DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.06.041

无人机航迹优化与跟踪技术研究

贾文涛,李春涛

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 211106)

摘　要:为了实现对任务航点的精确跟踪,提出了一种基于动态虚拟目标点的非线性制导方法。根据无人机与动态虚拟目标点的距离,建立动态虚拟目标点速度与无人机速度的关系。对于给定的任务航点序列,采用贝塞尔曲线进行航迹优化,得到曲率连续的参数化期望航迹曲线。设计基于动态虚拟目标点的非线性制导律,通过小扰动线性化,使该制导律在跟踪直线和圆弧航迹时的误差响应为一个2阶系统,跟踪变曲率航迹时,不受曲线曲率的影响,具有良好的跟踪性能。仿真结果表明该方法在跟踪直线、圆弧及变曲率航迹时都可以无振荡地收敛到期望航迹。

关键词:无人机;贝塞尔曲线;航迹优化;航迹跟踪

中图分类号:V279;TP391.9　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1671-5276(2020)06-0156-06

Trajectory Optimization of Unmanned Aerial Vehicle and Research on Its Following Technology

JIA Wentao, LI Chuntao

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: To follow the task waypoints accurately, a nonlinear guidance method based on dynamic virtual target points is proposed. According to the distance between the UAV and the dynamic virtual target point, the relationship of speed between them is established. For given task waypoints, the Bezier curve is used for the trajectory optimization to obtain a parameterized desired curve trajectory with continuous curvature. The nonlinear guidance law based on the dynamic virtual target points can be linearized according to small disturbance linearization principle. The following error response of the guidance law in the following linear and circular trajectories is a second-order system. And it isn't affected by the curvature of curve with the variable curvature trajectory followed and it shows the good following performance. The simulation results show that the method can be used to converge to the desired trajectory without oscillation in following straight lines, arcs and variable curvature curves.

Keywords: unmanned aerial vehicle; Bezier curve; trajectory optimization; trajectory following

0　引言

近年来,随着无人机技术的飞速发展,其在军事及民用领域发挥着越来越重要的作用[1]。例如,军事中利用无人机在复杂环境下的侦察能力,完成对威胁目标的精确打击任务;在民用领域,无人机正逐步代替人类完成繁琐、枯燥和危险的工作。无人机的总体系统架构可分为5层[2]:航点规划器、动态航迹平滑器、航迹跟踪器、飞行控制器和无人机本体。无人机的航迹跟踪能力是其安全完成飞行任务的保障,本文利用航迹优化和航迹跟踪技术,提出了一种精确可靠的航迹跟踪方法。

在航迹优化领域,Dubins提出的由直线段和常曲率圆弧段组成的Dubins曲线被广泛应用于机器人和无人机的航迹平滑中。为解决Dubins曲线在直线段和圆弧段连接处的曲率不连续问题,基于变曲率弧段的Clothoid曲线被提出,可使无人机得到连续的制导指令[3]。由于多项式样条曲线满足曲率连续的要求,ANASTASIOS M Lekkas利用Hermite三次样条曲线实现对离散航点的平滑,完成了无人机对目标航点的跟踪[4]。ZHAO Shulong利用B样条曲线,实现了对变曲率航迹的拟合,提高了无人机的跟踪精度[5]。毕达哥拉斯矢端曲线(PH曲线)拥有等距线的优良性质,根据这一特性,可以在PH曲线周围定义一段安全距离来防止碰撞,用于解决多架无人机的集群飞行问题[6]。

目前的航迹跟踪方法可分为两大类,基于几何计算的方法和基于控制理论的方法[7]。传统的几何计算法由导弹制导技术演变而来,包括纯追踪法、视线法(LOS)[4]以及二者相结合的方法(PLOS)。这些方法可实现对简单航迹的跟踪,但对于复杂的变曲率航迹跟踪性能较差。MIT的SANGHYUK Park利用虚拟目标点,设计了一种L_1非线性制导律(NLGL)[8-9],该方法设计简单,易于实现,跟踪性能依赖于虚拟探测长度的选取。利用控制理论进行航迹跟踪问题研究,易于分析制导律的稳定性和鲁棒性。基

基金项目:国防科技青年人才培育基金项目(56XIB18014)

第一作者简介:贾文涛(1996—),男,湖北荆州人,硕士研究生,研究方向为飞行控制技术。

于比例-积分-微分(PID)的经典控制理论可实现对简单航迹的跟踪[10]。现代控制理论技术如:线性二次型调节器(LQR)[11]、模型预测控制(MPC)[12-13]、自适应控制[14]等,也被用于解决航迹跟踪问题,提高了抗风干扰能力,使航迹跟踪具有较好的鲁棒性。

