

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.01.017

## 基于侧偏修正的无人驾驶旋翼机转弯飞行控制

陈洁, 王道波, 盛守照, 陈淼

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

**摘要:** 针对无人自转旋翼机在转弯飞行过程中, 由于外界扰动而导致的飞行轨迹偏离问题, 对无人自转旋翼机的转弯飞行机理和受力情况进行了分析, 在此基础上, 提出一种以侧偏距离和侧偏率来修正旋翼机滚转角指令和航向角速率指令的控制策略, 给出了基于侧偏修正的旋翼机转弯飞行控制回路。仿真结果表明: 所提方法能够使得旋翼机在转弯过程中精确跟踪预定航迹, 达到预期的控制效果。

**关键词:** 自转旋翼机; 转弯飞行; 侧偏修正; 航迹修正

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Turning Flight Control of Unmanned Gyroplanes Based on Deviation Correction

Chen Jie, Wang Daobo, Sheng Shouzhao, Chen Miao

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The trajectory of the unmanned gyroplane will deviate from the set route in the process of turning flight. Aiming to the problem, the mechanism and stress are analyzed in the process of turning flight on the unmanned gyroplane first. Based on this, a control method that the deviated distance and deviated rate are used to fix the roll command and heading rate command is presented. The turn model control loop is designed accordingly to achieve the flight control under the set turning route. Simulation results show that the gyroplane can track the desired trajectory accurately by using the proposed method. The desired effects are achieved.

**Key words:** unmanned gyroplane; turning flight; deviation correction; trace correction

### 0 引言

无人驾驶自转旋翼机(简称无人旋翼机)是一种既区别于直升机和固定翼飞机, 又在某些方面与两者类似的旋翼类飞行器<sup>[1]</sup>。在构型方面, 旋翼机机身上方有与直升机类似的旋翼, 但该旋翼不与发动机固连, 不是通过发动机驱动旋转, 而是依靠在飞行过程中的相对气流来吹动旋转, 为旋翼机提供升力; 旋翼机机身尾部有与固定翼飞机类似的方向舵实现航向控制; 动力方面, 配置了一台发动机, 用于驱动螺旋桨转动, 从而产生推力或拉力为旋翼机提供前进动力, 这一点与固定翼飞机类似。由于旋翼机结构与动力来源的独特性, 使它具有很多优点: 与直升机相比, 它的机械结构简单, 重量轻, 不需要各种复杂的减速器和机械铰链机构, 维护成本低, 具有很高的经济性<sup>[2]</sup>; 与固定翼飞机相比, 它可以实现无动力下滑, 对起飞降落场地要求不高, 当发动机停车时, 由于旋翼具有自转特性可以提供升力, 也能安全着陆, 具有很强的低空低速性能和安全性<sup>[3-4]</sup>。因此, 无人驾驶自转旋翼机在一些对悬停和垂直起降要求不高的场合, 可以替代无人直升机, 在军用和民用方面具有一定的应用前景。

转弯飞行是无人旋翼机一个必不可少的飞行状态。旋翼机在设定航线下进行转弯飞行时, 要求能够跟踪预定航线, 在水平面内连续改变飞行方向, 保证飞行速度波动和侧滑角尽量小, 并能保持飞行高度不变。因此, 笔者通过设计适当的控制律, 以实现和改善无人旋翼机转弯飞行功能。

### 1 无人旋翼机转弯飞行控制原理分析

#### 1.1 无人旋翼机转弯飞行原理分析

无人旋翼机的旋翼采用半刚性跷跷板式旋翼系统, 前三点式起落架, 单垂尾结构。一台活塞式发动机驱动一副螺旋桨提供飞机前进的推力。操纵机构包括油门舵、纵向周期变距舵、横向周期变距舵、方向舵和一套刹车执行机构。

对于无人旋翼机, 旋翼产生的拉力取决于来流速度和旋翼桨盘迎角 2 个因素, 飞行时同时受到升力、阻力、发动机推力和自身重力的作用<sup>[5]</sup>。在转弯飞行时, 机身有一定的横滚, 旋翼拉力在机体轴纵向平面内可分解为 2 个分量, 分别为旋翼升力和旋翼空气阻力。再将旋翼升力分别沿垂直方向和水平方向分解。当转弯达到平衡状态时, 旋翼升力竖

收稿日期: 2011-08-09; 修回日期: 2011-08-26

基金项目: 航空科学基金“变稳直升机控制技术”资助项目(20101352015)

作者简介: 陈洁(1986—), 女, 江苏人, 硕士研究生, 从事无人机飞行控制、旋翼机飞行控制研究。

直分量和机身所受升力构成的总升力与机身重力平衡，旋翼升力水平分量提供转弯时的向心力，旋翼空气阻力和机身所受阻力和与发动机推力平衡。当飞机进行转弯飞行时，可通过操纵横向周期变距舵来实现飞机的滚转，并操纵方向舵来抑制侧滑角。由于滚转时飞机升力的竖直分量减小，水平分量变大，飞机高度会下降，因此还需操纵油门舵和旋翼的纵向变距舵来实现飞机的高度和速度保持<sup>[6]</sup>。

