

doi: 10.7690/bgzd.2026.01.010

微型攻角传感器的研制及应用

唐 亮, 黄伟豪, 叶继果, 邓心如

(中国空气动力研究与发展中心高速所 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对风洞试验中测量模型俯仰角问题, 提出一种微型攻角传感器的设计方案。采用一体化电路设计, 将姿态角传感组件、采集处理单元等元器件集成于传感器内部, 提升信号的抗干扰能力。使用温度补偿、多级误差修正方法进行数据修正, 同时应用卡尔曼滤波方法, 在加速度传感器测量角度的基础上, 融合振动传感器数据, 增加设备的抗振动能力并提升传感器数据精度。在风洞试验中, 通过天平 X 元测值与俯仰角的关系, 对攻角传感器测值和天平信号进行了同步修正。结果表明: 俯仰角数据精准可靠, 同步效果满足试验要求。

关键词: 攻角传感器; 卡尔曼滤波; 同步修正

中图分类号: TP212.9 **文献标志码:** A

Development and Application of Micro Angle of Attack Sensor

Tang Liang, Huang Weihao, Ye Jiguo, Deng Xinru

(High Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to solve the problem of measuring pitch angle of model in wind tunnel test, a design scheme of micro angle of attack sensor is proposed. The integrated circuit design is used to integrate the attitude angle sensing component, acquisition and processing unit and other components into the sensor to improve the anti-interference ability of the signal. Temperature compensation and multi-level error correction methods are used to correct the data, and Kalman filtering method is used to fuse the vibration sensor data on the basis of the angle measured by the acceleration sensor, so as to increase the anti-vibration ability of the equipment and improve the accuracy of the sensor data. In the wind tunnel test, the measured value of the angle of attack sensor and the signal of the balance are corrected synchronously through the relationship between the measured value of the balance X element and the pitch angle. The results show that the pitch angle data is accurate and reliable, and the synchronization effect meets the test requirements.

Keywords: angle of attack sensor; Kalman filter; synchronous correction

0 引言

模型俯仰角测量精度是影响风洞试验数据精度的重要因素^[1], 在模型内部安装攻角传感器来测量模型俯仰角是现今风洞试验的普遍方法^[2-3]。俯仰角数据的精确性及其他数据特别是天平信号的同步性是风洞试验数据精确测量的关键。

由于环境温差大以及模型尺寸的限制, 笔者研制一套高精度微型攻角传感器, 其技术指标为: 1) 俯仰角有效量程: 不小于 $\pm 35^\circ$; 2) 测量精度: 俯仰角静态误差小于 0.015° , 俯仰角动态误差小于 0.04° ; 3) 设备尺寸(含低温防护装置): 设备外轮廓不大于截面为 48 mm 直径、轴向长度 90 mm 的圆柱体, 安装面位于圆柱体端面; 4) 稳定性指标: 24 h 静态工况状态(连续工作无断电、无校准), 俯仰角稳定性优于 0.01° ; 5) 工作环境温度范围: $-60^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$ 。

1 硬件组成

微型攻角传感器包括高精度姿态传感组件、高精度采集处理单元、攻角解算修正算法、低温防护等部分。传感器组成如图 1 所示。

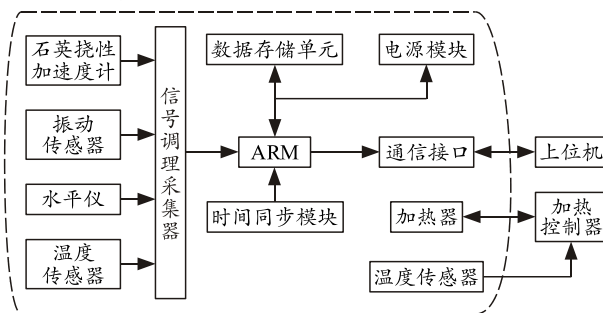


图 1 微型攻角传感器组成

沿模型轴线方向安装一个石英挠性加速度计作为测量模型俯仰角的主要元器件。使用振动传感器监测模型及攻角传感器的振动环境, 通过低通滤波算法消除高频振动加速度, 并积分导出模型的线速

