

doi: 10.7690/bgzdh.2018.02.009

一种无人机自主航线控制策略

张鲁遥¹, 白梓永², 孙 瑜¹, 渠尊尊¹, 杨 军¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106; 2. 国网山东省电力公司淄博供电公司, 山东 淄博 255000)

摘要: 为控制无人机按预定航线飞行, 提出一种无人机自主飞行控制策略。介绍自主飞行控制策略和控制律, 包括在水平方向上的飞行控制规律和在竖直方向的飞行控制规律, 分析软件流程图和半物理仿真系统, 并进行无人机半物理仿真。仿真结果表明: 该控制策略易编程实现, 可靠性好, 可有效完成无人机自主航迹飞行。

关键词: 无人机; 自主飞行; 控制策略

中图分类号: TJ814 **文献标志码:** A

Autonomous Routes Control Strategy of UAV

Zhang Luyao¹, Bai Ziyong², Sun Yu¹, Qu Zunzun¹, Yang Jun¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Zibo Power Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Zibo 255000, China)

Abstract: In order to control UAV flying by scheduled route, this paper puts forward a UAV autonomous flight control strategy. It introduces autonomous flight control strategy and control law, including the flight control rule in horizontal and vertical direction. Besides, it analyzes software flow chart and semi-physical simulation system, and carries out semi-physical simulation. The result of simulation proves that this method is easy programming and reliable, so it can effectively complete the UAV autonomous flight.

Keywords: UAV; autonomous flight; control strategy

0 引言

无人机是一种可人工远程操纵, 或由预编程序操纵的非载人飞行器, 拥有众多有人驾驶飞机所不具有的优点, 可执行各种任务, 在民用和军用领域得到越来越广泛的应用^[1]。无人机的发展也引起了各国的重视, 各国争相发展无人机。在无人参与的情况下, 飞机能否按预定航线飞行, 是一款无人机能否正常投入使用的前提。一款能沿航线飞行的无人机, 才有可能完成其飞行任务, 才有使用价值^[2]。

笔者在参与某型号无人机研发的过程中, 需要解决无人机的自主飞行问题。要实现自主飞行, 其首要条件是无人机能正确地沿航线飞行。基于此, 笔者提出一种控制策略, 可以实现飞机在 3 维空间里沿航线飞行。经过无人机的半物理仿真, 证实可以有效地控制无人机按航线飞行。

1 自主飞行控制策略

1.1 无人机的航线控制算法

此型号无人机水平尾翼安装有升降舵, 通过升降舵来改变飞机的高度。机翼安装有副翼, 垂直尾翼没有配置方向舵, 通过差动改变副翼舵角度来改

变方向; 因此, 要改变无人机水平方向上的位置, 就要通过控制副翼舵的偏转角度来实现^[3]。

航线由 3 维空间里的若干点组成, 飞机飞行航线实际是飞过预设的某个点。在水平方向上, 要确定飞机的航迹是否沿航线飞行, 需要观察飞机的侧偏距和侧偏角^[4]。

如图 1: A 为航线的前一个航点; B 为航线的下一个航点; M 为飞机当前位置; v 为飞机速度; d 为飞机距航线 AB 的距离, 即侧偏距; $\Delta\psi$ 为速度 v 与向量 AB 的夹角, 即侧偏角。定义无人机在航线左侧时, 侧偏距为负, 速度方向指向航线左侧时, 侧偏角为正。只有飞机侧偏距和侧偏角均在误差允许的范围, 方可证明飞机此刻正在沿航线飞行。

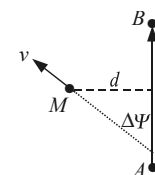


图 1 侧偏角侧偏距

若要实现无人机自主飞行时能按航线飞行, 当无人机偏离航线左侧时, 通过自动控制律的作用, 使飞机向右飞行; 反之亦然^[5]。但是, 如果只通过

收稿日期: 2017-10-18; 修回日期: 2017-11-14

基金项目: 研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj20160323)