为满足实际应用中对航点的跟踪,本文利用 Bezier 曲线对离散航点进行动态平滑,形成一条曲率连续的航迹。在期望航迹上引入一个具有动态约束的虚拟目标点作为跟踪对象[15],设计非线性制导律,实现对期望航迹的跟踪。

1　无人机的航迹优化

1.1　无人机质点运动方程

本文主要研究无人机在二维平面的航迹跟踪问题。假设无人机在二维平面内定高、定速飞行,采用文献[12]中的协调飞机动力学(CFV)模型。CFV 模型由常微分方程描述,复杂度较小,将无人机运动简化为质点运动,其动力学表达式如式(1)所示。

$$\begin{aligned} &\dot{x}=V_g\cos\varphi_g\\ &\dot{y}=V_g\sin\varphi_g\\ &\dot{\varphi}_g=\frac{g\tan\varphi}{V_g}\\ &a_{\mathrm{cmd}}=g\tan\varphi \end{aligned} \tag{1}$$

式中:$(\dot{x},\dot{y})$为无人机在地面坐标系中的北向速度和东向速度;V_g、φ_g、$\dot{\varphi}_g$、a_{cmd}、φ、g 分别为无人机地速、航向角、航向角速率、侧向加速度、滚转角及重力加速度。

1.2　航迹优化技术

无人机若以离散航点两两连接形成的直线段航迹进行跟踪,往往会在航点切换时无法满足自身的机动约束造成较大的跟踪误差,所以需要利用动态航迹平滑器将离散航点优化为一条满足无人机运动约束特别是机动性条件的可飞行航迹。n 次贝塞尔曲线的伯恩斯坦(Bernstein)的表达式[18]如下:

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{s}(u)=\sum_{j=0}^{n}b_jB_{j,n}(u),0\leqslant u\leqslant 1\\ &B_{j,n}(u)=\frac{n!}{j!\ (n-j)!}u^j(1-u)^{n-j} \end{aligned} \tag{2}$$

式中:b_j 为曲线的控制点;$B_{j,n}(t)$为伯恩斯坦基函数,其 k 阶导矢为:

$$\overset{(k)}{\boldsymbol{s}}(u)=\frac{n!}{(n-k)!}\sum_{j=0}^{n-k}\Delta^k\boldsymbol{b}_jB_{j,n-k}(u),0\leqslant u\leqslant 1 \tag{3}$$

式中 $\Delta^k\boldsymbol{b}_j$ 为 k 阶向前差分矢量,它可由 $k-1$ 阶向前差分矢量递推得到,其定义如式(4)所示。

$$\begin{aligned} &\Delta^k\boldsymbol{b}_j=\Delta^{k-1}\boldsymbol{b}_{j+1}-\Delta^{k-1}\boldsymbol{b}_j\\ &\Delta^0b_j=b_j\\ &\Delta^1b_j=\Delta^0b_{j+1}-\Delta^0b_j=b_{j+1}-b_j\\ &\Delta^2b_j=b_{j+2}-2b_{j+1}+b_j \end{aligned} \tag{4}$$

本文采用组合贝塞尔曲线来完成航迹的平滑,引入航迹分段序号,将贝塞尔曲线作为每个航段的样条曲线,可得到式(5)中用局部参数表示的组合 n 次贝塞尔航迹曲线。贝塞尔曲线具有很多优良和宝贵的性质[18],使其更利于航迹形状设计。

$$\boldsymbol{s}_i(u)=\sum_{j=0}^{n}b_{ni+j}B_{j,n}(u),i=0,1,\cdots,m-1 \tag{5}$$