收稿日期: 2024-11-26; 修回日期: 2024-12-22

第一作者: 唐 亮(1983—), 男, 四川人, 硕士。

度。温度传感器测量环境温度，用于温度补偿。高精度水平仪用于初始标定和对准，保证测量系统水平。高精度采集处理单元调理并采集高精度姿态传感组件输出的电压、电流等信号，经过解算后将数字信号上传至上位机并在本地进行存储，实现攻角实时测量。同时在攻角传感器内部布置加热薄膜，在低温环境下，对攻角传感器进行主动加热。

数据采集如图 2 所示。

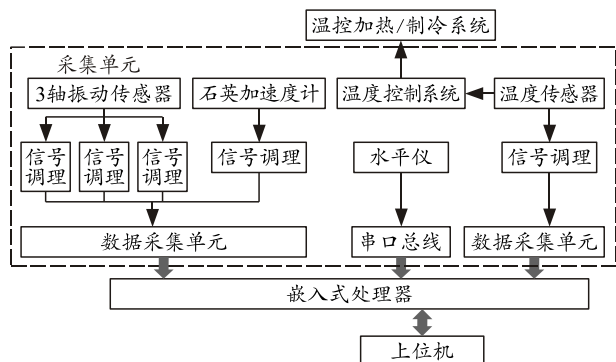


图 2 数据采集

传感器采用小尺寸 MYC-Y6ULX-V2 核心板，该核心板集成了 ARM 处理器、DDR、NAND Flash、eMMC、电源管理等电路。石英挠性传感器、振动传感器、温度传感器为模拟量输出，对其信号输出进行信号调理后再进行采集，水平仪为数字量传感器，通过 ARM 的串口总线对测量数据进行采集。

石英加速度计的精准度是保证攻角传感器精准度的关键元件。为保证石英加速度计采集精度，信号需先通过高性能运放器，将输出电压范围提高至 $\pm 2.5\text{ V}$ ，再采用 ADI 公司的 24 位 AD 采集芯片 AD7768 进行采集，其技术指标如表 1 所示。

表 1 AD7768 采集芯片性能指标

输入信号类型	差分信号	输入信号类型	差分信号
通道数	4	工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	$-40\sim 105$
转换速率/kSPS	最高 256	失调误差/ μV	± 5
动态范围/dB	108	增益误差/ppm	± 30
总谐波失真/dB	-120		

采集卡具备 4 路差分信号采集能力，分别用于采集传感器内部的加速度计信号和振动传感器的 3 轴信号。

2 误差修正方法

微型攻角传感器采用多级校准来补偿因温度变化产生的系统线性和非线性误差，建立精度校准曲线模型和温度补偿系数模型，同时应用卡尔曼滤波方法，在加速度传感器测量角度的基础上，融合了振动传感器数据，增加了设备的抗振动能力并提升

了传感器数据精度。

2.1 温度补偿修正

传感器灵敏度受温度影响，在加速度计研究与应用中，温度漂移是目前影响加速度计精度最主要的因素之一，成为高精度加速度计研究与工程应用的难题^[4-5]。

温度补偿修正，主要作用是补偿各类传感器在外部没有输入条件下、在不同温度下的零位偏移，温度补偿修正是提升加速度计精准度的常用手段^[6-7]。

微型攻角传感器采用的修正方法为：将传感器以某特定的静止状态放入温箱，采集温度传感器输出电压和传感器的输出信息。待数据采集完成后，将采集到的结果进行三阶多项式拟合。计算出各条曲线的零次项、一次项、二次项和三次项，将作为各向传感器零位温补参数，而后将参数写入到传感器存储器内。

2.2 传感器非线性误差修正

非线性误差是由传感器灵敏度随着被测信号量级增大相对于参考灵敏度的变化程度，又叫做“幅值线性度”或“非线性度”。传感器的非线性度是由于敏感元件的非线性特性、阻尼特性、迟滞或蠕变或活动部分的摩擦等因素产生的，非线性是传感器固有特性，通过校准（即实验室标定）的方式得到。非线性可用最大非线性误差表示或者分量程表示，进行非线性度误差修正可有效减少随机误差的影响^[8-9]。

通过增加传感器在不同量级条件下（特别是测量点较密的区间）的校准数据，在无校准测量点通过插值或外推方法进行修正，减少非线性误差对攻角测量结果的影响。

微型攻角传感器的非线性误差修正方法采用三阶拟合算法实现。通过离心标定试验，测试得到传感器敏感输出电压、零位偏移电压和加速度值。计算测试点上加速度输出的标准差，从而得到敏感轴的拟合系数，包括零位偏值、一阶系数、二阶系数、三阶系统。

