

引用格式:韩秀枫,吴剑,穆忠伟.四旋翼无人机斜面降落系统设计[J].电光与控制,2019,26(11):65-69. HAN X F, WU J, MU Z W. Design of a quad-rotor UAV slope landing system[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(11):65-69.

四旋翼无人机斜面降落系统设计

韩秀枫^{1,2}, 吴 剑¹, 穆忠伟¹

(1. 南昌航空大学,南昌 330063; 2. 中国科学院深圳先进技术研究院,广东 深圳 518055)

摘 要:对于复杂环境下四旋翼无人机(UAV)在斜面上完成精准降落,提出了一种新颖的系统框架。通过带有板载大疆 Manifold,视觉传感器 guidance 的四旋翼无人机实现斜面平稳降落。采用比例—积分—微分(PID)控制方法对无人机的自主降落控制算法进行了优化,Manifold 对获取的导航数据进行实时计算,四旋翼无人机可以精准到达降落点上空。提出通过代价函数筛选四旋翼无人机平台大疆(DJI) M100 采集的数据,并采用反向补偿算法完成了在斜面上的精准降落。实验结果表明,所提算法能够有效保持四旋翼飞机在飞行时的位姿稳定,并能在斜面上精准降落。

关键词:四旋翼; PID 控制器; 斜面降落; 反向补偿算法

中图分类号: V249.1 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.11.014

Design of a Quad-rotor UAV Slope Landing System

HAN Xiu-feng^{1,2}, WU Jian¹, MU Zhong-wei¹

(1. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract: For the quad-rotor UAV to achieve accurate landing on the slope in the complex environment, a novel system framework is proposed. The quad-rotor UAV with Manifold and visual sensor guidance is used to realize smooth slope landing. The autonomous landing control algorithm of the drone is optimized by using the Proportional-Integral-Derivative (PID) control method. After Manifold calculates the navigation data in real time, the quad-rotor UAV can accurately reach the position above the landing point. It is proposed to screen the data collected by the quad-rotor UAV platform DJI M100 through the cost function, and accurate landing on the slope is accomplished by using the reverse compensation algorithm. The experimental results show that the proposed algorithm can effectively maintain the stability of the quad-rotor UAV during flight and can accurately land on the slope.

Key words: quad-rotor; PID controller; slope landing; reverse compensation algorithm

0 引言

精准定位是精准降落的前提,目前无人机室外定位大多采用全球定位系统(GPS)和惯性组合导航^[1],使用滤波算法融合 GPS 和惯性导航系统(INS)计算得到位移,通过结合两种传感器各自的优点,提高无人机的室外定位精度^[2]。四旋翼无人机降落大多是在平面上完成,而在倾斜地面等复杂的室外环境下稳定精准降落就存在一定的难度。

本文用大疆(DJI) M100 无人机平台进行实验,用机载软件开发工具包 Onboard SDK 进行开发^[3],主

要解决无人机在室外环境下的定位及无人机实现斜面精准降落的问题。通过融合 GPS_Fused 与 guidance 所获取的信息,提高无人机的室外定位精度^[4],GPS_Fused 是机载 GPS 与惯性测量单元(IMU)通过 DJI SDK 融合的数据。对 guidance 和 GPS_Fused 标定后,获取数据进行保存并处理,将 guidance 数据和 GPS_Fused 数据通过核自适应滤波算法进行融合,并使用线性的回归函数分析非线性数据,计算得出滤波器的系数矩阵,最终实现室外环境下高精度定位^[5]。控制算法采用 PID 位置控制器^[6]和 PID 姿态控制器^[7]。当 DJI M100 到达斜面目标正上方时,通过 guidance 下方的超声波组件检测和识别并计算需要到达的位置,为后续降落做好准备^[8]。为了实现平稳降落,保持一个平稳的运动状态,DJI M100 的机载 guidance 能够实时

收稿日期:2018-12-07 修回日期:2019-06-03

基金项目:航空科学基金(2016ZC56003)

作者简介:韩秀枫(1992—),男,河南三门峡人,硕士生,研究方向为无人机导航及控制。

对相对位置进行计算^[9],本文实验采用多步控制法,让控制信号更加光滑,避免产生超调现象的无人机抖动,从而能够最终达到一个平稳的操作,来保证无人机相对于平台的软着陆^[10]。斜面降落采用反向补偿算法实现,前提是先采集 DJI M100 不同横滚角和不同角度降落时的漂移距离,并进行训练学习,根据代价函数找出最可靠的方案。在 guidance 识别斜体的位置和姿态后,根据补偿算法完成斜面降落。

