

# 基于 RFID 技术的四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统设计

高晶<sup>1</sup>, 郭志帅<sup>2</sup>

(1. 沈阳工学院 信息与控制学院, 沈阳 113122;

2. 东软集团股份有限公司, 沈阳 113122)

**摘要:** 为促进四旋翼无人机的飞行自主性, 增强无人监管情况下飞行器主机所具备的避障行进能力, 设计基于 RFID 技术的四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统; 采用 RFID 标签识别技术, 调制处理既定控制信号, 利用标签识别协议, 连接微型四旋翼轨迹控制器与内环姿态控制器, 通过数据通信链路, 提取轨迹跟踪控制所需的传输电子量, 完成轨迹跟踪控制系统硬件设计; 利用动力系统中的参数辨识策略, 确定与轨迹姿态控制相关的物理规律标注, 实现四旋翼无人机轨迹跟踪控制; 实验结果表明, 与机器视觉型控制系统相比, 基于 RFID 技术的控制系统的 SSI 避障行进指标数值相对较高, 全局最大值达到了 79%, 四旋翼无人机滚转角平均值为 85°, 能够有效抑制四旋翼无人机滚转角的数值上升趋势, 增强无人监管情况下飞行器主机避障行进能力。

**关键词:** RFID 技术; 四旋翼无人机; 轨迹跟踪; 标签识别协议; 数据通信链路; 时控跟踪电路

## Design of Quad-rotor UAV Trajectory Tracking Control System Based on RFID Technology

GAO Jing<sup>1</sup>, GUO Zhishuai<sup>2</sup>

(1. School of Information and Control, Shenyang Institute of Technology, Shenyang 113122, China;

2. Neusoft Group Co., Shenyang 113122, China)

**Abstract:** In order to promote the flight autonomy of quad-rotor UAV and enhance the obstacle avoidance ability of aircraft host under unmanned supervision, a trajectory tracking control system of quad-rotor UAV based on RFID technology is designed. RFID tag identification technology is used to modulate and process the given control signal. The tag identification protocol is used to connect the micro quad-rotor trajectory controller and the inner loop attitude controller. Through the data communication link, the transmission electronic quantity required for trajectory tracking control is extracted, and the hardware design of the trajectory tracking control system is completed. By using the parameter identification strategy in the power system, the physical laws related to the trajectory and attitude control are determined to realize the trajectory tracking control of the quad-rotor UAV. The experimental results show that, compared with the machine vision control system, the SSI obstacle avoidance index value of the control system based on RFID technology is relatively high, the global maximum value reaches 79%, and the average roll angle of the quad-rotor UAV is 85°, which can effectively suppress the rising trend of the roll angle of the quad-rotor UAV, and enhance the obstacle avoidance ability of the aircraft host in the case of unmanned supervision.

**Keywords:** RFID technology; quad-rotor UAV; trajectory tracking; tag identification protocol; data communication link; time control tracking circuit

## 0 引言

RFID (radio frequency identification) 技术也叫射频识别, 其应用原理可解释为标签与阅读器之间的非接触型数据通信关系, 一般情况下, 可在短时间内实现对待测目标的精准识别。作为自动识别技术的关键组成环节, RFID 技术可借助无线射频波提取非接触型双向通信数据, 再利用射频卡或电子标签对媒体信息进行读写处理, 从而实现待识别目标与数据对象间的执行指令交换<sup>[1-2]</sup>。该项处理手段通过信息交换与信息存储技术, 建立无线射频主机与数据

访问中心间的物理连接关系, 然后再通过数据库系统, 完成电子标签信息的通信与读写。根据通信距离的不同, 可将 RFID 技术分为远场、近场两种处理形式, 且由于负载调制与反向散射调制作用的存在, 电子标签之间数据交换行为也会出现明显不同的反应状态。

四旋翼无人机是以老鹰为设计灵感的新型飞行器元件, 具有抓力强、速度快、重量轻等多项应用特点。在无人监管情况下, 随着四旋翼主机飞行距离的延长, 飞行器结构体所具备的避障行进能力会出现明显下降的变化趋势。传

收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-01-28。

作者简介: 高晶 (1977-), 女, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 副教授, 主要从事语音识别和软件工程方向的研究。

引用格式: 高晶, 郭志帅. 基于 RFID 技术的四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 114-118, 124.