2.3 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波器是一种最优化的、递归的、数字处理的算法，其通过将多个传感器或测量器的数据进行融合，利用概率论和线性系统理论对状态进行估计和预测，从而有效地解决上述不确定性带来的

问题^[10]。由于上述特性，卡尔曼滤波器在姿态角估算中得到了广泛应用^[11~13]。

在微型攻角传感器的角度计算中，采用加速度传感器测量角度，振动传感器测量加速度，应用卡尔曼滤波对其进行数据融合。

卡尔曼滤波的步骤为：

1) 计算先验状态估计：

$$\hat{\mathbf{x}}_{[k]}^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{[k-1]} + \mathbf{B}u_{[k-1]}. \quad (1)$$

式中： \mathbf{x} 为 3 维向量，其对应关系为[角度值，角速度值，角加速度值]； $\hat{\mathbf{x}}_{[k]}^-$ 为 k 时刻先验状态估计值； \mathbf{A} 为状态矩阵； $\hat{\mathbf{x}}_{[k-1]}$ 为 $k-1$ 时刻后验状态估计值； \mathbf{B} 为输入矩阵； $u_{[k-1]}$ 为 $k-1$ 时候的系统输入值，及振动传感器测量的加速度。

2) 计算先验状态估计误差协方差矩阵：

$$\mathbf{P}_{[k]}^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_{[k-1]}^-\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}. \quad (2)$$

式中： $\mathbf{P}_{[k]}^-$ 为 k 时刻先验状态估计协方差； $\mathbf{P}_{[k-1]}^-$ 为 $k-1$ 时刻后验状态估计协方差； \mathbf{Q} 为过程噪声协方差。

3) 计算卡尔曼增益：

$$\mathbf{K}_{[k]} = \mathbf{P}_{[k]}^- \mathbf{H}_m^T / (\mathbf{H}_m \mathbf{P}_{[k]}^- \mathbf{H}_m^T + \mathbf{R}_c). \quad (3)$$

式中： $\mathbf{K}_{[k]}$ 为 k 时刻的卡尔曼增益； \mathbf{H}_m 为观测矩阵； \mathbf{R}_c 为观测噪声的协方差。

4) 计算后验状态估计：

$$\hat{\mathbf{x}}_{[k]} = \hat{\mathbf{x}}_{[k]}^- + \mathbf{K}_{[k]}(\mathbf{z}_{[k]} - \mathbf{H}_m \hat{\mathbf{x}}_{[k]}^-). \quad (4)$$

式中 $\mathbf{z}_{[k]}$ 为观测向量。

5) 更新后验状态估计误差协方差矩阵：

$$\mathbf{P}_{[k]} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{[k]} \mathbf{H}_m) \mathbf{P}_{[k]}^-. \quad (5)$$

将卡尔曼滤波算法计算得到的 $\hat{\mathbf{x}}_{[k]}$ 为最终俯仰角，实时上传至上位机，上位机同时保存攻角传感器、天平等数据。

3 传感器数据同步修正

微型攻角传感器的数据信号生成过程包括数字低通滤波、振动修正、离心加速度修正、温度补偿、卡尔曼滤波等复杂算法，这些计算过程需要时间，造成传感器数字信号输出延时。天平的原始数据因为滤波处理也会造成延时，由于处理过程不变，2 个系统的延时时间相对稳定。数据同步修正就是要将这种信号固定的时序差找出来，根据时序差调整俯仰角和天平测值的时序，曲线表现为平移过程。

在风洞连续变攻角试验中，对俯仰角测值和天平

测值的同步性要求很高。风洞常用方法采用互相关函数进行同步修正^[14~15]。该方法以俯仰角为基准，使用互相关函数计算其他信号与俯仰角信号之间的时序差。参与互相关函数计算的信号关系来源于岗位人员的经验总结，并未建立信号之间的数学模型。本次同步修正方法依据风洞无风状态下，天平 X 元数据和攻角传感器的数学模型：

$$X = Y_g \sin(\text{Alpha}). \quad (6)$$

式中： X 为天平 X 轴方向受力，由采集的天平电压值计算得出； Alpha 为攻角传感器测值。数据同步修正就是将天平 X 元测值为标准，计算得到与攻角数据的时序差。采用最小二乘法拟合方法，在冗余时间段内差量循环使用最小二乘法拟合，最终得到最小残差值以此来确定相对时序差。

