

基于无杆牵引车的舰载机路径跟踪控制

王正, 黄葵, 范加利

(海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 针对航母机库空间狭小、障碍物多等因素导致舰载机转运难度大的问题, 以无杆牵引车和舰载机组成的铰接系统为研究对象, 研究了舰载机在机库甲板调运作业的路径自动跟踪问题, 建立了基于无杆牵引车的舰载机转运模型, 将舰载机期望路径近似为直线和圆弧的组合, 基于反馈线性化和时间-状态形式设计各路段的跟踪控制律, 仿真结果表明, 所设计的控制律和各控制律间的切换策略可实现舰载机沿组合路径的跟踪; 基于自动跟踪的调运, 可放宽对牵引车司机牵引技术的要求, 确保调运作业时间准确、可控; 该研究为后续自动跟踪的实现打下基础。

关键词: 舰载机; 路径跟踪; 反馈线性化; 转运模型

Path Tracking Control for Carrier Aircraft Handled by Tractor Without Bar

Wang Zheng, Huang Kui, Fan Jiali

(Naval Aviation Engineering Institute—Qingdao Branch, Qingdao 266041, China)

Abstract: Aim at some difficulty problem such as narrowness space and multi-obstacles, path tracking of carrier aircraft in carrier handling was studied. The articulated vehicle with tractor and aircraft was selected as study object. The kinematics model of carrier aircraft handling based on non-bar tractor. The path tracking controllers for rectilinear and circular paths were designed separately based on feedback linearization and time-state system model. The switching strategy for the two controller was proposed also. The simulation results show that the proposed controllers and switching strategy can realize arbitrary path tracking for carrier aircraft. The demand for tracking skill of handling crew can be released by the handling task based on automatically tracking, and the handling time would be exact and controlled. This study was the ground for realization of automatic handling.

Keywords: carrier aircraft; path tracking; feedback linearization; kinematics model

0 引言

航空母舰是以舰载机为作战武器的大型海上平台, 其战斗力的发挥取决于搭载的舰载机数量和其出动强度。航母上舰载机的布列位置包括机库和飞行甲板。国内外学者对机库甲板舰载机的最优化布列和路径规划问题做了大量研究, 目的在于最大化利用机库空间搭载更多的飞机, 并取得了一定的成果^[1-4]。然而, 随着机库内舰载机数量的增多, 必然增加舰载机在机库内调运作业的难度和复杂性, 影响调运作业效率, 而调运作业效率是影响舰载机出动强度的关键因素之一。当前, 舰载机调运作业主要依靠引导员和牵引车司机的密切配合来完成, 其中牵引车司机的技术和经验尤其关键, 本文针对舰载机调运在实际实施中遇到的熟练司机少、培养难度大、路径跟踪难等问题, 研究了使用无杆牵引车进行舰载机调运的路径自动跟踪问题, 以期指导人员培训, 并为舰载机调运作业辅助(自动)实施系统的研制打下理论基础。使用牵引车转运舰载机的运动可以建模为一类典型的带有拖车的拖挂式移动机器人的运动, 国内外学者针对带拖车移动机器人的路径规划与跟踪进行了大量的研究工作^[5-7], 并取得了丰硕的可供借鉴研究成果。

1 舰载机转运的运动学模型

使用无杆牵引车转运舰载机的示意图如图 1 所示。假设:

收稿日期: 2016-11-22; 修回日期: 2016-12-19。

作者简介: 王正(1970-), 男, 山东青岛人, 副教授, 主要从事舰面航空保障系统控制方向的研究。

(1) 舰载机在转运过程中各轮均无滑动; (2) 假设舰载机的前轮与牵引车的铰接点位于牵引车后轮中心点处。以舰载机两主轮中点处 (x_a, y_a) 为研究点建立牵引系统的运动学方程为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_a &= \cos\theta \cos\phi v_c \\ \dot{y}_a &= \sin\theta \cos\phi v_c \\ \dot{\phi} &= -\frac{\sin\phi}{l_a} v_c + \frac{1}{l_c} \tan\delta \\ \dot{\theta} &= \frac{\sin\phi}{l_a} v_c \end{aligned} \quad (1)$$