1 无人机定位系统

1.1 数据融合概述

本文实验通过核自适应滤波算法融合 GPS_Fused 和 IMU 计算得到位移并提高定位精度,如图 1 所示。对 guidance 和机载导航系统采集的信号进行建模,定义各自的核函数,映射到各自的高维线性可分空间,核函数的张量积定义了新的高维特征空间^[5]。在新的三维空间中, guidance 和机载导航系统采集的信号可以

$$\mathbf{R}_b^n = R(\psi, \varphi, \theta) = R_z(\psi)R_y(\varphi)R_x(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \psi \cdot \cos \varphi & \cos \psi \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta - \sin \psi \cdot \cos \theta & \cos \psi \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta - \sin \psi \cdot \sin \theta \\ \sin \psi \cdot \cos \varphi & \sin \psi \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta + \cos \psi \cdot \cos \theta & \sin \psi \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta - \cos \psi \cdot \sin \theta \\ -\sin \varphi & -\cos \varphi \cdot \sin \theta & \cos \varphi \cdot \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: ψ, φ, θ 分别表示偏航角、横滚角、俯仰角。无人机在世界坐标系下的加速度 \mathbf{a}_n 为

$$\mathbf{a}_n = \mathbf{R}_b^n \cdot \mathbf{a}_b + \mathbf{G} \quad (2)$$

式中: \mathbf{a}_b 表示机体坐标系下的加速度; $\mathbf{G} = (0 \ 0 \ -g)$, g 为重力加速度,取值为 9.8 m/s^2 。无人机在世界坐标系下的速度和位置分别为

$$\mathbf{v}_k = \mathbf{v}_{\text{start}} + \sum_{i=0}^k \mathbf{a}_n^{(i)} \cdot \Delta T \quad (3)$$

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{\text{start}} + \sum_{i=0}^k \left(\mathbf{v}_i \cdot \Delta T + \frac{1}{2} \mathbf{a}_n^{(i)} \cdot \Delta T^2 \right) \quad (4)$$

式中: \mathbf{v}_k 为无人机当前速度; $\mathbf{v}_{\text{start}}$ 为起始速度(实验中起始速度设置为零); \mathbf{X}_k 为无人机当前位置; $\mathbf{X}_{\text{start}}$ 为起始位置; ΔT 为时间间隔。实验中,首先将采集到的 IMU 数据和 GPS_Fused 数据按照时间戳进行匹配,并计算出机体坐标系到世界坐标系的变换矩阵^[5]。

1.3 核自适应滤波

核自适应滤波是先使用核函数将原空间的数据映射到新的高维特征空间,然后在新的高维特征空间中用线性学习方法从训练数据中学习模型。输入信号为 $u(n)$, 输出信号为 $y(n)$, 期望信号为 $d(n)$, 误差 $e(i) = d(i) - y(i)$ 。对目标函数使用最小化均方差(LMS)的优化算法更新滤波器的参数,使得误差收敛。

对公式解算出的加速度 \mathbf{a}_i 和 GPS_Fused 输出的 x_i 分别进行核映射 $\varphi(\mathbf{a}_i)$ 和 $\psi(x_i)$, 映射到两个高维特征

使用线性数据的特征分析方法,将获取到的 guidance 数据和 GPS_Fused 数据采用核最小均方差^[11]算法分析,得出符合数据特征的滤波器系数^[5,12]。

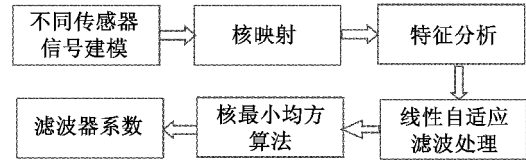


图1 定位算法框图

Fig. 1 Flow chart of the positioning algorithm

1.2 INS 数据处理

定义 DJI M100 所在的坐标系为机体坐标系,导航所对应的地面坐标系为世界坐标系。通过旋转矩阵和平移向量组成的转换矩阵可以得到世界坐标系下的无人机位移^[5,13]。

本文以欧拉角形式表示旋转,得到机体坐标系到世界坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R}_b^n 为