### 1.2 旋翼机转弯飞行横纵向受力分析

忽略旋翼机的桨盘安装角，对旋翼机转弯时的受力进行分析，设旋翼机转弯飞行时的转弯角速率为  $r$ ，速度为  $V$ ，俯仰姿态角  $\theta$ ，滚转姿态角为  $\phi$  时，其水平方向和竖直方向的受力分析图如图 1、图 2。

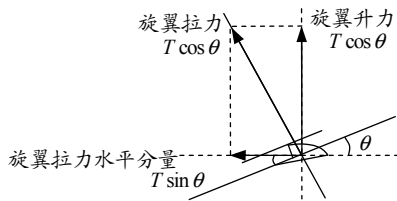


图 1 无人旋翼机转弯纵向受力图

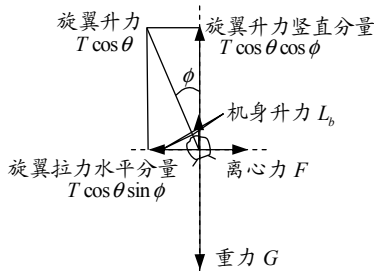


图 2 无人旋翼机转弯横向受力图

发动机推力  $F_T$  与发动机转速成正比，旋翼拉力与空速  $V$  的平方成正比，机身阻力  $F_D$  与旋翼机的速度平方成正比，机身重力  $G$  方向竖直向下。在转弯飞行进入稳态以后，机身阻力与旋翼拉力水平分量的合力与发动机推力平衡；旋翼升力的水平分量与离心力平衡，提供飞机转弯所需的向心力；旋翼升力的竖直分量与机身重力平衡<sup>[7-8]</sup>。

故可得到水平方向和竖直方向的力平衡方程：

$$\begin{cases} F_T = F_D + T \sin \theta \\ F = T \cos \theta \sin \phi = m V r \\ T \cos \theta \cos \phi = G \end{cases} \quad (1)$$

## 2 旋翼机转弯飞行回路设计

### 2.1 侧偏修正控制率设计

考虑到飞行转弯时，存在扰动或飞行控制参数

非最优的情况，旋翼机并不能完全按照设定的航线飞行，因此必须考虑侧偏修正问题。假设在导航坐标系下，给定转弯航线为以  $O(z_0, x_0)$  为圆心  $R$  为半径的圆弧，点  $P(z, x)$  为旋翼机的当前位置， $P'(z', x')$  为  $P$  点与  $O$  点连线与圆弧的交点， $x_n$  为北向， $z_n$  为东向，如图 3。

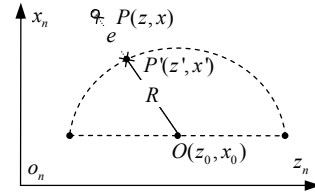


图 3 无人旋翼机侧偏距离计算

定义线段  $PP'$  表示侧偏距离  $e$  的大小， $P$  在圆弧外  $e$  为正，在圆弧内  $e$  为负，侧偏率  $\dot{e}$  定义为  $e$  对时间  $t$  的导数。

笔者的设计思想是：利用侧偏距离及其变化率来修正横向通道滚转角给定量和偏航角速率给定量，使旋翼机在转弯飞行时，即使偏离设计航线后也能自动修正到应飞航线上。

侧偏距离计算公式为

$$e = PP' - P'O = \sqrt{(z - z_0)^2 + (x - x_0)^2} - R \quad (2)$$

对时间  $t$  进行求导，可以得到侧偏率的计算公式为

$$\dot{e} = \frac{de}{dt} = \frac{(z - z_0)V_z + (x - x_0)V_x}{\sqrt{(z - z_0)^2 + (x - x_0)^2}} \quad (3)$$

式中  $V_z, V_x$  分别为旋翼机的北向速度和东向速度。

利用实时解算出来的侧偏距离和侧偏率，可以得到滚转角修正量  $\Delta \phi_g = a e + b \dot{e}$ ，其中  $a$  和  $b$  为常数，可根据实际飞行情况进行调整。同时，为实现协调转弯，航向角速率也应有相应的修正量，根据协调转弯公式，可以得到航向角速率的修正量  $\Delta r_g = g(\tan \Delta \phi_g / u)$ 。将滚转角修正量和航向角速率修正量加入控制回路中，可以得到如图 4 所示的侧偏修正策略框图。

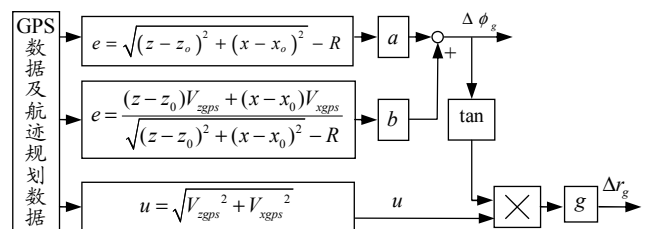


图 4 无人旋翼机侧偏修正策略框图



图 8 为加入侧偏修正以后的旋翼机转弯速度仿真图，在起飞阶段，飞机由速度为零升到到 14 m/s，有一定的超调，但在允许范围内；在转弯过程中，转弯速度在转弯初始阶段受侧滑角影响有一定的波动，但很快有恢复到初始值并保持稳定。

