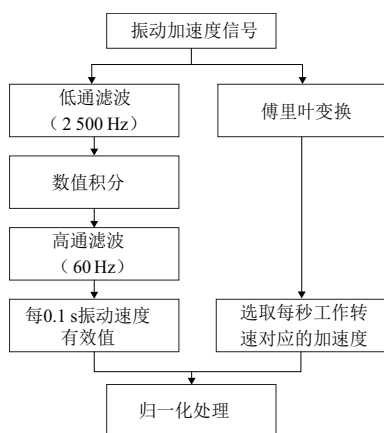


图1 振动信号处理流程

在计算振动速度有效值之前需要先对加速度传感器采集的原始信号进行低通滤波、数值积分以及高通滤波处理。低通滤波保留 2500 Hz 以下的振动信号,是为了避免高频噪声的影响。离散数值积分的目的是将加速度信号转换为速度信号。高通滤波是为了消除离散数值积分引

起的低频噪声。本文关心的是转子激振力,转子激振力由转子运动引起,主要成分为转子工作转速下的力。所以本文在傅里叶变换后,需根据辅助动力装置每秒的平均转速选取此转速对应的加速度值。

齿轮箱轴向、垂向、侧向和涡轮机匣径向振动大小各不相同,绝对值无法有效、准确反映机场风向、温度对辅助动力装置各处振动的影响。因此本文用每个加速度传感器在不同风向(温度)下的最大振动值进行归一化处理。

3 机场风向对振动的影响

3.1 机场风向对振动能量的影响

假设飞机逆风,且机场风向与飞机轴线完全平行时为 0° 。在某型号飞机辅助动力装置的齿轮箱和涡轮机匣上分别安装振动传感器,在锡林浩特机场将飞机分别放置在与机场风向成 90° 、 180° 和 270° 的位置上,如图 2 所示。空载运行辅助动力装置 2 min,测量其振动情况,重复进行 2 次试验,取 2 次试验的平均值。

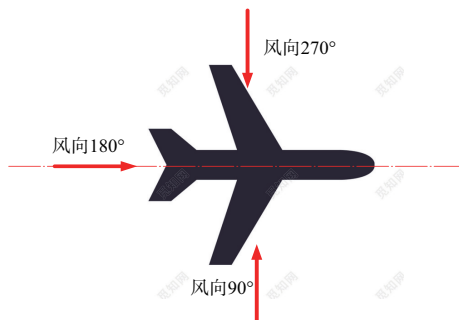


图2 飞机与机场风向相对位置

对于采集的振动数据按图 1 方法处理后得到辅助动力装置在不同机场风向下的振动速度有效值,如图 3 所示。从图中可以看出,齿轮箱轴向振动速度有效值在顺风 180° 下最大,在 90° 侧风下最小,两者振动均值相差 27.2%;齿轮箱侧向振动速度有效值也是在顺风 180° 下最大,在 90° 侧风和 270° 侧风下的差异很小,振动均值相差最大为 9.3%。齿轮箱垂向振动和涡轮机匣径向振动在 180° 顺风、 90° 侧风和 270° 侧风下差异较小,振动均值相差最大仅为 4.2%。因此,辅助动力装置在顺风下的振动能量最大,在 90° 侧风、 270° 侧风下除了齿轮箱轴向振动能量差异明显外,其余 3 个方向振动能量差异很小。这可能与辅助动力装置的进气畸变有关,本文所测试的辅助动力装置布置在飞机尾部中轴线附近,因此 90° 侧风和 270° 侧风下进气畸变差异很小,但是在顺风下,辅助动力装置进气会受到进气风门的阻挡,容易导致进气畸变的变大。

3.2 机场风向对转子激振力的影响

辅助动力装置在不同机场风向下的转子频率对应的加速度值如图 4 所示。从图中可以看出,对于齿轮箱轴向振动,顺风 180° 下的加速度值最大,侧风 90° 下的加速度值最小,加速度平均值相差 58%;对于齿轮箱侧向振动,在侧风 90° 下的加速度值最大,侧风 270° 下的加速度值

