

无人机编队飞行控制器设计

朱战霞, 郑莉莉

(西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 主要对两架无人机斜线编队控制进行研究, 建立了相应的数学模型, 并基于 PI 控制律分别设计了 x 、 y 两个方向的控制器, 利用解析和数值计算两种方法解算。仿真结果表明, 设计的控制器可以控制僚机跟随长机机动, 保持原有的相对位置和姿态。

关 键 词: 无人机; 编队飞行; PI 控制

中图分类号: V279

文献标识码: A

文章编号: 1002-0853(2007)04-0022-03

引言

无人机编队飞行有着单架无人机无法比拟的优点, 成为无人机领域的一个研究热点。编队无人机相对于单架无人机具有以下优势^[1]: 扩大视野; 可以实现对目标的全方位立体拍照, 提高信息的逼真度; 可以提高无人战斗机的整体作战效率; 近距离编队飞行可使整体阻力减小, 实现相当于大展弦比飞机的气动性能^[2]。

无人机的编队飞行是一个较新的研究领域, 要应用于实际之中, 还要涉及很多关键技术, 例如编队队形设计、航迹规划、编队过程中的信息互换和传递技术、编队控制等^[1]。对于多架飞机的编队飞行, 控制系统的设计不同于单架飞机。不仅要求控制单架飞机使其稳定^[3], 而且还要控制它在编队过程中相对于长机或者选定的参考点的位置和距离符合要求。僚机要跟踪长机状态的变化, 包括航向变化、速度变化、高度变化等, 从而使整个编队队形保持不变。另外, 编队控制的另一个方面就是控制整个编队进行机动, 这是因为对装备有编队保持自动驾驶仪的飞机, 僚机是由编队保持自动驾驶仪控制的, 长机的任何一种机动都相当于产生了误差信号, 并输入给僚机使其发生状态的变化, 自动跟随长机机动。

单架无人机控制系统的设计主要基于 PI 控制、PID 控制、自适应控制、最优控制等。对于多架无人机编队飞行控制系统的设计, 也可以基于以上方

法^[4,5]。但考虑到 PI 控制简单易实施、抗干扰较强的特点, 本文就以 PI 控制为基础进行编队飞行控制器的设计。

1 编队飞行相对运动数学模型的建立

以两架无人机斜线编队为例进行分析。设编队中领队的飞机为长机(L), 跟随飞机为僚机(W), 长机和僚机处于某一水平面内(同一高度)斜线编队, 采用固连于僚机的旋转参考坐标系^[4](如图1所示), 它的 x 轴方向与僚机的速度矢量方向一致。在

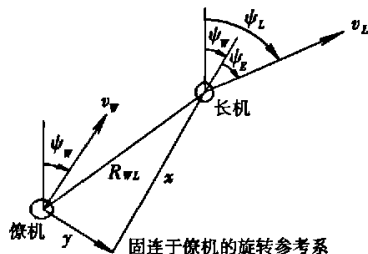


图1 编队飞行的相对运动图

同一平面内飞行时, 不考虑高度方向即 z 向, 长机与僚机的相对运动方程为:

$$\dot{x} = v_L \cos \psi_E + \dot{\psi}_W y - v_W \quad (1)$$

$$\dot{y} = v_L \sin \psi_E - \dot{\psi}_W x \quad (2)$$

式中, x, y 为在固连于僚机的旋转参考系中长机与僚机之间的相对距离在 x 轴和 y 轴上的分量; v_L, v_W

收稿日期: 2006-06-06; 修订日期: 2007-04-19

基金项目: 西北工业大学本科重点扶持资助项目; 西北工业大学英才计划资助项目

作者简介: 朱战霞(1973-), 女, 陕西武功人, 副教授, 博士; 主要研究方向为飞行器飞行力学与控制;

郑莉莉(1982-), 女, 山东济宁人, 博士; 主要研究方向为飞行器飞行力学与控制。

分别为长机与僚机的速度; ψ_L, ψ_W 分别为长机与僚机的航向角; 定义 $\psi_E = \psi_L - \psi_W$ 为航向角偏差, 即长机与僚机速度向量之间的夹角。

编队飞行中的每架无人机上都安装有编队保持自动驾驶仪, 不失一般性地采用一阶自动驾驶仪动力学模型, 可用以下方程来描述^[4]:

$$\dot{v}_W = -\frac{1}{\tau_{vW}}v_W + \frac{1}{\tau_{vW}}v_{Wc} \quad (3)$$

$$\dot{\psi}_W = -\frac{1}{\tau_{\psi W}}\psi_W + \frac{1}{\tau_{\psi W}}\psi_{Wc} \quad (4)$$

$$\dot{v}_L = -\frac{1}{\tau_{vL}}v_L + \frac{1}{\tau_{vL}}v_{Lc} \quad (5)$$

$$\dot{\psi}_L = -\frac{1}{\tau_{\psi L}}\psi_L + \frac{1}{\tau_{\psi L}}\psi_{Lc} \quad (6)$$