空间 RKHS^[11]。 Ω 作为滤波权重函数, (\mathbf{a}_i, x_i) 作为输入, $\Phi(\mathbf{a}_i, x_i)$ 为输入空间到特征空间变换函数, n 时刻 $\Omega(n)$ 为

$$\Omega(n) = \eta \sum_{i=0}^{n-1} e(i) \Phi(\mathbf{a}_i, x_i) \quad (5)$$

输出为

$$\begin{aligned} y(n) &= \langle \Omega(n), \Phi(\mathbf{a}_n, x_n) \rangle = \\ &= \eta \sum_{i=0}^{n-1} e(i) \langle \Phi(\mathbf{a}_i, x_i), \Phi(\mathbf{a}_n, x_n) \rangle = \\ &= \eta \sum_{i=0}^{n-1} e(i) K(u(i), u(n)) \end{aligned} \quad (6)$$

高斯径向基函数可以将一个特征样本映射到一个更高维的空间内,而且其相对于多项式核函数参数要少,因此优先使用高斯核函数,高斯核函数为

$$K(x, y) = \exp \left(-\frac{\|x - y\|^2}{2\sigma^2} \right) \quad (7)$$

通过 DJI Onboard SDK 中的 broadcast 函数读取到获取的位置信息,使用 GPS_Fused 得出轨迹,读取 IMU 的线性加速度和已经匹配的 Ground-truth。通过式(5)计算出 n 时刻的权重 Ω_n ,通过式(6)得出融合后的轨迹。

2 斜面降落原理

2.1 反向补偿理论

有了 1.3 节准确的导航数据,降落就能够更精确。

假设 UAV 长度为 $2a$, 斜面中心距地面高度为 h , 可通过 guidance 下端的超声模块测得, guidance 安装于 DJI M100 下方且方向朝下有个视觉模块, 在 guidance 的观测下 DJI M100 可在斜体上方巡视, 并通过 guidance 可计算出斜面与地面夹角为 α , 如图 2 所示。

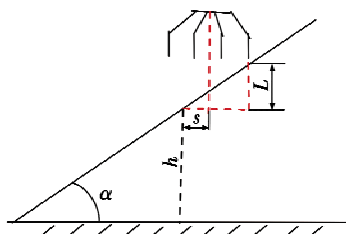


图 2 斜面及无人机示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the bevel and drone

根据普通四旋翼飞行器气动性原理, 当 DJI M100 以一定的横滚角度下降时, 机体会向横滚一侧漂移, 导致不能精准降落。分析离线训练得出在不同横滚角下降漂移的距离 s , 用这些数据对降落进行补偿, DJI M100 先到达斜面降落点上方高度为 h' 的地方, 再向高一侧水平飞行距离为 s , 等待降落。

M100 从临界高度 h' 开始降落到降落完成, 下降的高度为 L , 则 L 与漂移距离 s 需要满足

$$h' = L + h \tag{8}$$

$$L = s \cdot \tan \alpha + a \cdot \tan \alpha \tag{9}$$

2.2 控制算法

DJI M100 无人机有两种控制方式: 位置控制和速度控制。如图 3 所示, 位置控制器由位置环和速度环两部分构成, 由于本文是横滚降落, 主要研究 Y 轴和 Z 轴的变化。读取的数据通过 broadcast 得到, 用户通过调用 API 设定数据。结合 PID 控制算法, 可以实现 DJI M100 精准稳定降落。

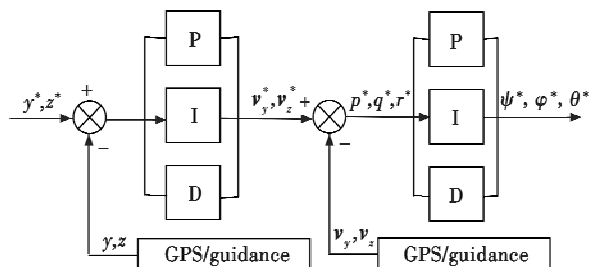


图 3 位置控制器

Fig 3 Position controller

下降时保持与斜体一致的角度, 该过程通过调用 DJI 官方 API 里面的姿态控制函数完成。DJI M100 的位姿控制引入 PID 控制算法, 能够得到相应的输入变化量, 提高降落的可靠性, 如图 4 所示。姿态控制器由