最小,平均值相差 27%;对于齿轮箱垂向振动和涡轮机匣径向振动,两者都是侧风 90°下的加速度值最大,顺风 180°下的加速度值最小,加速度平均值最大相差 33%。因

此本文辅助动力装置的轴向激振力在顺风下较大,在径向激振力在侧风下较大。这说明辅助动力装置转子振动可能受到了同方向尾椎运动的影响。

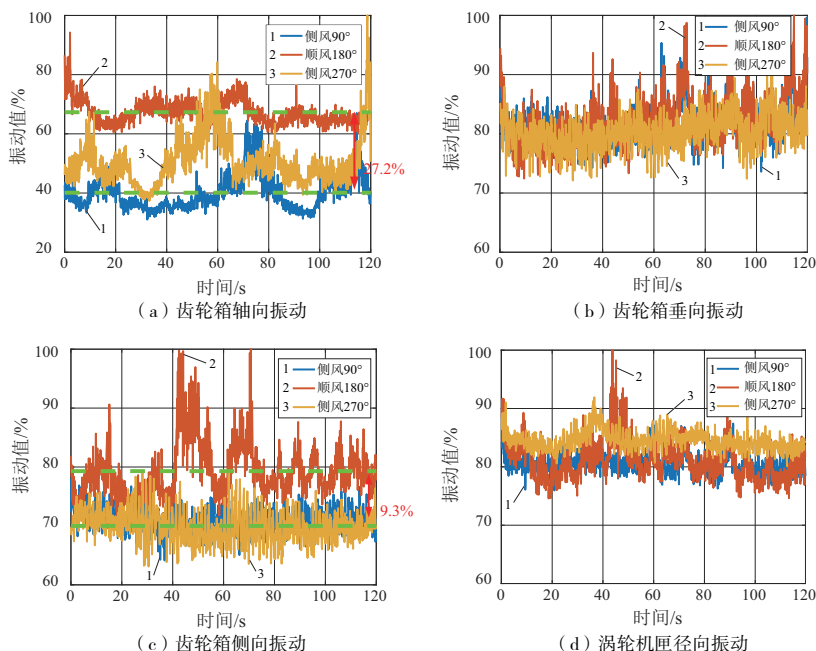


图3 辅助动力装置在不同机场风向下的振动速度有效值

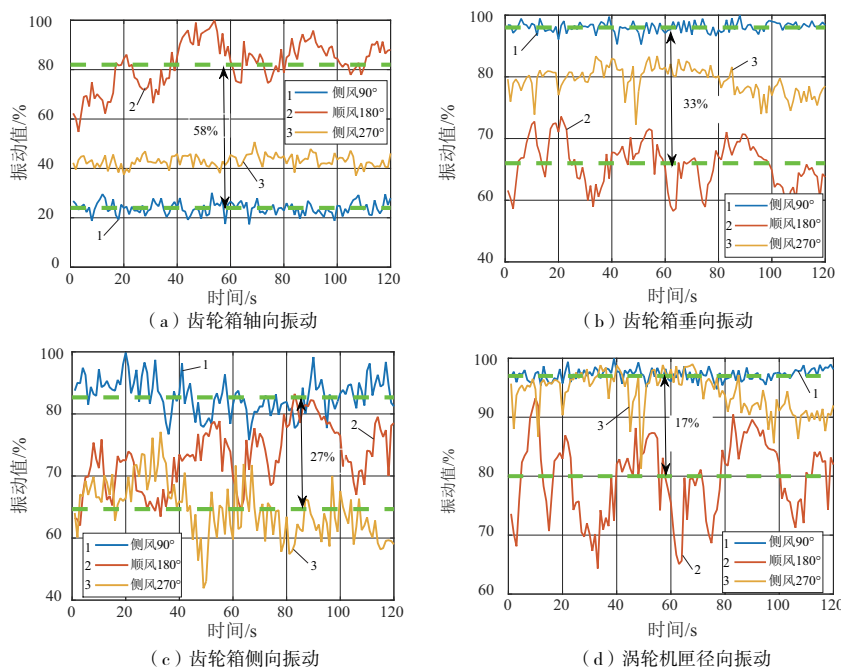


图4 辅助动力装置在不同机场风向下的振动加速度

4 机场温度对振动的影响

4.1 机场温度对振动能量的影响

在某型号飞机辅助动力装置的齿轮箱和涡轮机匣上安装振动传感器,在吐鲁番机场高温($35^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$)环境、敦煌机场常温环境($10^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$)、西安环境实验室低温环境($-10^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$)下,分别空载运行辅助动力装置 2 min,测