式中, τ_{vW} 为僚机的速度时间常数; $\tau_{\psi W}$ 为僚机的航向角时间常数; 下标 c 表示控制量; τ_{vL} 为长机的速度时间常数; $\tau_{\psi L}$ 为长机的航向角时间常数; 僚机的 v_{Wc} , ψ_{Wc} 为自动驾驶仪的输入控制量, 而长机的 v_{Lc} , ψ_{Lc} 看成是扰动量。

式(1)、式(2)为非线性方程。应用小扰动和小角度假设, 在水平编队飞行时, 对其进行线性化处理得:

$$\dot{x} = v_L + \psi_W y_0 - v_W \quad (7)$$

$$\dot{y} = v_L \psi_E - \psi_W x_0 \quad (8)$$

通过整理可得两架无人机编队飞行的数学模型为:

$$\dot{x} = -v_W - \frac{y_0}{\tau_{\psi W}}\psi_W + \frac{y_0}{\tau_{\psi W}}\psi_{Wc} + v_L \quad (9)$$

$$\dot{v}_W = -\frac{1}{\tau_{vW}}v_W + \frac{1}{\tau_{vW}}v_{Wc} \quad (10)$$

$$\dot{y} = \left[\frac{x_0}{\tau_{\psi W}} - v_L \right] \psi_W - \frac{x_0}{\tau_{\psi W}}\psi_{Wc} + v_L \psi_L \quad (11)$$

$$\dot{\psi}_W = -\frac{1}{\tau_{\psi W}}\psi_W + \frac{1}{\tau_{\psi W}}\psi_{Wc} \quad (12)$$

$$\dot{v}_L = -\frac{1}{\tau_{vL}}v_L + \frac{1}{\tau_{vL}}v_{Lc} \quad (13)$$

$$\dot{\psi}_L = -\frac{1}{\tau_{\psi L}}\psi_L + \frac{1}{\tau_{\psi L}}\psi_{Lc} \quad (14)$$

上式中包含了6个变量, 若把 v_L 看成常数 v_0 时, 可认为变量 y, ψ_W, ψ_L (y 通道) 不与变量 x, v_W, v_L (x 通道) 耦合, 但 x 通道中耦合入了 y 通道的变量 ψ_W 和控制变量 ψ_{Wc} 。这样就可以先进行 y 通道的设计和求解, 然后在此基础上进行 x 通道的设计和求解。

2 y 方向控制器的设计

y 通道的误差信号由间距偏差信号和航向角偏

差信号线性合成, 增益分别为 k_y, k_ψ , 形式如下:

$$e_y = k_y(y - y_0) + k_\psi\psi_E \quad (15)$$

式中, $\psi_E = \psi_L - \psi_W$ 为航向角误差; k_y 为 y 向间距偏差信号的控制增益; k_ψ 为航向角偏差信号的控制增益。以 e_y 为偏差信号, 采用 PI 控制律得到航向角控制指令 ψ_{Wc} 的表达式:

$$\psi_{Wc} = k_{yp}e_y + k_{yi}\int_0^t e_y dt \quad (16)$$

式中, k_{yp} 为比例项的控制增益; k_{yi} 为积分项的控制增益。对式(16)进行微分得:

$$\dot{\psi}_{Wc} = k_{yp}(k_y\dot{y} + k_\psi\dot{\psi}_E) + k_{yi}[k_y(y - y_0) + k_\psi\psi_E] \quad (17)$$

3 x 方向控制器设计

x 方向有三个状态变量: x, v_W 和 v_L , 长机的速度输入指令 v_{Lc} 看作干扰输入, 另外, y 方向耦合入 x 方向的航向角及其控制量 ψ_W, ψ_{Wc} 在 x 方向被看作干扰量。

x 方向的控制变量是僚机的速度指令 v_{Wc} , 它响应 x 方向编队间距的变化, 类似于 y 方向, x 方向的综合误差信号由 x 向间距偏差信号和速度偏差信号线性合成, 形式为:

$$e_x = k_x(x - x_0) + k_v v_E \quad (18)$$

式中, $v_E = v_L - v_W$ 为速度偏差; k_x 为 x 向间距误差信号的控制增益; k_v 为速度偏差信号的控制增益。以 e_x 为偏差信号, 采用 PI 控制律得:

$$v_{Wc} = k_{xp}e_x + k_{xi}\int_0^t e_x dt \quad (19)$$

式中, k_{xp} 为比例项的控制增益; k_{xi} 为积分项的控制增益。对式(19)进行微分得:

$$\dot{v}_{Wc} = k_{xp}(k_x\dot{x} + k_v\dot{v}_E) + k_{xi}[k_x(x - x_0) + k_v v_E] \quad (20)$$