最小二乘法是一个最优化的问题，通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配，基于相对误差最小二乘法则是寻找相对误差的平方和最小来寻求最优解，迭代方法采用高斯—牛顿迭代法。该法使用泰勒级数展开式去近似地代替目标函数，通过多次迭代，多次修正待定系数，使待定系数不断逼近目标函数的最佳待定系数，使原函数的相对误差平方和达到最小。

预估信号之间的时序差在 2 s 以内，即计算 $t \in [-2, 2]$ 范围内，以最小二乘法，计算每个 t 时刻对应的残差值 $\varepsilon[t]$ ：

$$\varepsilon[t] = \min \left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (X[i+t] - \hat{Y}_g \sin(\text{Alpha}[i]))^2 \right). \quad (7)$$

索引计算得到的残差数组，找到残差值最小对应的 t_{\min} ，该 t_{\min} 即为天平 X 元和攻角传感器测值拟合最好的相对时序差。

$$t_{\min} = \text{argmin}(\varepsilon[t]). \quad (8)$$

以最小二乘法同步修正方法为基础编写同步修正计算程序，无风情况下，走攻角测自重，计算结果如图 3 所示。

由图 3 可见：攻角传感器 19 行对应天平数据的 0 行，系统连续数据的保存频率为 50 Hz，即一行数据时间间隔 0.02 s，表明攻角传感器测值滞后天平测值 0.38 s。

4 数据验证

4.1 微型攻角传感器精准度验证

将微型攻角传感器安装于高精度转台上，转台的角度测量精度为 0.02°。表 2 为环境温度 18 °C 时微型攻角传感器测值，误差最大为 0.002°。

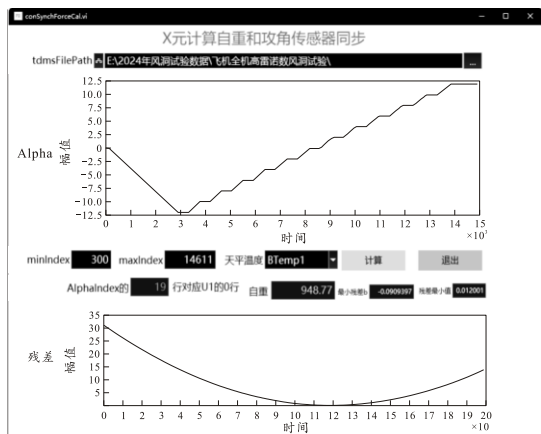


图 3 同步修正算法软件运行界面

表 2 环境温度 18 ℃ 时传感器测值

转台标准值 $\alpha/(^{\circ})$	角度测量值 $\alpha/(^{\circ})$	误差 $\Delta\alpha/(^{\circ})$	传感器温度 $T/^{\circ}\text{C}$
35	35.002	0.002	44.6
15	15.002	0.002	44.7
10	10.001	0.001	44.9
5	5.001	0.001	44.7
0	0	0	44.6
-5	-5.000	0	45.0
-10	-10.001	-0.001	45.0
-15	-15.001	-0.001	45.1
-35	-35.000	0	45.1

表 3 为环境温度在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内，微型攻角传感器测值。

表 3 环境温度 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内传感器测值

环境温度 $T/^{\circ}\text{C}$	转台标准值 $\alpha/(^{\circ})$	角度测量值 $\alpha/(^{\circ})$	角度误差 $\Delta\alpha/(^{\circ})$	传感器温度 $T/^{\circ}\text{C}$
18	15	15.003	0.003	39.9
-10	15	15.002	0.002	40.2
-30	15	15.004	0.004	39.2
-40	15	15.004	0.004	38.2
-60	35	35.003	0.003	32.7
-60	15	15.005	0.005	32.7
-60	0	0	0	32.7
-60	-15	-15.001	0.001	32.7
-60	-35	-35.000	0	32.6

