

# 无人机指令生成器设计

杨蔷薇, 占正勇

(飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 如何将以时间、位置描述的期望航迹或战术机动转化为可以实时跟踪的以速度、姿态指令描述的期望机动轨迹, 是无人机设计的难点之一。针对这一问题, 提出了一种采用三自由度质点动力学飞机方程, 通过建立机动动作规则库, 利用机动动作设计指令生成器方法, 将描述航迹的时间、位置信息或战术需求转化为无人作战飞机期望的油门、法向过载、航迹角、滚转角信息, 直接作为轨迹跟踪回路的期望指令。在机动动作的设计过程中考虑了飞机的飞行性能以及飞行动态的影响, 生成的期望控制指令合理可实现。仿真结果表明: 该方程实时有效, 生成的控制指令易于跟踪, 可应用于无人机指令生成器设计。

**关键词:** 无人机; 期望航迹; 机动动作; 控制指令

**DOI:** 10.3969/j.issn.1009-3516.2010.03.005

**中图分类号:** V249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)03-0021-05

无人机是未来空中精确打击武器系统的发展方向<sup>[1]</sup>。其决策层能够根据飞机的当前状态、敌我态势以及飞机本身性能等信息对飞行任务进行自动决策, 执行层的轨迹跟踪回路按照期望指令控制飞机, 协调层的指令生成器为执行层提供可以直接使用的无人机期望的速度、航迹角、滚转角、偏航角指令<sup>[2]</sup>。传统的指令生成器一般利用位置与速度、航迹角、航迹偏航角的运动学关系, 通过反向求逆来生成期望指令, 运算量大, 实时性差; 目前按预定航线飞行的侦察类无人机普遍采用的方法为将规划航路分解成直线航段、转弯航段、爬升航段、下降航段, 并依据各航段的特点分别生成相应自动驾驶仪模态期望指令, 运算量小、实时性好, 但这些方法只适用于预规划好的航线飞行任务, 不能满足无人作战飞机对于战术机动飞行任务的需求<sup>[3-4]</sup>。

机动动作反映了飞机的机动能力和人工操纵的一些规则<sup>[5-6]</sup>, 利用机动动作反演期望航路, 可以将描述航迹的位置信息转化为描述姿态的机动信息, 通过选择合理的机动动作拟合期望航迹或完成特定飞行轨迹, 从而将决策层的航迹需求转换为实时机动轨迹<sup>[7-8]</sup>。本文借鉴有人机中驾驶员操纵飞机完成特定飞行轨迹的原理, 综合期望航迹需求和飞机的自身特性, 设计了无人机基于机动动作库的指令生成器。

## 1 设计原理

通过控制飞机的速度、航迹倾角和航迹偏航角, 可以实现对航迹的精确控制, 因此选用三自由度的质点飞机模型就可以满足指令生成器的设计要求。

忽略飞机飞行中的侧滑角, 航迹坐标系下飞机的质点动力学方程如下所示<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dt} = P \cos(\alpha + \varphi_p) - Q - G \sin\theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} = P \sin(\alpha + \varphi_p) \cos\gamma_s + Y \cos\gamma_s - G \cos\theta \\ -mV \cos\theta \frac{d\psi_s}{dt} = P \sin(\alpha + \varphi_p) \sin\gamma_s + Y \sin\gamma_s \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-09-15

基金项目: 航空基金资助项目(2006ZC18003)

作者简介: 杨蔷薇(1975-), 女, 陕西礼泉人, 高级工程师, 主要从事飞行器制导控制律设计及仿真研究。

E-mail: zhan\_facri@sina.com

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= V\cos\theta\cos\psi_s \\ \frac{dH}{dt} &= V\sin\theta \\ \frac{dZ}{dt} &= -V\cos\theta\sin\psi_s\end{aligned}\quad (2)$$

式中:  $m$  为质量;  $V$  为速度;  $P, Y, Q, G$  分别为推力、升力、阻力和重力;  $\alpha, \theta, \gamma_s, \psi_s$  分别为迎角、航迹倾角、航迹滚转角和航迹偏航角;  $\varphi_p$  为发动机安装角;  $X, H, Z$  分别表示前向距离、高度和侧向距离。从方程中可以看出, 改变作用在飞机上的推力、升力和阻力就可以控制飞机的飞行速度、航迹倾角和航迹偏航角, 从而实现对航迹的控制, 而推力、升力和阻力的改变是通过改变油门位置、法向过载和滚转角实现的。