4 仿真计算及结果分析

仿真时选取的对象为两架 F-16 无人机^[6], 编队时处于同一水平面内, 飞行高度为 14 km, 马赫数 0.85 (速度 251.46 m/s)。

设理想的编队间距在 x, y 向的投影分别为: x_0, y_0 。若取编队的间距初值为 $x_0 = 30$ m, $y_0 = 15$ m, $t = 0$ 时刻长机的航向角 $\psi_L = 15^\circ$, 僚机的航向角 $\psi_W = 10^\circ$, 长机的初始速度: $v_L = v_0 = 251.46$ m/s, 而僚机的初始速度为 241.46 m/s。

图2~图5给出了对应于长机航向角变为 30° 、飞行速度变为 $v_L = 245$ m/s 时, 僚机飞行参数及编队

间距的变化情况。

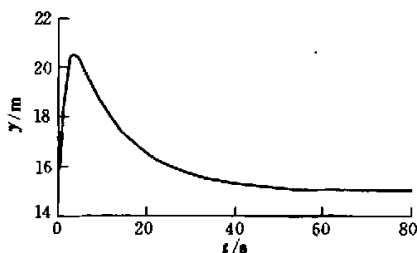


图2 间距 y 的响应曲线

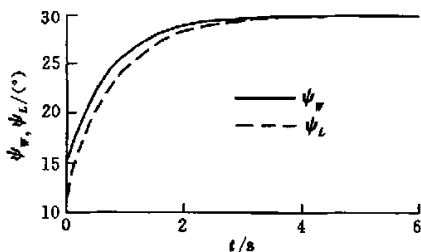


图3 航向角响应曲线

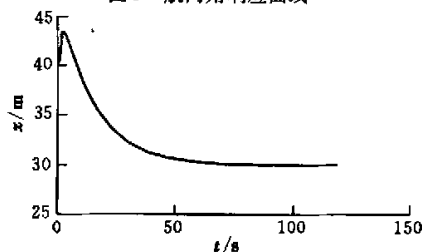


图4 间距 x 的响应曲线

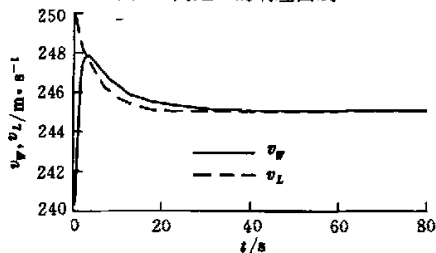


图5 速度响应曲线

图2~图5的仿真结果表明:基于PI控制律设计的控制系统是稳定的,稳态误差为零,最终可以达到控制目的。PI控制系统响应速度较快,能较好地保持两架无人机的相对姿态和相对位置,且允许长机带领编队机动,因此,这种方法可用于实际之中,实现无人机编队的控制。

5 结束语

无人机编队飞行就是多架无人机排列成一定的几何形状一起飞行,并在整个飞行过程中保持队形不变。在编队飞行时,如果某架飞机受到干扰,航向角或速度发生改变,从而与其他飞机的相对位置发生变化,本文所设计的控制系统能够纠正这种变化,恢复无人机的相对姿态与位置;若要控制长机机动,僚机也会跟随机动,同样能在一段时间后保持队形和间距不变。因此,本文的方法可以用于两架或多架无人机编队飞行的控制,具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 朱战霞,袁建平. 无人机编队飞行问题初探[J]. 飞行力学, 2003, 21(2): 5-7.
- [2] Wolfe J D, Chichka D F, Speyer J L. Decentralized Controller for Unmanned Aerial Vehicle Formation Flight [R]. AIAA-96-3833, 1998.
- [3] [美] Paul G Fahlstrom, Thomas J Gleason. 无人机系统导论[M]. 吴汉平译. 北京: 电子工业出版社, 1995.
- [4] Reyna V R, Pachter M, D' Azzo J. Formation Flight Control Automation [R]. AIAA-94-3557, 1994.
- [5] McCamish S, Pachter M, D' Azzo J. Optimal Formation Flight Control [R]. AIAA-96-3868, 1996.
- [6] Andrew W Proud, Pachter M, D' Azzo J. Close Formation Flight Control [R]. AIAA-99-4207, 1999.

The Controller Design of UAV Formation Flight

ZHU Zhan-xia, ZHENG Li-li

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Research on the control of two UAV's formation flight in an oblique line is conducted, and the mathematical model is got, moreover, controllers for x and y channels are designed based on the PI control law. The solutions of the mathematical model are completed using the analytic method and numeric calculation method. The simulation result indicates that the controller can achieve the purpose that the wingman's aircraft maneuvers with the leader aircraft, and it can maintain the separation distance and attitude between them.

Key words: UAV; formation flight; PI control

(编辑:王育林)