统机器视觉型控制系统借助交叉视场解决机体与障碍物之间的避障问题, 再通过目标参考点递推的方式, 确定障碍物结构体与飞行器设备之间的实际距离。但此系统很难对无人机滚转角进行有效控制, 易造成 SSI 避障行进指标数值的持续下降。为解决此问题, 引入 RFID 技术, 在内环姿态控制器、数据通信链路等多个硬件设备结构体的支持下, 设计一种新型的四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统, 并通过设计对比实验的方式, 突出该系统的实际应用价值。

## 1 RFID 标签识别技术

RFID 标签识别技术由工作频段定义、控制信号调制、标签识别协议连接 3 个流程共同组成, 具体研究操作方法如下。

### 1.1 RFID 的工作频段

RFID 标签识别的过程主要包括轨迹信息的发送、传输、接收 3 个流程。在 RFID 工作频段保持不变的情况下, 标签识别协议和数据标签的待传输信息首先可被调制到载波频段之上, 再通过无线型空间信道将其发送出去。对于 RFID 工作频段来说, 标签识别协议与数据标签之间的通信主要包含 3 个基本功能块结构, 按照从标签识别协议到数据标签的信息传输方向, 它们可总结为标签识别协议中的无人机轨迹数字信号 (如待处理信号、编码信号、基带信号等)、跟踪波调制器 (也叫回路载波信号调制)、轨迹跟踪信号传输介质 (也叫控制波传输信道) 以及数据标签中的所有信号译码行为 (信号处理行为) 和解调器设备<sup>[3-4]</sup>。此外, RFID 工作频段的轨迹跟踪信号通信还包括标签识别协议和数据标签之间的两种组合方式以及这两种组合与无人机轨迹跟踪信号之间的工作频段关系。与 RFID 标签识别相关的主要工作频段有: 微波、超高频、高频、低频。其中, 微波与超高频主要被应用于无人机跟踪控制信号的远场通信, 而低频与高频主要被应用于无人机跟踪控制信号的近场通信。RFID 标签工作频段及其主要特征如表 1 所示。

表 1 RFID 标签工作频段及其主要特征

性能指标	微波	超高频	高频	低频
工作频率	2.45 GHz、 5.8 GHz	433 MHz、 860~ 960 MHz	13.56 MHz	<135 kHz
数据传输率	<200 kbit/s	<200 kbit/s	<200 kbit/s	<10 kbit/s
耦合方式	反向散射	反向散射	感应耦合	感应耦合
天线组成	偶极子天线	偶极子 天线	线圈 (<10 圈) 和电容	线圈 (<10 圈) 和电容
标签类型	主动、被动	主动、被动、 半主动	被动	被动
通信范围	远场通信	远场通信	近场通信	近场通信
识读范围	1 m	4~7 m	0.1~0.2 m	2 m

### 1.2 RFID 控制信号调制

RFID 控制信号调制也叫对无人机轨迹跟踪信号源的变

换处理, 其目的在于使源信号数据以较低衰减频率的方式在 RFID 信道中传输。通常来说, 无人机轨迹跟踪信号源的信息 (也叫信源) 包含有大量直流形式的低频率数据分量 (基带控制信号)。基带控制信号在 RFID 信道中直接传输极易造成无人机轨迹数据信息出现严重衰减行为, 从而呈现完全失真状态<sup>[5]</sup>。因此, 基带控制信号往往不能被用于直接传输, 而是需要将其转换为一个低传输损耗形式的信号主体再进行传输。对于 RFID 工作频段中二进制信号的调制手段有: 相移键控法、频移键控法、幅移键控法 3 种。

1) 相移键控: 对不同基带控制信号采用不同的控制载波相位。该项技术手段的抗信号干扰性极为优良, 此外, 控制载波相位的变化还可以对无人机轨迹跟踪信号源起到同步调制的作用。