作者简介: 张鲁遥(1992—), 男, 山东人, 在读硕士, 从事无人机控制主要系统研究。

控制侧偏距来控制飞机，则容易出现飞机沿着航线左右波动的情况；因此，需要把侧偏角加入到控制率里，当侧偏距较大时，飞机能以较大的侧偏角靠近航线，当侧偏距较小时，侧偏角也随之减小。理想的情况是：当侧偏距为零时，侧偏角同时为零，否则就容易出现飞机沿着航线波动的情况。此外，还把飞机的速度加入到控制律中，也是为了增大阻尼，避免飞机飞过航线，产生超调。为了消除误差，把对侧偏距的积分加入到控制律中，考虑到系统的响应速度，在侧偏距小于 200 m 时，才进行积分。高度控制采用传统的 PID 控制，为增大阻尼，又把高度变化率加入到控制中来，为提高响应速度，只在高度误差小于 50 m 时进行积分。

1.2 水平方向自主飞行参数计算

无人机沿航线飞行可以分为沿直线段飞行和沿圆弧段飞行。

1.2.1 直线部分

侧偏角计算：定义正北向为 y 轴正方向，直线段侧偏角如图 2 所示， A 为航线直线段起点，即当前飞机飞行的前一个航点， B 为终点，即飞机的待飞航点，设 $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$, Ψ_d 为航线 AB 方向与北向的夹角， Ψ 为飞机偏航角，实际飞行中可由 GPS 获得，飞机侧偏角为

$$\Delta\Psi = \Psi_d - \Psi \quad (1)$$

符号左正右负，其中

$$\Psi_d = 90 - \arctan((y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)) \quad (2)$$

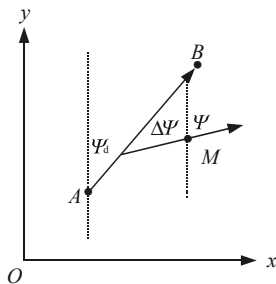


图 2 直线段侧偏角

侧偏距计算：图 3 为直线段侧偏距，图中， A 为航线直线段起点，即当前飞机飞行的前一个航点， B 为终点，即飞机的待飞航点， M 为飞机当前位置。 A, B 的坐标已知， M 的坐标由 GPS 获得。设 (x_1, y_1) , $B(x_2, y_2)$, $M(x, y)$ ，图中各点坐标可由此得出，各线段长度也可计算得出。 d 为飞机侧偏距，利用等面积法计算侧偏距，具体过程如下：

$$\frac{1}{2}d_1d + \frac{1}{2}d_2d_3 + \frac{1}{2}d_3d_4 = \frac{1}{2}d_2d_3 \quad (3)$$