指令生成器就是将期望轨迹和飞机模型轨迹综合, 根据要求的飞行状态转换为可跟踪的实时机动轨迹, 确定如下的函数关系:

$$\begin{aligned}(\theta_{\text{comd}}, \psi_{s,\text{comd}}, V_{\text{comd}}) &= f(X, X_c, Y, Y_c, Z, Z_c) \\ N_{y_c} &= f_1(\theta, \theta_{\text{comd}}) \quad \gamma_{sc} = f_2(\psi_s, \psi_{s,\text{comd}}) \quad P_{LA_c} = f_3(V, V_{\text{comd}})\end{aligned}\quad (3)$$

式中:  $(X_c, Y_c, Z_c)$  为期望轨迹;  $(X, Y, Z)$  为飞机模型实时轨迹;  $(\theta_{\text{comd}}, \psi_{s,\text{comd}}, V_{\text{comd}})$  分别为机动动作期望的航迹倾角、航迹偏航角和飞行速度;  $(\theta, \psi_s, V)$  分别为飞机模型当前的航迹倾角、航迹偏航角和飞行速度;  $(P_{LA_c}, N_{y_c}, \gamma_{sc})$  分别为指令生成器生成的实时机动轨迹, 可以直接作为轨迹跟踪回路的期望控制指令。

基于机动动作的指令生成器设计就是利用机动动作实现函数关系  $f, f_1, f_2, f_3$ , 其中机动动作指令计算模块实现指令生成器关系式  $f$ , 机动动作库实现关系式  $f_1, f_2, f_3$ , 其原理结构见图 1。对于航线飞行任务, 指令生成器包括机动动作指令计算和机动动作库 2 部分; 对于战术机动飞行任务, 指令生成器只包括机动动作库。

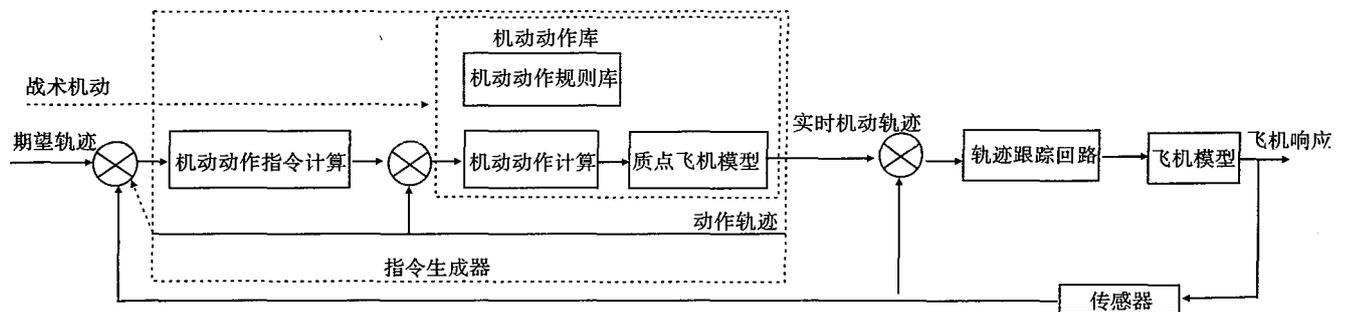


图 1 指令生成器原理结构图

Fig. 1 The structure of command generator

## 2 基于机动动作的指令生成器设计

基于机动动作的指令生成器由机动动作计算和机动动作库两部分构成, 在指令生成过程中, 具体选择哪一种机动动作由决策层根据环境变化和态势感知决定。

### 2.1 机动动作指令计算

机动动作指令计算模块实现关系式  $(\theta_{\text{comd}}, \psi_{s,\text{comd}}, V_{\text{comd}}) = f(X, X_c, Y, Y_c, Z, Z_c)$ 。

以航路点(包含位置和时间)为例来阐述机动动作指令的计算过程<sup>[9]</sup>, 假设相邻 2 个航路点分别为:  $A_1(X_{c1}, Y_{c1}, Z_{c1}, T_1)$ 、 $A_2(X_{c2}, Y_{c2}, Z_{c2}, T_2)$ , 无人机当前点为  $(X, Y, Z, T)$ , 其中  $(X_{c1}, Y_{c1}, Z_{c1})$ 、 $(X_{c2}, Y_{c2}, Z_{c2})$ 、 $(X, Y, Z)$  表示航路点的位置,  $T_1, T_2, T$  表示航路点的时间。用  $L_{12}$  表示航路点  $A_1$  与  $A_2$  的距离,  $\varphi_1$  表示航段  $A_1 - A_2$  的航向角,  $\varphi$  表示当前点航向角,  $\Delta\varphi$  表示  $\varphi$  与  $\varphi_1$  的航向差,  $\Delta H$  表示航路点  $A_1$  与  $A_2$  的高度差。