式中:i 为航段序号,表明整条航路由一个个航段组成;控制顶点 b_{ni+j} 中的 b_{ni} 表示各个离散航迹点,每段航路曲线由 $n+1$ 个控制点控制。当第 $i-1$ 段与第 i 段两相邻航路连接时,要求他们在连接点处具有直到 r 阶相等的左右导数,称曲线在该点 C^r 连续。航段连接点的左右导矢方程如下:

$$s_{i-1}^{(k)}(1)=\frac{n!}{(n-k)!}\Delta^kb_{ni-k},k=0,1,\cdots,r \tag{6}$$

$$s_i^{(k)}(0)=\frac{n!}{(n-k)!}\Delta^kb_{ni},k=0,1,\cdots,r \tag{7}$$

联立式(6)和式(7)得到航段连接点处的 C^r 连续条件:

$$\Delta^kb_{ni-k}=\Delta^kb_{ni},k=0,1,\cdots,r \tag{8}$$

对于给定的航迹点使用组合 3 次贝塞尔曲线进行航迹平滑得到 C^2 连续的航迹,可实现航路曲率的连续性,由式(8)可推出在连接点的 1 阶导矢连续确立了无人机速度的连续性,2 阶导矢连续确立了无人机侧向加速度的连续性,得到式(9)。

$$\begin{aligned} &b_{3i}=(b_{3i+1}+b_{3i-1})/2\\ &b_{3i}-2b_{3i-1}+b_{3i-2}=b_{3i+2}-2b_{3i+1}+b_{3i} \end{aligned} \tag{9}$$

引入辅助点 $d_i(i=0,1,\cdots,m)$,如图 1 所示,由 4 个航迹点 q_0、q_1、q_2、q_3、q_4 组成一条航路,将航路分成 4 段,每条航路由 4 个控制点控制,首尾 2 个控制点与航迹点重合,得到如下关系:

$$\begin{aligned} &2b_{3i-1}-b_{3i-2}=2b_{3i+1}-b_{3i+2}=d_i\\ &q_i=b_{3i}\quad q_0=d_0\quad q_m=d_m \end{aligned} \tag{10}$$

联立式(9)和式(10)可得关系式(11):

$$b_{3i}=\frac{1}{6}d_{i-1}+\frac{2}{3}d_i+\frac{1}{6}d_{i+1} \tag{11}$$

通过求解辅助点,进而确定所有的控制点,带入式(5)得到航迹平滑曲线。该方法求解贝塞尔曲线不涉及基函数的运算,通过控制点就可得到航迹曲线,相比于 Hermite 三次样条曲线计算量大大减小。

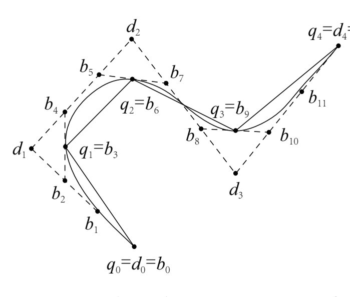

图 1　组合 3 次贝塞尔曲线示意图

在实际的无人机航迹跟踪问题中,一般是根据无人机执行的任务类型,设计任务目标点,形成一个离散的期望航点序列。期望航点如表 1 所示,利用贝塞尔曲线进行航迹平滑,得到的曲线如图 2 所示。可以看出经过航迹平滑

后的航迹曲率连续,更加符合无人机的机动飞行约束,为制导律的设计奠定了基础。

表 1　航点信息

航点序号 i	航点坐标/m	航点序号 i	航点坐标/m
1	(50,50)	6	(94,900)
2	(100,200)	7	(142,1 100)
3	(124,300)	8	(100,1 300)
4	(86,500)	9	(74,1 400)
5	(136,700)	10	(50,1 500)

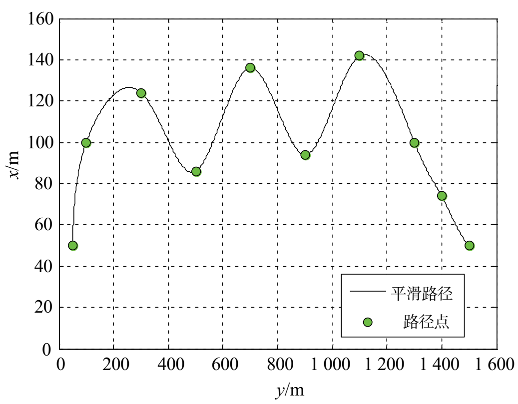

图 2　航迹平滑仿真示意图

2　非线性制导律设计

2.1　动态虚拟目标跟踪点

对于一般的直线和圆弧航迹,可将无人机在航迹上的垂直投影点作为目标跟踪点,求取无人机与目标航迹的侧偏距和航向角偏差,利用这些信息进行制导律的设计。但对于一条变曲率航迹,由于其曲率的无规则变化,利用垂直投影求出的目标参考点可能存在多个,同时目标航向与侧偏也可能在短时间内存在较大波动。