可由此结算出侧偏距 d 的值，符号左负右正。

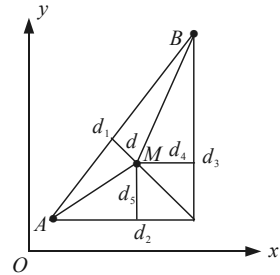


图 3 直线段侧偏距

1.2.2 圆弧部分

图 4 为飞机飞圆弧段示意图，侧偏角计算： O 为圆弧圆心； M 为飞机，设 $O(x_0, y_0)$, $M(x, y)$ ，侧偏角

$$\Delta\Psi = \Psi_d - \Psi \quad (4)$$

符号左正右负，其中：

$\Psi_d = -\arctan((y - y_0)/(x - x_0))$ ， Ψ 为飞机偏航角，向右为正。

侧偏距计算：

$$d = |OM| - r \quad (5)$$

符号左负右正，其中

$$|OM| = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (6)$$

r 为已知转弯半径。

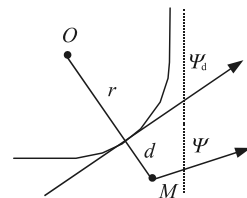


图 4 圆弧段侧偏角和侧偏距

1.3 竖直方向飞行参数计算

如图 5， H_g 为给定高度，由航线给定； H 为飞机当前高度，可由 GPS 获得

$$\Delta H = H_g - H \quad (7)$$

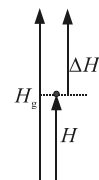


图 5 高度

2 自主飞行控制律

2.1 水平飞行控制律

飞机飞行时，航向传感器提供的航向信号被用

于闭环控制，加入速度反馈控制回路，以增加航向通道的阻尼，加入飞机的位置信号，使得航向通道稳定。水平方向控制律如图 6 所示。

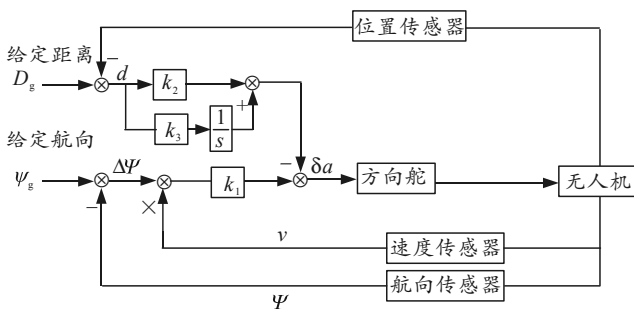


图 6 水平方向控制律

副翼舵面偏转角

$$\delta a = k_1 v \Delta \Psi - k_2 d - \int k_3 dx \quad (8)$$

以飞机直线段飞行为例，不考虑积分作用，当飞机开始向左偏离航线时，侧偏距 $d < 0$ ，侧偏角 $\Delta \Psi > 0$ ， $\delta a > 0$ ，飞机右偏，可以回归航线；反之亦然。

当飞机已经向左偏离航线时，在控制率的作用下开始向右偏向航线飞行，此时，侧偏距 $d < 0$ ，侧偏角 $\Delta \Psi < 0$ ， δa 的符号由二者之差决定。如果 $k_1 v$ 的值过大，侧偏角调节作用强，会导致飞机近乎平行于航线飞行，侧偏距的收敛速度慢，飞机长时间才能靠近航线；如果 k_2 的值过大，则飞机会以近乎垂直于航线的方向飞向航线，容易产生侧偏距的超调，使飞机沿着航线波动。因此，需要根据对飞机的飞行要求调节 k_1 和 k_2 的大小，使其满足需求。

飞机在直线段和圆弧段，采用相似的控制律，但是控制参数不同，具体参数可根据实际要求进行修改。程序流程见图 7。

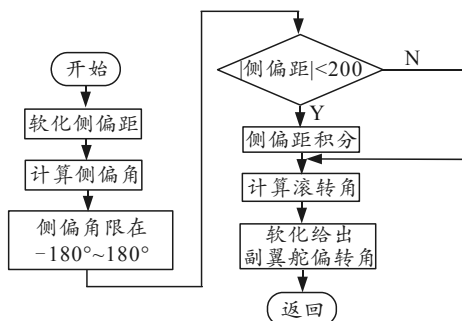


图 7 程序流程

2.2 高度控制律

无人机的高度控制主要通过控制方向舵实现。如果飞机的升力在铅垂线方向上的分量与重力相等，那么飞机就会高度保持或匀速升降；因此，高

度控制实际上就是通过高度传感器反馈的真实高度与设定高度相比较，高度控制的精度主要取决于高度传感器的可靠性精度。垂直方向控制律见图 8。为了增加控制阻尼，引入了高度的变化率反馈。

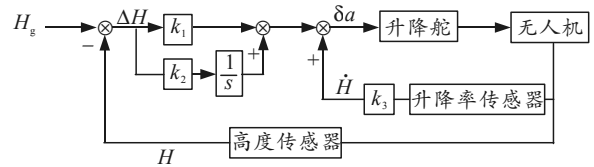


图 8 垂直方向控制律

升降舵舵面偏转角

$$\delta e = k_1 \Delta H + k_2 \int \Delta H dt + k_3 \dot{\Delta H} \quad (9)$$

3 自主飞行控制算法的半物理仿真

3.1 无人机半物理仿真环境介绍

图 9 为无人机半物理仿真系统。飞控计算机采用 TMS320F28335 型号 DSP 为核心，通过采集垂直陀螺传感器和 GPS 数据，可以确定飞机此时的姿态和位置，在飞控计算机里处理过传感器数据之后，通过自主飞行控制律的控制，控制舵机的偏转角度，使飞机能在水平方向上沿着航线飞行^[6]。飞机可通过无线电台把飞行数据实时传递给地面测控系统，在地面测控系统上显示飞行状态信息和航迹信息，并把一些飞行参数保存在地面测控系统中^[7]。

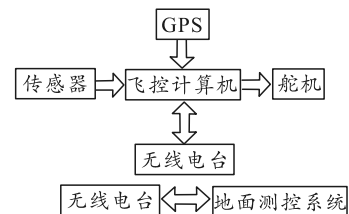


图 9 无人机半物理仿真系统

3.2 仿真结果分析^[8]