2) 频移键控: 对不同基带控制信号采用不同的控制载波频率。该项技术手段的抗信号干扰能力相对较为不错, 但所需占用的带宽量数值极大。

3) 幅移键控: 基带控制信号载波的幅度可根据无人机轨迹跟踪信号源的不同而选取不同的物理数值, 控制幅移键控的实现流程相对较为简单, 且极易受到无人机轨迹增益变化行为的影响, 因此实际调制效果并不十分理想<sup>[6]</sup>。

### 1.3 标签识别协议

RFID 标签识别环境下的经典连接协议包含纯 ALOHA 协议、帧时隙 ALOHA 协议、EPC C1G2 协议 3 种。其中, 纯 ALOHA 协议的基本思想是无人机轨迹跟踪信号一旦准备好要发送的控制标签 ID 信息后, 就立即开始向数据通信链路发送。一旦出现碰撞行为, 控制标签就停止 ID 信息的发送行为, 并随机等待下一个单位控制时间, 再继续重新发送控制标签 ID 信息的操作<sup>[7]</sup>。帧时隙 ALOHA 协议的主要思想是将所有无人机轨迹跟踪信号时隙组合成一个传输帧结构, RFID 标签只能随机在  $0-n$  内选择一个时隙参量与微型四旋翼轨迹控制器进行通信, 这种协议的时隙存在 3 种基本传输情况: 无标签响应、一个标签响应、多个标签响应<sup>[8]</sup>。EPC C1G2 协议可同时多个无人机轨迹跟踪信号进行应答, 在 RFID 标签识别时长保持不变的情况下, 该协议可自行调整控制标签 ID 信息的存储长度值, 从而使帧长调整反应比数值相对较大。

## 2 四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统硬件设计

在 RFID 标签识别技术的支持下, 按照微型四旋翼轨迹控制器、内环姿态控制器、数据通信链路、时控跟踪电路连接的设计流程, 完成四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统硬件平台的搭建。

### 2.1 微型四旋翼轨迹控制器

根据四旋翼无人机的飞行动力学模型可以看出, 该结构是高耦合状态的非线性欠驱动模型, 在空间环境中具有六种不同的自由度输出状态, 但却只能同时收到 4 个与轨迹跟踪信号相关的控制输入量。近年来越来越多的复杂控制算法被应用于四旋翼无人机模型之中, 但绝大多数算法的核心控制思想依然是利用无人机的自主输出行为对轨迹

跟踪信号进行反馈调节。在 RFID 技术的支持下, 微型四旋翼轨迹控制器主要有全驱动反馈、欠驱动反馈两种执行模式<sup>[9-10]</sup>。微型四旋翼轨迹控制器结构在实际控制过程中, 需要匹配更加复杂的逻辑算法思想。从全驱动反馈模式结构可以看出, 控制模式只能对无人机的航向与位置偏差进行修正, 但却忽视了在姿态与速度方面的控制处理; 欠驱动反馈模式结构能够使四旋翼无人机始终保持相对良好的航向与位置收敛性, 但却无法对飞行姿态进行定向化控制, 易导致飞行器结构体失去控制。

## 2.2 内环姿态控制器

内环姿态控制器可在 RFID 标签识别技术的作用下, 实现与微型四旋翼轨迹控制器的对应连接, 且随着无人机飞行时间的延长, 这种连接形式的物理稳定程度也会逐渐增强, 直至能够与轨迹跟踪控制指令的实际执行需求完全匹配。整个控制器元件由内部应用芯片和外部四旋翼内环共同组成, 前者负责记录无人机轨迹路径的实际变动行为, 后者则根据前者所记录的具体数据, 而进行相应的行为变动<sup>[11-12]</sup>。通常情况下, 内环姿态控制器只包含 4 个相互独立的半环状旋翼结构, 且为使无人机设备具有更强的飞行能力, 后部旋翼的覆盖面积必须大于前部旋翼。当无人机飞行器遭遇强气流影响时, 风力首先作用于前部旋翼结构, 由于前部半环周长相对较短, 气体在此区间内的流动速度也相对较慢; 由于后部半环周长相对较长, 当风力作用于后部旋翼结构时, 气体流动速度相对较快; 此时前、后半环之间的气体流速差会推动四旋翼无人机向前飞行。