内环、外环 2 个闭环构成, 内环为角速度控制环, 采用 P 控制, 基于机体坐标系, 其反馈信号为陀螺仪角速度输出 p, q, r 。外环为角度控制环, 基于大地坐标系, 反馈信号为欧拉角输出, 采用比例—积分—微分 (PID) 控制。内环和外环的反馈信号由姿态控制器得出的控制量 u_1, u_2, u_3 输入到控制对象 UAV, 通过 IMU 读取。

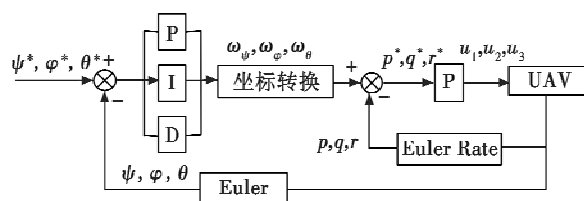


图 4 姿态控制器

Fig. 4 Attitude controller

3 降落实验及验证

3.1 计算反向飞行距离

如图 5 所示, 以 DJI M100 无人机为平台, 在 DJI Onboard SDK 上开发程序。基于 Arm 架构的机载计算机 Manifold 搭载 NVIDIA Tegra K1 处理器, 主存 2 GiB, 最高主频 2.2 GHz, 操作系统为 Ubuntu14.04^[14]。运用 DJI 提供的无人机仿真飞行平台进行仿真实验测试以及训练数据的采集^[2]。



图 5 DJI M100 无人机

Fig. 5 DJI M100 drone

用 USB 转串口线将 DJI M100 与 Linux 电脑连起来, 并用 USB 线连接 DJI 提供的仿真飞行平台。设定一个起飞高度, 起飞完成后, 让 DJI M100 保持一定的姿态降落, 为了减少与斜坡的冲击力, 尽可能地设置较小的下降速度垂直分量, 直到 DJI M100 降落至地面。在寻找最佳下降点时, 构造一个代价函数为

$$f = k_1 f_1 + k_2 f_2 \tag{10}$$

$$f_1 = v_y^2 + v_z^2 \tag{11}$$

式中: f 为评价函数; k_1, k_2 为参数; f_1 为安全函数, 与着地时的动能有关; f_2 为降落点的水平误差。本文在 4 个不同倾角上实验, 经过大量实验调节不同的 v_z 得出这 4 个角度代价函数最小的点, 用串口打印并拟合出轨迹,

再通过式(9)绘出一条 L 关于 s 的直线,找到轨迹与该线的交点即 s 。 a 为 DJI M100 宽度的一半,取值 0.23 m 。

如图 6 所示,当无人机保持横滚角为 10° 下降时, $s = -0.016\text{ m}$; 15° 下降时, $s = -0.016\text{ m}$; 20° 下降时, $s = -0.037\text{ m}$; 25° 下降时, $s = -0.023\text{ m}$ 。由于是反向水平飞行,从图 6 得到的 s 需要取其相反数。