为了解决这一问题,本文提出了一种动态虚拟目标点的设计方法。在目标航迹上定义一个动态的虚拟目标点,该目标点的移动速度同无人机地速存在如下关系:

$$V_t = V_g \frac{R^*}{L} \tag{12}$$

其中:V_t 为虚拟动态目标点在目标航线上移动的速度;V_g 为无人机地速;L 为无人机距虚拟目标点的距离;参数 R^* 为设定的虚拟目标点与无人机的最小距离,它的选取可根据无人机滚转角的响应时间确定。

由公式(12)可以看出,当无人机远离目标航迹时,虚拟点移动速度很小,几乎不动,此时无人机追踪航迹上的一个固定点快速靠近航迹。当无人机靠近航迹时($L=R^*$),虚拟目标点的速度增加并与无人机的速度相等,无人机与虚拟目标点在航路长度上始终相差 R^*,并紧跟虚拟目标点飞行。与传统的航迹跟踪方法相比,该方法并没有将目标航迹和无人机独立开来,而是将无人机与动态虚拟目标点通过相对距离及速度建立起联系。

虚拟目标点在每个制导律解算周期内进行更新,确定下一时刻无人机需要跟踪的虚拟目标点,对于直线航迹,更新方法如式(13)所示。

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix}_{i-1} + V_t \Delta T \begin{bmatrix} \cos\psi_{ref} \\ \sin\psi_{ref} \end{bmatrix} \tag{13}$$

其中:x_t、y_t 为虚拟目标点位置;V_t、ΔT、ψ_{ref} 分别为虚拟目点速度、制导律解算周期及航迹方位角。

跟踪半径为 R_c、圆心坐标为$[x_o, y_o]$的圆弧航迹时,定义沿顺时针方向旋转为正方向,虚拟目标点的更新如下:

$$\Delta\psi = V_t \Delta T / R_c$$

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} + R_c \begin{bmatrix} \cos(\Delta\psi + \psi_{i-1}) \\ \sin(\Delta\psi + \psi_{i-1}) \end{bmatrix} \tag{14}$$

其中 $\Delta\psi$、ψ_{i-1} 分别为单位制导律周期内虚拟点相对圆心转动的角度和上一时刻虚拟目标点相对圆心的方位角。

跟踪一般的离散航点时,首先利用上节的离散航点平滑方法,得到目标航迹的参数曲线如式(15)所示。

$$\begin{cases} x = F(u) \\ y = G(u) \end{cases} \quad (a \leqslant u \leqslant b) \tag{15}$$

虚拟目标点的更新可利用下式求出:

$$\Delta S = \int_{u_{i-1}}^{u_i} \sqrt{F'^2(u) + G'^2(u)}\, \mathrm{d}u = V_t \Delta T \tag{16}$$

其中:u_{i-1}、u_i 分别为上一时刻和当前时刻虚拟目标点在航迹上的参数值;ΔS 为单位制导律解算周期内虚拟目标点行进的距离。可以利用组合辛普森定积分公式和二分迭代法求取参数 u_i,当前航段剩余距离<ΔS,需要进行航段切换,采用分航段积分确定参数 u_i 的值。

2.2　非线性制导律设计

常规的导弹目标拦截模型,导弹只需要击中目标即可完成任务,而无人机跟踪虚拟目标点的制导模型中,无人机并不会与虚拟目标点交会,而是一直跟踪下去,直到到达最后的任务航点。基于这一特点,本文设计的制导律,在考虑无人机航向角和视线角的偏差基础上,加入了虚拟目标点的航向角和视线角的偏差,制导律方法如式(17)所示。

$$a_{cmd} = \frac{V_g^2}{L}[4(\lambda - \gamma_a) + 2(\lambda - \gamma_t)] \tag{17}$$

其中 a_{cmd}、L、γ_a、γ_t、λ 分别为侧向加速度指令、无人机与虚拟目标点的距离、无人机航向角、虚拟目标点航向角、无人机与虚拟目标点之间的视线角。

当无人机跟踪直线航迹,到达航迹上的某点时,若实际速度方向与该点的虚拟速度方向不同,会立刻脱离直线航迹,造成摆振现象,航迹跟踪收敛较慢,跟踪圆弧或变曲率航迹问题会更加突出。将虚拟目标点的航向信号引入制导律的设计中,这样在跟踪航迹时,无人机会调整航向飞向虚拟目标点。同时,在到达虚拟目标点前调整无人机航向,使其在到达目标航迹时与虚拟目标点速度方向一致,使实际航迹快速收敛到目标航迹。