## 2.3 数据通信链路

数据通信链路是空中四旋翼无人机飞行器与地面航迹规划主机间进行控制数据交换的通道, 作为两个元件设备之间的纽带, 通常以 9XTend OEMRF 无线数传模块作为核心搭建设备。9XTend OEMRF 无线数传模块具有多个串行接口通道, 其中 3~5 V 的 CMOS DART 串行接口只能占据原有的 RPSMA 型天线接口, 在内环姿态控制器接收能力保持不变的情况下, 该类型接口的应用能力越强, 数据通信链路所具备的无人机轨迹跟踪信号传输能力也就越强<sup>[13]</sup>。当内部调制解调器中被加入了 RFID 标签识别技术后, 数据通信链路能够有效解决因无人机轨迹跟踪信号射频干扰而产生的数据信息波动问题, 因此在超长飞行距离下, 微型四旋翼轨迹控制器依然能够较好协调无人机设备的实际飞行能力。一般情况下, 9XTend OEMRF 无线数传模块的接收灵敏度可达 -110 dBm<sup>[14]</sup>。在四旋翼无人机飞行距离小于 9 000 m 时, 轨迹跟踪控制信号数据的吞吐量只能达到 230 kbps; 而当四旋翼无人机的飞行距离大于 9 000 m 时, 轨迹跟踪控制信号数据的传输率会在短时间内超过 115.2 kbps, 且随着待传输数据总量的增大, 整个数据链路始终可维持原有的多分支网络拓扑型工作模式。

## 2.4 时控跟踪电路

时控跟踪电路由信号跟踪子电路、信号放大电路两部

分共同组成。其中, 信号跟踪子电路存在于四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统的 Fin 端与 Fout 端之间, 由电流偏置电机、控制信号偏置电机等多个物理结构共同组成。信号跟踪子电路结构如图 1 所示。

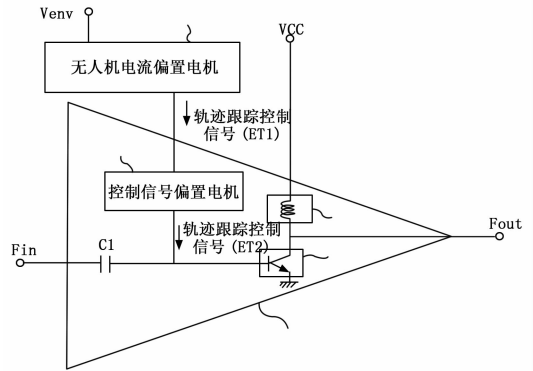


图 1 信号跟踪子电路结构

通常情况下, 四旋翼无人机轨迹跟踪控制信号包含 ET1、ET2 两个传输部分, 前者可在电流偏置电机的作用下, 对无人机设备的飞行状态进行小幅度调试, 再将其暂时存储于 C1 电阻元件之中<sup>[15-16]</sup>; 后者可直接接收控制信号偏置电机中的传输电子量, 一方面调取 C1 电阻中的电子数据信息, 另一方面将无人机轨迹跟踪控制信号整合成既定的传输应用形式。

信号放大电路外接一个独立的无人机天线结构, 可在信号调制器元件的作用下, 实现对低频放大器元件、高频放大器元件连接行为的同步协调, 再通过正交调制器与变频调制器, 完成对四旋翼无人机轨迹跟踪控制信号的生产与转换处理。信号放大电路结构如图 2 所示。