其中: v_c 为牵引车的速度, δ 为牵引车前轮转角, l_c 为牵引车前后轮轴之间的距离, θ 为舰载机的艏向角, ϕ 是舰载机纵轴和牵引车纵轴之间的夹角。

定义状态变量 $x = (x_2, y_2, \varphi, \theta)^T$, 系统 (1) 可以表示为如下形式:

$$\dot{x} = g_1(x_2, y_2, \varphi, \theta) v_c + g_2(x_2, y_2, \varphi, \theta) \omega \quad (2)$$

其中: $\omega = v_c \tan\delta$, 该变量为牵引车的角速度信号。由于 $g_1(0, 0, 0, 0) = (1, 0, 0, 0)^T$ 和 $g_2(0, 0, 0, 0) = (0, 0, \frac{1}{l_c}, 0)^T$, 状态方程 (2) 满足一类非完整约束系统的条件, 该类系统的基本特征是输入维数 (m) 小于状态维数 (n), 且 $\{g_1(0), g_2(0), \dots, g_m(0)\}$ 线性独立。文献 [6] 中已经证明该类系统不能通过连续静态状态反馈镇定。因此, 对于系统 (1) 不能采用常规控制器设计方法。

2 路径跟踪控制器

2.1 直线路径跟踪控制器设计

对于直线路径跟踪问题, 对系统 (2) 定义坐标变换:

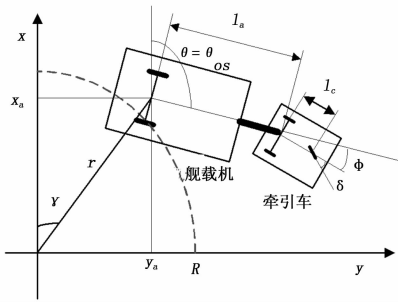


图 1 无杆牵引系统示意图

$$\begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_a \\ \varphi \\ \theta \\ x_a \end{pmatrix} \quad (3)$$

定义输入变换：

$$\mu_1 = \frac{w}{v_c} = \tan\delta, \mu_2 = \cos\varphi\cos\theta v_c \quad (4)$$

系统 (2) 的状态方程可变换为：

$$\frac{d}{d\tau} \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{pmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{pmatrix} \frac{dt}{d\tau} = \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} y_a \\ \varphi \\ \theta \end{pmatrix} \frac{dt}{dx_a} = \begin{pmatrix} \tan\xi_3 \\ -\frac{\tan\xi_2}{l_a \cos\xi_3} \\ \frac{\tan\xi_2}{l_a \cos\xi_3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{l_c \cos\xi_3 \cos\xi_2} \\ 0 \end{pmatrix} \mu_1 \quad (5)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{dx_a}{dt} = \cos\varphi\cos\theta v_c = \mu_2 \quad (6)$$

由于机械约束的存在使得：

$$|\varphi| \leq \varphi_{\max} < \frac{\pi}{2}, |\theta| \leq \theta_{\max} < \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

则当 $v_c > 0$, x_a 为严格单调增函数，当 $v_c < 0$, x_a 为严格单调减函数，因此，可以通过式 (6)，控制状态方程 (5) 中的时间标量 x_a 。对于状态方程 (5)，通过坐标变换：

$$\begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_a \\ \tan\theta \\ \frac{\tan\varphi}{l_a \cos^3\theta} \end{pmatrix} \quad (8)$$

和反馈控制律：

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{l_a l_c \cos^3\varphi \cos^4\theta}{-l_c \cos\varphi (3\sin^2\varphi \tan\theta - \tan\varphi)} \right] \quad (9)$$

分别求 ξ_1, ξ_2, ξ_3 对 x_a 的导数，并视 v 为新的输入变量，可得状态方程 (5) 的精确线性化形式为：

$$\frac{d\xi}{dx_a} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \xi + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v \quad (10)$$

对于系统 (10)，可采用线性系统控制器设计方法设计其控制规律为：

$$v = [p_1 \quad p_2 \quad p_3] \xi \quad (11)$$

利用坐标变换 (8) 可得：

$$v = p_1 y_a + p_2 \tan\theta + p_3 \frac{\tan\varphi}{l_a \cos^3\theta} \quad (12)$$