图 10 为飞机自主飞行时沿航迹飞行图，飞行速度 50 m/s。由图中可知，自主飞行时，飞机可以较好地沿航线飞行。

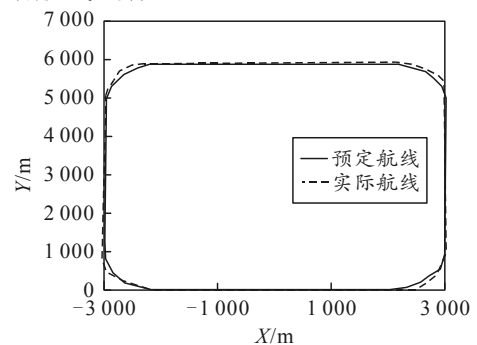


图 10 沿航线自主飞行图

图 11、图 12 分别为飞机自主飞行时，侧偏角和侧偏距随时间变化图，加上水平向左吹的 10 m/s 的侧风干扰，控制律使飞机能自动恢复原来航线，证明水平飞行控制律是有效的。

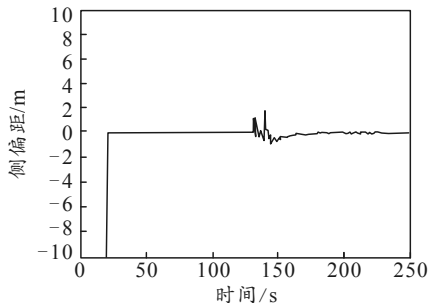


图 11 有干扰侧偏角随时间变化图

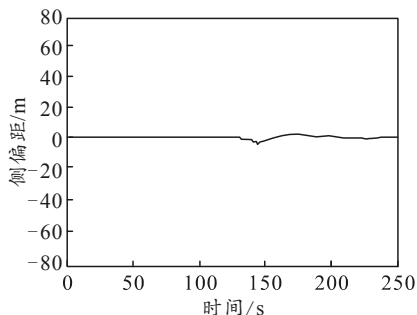


图 12 有干扰侧偏距随时间变化图

图 13 为高度随时间变化图，在飞机定高飞行时，在 A 点加一个向上的气流扰动，飞机高度增加，但很快就恢复到给定高度，证明高度控制律有效。

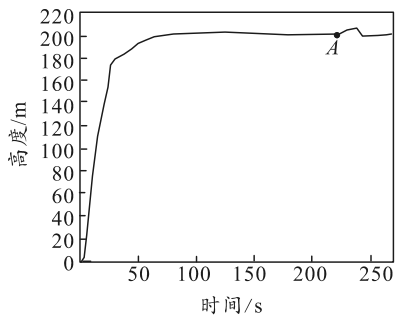


图 13 有干扰高度随时间变化图

4 结束语

笔者提出一种无人机自主飞行控制策略，包括水平飞行控制策略和垂直飞行控制策略，通过控制飞机在垂直方向上的高度和水平方向的水平位置来实现无人机按航线飞行。水平飞行控制策略把侧偏距、侧偏角和速度加入到飞机的控制中来，当无人机受到侧向气流扰动时，通过调节侧偏距和侧偏角为零，偏离航线后可以在水平方向上飞回航线^[9]。垂直飞行控制策略主要解决飞机的高度控制问题，用 PID 控制方法来调节高度，同样，受干扰后，可以恢复到给定高度。该控制策略易编程实现，可靠性好，可以方便地应用到实际工程上，但是控制精度不够，当飞机飞行时，由于执行机构和计算结果的偏差，造成飞机与预定航线有一定偏差。

参考文献：

- [1] 张伟, 杨雷, 金钊. 伊拉克战争中无人机作战使用及启示[J]. 电脑开发与应用, 2006, 19(7): 44-46.
- [2] 张劲锐, 卢京潮. 基于 GIS 的无人机地面测控系统设计与实现[J]. 火箭与导弹学报, 2008, 28(5): 245-248.
- [3] 吴森堂, 费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 4-10.
- [4] 唐强, 朱志强, 王建元. 国外无人机自主控制研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(3): 418-422.
- [5] 柳长安. 无人机航路规划方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- [6] 李昕, 杨睿. 基于 586-Engine 的无人机飞控系统的设计与实现[J]. 航空电子技术, 2008, 39(2): 29-33.
- [7] 刘林, 郭恩友. 飞行控制系统的分系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 5-20.
- [8] 黄克明, 王涛, 胡军. 无人机作战仿真平台设计及其关键技术研究[J]. 兵工自动化, 2016, 36(1): 90-92.
- [9] 路引, 郭昱津, 王道波. 基于 RRT 算法的某型无人机航路在线规划设计[J]. 兵器装备工程学报, 2016(12): 18-21.