2.3　制导律分析

当评价一个制导算法的好坏时通常的依据是其航迹跟踪误差的收敛速度。定义航迹跟踪误差 d 为无人机距航迹最近的距离,即通过投影算法得到的侧偏距的大小,

无人机在期望航迹右边侧偏距为正。下面从直线航迹跟踪和圆弧航迹跟踪两个方面来进行制导律的分析。

1）直线航迹跟踪

基于小扰动假设,当无人机跟踪直线段,$L\rightarrow R^*$ 时,虚拟目标点的速度等于无人机速度,如图 3 所示,可得到如下关系:

$$\gamma_t-\gamma_a\approx-\frac{\dot{d}}{V_g},\lambda-\gamma_t=-\frac{d}{R^*} \tag{18}$$

同时,侧向加速度

$$a_{cmd}=\ddot{d}\cos(\gamma_t-\gamma_a)\approx\ddot{d} \tag{19}$$

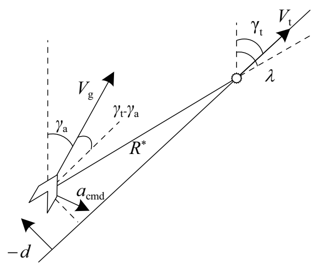

图 3　直线航迹跟踪示意图

联立式(17)-式(19)得:

$$\ddot{d}+4\left(\frac{V_g}{R^*}\right)\dot{d}+6\left(\frac{V_g}{R^*}\right)^2 d\approx0 \tag{20}$$

其特征多项式的形式是一个简单的二阶系统:

$$s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2=0 \tag{21}$$

该二阶系统的自然频率和阻尼比为:

$$\omega_n=\sqrt{6}\frac{V_a}{R^*},\ \zeta=\sqrt{\frac{2}{3}} \tag{22}$$

航迹跟踪误差在时域上的响应曲线如式(23)所示。

$$d(t)=e^{-\zeta\omega_n t}\left[C_1\sin\left(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}t\right)+C_2\cos\left(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}t\right)\right] \tag{23}$$

对于一组初始条件 $d(0),\dot{d}(0)$,

$$C_1=\frac{\zeta d(0)+(\dot{d}(0)/\omega_n)}{\sqrt{1-\zeta^2}},C_2=d(0) \tag{24}$$

可以看出当时间 $t\rightarrow\infty$,航迹跟踪误差以 $\zeta\omega_n=2\frac{V_g}{R^*}$ 的速度收敛到 0。

2）圆弧航迹跟踪

假设无人机与虚拟目标点以相距 R^* 的距离在跟踪圆弧航迹,如图 4 所示。理想情况下,无人机应沿半径为 R_c 的圆弧由 A 点在轨跟踪飞行到 C 点,但实际由于受到外界环境很小的扰动,无人机偏离圆弧轨道位于 B 点,进行脱轨跟踪,基于此小扰动假设:

$$\eta\approx\frac{\dot{d}}{V_g},\ \delta\approx\frac{d}{R^*} \tag{25}$$

式中:η 为航向偏差角;δ 为在轨跟踪和脱轨跟踪的视线角偏差。图 4 中 α 为线段 AC 的弦切角。

侧向加速度可以表示如下:

$$a_{cmd}=\left[\ddot{d}-\frac{(V_g\cos\eta)^2}{R_c}\right]\frac{1}{\cos\eta}\approx\ddot{d}-\frac{V_g^2}{R_c} \tag{26}$$

由圆的几何关系可以得到:

$$\begin{gathered}\lambda-\gamma_t+\delta=\alpha\\ \lambda_a-\lambda=\alpha+\delta+\eta\end{gathered} \tag{27}$$

基于小角度假设并且当 $d\ll 2R_c$ 时:

$$\sin\alpha=\frac{R^*}{2R_c+d}\cos\delta\rightarrow\sin\alpha\approx\alpha\approx\frac{R^*}{2R_c} \tag{28}$$

联立式(17)和式(27),得

$$a_{cmd}=-\frac{V_g^2}{R^*}[4(\alpha+\delta+\eta)+2(\delta-\alpha)]=-\frac{V_g^2}{R^*}(2\alpha+6\delta+4\eta) \tag{29}$$

将式(25)、式(26)和式(28)带入式(29):

$$\ddot{d}-\frac{V_g^2}{R_c}\approx-\frac{V_g^2}{R^*}\left[2\left(\frac{R^*}{2R_c}\right)+6\frac{d}{R^*}+4\frac{\dot{d}}{V_a}\right] \tag{30}$$