误差最大为 0.005° 。结果表明静态精度小于 0.01° ，满足技术指标要求。

4.2 同步性验证

使用最小二乘法拟合计算的时序差进行数据同步修正，开展阶梯试验和连续试验的对比较验证。CL-Alpha 曲线如图 4 所示。

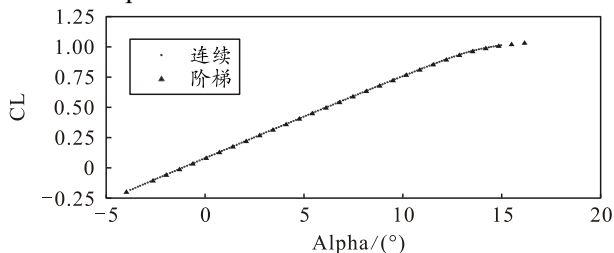


图 4 CL-Alpha 曲线

最大差量为 $\Delta\text{Alpha} < 0.01^{\circ}$ 。CL-CD 曲线如图 5 所示。

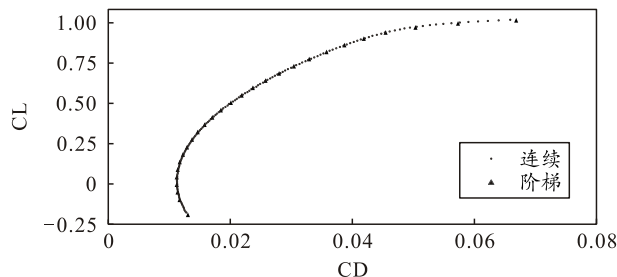


图 5 CL-CD 曲线

试验结果表明，连续与阶梯试验结果吻合度较好。图 5 中最大差量 $\Delta\text{CD} = 0.000\ 2$ 。满足试验精度要求。

5 结束语

微型攻角传感器采用集成设计方案，将 AD 采样、采样驱动、精度补偿、数字滤波、多通道数值计算等功能模块融合到测姿组件内部的一体化电路板，其精准度高、抗干扰能力强。采用多级校准来补偿因温度变化产生的系统线性和非线性误差，建立精度校准曲线模型和温度补偿系数模型，同时应用卡尔曼滤波方法，在加速度传感器测量角度的基础上，融合了振动传感器数据，增加了设备的抗振动能力并提升了传感器数据精度。结合风洞试验的同步修正算法，成功应用于风洞阶梯及连续试验，数据结果证明微型传感器的研制与应用已取得了良好的实用价值。

参考文献：

- [1] 王瑞波, 李平, 谢艳, 等. 攻角传感器在 2.4 m 跨声速风洞中的应用[J]. 兵工自动化, 2007, 26(7): 80-85.
- [2] 恽起麟. 实验空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991: 193.
- [3] 姜金俊, 陈连忠, 徐芮. 风洞试验模型姿态精确计算[J]. 兵工自动化, 2024, 43(1): 56-61.
- [4] 陈福彬, 张科备. 石英挠性加速度计温度补偿算法[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(1): 98-102.
- [5] 张金云, 姜欢, 赵军虎, 等. 惯性平台系统石英加速度计温度建模补偿技术[J]. 导航与控制, 2021, 20(3): 66-73.
- [6] 付红坡, 温云同, 苗凤海, 等. 一种新的基于 SCM_ANFIS 的加速度计温度建模与补偿方法[J]. 传感技术学报, 2019, 32(12): 1795-1801.
- [7] 于湘涛, 张兰, 郭琳瑞, 等. 基于小波最小二乘支持向量机的加速度计温度建模和补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1): 95-98.

- [8] 万波. 加速度计非线性动态建模方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- [9] 刘艳霞, 方建军, 宋玉秋, 等. 基于非线性变换的加速度计误差标定与补偿[J]. 宇航计测技术, 2016, 36(2): 37-41.
- [10] 王天威, 黄军魁. 控制之美(卷 2)-最优化控制 MPC 与卡尔曼滤波器[M]. 北京: 清华大学出版社, 2023: 133.
- [11] 陈航科, 张东升, 盛晓超, 等. 基于 Kalman 滤波算法的姿态传感器信号融合技术研究[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(12): 82-89.
- [12] 张立中, 胡瀚元, 洪进, 等. 基于 Kalman 滤波算法角度测量信号融合技术研究[J]. 长春理工大学学报, 2015, 38(1): 94-97.
- [13] 陈伟. 基于四元数和卡尔曼滤波的姿态角估计算法研究与应用[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [14] 谢艳, 李平, 蒋鸿, 等. 2.4 m 跨声速风洞连续变迎角试验关键技术研究[J]. 实验流体力学, 2014, 28(1): 89-93.
- [15] 黄昊宇, 黄辉, 凌忠伟, 等. 某式某型高超声速风洞连续变攻角测力试验测试系统研制及关键技术研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2021, (2): 33-37.