并将 (12) 式代入 (9)，可得状态方程 (5) 的控制律，从 (12) 和 (9) 可以发现，输入 δ 可以仅由状态 y_a, θ 和 φ 决定。而且，如果反馈控制律 (12) 镇定系统 (10)，随着 $x_a \rightarrow \infty$ ，将有 $\xi \rightarrow 0$ 。因此随着 x_a 的增加 y_a, φ 和 θ 都将趋近于 0。因为当牵引车正向运动时， x_a 单调增加，则舰载机将逐步跟踪 X 轴。

对于牵引车顶推舰载机的逆向运动，只需令 $x'_a = -x_a$ 即可按上述方法设计逆向运动的控制律。

对于跟踪问题，可对于线性化系统 (10) 采用控制律：

$$v = p_0 \int (y_r - y_a) dx_a + p_1 \xi_1 + p_2 \xi_2 + p_3 \xi_3 \quad (13)$$

其中： y_r 为期望输出。利用式 (9)，控制律 (13) 可改写为：

$$v = p_0 \int (y_r - y_a) \cos\theta \cos\varphi dt + p_1 y_a + p_2 \tan\theta + p_3 \frac{\tan\varphi}{l_a \cos^3\theta} \quad (14)$$

2.2 圆弧路径跟踪控制器设计

对于圆弧形路径跟踪问题，仍可采用第 3.1 节中的控制律设计方法，唯一不同的是时间标量和状态变量的选择。

为简化计算，如图 1 所示，用极坐标形式表示舰载机主轮中心位置为 (γ, r) ，极坐标原点取为期望圆弧路径的中心，期望圆弧路径的半径为 R 。控制目标是随着牵引车的前向或后向运动使得 $r \rightarrow R$ 。

当牵引车与舰载机构成的运动体沿圆弧顺时针方向运动时， γ 单调增加，此时使用 $\lambda = R\gamma$ 为时间标量。可以很容易得出如下形式的舰载机极坐标下的运动方程：

$$\frac{d}{d\lambda} \begin{pmatrix} r-R \\ \varphi \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r \cot(\theta-\gamma)}{R} \\ -\frac{r \tan\varphi}{R l_c \sin(\theta-\gamma)} \\ \frac{r \tan\varphi}{R l_c \sin(\theta-\gamma)} - \frac{1}{R} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{r}{R l_c \cos\varphi \sin(\theta-\gamma)} \\ 0 \end{pmatrix} \tan\delta \quad (15)$$

其中：时间标量 λ 对时间导数如下：

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{R \sin(\theta-\gamma)}{r} \cos\varphi v_c \quad (16)$$

使用如下坐标变换和反馈律：

$$\begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r-R \\ \frac{r \cot(\theta-\gamma)}{R} \\ \frac{l_a (\cos^2(\theta-\gamma) + 1) \sin(\theta-\gamma) - r^2 \tan\varphi}{R^2 l_c \sin^3(\theta-\gamma)} \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{(\cos^2\delta + 5) l_a l_c \cos\delta \cos^3\varphi \sin\alpha}{r^2} + \frac{l_c \sin\varphi - 9 l_a \cos\alpha \cos^2\varphi \sin\varphi}{r} + \frac{3 l_c \cos\alpha \cos\varphi \sin^2\varphi - R^3 l_a l_c \cos^3\varphi \sin^4\alpha}{l_a \sin\alpha r^3} v \right) \quad (18)$$

其中： v 为新的输入变量， $\alpha = \theta - \gamma$ 。通过变换 (17) 和反馈 (18)，状态方程 (15) 可精确线性化为形式如 (10) 式的线性系统，其中用 l 代替 x_a ，后续的控制律设计方法与上一节相同。

(下转第 104 页)

30%以上，满足了设计要求。

5 结语

按照传统方法，整个干燥过程至少需要 3 个小时，本文通过均匀设计的实验方案得出了最佳工艺参数，干燥时间只需要 1 个半小时，为改善浸漆线圈干燥工艺提供了一定的数据和经验。

参考文献：

[1] 张贤明, 卢浩闻. 油水分离设备“真空洗涤”工艺实验研究 [J]. 重庆工商大学学报, 2013. 30 (5), 78-80.

[2] 周乔君, 蒋庆. 基于 PLC 的真空氮质谱自动检漏系统的设计

[J]. 制造业自动化, 2013 (18): 64-68.

[3] 周乔君, 蒋庆. 热力膨胀阀氮质谱自动检漏系统的研制 [D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.