化简,得

$$\ddot{d}+4\left(\frac{V_g}{R^*}\right)\dot{d}+6\left(\frac{V_g}{R^*}\right)^2 d\approx0 \tag{31}$$

可以看出它同样是一个 2 阶系统的形式,跟踪误差的收敛速度如式(32)所示。

$$\zeta\omega_n=2\frac{V_g}{R^*} \tag{32}$$

其收敛速度与圆弧半径无关,说明了该制导律在跟踪圆弧和直线时具有一致性,无需进行制导律逻辑切换,应用起来更加简单。

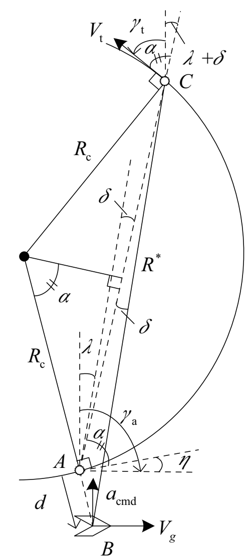

图 4　圆弧航迹跟踪示意图

2.4　制导律性能对比

从文献[8]可得出 L_1 非线性制导律,其侧向加速度指令:

$$a_{cmd}=\frac{2V_g^2}{L_1}\sin(\gamma_a-\lambda) \tag{33}$$

式中 L_1 为一个固定的探测步长。当无人机与期望航迹距离 $>L_1$ 时,无法确定虚拟跟踪点,该制导律失效,需要额外的制导逻辑来弥补这一缺陷,而本文提出的 R^* 制导律不存在这个缺点。为了对比两者的收敛速度,令 $L_1=R^*$,可

以得到非线性制导律在跟踪直线航迹时的收敛速度:

$$\zeta\omega_n=\frac{V_g}{R^*} \tag{34}$$

跟踪圆弧航迹时的收敛速度:

$$\zeta\omega_n=\frac{V_g}{R^*}\sqrt{1-\left(\frac{R^*}{2R_c}\right)^2} \tag{35}$$

与式(32)对比可以看出,R^* 制导律的跟踪误差收敛速度是 L_1 非线性制导律的 2 倍。在跟踪圆弧航迹时,其跟踪误差收敛速度受到圆弧半径的影响,R^* 制导律不受圆弧半径的影响,可以将这一性质应用到变曲率航迹的跟踪上。

3　仿真验证

为了验证论文提出的航迹跟踪控制方法的优劣,本节进行 3 种情况的仿真,直线航迹跟踪、圆弧航迹跟踪和离散航迹点跟踪。在前两个情况中加入 L_1 非线性制导律的跟踪对比仿真。仿真时采用 CFV 模型,给定样例无人机定常飞行速度为 $V_g=30\,\mathrm{m/s}$,无人机运动状态约束最大侧向加速度 $a_{max}=10\,\mathrm{m/s^2}$。

3.1　直线跟踪仿真

无人机初始位置为(0 m,0 m),初始航向角为 90°,参考航迹起点为(100 m,0 m),期望航迹角 90°。分别取 2 种制导律的参数 L_1 和 R^* 为 100 m 和 150 m。仿真结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,L_1 制导律在到达期望航迹后会出现超调,而 R^* 制导律可以无超调地收敛到期望航迹。L_1 制导律在参数为 100 m 和 150 m 的收敛时间分别为 14.43 s 和 21.09 s,R^* 制导律在参数为 100 m 和 150 m 的收敛时间分别为 7.22 s 和 10.51 s,R^* 制导律的误差收敛速度大约是 L_1 制导律的 2 倍,这与理论分析一致。