1) 期望速度指令  $V_{\text{comd}}$ :

$$V_{\text{comd}} = L_{12} / (T_2 - T_1)$$

期望速度与发动机模型以及当前油门位置有关, 要对其值进行修正, 保证依此计算出的期望油门位置处于合理的范围之内。

2) 期望航迹角指令  $\theta_{\text{comd}}$ :

$$\theta_{\text{cmd}} = \arctan(\Delta H/L_{12})$$

期望航迹角与爬升或俯冲过程中的过载有关,要对其值进行修正,保证依此计算出的过载不能大于飞行器在此高度上允许的最大过载值。

3) 期望航迹偏航角指令  $\psi_{s,\text{cmd}}$ :

$$\psi_{s,\text{cmd}} = \Delta\varphi$$

由于在机动飞行中航迹偏航角是由航迹滚转角实现的,将期望航迹偏航角依据要求转换为航迹滚转角  $\gamma_{s,\text{cmd}}$ ,  $\gamma_{s,\text{cmd}} = K_{\Delta Z}\Delta Z + K_{\Delta\varphi}\Delta\varphi$ , 式中  $\Delta Z$  为实时计算的航路侧偏距,  $K_{\Delta Z}, K_{\Delta\varphi}$  为调参系数, 根据航路特性进行调节。

## 2.2 机动动作库设计

机动动作库由机动计算和质点模型组成,以机动动作规则库为支撑,输入  $(\theta_{\text{cmd}}, \psi_{s,\text{cmd}}, V_{\text{cmd}})$  和质点飞机输出,实现关系式  $f_1, f_2, f_3$ , 生成实时机动轨迹。

常规飞行任务中,无人作战飞机可采用平飞、加速、减速、俯冲、跃升、盘旋、转弯等基本机动动作,和直线俯冲、上升转弯、半滚倒转、跃升倒转、直筋斗、斜筋斗、蛇行机动等战术机动动作。

飞行器要完成某一机动动作,就必须满足相应的规则和条件。以等速水平转弯、推杆跃升机动为例来说明如何建立机动动作规则库,在机动动作描述过程中以法向过载  $n_z$ 、航迹滚转角  $\gamma_s$ 、发动机工作状态作为动作指令,以航迹倾角  $\theta$ 、航迹偏航角  $\psi_s$  作为辅助判断条件<sup>[10]</sup>。若要建立完整的机动动作规则库,其他机动动作参见文献[9]。

### 2.2.1 等速水平转弯机动

1) 进入阶段和形成阶段的指令:  $\gamma_s = \gamma_{s,\text{cmd}}; N_y = 1.0/\cos\gamma_s$

2) 改出阶段的指令:  $\gamma_s = 0.0; N_y = 1.0$

3) 结束时的高度基本保持不变,速度保持不变,航迹偏转角达到规定值。此过程中发动机油门位置依据速度要求确定。

### 2.2.2 推杆跃升机动

1) 进入阶段的指令:

$$\gamma_s = 0.0, N_y = C_1$$

以  $\theta$  达到期望的  $\theta_{\text{cmd}}$  为进入段结束条件。

2) 形成阶段的指令:

$$\gamma_s = 0.0, N_y = \cos\theta_{\text{cmd}}$$

3) 改出阶段的指令:

$$\gamma_s = 0.0, N_y = C_2$$

4) 结束时到达希望的高度。

推杆跃升机动在进入段要求  $C_1 \leq$  该高度上的最大允许过载值,在直线段  $N_y$  取决于期望爬升角的大小。在改出段要求  $C_2 < 1.0$ , 其中  $C_1, C_2$  表示 2 个不等的常数。此过程中发动机为“最大”或“加力”状态。

## 2.3 机动动作的选取

由无人作战平台的决策层根据环境变化和态势感知决定机动动作的选取。对于战术机动飞行任务,由于指令生成器只包括机动动作库,可以按照战术机动要求直接选择相应的战术机动动作,生成实时机动轨迹。对于航线飞行任务,如果航迹仅有航向方向的变化,就可以根据航向、速度的要求选择等速水平转弯、加减速水平转弯等机动动作;如果航迹仅有高度方向的变化,就可以根据高度、速度的要求选择俯冲、跃升等机动动作;如果航迹即有航向变化又有高度变化,就可以选择加减速转弯上升下降机动。