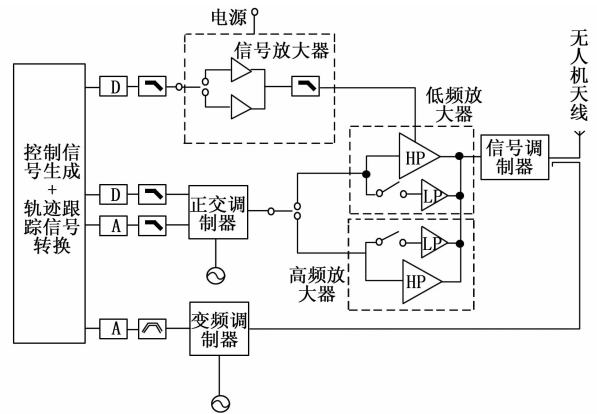


图 2 信号放大电路结构

正交调制器、变频调制器存在于时控跟踪电路信号放大子电路的中部, 通常可与 D 主机、A 主机直接相连<sup>[17-18]</sup>。D 主机能够记录四旋翼无人机设备的实际轨迹变动行为, 并可根据其中既定跟踪节点的连接形式, 判定信号放大器设备所处的现有执行状态。A 主机能够分析变频调制器中四旋翼无人机轨迹跟踪控制信号的连接状态, 并可按照既定应用形式对其进行一定程度的调制处理。

### 3 四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统软件设计

以硬件平台作为应用元件支持, 在辨识动力系统参数的同时, 确定轨迹姿态控制的具体规律标准, 两相结合, 完成基于 RFID 技术的四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统软件设计。

#### 3.1 动力系统参数辨识

四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统的参数辨识中, 最重要的就是针对升力系数的辨识处理, 因为对于无人机这类完全依靠螺旋桨升力作用的飞行器结构体而言, 能否准确拟合由控制量引起的反扭力矩及升力力矩, 是确定油门响应控制量及期望输出控制量的最主要条件<sup>[19-20]</sup>。对上文中定义的所有升力系数进行辨识, 四旋翼无人机动力系统辨识试验台如图 3 所示。

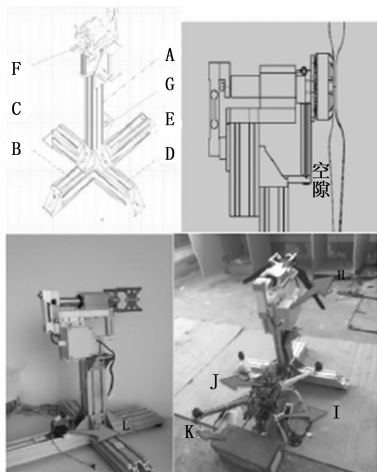


图 3 四旋翼无人机动力系统辨识试验台

四旋翼无人机动力系统辨识试验台具体部件功能如表 2 所示。

表 2 四旋翼无人机动力系统参数辨识结构

符号	名称	功能
A	动力台架主体	抵消四旋翼无人机的反推力与反扭力矩
B/C/D/E	前/后/左/右支撑元件	
F	轨迹扭矩传感器	侧力矩
G	电调	控制电机驱动
H	轨迹跟踪控制信号收发模块	传输测量数据
I	遥控接收机	油门输入
J	四旋翼无人机飞控测试平台	控制信号功率输出
K	动力电池	电机供电
L	电压电流计	电压电流测量

#### 3.2 轨迹姿态控制规律

考虑到四旋翼无人机轨迹姿态控制算法的可实现性及在一定范围内的电量载荷具有变化鲁棒性, 选用基于串级 RFID 技术的控制方法。串级 RFID 技术控制结构以角度环控制作为第一级控制规律、以内环角速度控制环作为第二

级控制规律, 相较于传统机器视觉反馈回路中的 PID 控制结构, 串级 RFID 技术控制结构具有参数整定时间快、超调量小、响应时间快等多项特点<sup>[21]</sup>。在反步积分控制法则的支持下, 串级 RFID 技术对于被控系统模型始终保持较高的适应性, 可在不接受模型精度条件的同时, 将模型参数引起影响行为控制到最小<sup>[22]</sup>。综上, 本次研究使用更为成熟的改进 RFID 技术控制方法, 试验效果良好。设  $\beta$  代表已选定的四旋翼无人机轨迹跟踪系数,  $D$  代表改进 RFID 技术的实际控制作用权限,  $K$  代表单位时间内的轨迹跟踪控制指令输出量, 联立上述物理量, 可将轨迹姿态控制规律定义为:

$$Y(\beta) = \frac{\log_b K^2}{f(\lambda\omega_1^2 + \omega_2^2)^2} U_\beta \quad (1)$$