量其振动情况,重复进行 2 次试验,取 2 次试验的平均值。

辅助动力装置在不同温度下的振动速度有效值如图 5 所示。从图中可以看出:齿轮箱轴向、垂向、侧向和涡轮机匣径向振动速度有效值都是在高温下最大,在低温下最小;齿轮箱侧向振动速度有效值的平均值相差最大为 46.8%,涡轮机匣径向振动速度有效值的平均值相差最小为 29%。因此,在 $-10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 范围内,辅助动力装置的振动能量随着温度升高而增大。

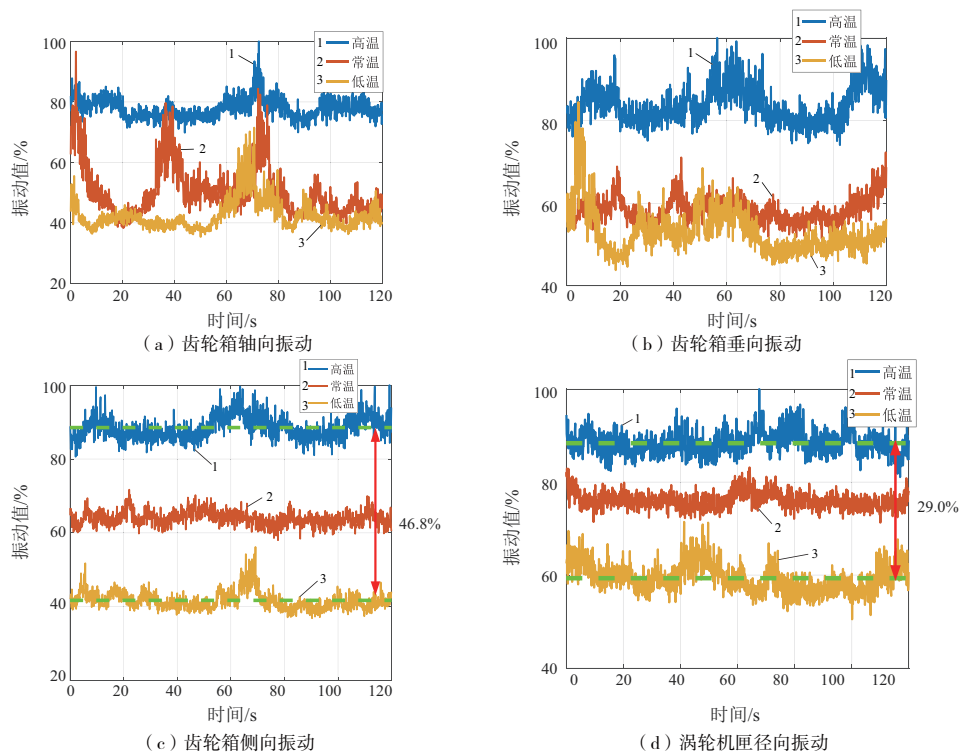


图5 辅助动力装置在不同机场温度下的振动速度有效值

4.2 机场温度对转子激振力的影响

辅助动力装置在不同温度下转子频率对应的加速度值如图6所示。从图中可以看出:对于齿轮箱轴向振动,高温下的加速度最大,常温下的加速度平均值仅比低温下的加速度平均值大0.006%;对于涡轮机匣径向振动,常温下的加速度最大,低温下的加速度最小,两者加速度平均值相差48%;对于齿轮箱垂向、侧向振动,都是高温下的