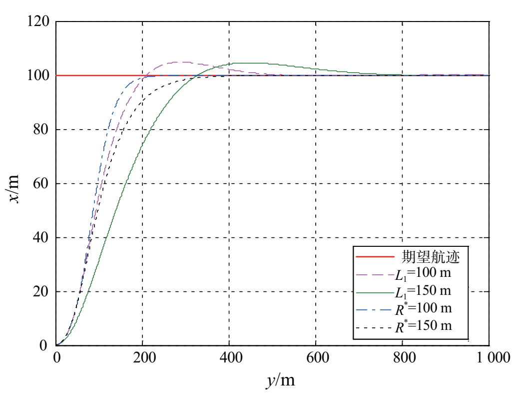

图 5　直线航迹跟踪仿真示意图

3.2　圆弧跟踪仿真

无人机初始位置为(500 m,200 m),初始航向角为 45°,参考航迹起点为(400 m,200 m),跟踪圆心为(200 m,200 m),半径为 200 m 的圆弧航迹,其中 2 种制导律参数选取 $L_1=R^*=50\,\mathrm{m}$,对于 L_1 制导律,当初始位置距离参考航迹较远时,选取无人机在参考航迹上的投影点作为虚拟参考点,从图 6 可以看出,L_1 制导律在收敛到参考航迹之前,存在超调和摆振现象,而 R^* 制导律可以无超调地收敛到期望航迹。从图 7 的侧向加速度指令可以看出,相比于 L_1 制导律,R^* 制导律中加入了动态虚拟目标点的航向角,得到的制导律指令更加平缓,有利于控制回路的跟踪,避免了无人机进行大机动飞行,加快了航迹跟踪误差的收敛速度。

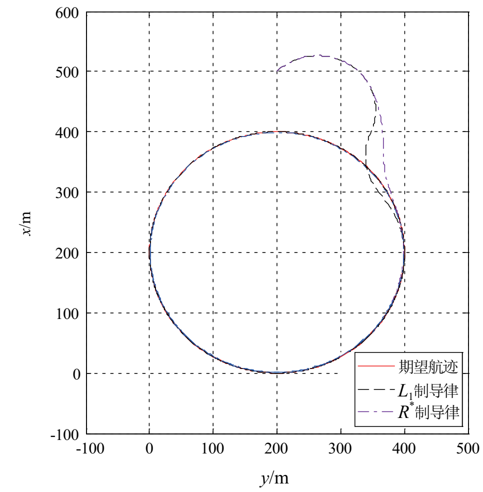

图 6　圆弧航迹跟踪仿真示意图

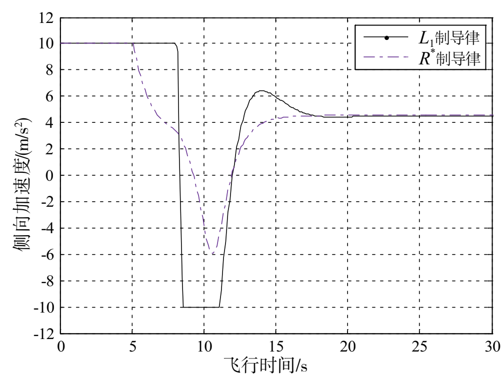

图 7　圆弧航迹跟踪侧向加速度指令示意图

3.3　离散航迹点跟踪

使用 R^* 制导律跟踪 1.2 节中经过航迹平滑后的期望航迹。无人机初始位置为(50 m,10 m),初始航向角为 45°,$R^*=20\,\mathrm{m}$,仿真结果如图 8 所示。可以看出,R^* 制导律在跟踪经过参数化的变曲率曲线时,几乎与期望航迹重合,并且在航段切换过程中跟踪效果良好,跟踪误差在 0.5 m 以内。从图 9 的仿真结果可以看出,无人机航向角始终紧跟视线角及虚拟点航向角,达到了精确跟踪的效果。

4　结语

本文针对无人机航迹跟踪问题,提出了一种基于动态虚拟目标点的 R^* 非线性制导律。在跟踪离散航点时,采用贝塞尔曲线进行航迹优化,并提出一种贝塞尔曲线的简单求解方法,得到了曲率连续的参数曲线,解决了航