(上接第 21 页)

由图 7—9 对比观察可以发现, 验证组中的 4 组图像识别边缘清晰, 物体之间的空间分布界限识别准确, 且前景与背景之间的划分相对精准, 没有出现景物分布混乱的现象; 反观对比组 E_1 算法处理的 4 组图像, 虽然景物边界及其空间关系完成了识别, 但存在边界混乱, 前景与背景划分模糊的问题; 而 E_2 算法所处理的 4 组图像虽然边界清晰, 前景与背景划分准确, 但细节特征丢失严重, 局部物体类型属性信息存在混淆现象; 在整体特征识别精度及其细节特征属性分类精度的角度上分析, 验证组各项指标均优于对比组; 基于上述分析, 可以判定该项目测试中表现最佳的算法为验证组代表的深度学习算法。

3 结束语

通过引入深度学习算法, 对室内图像特征进行凹凸特征学习, 并根据全新特征重新优化类别分类策略, 实现高精度识别效果。提出算法对深度学习算法的多样应用与研究, 提供了一种全新的设计思路。通过对设计过程的研究与测试数据的分析发现, 提出算法设计虽然参量结构设计巧妙, 问题入手点选择精准, 但是在图像边缘的特征约束方面设计过于薄弱, 由此在特征像素边缘化集中的图像识别场景, 设计算法存在大概率识别错误的缺陷。为了避免该缺陷对其效果的负面影响, 必须在日后优化过程中逐步更新边缘平滑系数, 替换原始窗口平滑系数, 使其与当前识别边缘阈值保持平衡, 形成约束关系, 以此确保设计算法的稳定状态。

参考文献:

- [1] 刘惠中, 宁剑, 邹起华, 等. 基于深度学习的螺旋选矿机矿物分带图像特征信息提取方法研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(12): 91-99.
- [2] 石志彬, 罗望春, 莫兵兵, 等. 基于深度学习的电力巡
- [3] 陈博勋, 王宏铭, 王玲, 等. 基于深度学习的镜下矿物图像识别方法[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(11): 163-170.
- [4] 王亮, 陈建华, 李烨. 一种基于深度学习的无人艇海上目标识别技术[J]. 兵工学报, 2022, 43(S2): 13-19.
- [5] 黄程, 曾志高, 朱文球, 等. 基于弱监督多注意融合网络的细粒度图像识别[J]. 现代信息科技, 2022, 6(21): 78-82, 87.
- [6] 胡晓斌, 彭太乐. 基于数据增强视觉 Transformer 的细粒度图像分类[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 9-16.
- [7] 朱小燕, 利节, 王东. 深度学习和图像识别[J]. 电子技术应用, 2022, 48(11): 75.
- [8] 郭敏, 王超, 范青荣, 等. 基于人机共识标记的室内移动机器人定位技术研究[J]. 现代电子技术, 2022, 45(20): 183-186.
- [9] 范兴奎, 刘广哲, 王浩文, 等. 基于量子卷积神经网络的图像识别新模型[J]. 电子科技大学学报, 2022, 51(5): 642-650.
- [10] 陈牧图, 谭睿, 石垒垒, 等. 基于深度学习的智能垃圾分类系统设计[J]. 电子测试, 2022, 36(17): 12-14, 18.
- [11] 汤永涛, 林鸿生, 刘兴. 基于深度学习的水下光学图像分类识别方法研究[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(8): 189-194.
- [12] 董庆伟. 弱监督下基于 SSD 模型的低照度交通图像分类识别[J]. 北部湾大学学报, 2022, 37(4): 37-42.
- [13] 彭治, 刘杨, 杜永萍, 等. 基于迁移学习的多场景垃圾图像分类方法[J]. 计算机技术与发展, 2022, 32(5): 106-111.
- [14] 邓晖, 邓逸川, 欧智斌, 等. 单目视觉技术在室内定位中的应用研究[J]. 测绘工程, 2021, 30(6): 8-15.
- [15] 焦传佳, 江明. 基于 AprilTag 图像识别的移动机器人定位研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 110-119.