加速度最大,低温下的加速度最小,两者加速度平均值相差最大为64%。因此,在 $-10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 范围内,辅助动力装置在前轴承的转子激振力随着温度升高逐渐增大,在后轴承处的转子激振力在常温下最大,在低温下最小。

辅助动力装置的振动能量和激振力在高温下较大,在低温下最小,这可能与辅助动力装置通风冷却有关。在高温下,辅助动力装置散热效果差,易导致转子轴承间隙、转子与机匣间的间隙减小,进而导致振动变大。

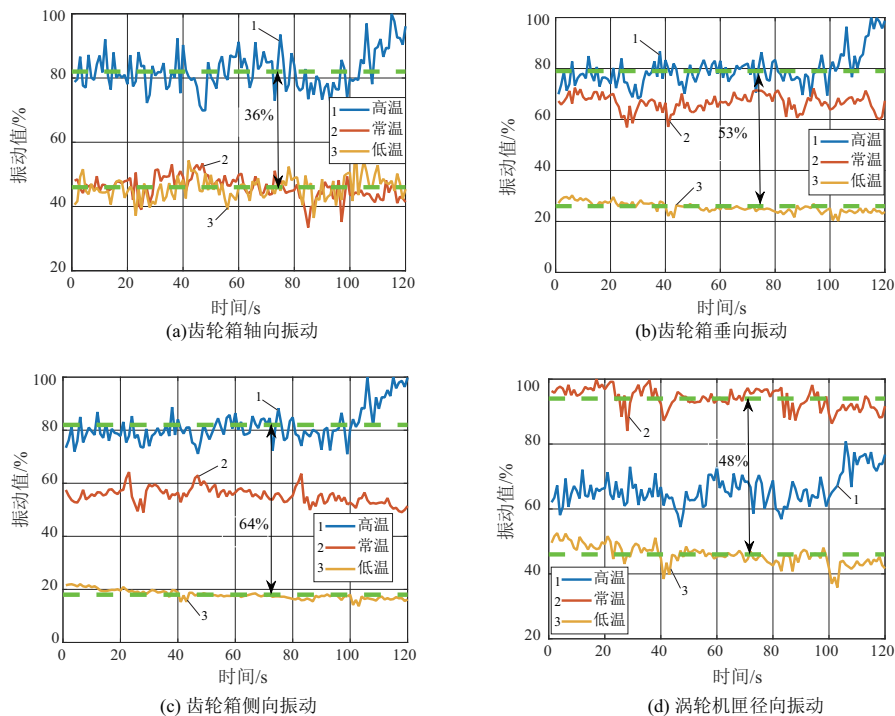


图6 辅助动力装置在不同机场温度下的振动加速度

5 结语

本文基于实机地面试验研究机场复杂环境对某型辅助动力装置振动的影响,得出如下结论:

1) 辅助动力装置在顺风下的振动能量最大,在 90° 侧风、 270° 侧风下除了齿轮箱轴向振动能量差异明显外,其余3个方向的振动能量差异很小,这可能与辅助动力装置的进气畸变有关;

2) 辅助动力装置轴向转子激振力在顺风下较大,径向转子激振力在侧风下较大,这说明辅助动力装置转子振动可能受到尾椎运动的影响;

3) 在 $-10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 范围内,辅助动力装置的振动能量和激振力在高温下较大,在低温下最小,这可能与辅助动力装置通风冷却有关。

由于试验条件的限制,本文仅针对1种型号的辅助动力装置进行研究,风向角度只选择3个极端值,低温值也远未达到我国某些机场冬天的极端温度。因此若想将本文结论推广,还需做进一步的研究。同时本文仅通过试验得出机场风向、温度对辅助动力装置振动的影响,但对于其内部机理仍需做进一步分析研究。

参考文献:

- [1] 李东杰. 辅助动力装置的应用现状和发展趋势[J]. 航空科学技术, 2012, 23(6): 7-10.
- [2] 金中平. 辅助动力装置及其标准发展综述[J]. 航空标准化与质量, 1998(4): 19-22.
- [3] 孙海东, 傅强. 航空发动机振动监测研究[J]. 机械设计与制造, 2007(2): 127-129.
- [4] 艾书民. 温度场对航空发动机转子系统动力学特性影响的研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2012.
- [5] 景晓东, 王克明, 张婷婷, 等. 稳态温度场对航空发动机静子振动特性影响的研究[J]. 中国科技纵横, 2013(1): 131-133.
- [6] 郭琪琦. 航空发动机中加速度传感器的应用[J]. 河南科技, 2011(10): 69.
- [7] 姚天忠, 瞿昌余, 胡铮浩. Shannon 采样定理中 $f_s = 2f_m$ 的讨论[J]. 苏州大学学报(自然科学), 1990, 6(1): 62-70.
- [8] 谢福缙. 用速度均方根值表示机器基础的振动烈度[J]. 工业建筑, 1990, 20(1): 32-36.
- [9] 熊帆. 航空辅助动力装置振动故障诊断技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [10] 吕书强, 李小平, 瞿晓. 快速傅里叶变换在振动预测中的应用[J]. 电气应用, 2009, 28(24): 72-74.

收稿日期: 2021-04-19

(上接第214页)

参考文献:

- [1] 于欣波, 贺威, 薛程谦, 等. 基于扰动观测器的机器人自适应神经网络跟踪控制研究[J]. 自动化学报, 2019, 45(7): 1307-1324.
- [2] 戴华东, 易晓东, 王彦臻, 等. 可持续自主学习的 micROS 机器人操作系统平行学习架构[J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(1): 49-57.
- [3] 李辉. 基于视觉技术的工业机器人焊牌流程全自动控制[J]. 现代科学仪器, 2019(6): 39-41, 46.
- [4] 姚健康, 熊根良, 张驰洲. 履带式机器人避障自动控制系统设计[J]. 南昌大学学报(工科版), 2019, 41(4): 385-390.
- [5] 方勇纯, 朱威, 郭宪. 基于路径积分强化学习方法的蛇形机器人目标导向运动[J]. 模式识别与人工智能, 2019, 32(1): 1-9.
- [6] 王万良, 张兆娟, 高楠, 等. 基于人工智能技术的大数据分析方法研究进展[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(3): 529-547.
- [7] 董朝瑞, 郭欣, 李宁, 等. 基于改进A*算法的多机器人动态路径规划[J]. 高技术通讯, 2020, 30(1): 71-81.

- [8] 曹风魁, 庄严, 闫飞, 等. 移动机器人长期自主环境适应研究进展和展望[J]. 自动化学报, 2020, 46(2): 205-221.
- [9] 王成军, 严晨. 机器视觉技术在分拣系统中的应用研究综述[J]. 制造技术与机床, 2020(5): 32-37.
- [10] 赵云涛, 李宗刚, 杜亚江. 基于最大空闲时间的分布式巡逻机器人数量优化[J]. 模式识别与人工智能, 2020, 33(4): 375-382.
- [11] 杨学科. 论人工智能机器人权利及其权利界限[J]. 天府新论, 2019(1): 81-91.
- [12] 郭宪, 方勇纯. 仿生机器人运动步态控制: 强化学习方法综述[J]. 智能系统学报, 2020, 15(1): 152-159.
- [13] 董瑶, 葛莹莹, 郭鸿湧, 等. 基于深度强化学习的移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(13): 15-19, 157.
- [14] 刘市祺, 孙晓波, 谢晓亮, 等. 基于区域建议网络和残差结构的导丝跟踪[J]. 模式识别与人工智能, 2019, 32(1): 36-42.
- [15] 包震洲, 钱泱, 周卫杰, 等. 基于GIS的智能机器人动态路径跟踪控制系统设计[J]. 科技通报, 2019, 35(12): 75-81.

收稿日期: 2021-10-08