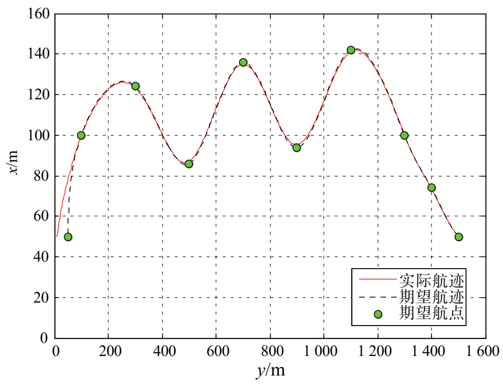

图 8　离散航点跟踪仿真示意图

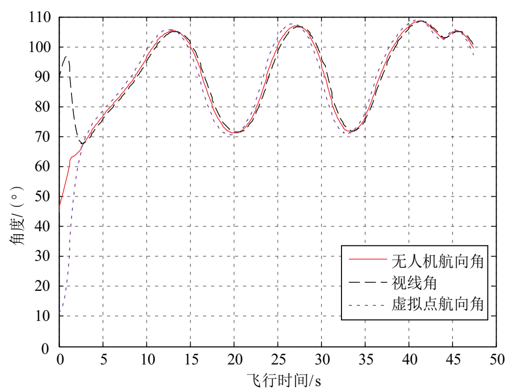

图 9　离散航点跟踪航向角收敛示意图

点切换时出现较大跟踪误差的问题。该制导律可以利用无人机与期望航迹的距离,建立无人机与动态虚拟目标点的联系。通过小扰动线性化,分析了制导律的跟踪性能,在跟踪直线和圆弧航迹时,该制导律跟踪误差的响应是一个 2 阶系统,与 L_1 制导律相比,跟踪误差收敛速度是其 2 倍。当无人机初始点距离期望航迹较远时,不需要设计额外的制导逻辑进行引导。同时利用 R^* 制导律不受曲线曲率影响的优点,对参数化的变曲率航迹进行跟踪,仿真结果显示 R^* 制导律可以实现对变曲率航迹的精确跟踪。

参考文献:

[1] GOERZEN C,KONG Z,METTLER B. A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2010, 57(1): 65-100.

[2] WEI Ren,RANDAL W Beard. Trajectory tracking for unmanned air vehicles with velocity and heading rate constraints[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2004,12(5): 706-716.

[3] SHANMUGAVEL M,TSOURDOS A,WHITE B. Co-operative path planning of multiple UAVs using dubins paths with clothoid arcs[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(9): 1084-1092.

[4] ANASTASIOS M Lekkas,THOR L Fossrn. Integral LOS path following for curved paths based on a monotone cubic hermite spline parametrization[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2014,22(6): 2287-2301.

[5] ZHAO Shulong,CONG Yirui,WANG Xiangke,et al. Curved path following control for fixed-wing unmanned aerial vehicles with control constraint[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017,89: 107-119.

[6] TSOURDOS A,WHITE B,SHANMUGAVEL M. Cooperative path planning of unmanned aerial vehicles[M]. Chichester: Wiley & Sons,2011:1-185.

[7] SUJIT P B, SRIKANTH Saripalli, SOUSA B J. Unmanned aerial vehicle path ollowing: a survey and analysis of algorithms for fixed-wing unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Control Systems Magazine,2014,34(1): 42-59.

[8] SANGHYUK Park,JOHN Deyst,JONATHAN P How. A new nonlinear guidance logic for trajectory tracking[C]. AIAA Guidance, Rhode Island: Navigation and Control Conference. 2004: 2004-4900.

[9] SANGHYUK Park,JOHN Deyst,JONATHAN P How. Performance and lyapunov stability of a nonlinear path following guidance method[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2007, 30(6): 1718-1728.

[10] IHNESOK Rhee,SANGHYUK Park,CHANG Kyung Ryoo. A tight path following algorithm of an UAS based on PID control [C]. TaipeI:SICE Annual Conference. 2010: 1270-1273.

[11] LEE S,CHO A,KEE C. Integrated waypoint path generation and following of an unmanned aerial vehicle[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology,2010,82(5): 296-304.

[12] RUCCO A, AGUIAR A P. A predictive path following approach for fixed-wing unmanned aerial vehicles in presence of wind disturbances[C]. Switzerland: Robotics Conference, 2015: 623-634.

[13] STASTNY T J, DASHY A, SIEGWART R. Nonlinear MPC for fixed-wing UAV trajectory tracking: implementation and flight experiments[C]// AIAA Guidance,Grapevine,Texas: Navigation and Control Conference,2017.

[14] CAO C,HOVAKIMYAN N,KAMINER I.Stabilization of cascaded systems via L1 adaptive controller with application to a UAV path following problem and flight test results[C]. American Control Conference Piscataway,USA: IEEE,2007: 1787-1792.

[15] MEDAGODA E D B, GIBBENS P W. Synthetic waypoint guidance algorithm for following a desired flight trajectory[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics,2010,33(2): 601-606.

[16] 王勋,张代兵,沈林成. 一种基于虚拟力的无人机路径跟踪控制方法[J]. 机器人,2016,38(3): 329-336.

[17] 李樾,陈清阳,侯中喜. 自适应引导长度的无人机航迹跟踪方法[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(7): 1481-1490.

[18] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M]. 北京:高等教育出版社,2013: 167-178.

收稿日期:2019-09-18