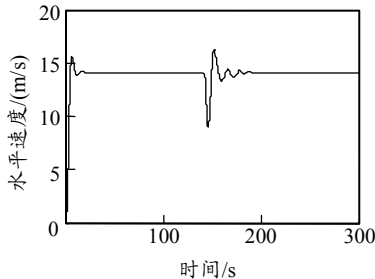


图 8 转弯速度仿真图

图 9 在设定航线下的高度仿真图，在起飞阶段飞机高度逐渐上升，直至设定值，在转弯阶段，由于横向通道和航向通道的协调作用，飞行高度能够保持稳定，满足旋翼机转弯飞行的性能和要求。

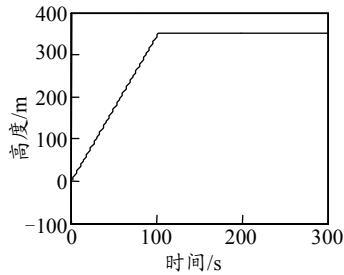


图 9 高度仿真图

### 4 结束语

根据无人驾驶自转旋翼机转弯飞行时特性，在协调转弯回路中加入侧偏修正，可以在协调转弯的同时使旋翼机更加精确地跟踪设定的转弯航线。试验结果证明，该控制方法可以有效完成不同转弯半径和转弯速度下的旋翼机转弯指令。

### 参考文献:

[1] 陆洋, 李建波, 朱清华. 自转旋翼机配平及操纵响应特性[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(5): 577-578.  
 [2] 王焕瑾, 高正. 自转旋翼的气动优势和稳定转速[J]. 航空学报, 2001, 22(4): 337-338.  
 [3] Hollmann M. Modern Gyroplane Design[M]. Minterey, 1992.  
 [4] Leishman J G. Development of the Autogyro a Technical Perspective[J]. Journal of Aircraft, 2004, 41(4): 765-781.  
 [5] 朱清华, 李建波, 倪先平. 旋翼机总体设计的几个问题[J]. 航空科学技术, 2006(5): 29-30.  
 [6] 郝春杰, 王道波, 陈淼, 等. 无人驾驶自转旋翼机高度控制[J]. 航空兵器, 2011, 1: 13-16.  
 [7] 陈健. 无人直升机飞行控制技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.  
 [8] 李乐奇. 无人机横侧向姿态控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.  
 [9] 吴森堂, 费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
 [10] 薛定宇. 控制系统仿真与计算机辅助设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

\*\*\*\*\*

(上接第 43 页)

表 2 试验中内膛尺寸检查数据表 mm

射弹数	阳线尺寸					
	起点	与初始 差值	中点	与初始 差值	末点	与初始 差值
0	Φ35.07	0	Φ35.04	0	Φ35.06	0
500	Φ35.07	0	Φ35.04	0	Φ35.06	0
1 000	Φ35.07	0	Φ35.04	0	Φ35.06	0
1 500	Φ35.07	0	Φ35.04	0	Φ35.07	0.01
2 000	Φ35.07	0	Φ35.05	0.01	Φ35.07	0.01
2 500	Φ35.07	0	Φ35.05	0.01	Φ35.07	0.01
3 000	Φ35.07	0	Φ35.05	0.01	Φ35.07	0.01
3 500	Φ35.07	0	Φ35.05	0.01	Φ35.08	0.02
4 000	Φ35.07	0	Φ35.05	0.01	Φ35.08	0.02
4 500	Φ35.08	0.01	Φ35.05	0.01	Φ35.08	0.02
5 000	Φ35.08	0.01	Φ35.05	0.01	Φ35.08	0.02
5 500	Φ35.08	0.01	Φ35.05	0.01	Φ35.08	0.02
6 000	Φ35.08	0.01	Φ35.06	0.02	Φ35.08	0.02

从表 2 的数据得知：在寿命周期内，身管阳线

尺寸变化在 0.01~0.02 mm 之间，铬层磨损轻微，未发现身管有异常磨损，达到寿命周期时，没有出现掉铬和无铬等情况。

### 4 结论

从寿命试验的验证结果可以看出，对发射器身管铬层厚度在原设计基础上减薄是可行的，铬层厚度阳线铬层厚度调整为 0.05~0.10 mm 是科学合理的。铬层厚度调整后，身管每件镀铬时间降为 2~3 h，相对于每件缩短了 3~4 h。该方法不仅缩短了生产时间，降低了镀铬溶液、水、电、气等物质消耗和生产成本，而且提高了生产效率以及产品的合格率，使整个武器系统的可靠性得到提升。

### 参考文献:

[1] 欧学柄, 等. 自动武器结构设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.