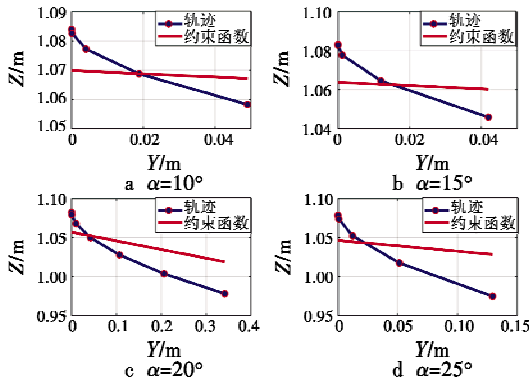


图 6 不同下落姿态的 s

Fig. 6 s of different falling postures

3.2 实验轨迹

为了让轨迹可视化效果更好,在仿真飞行时将采集的数据通过串口输出,并在 Matlab 2016b 上进行飞行轨迹演示。本文实验让 DJI M100 起飞到 h' 高度,再向斜体高一侧水平飞行一定距离 s ,然后保持一定的横滚角度降落,所以只提取 Y 与 Z 坐标。本文实验采用的 PID 参数遵循先对内环整定再对外环整定,由小到大找的规则。最终参数:姿态控制器内环 P 系数为 0.17 ,外环 P 系数为 3.2 ,I 的系数为 0.15 ,D 系数为 0.12 ;位置控制器内环 P 系数为 0.34 ,I 系数为 0.01 ,D 系数为 0.23 ;外环 P 系数为 0.2 ,I 系数为 0.01 ,D 系数为 0.23 。根据 3.1 节结论得出的 s 确定反向水平补偿距离并预计下落高度 L 。本文实验固定 L 变量,当无人机降落 L ,停止螺旋桨转动,关闭电机,读出 Y 坐标所在的位置,如图 7 所示。当斜体角度过小时可以常规慢速降落,而 DJI M100 的极限横滚角为 35° ,根据 3.1 节的结论本文实验选取的下降姿态角度分别为 $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 和 25° 。从图 7 可以看出,由于采用了 PID 控制器,当无人机在水平偏移飞行时会先飞过设定值,在摆动后很快会回到设定值,并采用分步控制法,使无人机在水平方向飞行时能及时判断准确度,所以可以看出每个动作完成时附近的点比较密。 $\alpha = 15^\circ$ 和 $\alpha = 20^\circ$ 用了相同的垂直控制量,可看出,相同的下降速度垂直分量下,不同姿态角需要水平偏移的距离也不同,当斜体的角度较小时,需要水平反向偏移的距离会小些,并且 L 、水平误差和落地动能都会小一

些,反之会大一些。

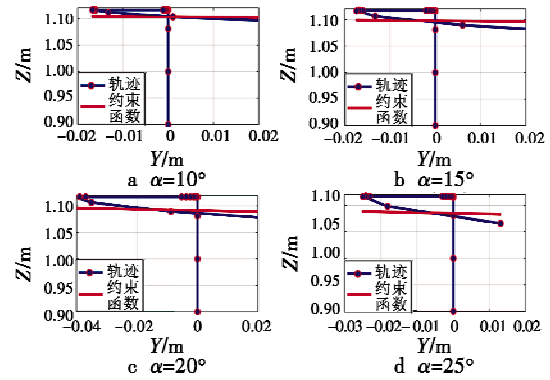


图 7 不同下落姿态的轨迹图

Fig. 7 Trajectory map of different falling postures

3.3 误差分析

本文实验 UAV 飞行全过程可以分为 3 个阶段,分别为起飞到 h' 高度、反向水平飞行、保持一定的横滚角度降落。由图 7 可以看出,每次起飞的高度都为 1.12 m ,由于模拟环境的原因,会有一点点小波动。为了确保上一个动作完成后再开始下一个动作,前两个动作都加了延迟函数。在保证代价函数最小的情况下进行降落,最终的降落点都存在一定的误差,这是由于导航的精准度以及串口通信的准确度等原因,如果 v_z 取值合理,实验结果最大误差在水平距离 0.02 m 之内。

v_z 设置为 0.1 m/s ,当 $\alpha > 15^\circ$ 时误差会非常大,由图 8a 可知,当 $\alpha = 25^\circ$ 时,飞行轨迹与约束函数没有交点,所以该下降速度对 $\alpha > 25^\circ$ 的情况不适用;图 8b 为选取垂直控制量过大的情况,导致着陆时水平速度 $v_y = 0.88\text{ m/s}$ 。针对 $\alpha > 25^\circ$ 的情况,可以适度加大垂直方向的控制量,但水平补偿飞行距离会变小。本文实验中,当 $\alpha = 25^\circ$ 时,自动调整控制量,使得垂直速度分量为 -0.34 m/s 。如图 7 所示, $s = -0.023\text{ m}$ 时,降落水平误差为 0.01 m ,着地水平速度为 0.45 m/s ,所有速度值由串口读出。