式中,  $f$  代表四旋翼无人机在既定轨迹区间内的可控飞行向量,  $\lambda$  代表与角度环控制律相关的串行控制系数,  $\omega_1$  代表第一级轨迹跟踪信号的输出控制量<sup>[23]</sup>,  $\omega_2$  代表第二级轨迹跟踪信号的输出控制量,  $U_\beta$  代表轨迹区间内的飞行姿态控制系数。四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统软件流程如图 4 所示。

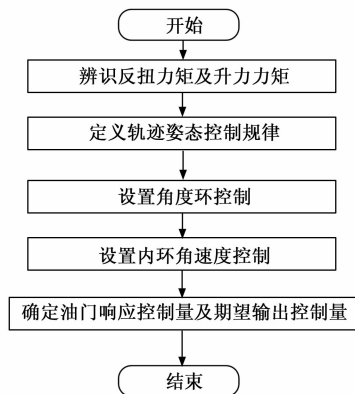


图 4 四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统软件流程

根据图 4 可知, 通过辨识反扭力矩及升力力矩, 采用串级 RFID 技术, 定义轨迹姿态控制的具体规律标准, 将角度环控制作为第一级控制规律, 将内环角速度控制作为第二级控制规律, 确保被控系统模型始终保持较高的适应性, 从而减小油门响应控制量及期望输出控制量引起的影响, 实现四旋翼无人机轨迹跟踪控制。综上所述, 在串级 RFID 技术的支持下, 通过搭建四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统软、硬件执行条件, 实现四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统设计。

### 4 实验分析

在本实验中主要验证四旋翼无人机实时航迹规划能力及跟踪控制主机与地面基站间的信息交互能力。在实际的航迹规划环境中, 障碍物结构包括电力塔、高压线、建筑物等。实验组飞行器搭载基于 RFID 技术的轨迹跟踪控制系统, 对照组飞行器搭载机器视觉型控制系统。

由于地形相对较为平缓, 为减少计算量在实验中假设地面环境均为平面约束。一般情况下, 可将建筑物和电力

塔抽象成规则的矩形，将高压线抽象成线形障碍物，再统一进行航行轨迹的规划约束，将完成抽象的障碍物数据加载到地面站软件中，如图 5 所示。

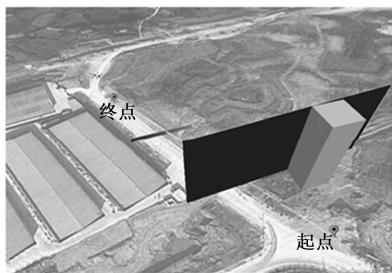


图 5 抽象处理后的无人机飞行轨迹

已知 SSI 避障行进指标能够反映四旋翼无人机飞行器主机所具备的避障行进能力，一般情况下，指标数值越大，飞行器主机所具备的避障行进能力也就越强，反之则越弱。SSI 避障行进指标对比结果如图 6 所示。

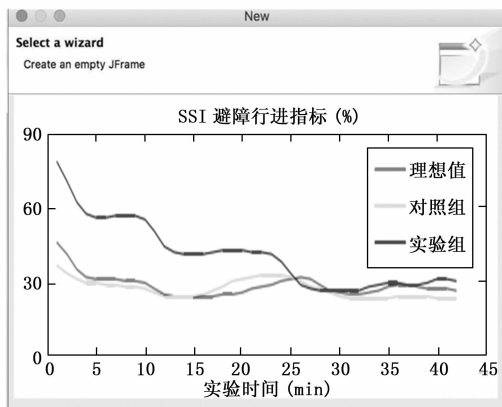


图 6 SSI 避障行进指标对比图

分析图 6 可知，随着实验时间的延长，对照组 SSI 避障行进指标与理想化指标的数值差异水平相对较小，在第 20 ~ 25 min 的实验时间内，达到最大数值量，约为 38%。实验组 SSI 避障行进指标在实验前期的数值水平相对较高，实验后期的数值水平虽有一定程度的下降，但对整体数值变化状态的影响能力相对较小，全局最大值达到了 79%，与对照组极值相比，上升了 38%。