## 3 仿真验证

以某型先进无人机为例进行仿真验证,仿真分 2 部分进行:

### 3.1 以航线飞行仿真为主

选取某条任务链包括起飞、高空突进、低空突防、战场攻击、退出阶段,其中战场攻击属于战术机动飞行任务,选取直线俯冲机动,其余属于航线飞行任务,以期望经度、纬度、高度描述。指令生成器生成的期望指

令曲线见图2,机动动作反演拟合的航路与期望航路的对比曲线见图3,图中“○”表示期望的航路点,实线表示机动动作反演的机动航路。从对比曲线可以看出,基于机动动作的指令生成器很好地反演了飞行任务链,生成的机动轨迹指令均在合理的范围之内连续变化。

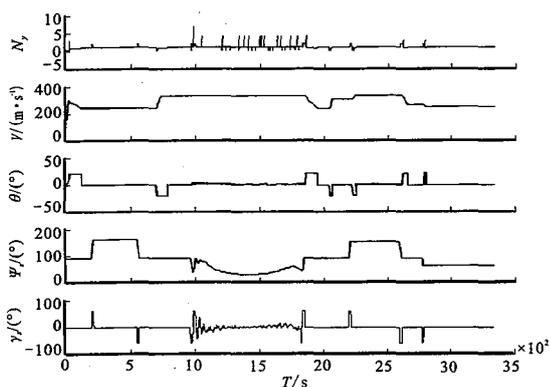


图2 航线期望指令曲线

Fig.2 The curve of airway expectation instruction

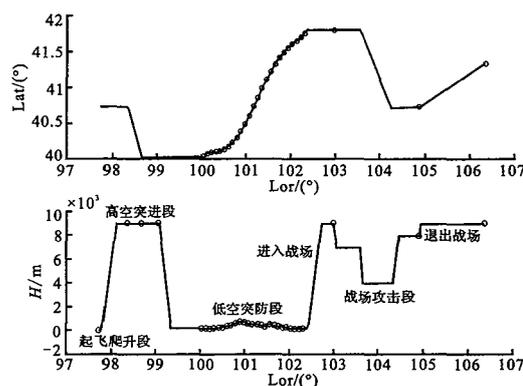


图3 航路对比曲线

Fig.3 The contrast curve of airway

### 3.2 以战术机动仿真为主

机动动作串包括平飞、加速、筋斗、跃升、俯冲、跃升倒转、蛇形机动、上升转弯等,初始高度3 000 m,初始马赫数0.7,初始航向217.0°。指令生成器生成的期望指令曲线见图4,机动轨迹曲线见图5。从仿真曲线可以看出,在完成上述机动动作串的过程中,指令生成器生成的期望机动轨迹指令连续合理,轨迹跟踪回路按照这样的指令就可以完成上述战术动作。