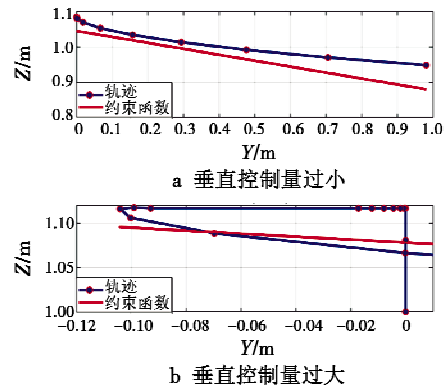


图 8 调整垂直控制量前的轨迹

Fig. 8 Track before adjusting the vertical control amount

4 结束语

本文提出基于 guidance 辅助导航和反向补偿算法的无人机斜面降落方法,设计了基于 PID 控制器的位姿估计算法,得到良好的控制效果。对不同倾角下降采用不同下降速度的训练,并对实验结果进行详细分析。本文对无人机斜面精准降落的研究具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 王鼎杰,王广才,吴杰. 微惯性/卫星组合导航高精度事后基准确定方法[J]. 中国惯性技术学报,2017,25(1):97-102.
- [2] 张舸,伊国兴,高翔. 基于视觉导航的旋翼无人机自主降落系统[J]. 传感器与微系统,2018,37(9):77-80,83.
- [3] 毕庆生. 基于 OnboardSDK 的无人机自主飞行控制技术[D]. 西安:西安石油大学,2017.
- [4] 刘华迪,段智敏,王磊. 松耦合 SINS/GPS 组合导航技术仿真研究[J]. 沈阳理工大学学报,2012,31(6):1003-1251.
- [5] 陈志恒. 基于异构传感信息融合的导航定位方法[D]. 北京:中国科学院大学,2018.

- [6] XIONG J J, ZHENG E H. Optimal Kalman filter for state estimation of a quadrotor UAV [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(21): 2862-2868.
- [7] 宿敬亚,樊鹏辉,蔡开元. 四旋翼飞行器的非线性 PID 姿态控制[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(9): 1054-1058.
- [8] 辛哲奎,方勇纯. 无人机地面目标跟踪系统的建模与控制[J]. 高技术通讯,2009,19(4):398-403.
- [9] 张磊. 多旋翼无人机地面移动目标追踪与软着陆研究[D]. 吉林:吉林大学,2018.
- [10] 李泽. 四旋翼飞行器姿态控制系统性能优化设计[J]. 计算机仿真,2017,34(5):58-62.
- [11] CHEN Z H, WANG C, WANG H G, et al. Heterogeneous sensor information fusion based on kernel adaptive filtering for UAVs' localization[C]//International Conference on Information and Automation(ICIA), 2017:171-174.
- [12] 雷章勇,彭志炜,张俨,等. 基于 S 函数的改进变步长 LMS 自适应算法[J]. 电光与控制,2018,25(10):52-56.
- [13] 贾配洋. 无人机高速移动降落技术研究[D]. 北京:中国科学院大学,2017.

(上接第 18 页)

BP 算法的迭代误差远小于标准算法的迭代误差。

以上证明,改进 BP 算法得到的模型精度更高,更逼近真实系统。此外,图 8 也证明改进 BP 算法迭代误差波动更小,说明其网络性能稳定,有更好的实用价值。

5 结束语

本文以“动中通”伺服系统的方位轴稳定环为辨识对象。首先分析其非线性特质,介绍辨识中常用的标准 BP 算法;然后在该方法优缺点的基础上提出一种基于累积误差函数梯度的双学习步长的自适应 BP 算法;最后设计实验证明了改进算法具有精度高、收敛快和泛化能力佳的特点,对于其他的复杂非线性系统(如位置环)的辨识,以及下一步设计稳定环调节器等具有应用价值和实际意义。

参考文献

- [1] 吴世浩,孟亚峰,王超. 基于神经网络的 Volterra 频域核辨识方法[J]. 电光与控制 2019,26(2):38-43.
- [2] 邓召学,郑玲,郭敏敏,等. 基于遗传 BP 神经网络的磁流变悬置模型辨识[J]. 电子科技大学学报,2014,43(6):955-960.

- [3] LIANG F, SHEN C, WU F. An iterative BP-CNN architecture for channel decoding[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2018, 12(1):144-159.
- [4] LIU S D, HOU Z S, YIN C K. Data-driven modeling for UGI gasification processes via an enhanced genetic BP neural network with link switches[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(12):2718-2729.
- [5] 方阳丽. 陀螺加速度计稳定环在“动中通”伺服系统中的应用[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [6] 高朋. 改进型神经网络算法在非线性系统辨识中的研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2018.
- [7] 朱振国,田松祿. 基于权值变化的 BP 神经网络自适应学习率改进研究[J]. 计算机系统应用,2018,27(7): 205-210.
- [8] 李言俊,张科. 系统辨识理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2003:232-233.
- [9] 庞中华,崔红. 系统辨识与自适应控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2013:218-226.
- [10] WU W, WANG J, CHENG M S, et al. Convergence analysis of online gradient method for BP neural networks[J]. Neural Networks, 2011, 24(11):91-98.