分析表 3 可知，理想状态下四旋翼无人机滚转角理想值始终保持不断上升的变化趋势，而实验组四旋翼无人机滚转角的变化幅度相对较小，四旋翼无人机滚转角平均数值为 85°，整个实验过程中的平均数值也始终低于理想均值水平，对照组四旋翼无人机滚转角则始终保持大幅上升的变化趋势，全局最大值与实验组极值相比，上升了 105°。

表 3 记录了实验组、对照组四旋翼无人机滚转角数值的实际变化情况。

综上所述，随着基于 RFID 技术轨迹跟踪控制系统的应用，四旋翼无人机飞行器的滚转角变化能力得到有效控制，而 SSI 避障行进指标的数值水平却得到良好抑制，可大幅增

强无人监管情况下飞行器主机所具备的避障行进能力。

表 3 四旋翼无人机滚转角数值对比表

四旋翼无人机滚转角理想值/(°)							
实验时间/min	5	10	15	20	25	30	35
数值	103	107	112	115	119	120	120
实验组四旋翼无人机滚转角/(°)							
实验时间/min	5	10	15	20	25	30	35
数值	85	85	85	86	85	85	84
对照组四旋翼无人机滚转角/(°)							
实验时间/min	5	10	15	20	25	30	35
数值	118	127	136	149	160	179	191

### 5 结束语

在 RFID 技术的作用下，四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统联合内环姿态控制器、时控跟踪电路等多个硬件执行设备，在辨识动力系统参数的同时，可对轨迹姿态控制规律进行精准定义。从 SSI 避障行进指标、无人机滚转角两项参量来看，能够促进四旋翼无人机自主飞行能力的大幅增强。

#### 参考文献:

- [1] 景 熠, 李文川, 宋 寒. 基于 RFID 技术的闭环供应链投资决策及协调策略 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24 (9): 2341 - 2348.
- [2] 牛秦玉, 李珍惜, 田海波. 基于 RFID 技术的叉车式 AGV 动作指令算法研究 [J]. 电子技术应用, 2018, 44 (12): 115 - 118.
- [3] 傅世强, 熊昂宇, 陈韦宁, 等. 用于超高频射频识别的小型宽带高定向天线 [J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42 (5): 987 - 991.
- [4] 刘晓春, 张文武, 胡文秀, 等. 基于 2.5 维小型化设计的 UHF 频段高性能超材料吸波体 [J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51 (6): 864 - 869.
- [5] 赵小明, 李世杨, 张 悦, 等. 抑制耦合干扰的半球谐振陀螺信号分频调制检测方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28 (1): 100 - 105.
- [6] 陈晓雷, 张恩光, 于泽琦. 基于数字 PWM 发生器的非对称双边沿 UPWM 信号频谱分析 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (16): 33 - 38.
- [7] 杨新爱, 段 富. 面向 EPC Gen2 标准的 RFID 标签分组多位隙并行识别协议 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37 (3): 242 - 245.
- [8] 何 炬, 王红军, 袁 泉. 可证明安全的射频识别双向认证协议 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2018, 19 (5): 41 - 46.
- [9] 余后明, 刘彦臣, 刘玉斌, 等. 基于动态调节的小型四旋翼飞行器的控制系统 [J]. 光电与控制, 2018, 25 (9): 110 - 113.
- [10] 陶彦隐, 王炜毅, 邱亚峰, 等. 基于自适应滑模控制的四旋翼无人机轨迹追踪控制 [J]. 信息与控制, 2018, 47 (3): 22 - 28.

(下转第 124 页)