基于机动动作库的指令生成器在计算机动轨迹过程中,只要求按照相应的机动规则进行简单数学计算,不需要复杂的逻辑和大量计算,实时性好。

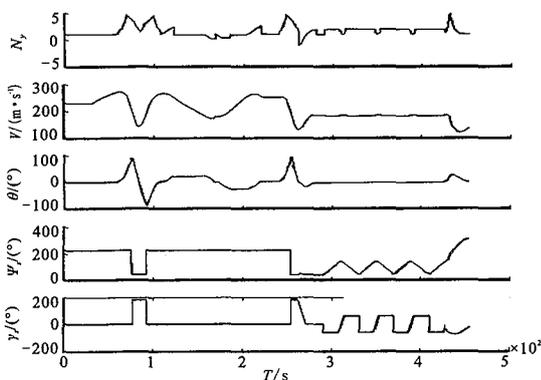


图4 动作期望指令曲线

Fig.4 The curve of maneuver expectation instruction

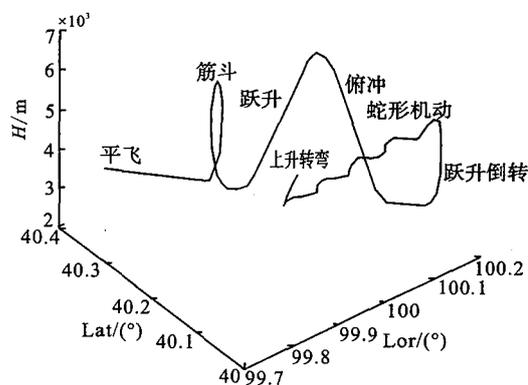


图5 机动轨迹曲线

Fig.5 The curve of maneuver trajectory

## 4 结束语

本文提出的基于机动动作的指令生成器不仅可以用于航线飞行任务,也可以用于无人作战飞机的战术机动指令生成。由于采用三自由度的质点飞机模型按照相应的机动动作规则进行计算,计算量小,生成的轨迹指令实时性好;同时在机动动作设计计算过程中充分考虑了无人机本身的机动性能,生成的轨迹指令易于跟踪,克服了传统指令生成器运算量大、实时性差、仅能用于航线飞行任务的缺点。仿真结果表明,基于机动动作的指令生成器为无人作战飞机指令生成器的设计提供了一种新的思路和方法。

## 参考文献:

- [ 1 ] Greu, Gonsalves Dan L, Paul G. Agent - based Simulation Environment for UCAV Mission Planning and Execution[ R]. AIAA 2000 - 3734.
- [ 2 ] 杨晖. 无人作战飞机自主控制技术研究[ J]. 飞行力学, 2006, 24(2): 1 - 4.  
YANG Hui. Research on UCAV Autonomous Control Technology[ J]. Flight Dynamics, 2006, 24(2): 1 - 4. (in Chinese)
- [ 3 ] Menon P K A, Kim E. Optimal Trajectory Synthesis for Terrain Following Flight[ J]. Journal of Guidance Control and Dynamics. 1991, 14(4): 807 - 813.
- [ 4 ] Trankle, Bryson T L. Control Logic to Track the Outputs of A Command Generator or Randomly Forced Target[ C]//The Proceedings of Guidance and Control Conference. Hollywood: [ s. n. ], 1977: 8 - 10.
- [ 5 ] 张翔伦, 杨蔷薇. 平台自主控制大机动鲁棒轨迹生成算法验证报告[ R]. 西安: 飞行自动控制研究所, 2004.  
ZHANG Xianglun, YANG Qiangwei. Research on UCAV Large Angle Maneuver Robust Trajectory Generation[ R]. Xi'an: Flight Automatic Control Research Institute, 2004. (in Chinese)
- [ 6 ] 张翔伦, 杨蔷薇. 基于机动动作库的实时轨迹生成与仿真研究[ J]. 飞行力学, 2008, 26(3): 29 - 32.  
ZHANG Xianglun, YANG Qiangwei. Research on Real - Time Trajectory Generation Based on Tactical Maneuvers Data Base [ J]. Flight Dynamics, 2008, 26(3): 29 - 32. (in Chinese)
- [ 7 ] Freddie Lee A. Should the Army Tactical Command and Control System Provide Command and Control Automation to the Heavy Maneuver Battalion/Task Force? [ R]. ADA272719, 1993.
- [ 8 ] Mills, Herring Kathryn A. Function Requirements for Combat Engineer Command and Control in the Maneuver Control System [ R]. ADA170985, 1986.
- [ 9 ] 黄太平. 飞机性能工程[ M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
HUANG Taiping. Airplane Performance Engineering[ M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [ 10 ] 杨蔷薇. 无人机低空突防 4D 制导指令生成器设计[ C]//第一届中国导航、制导与控制年会. 北京: 导航、制导与控制学会, 2007: 1 - 4.  
YANG Qiangwei. The 4D Guidance Command Generator Design for Low Altitude Penetration of UCAV[ C]//The 1st Proceedings of the Aviation, Guidance and Control. Beijing: CGNCC, 2007: 1 - 4. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)

## Design of Command Generator for UCAV

YANG Qiang - wei , ZHAN Zheng - yong

(Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** It is an important problem how to effectively transform the information of time and attitude into aircraft's expectation control command of velocity and attitude on condition of taking UCAV's performance constrains into account. This paper presents a new method which apply maneuver movement matching planned path by establishing maneuver action database to create the expectation commands such as thrust brake gate, perpendicular load, flight path angle and flight path bank. The UCAV's performance constrains are taken into consideration in the design of the method, so the created expectation commands are reasonable and easy to be realized. The results of simulation show that the method has a good real - time and the created command is easy to be followed.

**Key words:** unmanned combat aerial vehicle(UCAV); expectation path; maneuver movement; control command