[4] 严春平, 宋耀华, 熊望志. 采用 PWM 方式的 PLC 恒温控制系统设计 [J]. 现代制造, 2015 (36): 121-121.

[5] 张梅. 电机绝缘水平综述 [J]. 工会博览理论研究, 2011 (5): 194-194.

[6] 李柏榕. 基于 MODBUS 的温度控制器的研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2009.

[7] 刘莉. 橡胶配方均匀设计优化系统的开发与应用 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2004.

(上接第 100 页)

舰载机移动路径可以近似为若干直线运动和圆弧运动的组合，该路径可表示为 $S_p = \{L_i\}$ 。相应地有控制器集合 $C_p = \{v_i\}$ 。根据期望路径在这些控制器间切换，从而实现任意路径的跟踪控制。对于复杂控制策略，控制律间的切换容易导致整个闭环系统的不稳定。针对这一问题，采用以下控制器切换策略，首先，应保证控制器切换过程中牵引车的操舵角连续。考虑两条交叉直线的跟踪问题，建设舰载机先沿直线 1 移动，到交叉点 C 后沿直线 2 移动。当舰载机靠近交叉点时（舰载机参考位置在以点 C 为圆心，以 R_c 为半径的圆内），同时计算沿直线 1 和沿直线 2 的控制输入，当二者相等时，切换控制器。当跟踪路线在直线和圆弧之间切换时，采用同一切换策略。在切换控制策略下，闭环系统稳定性的证明见文献[5]。

3 仿真研究

在 MATLAB2008 环境下，不是一般性，假设机库内无障碍物，以顺航向方向，取机库的右下角为坐标原点，取系统参数为： $l_a = 8\text{ m}$, $l_c = 4\text{ m}$, $|\varphi_{\max}| \leq \frac{7}{18}\pi$, $|\delta_{\max}| \leq \frac{\pi}{4}$ 。期望路径取直线 1 为 $y = x$ ，直线 2 为 $y = 60$ ，两线交点为 (60, 60)，路径起点为 (20, 20)，舰载机初始位置为 (12, 10)，初始航行角为 0 度，牵引车速度取为 1 m/s，仿真曲线如图 2~4 所示。

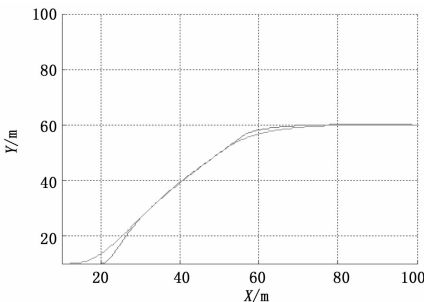


图 2 舰载机参考点有功轨迹

仿真曲线表明，本文设计的控制律可实现舰载机在路径 1 和路径 2 上的跟踪。当舰载机的参考点落入以路径交叉点为圆心，半径为 3 m 的圆内，实施跟踪控制律切换，仿真表明，该在切换策略和控制律作用下系统保持稳定，并能快速跟踪上期望路径。

4 结论

使用无杆牵引车牵引舰载机的运动学模型为一类非线性不完整约束系统模型，针对舰载机牵引路径的跟踪问题，文中采

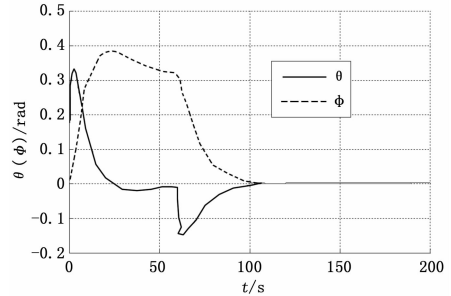


图 3 舰载机航向角和 φ 角响应曲线

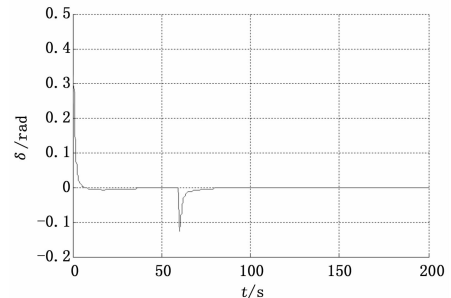


图 4 牵引车前轮转向角（控制输入）

用将期望路径等效为若干直线和圆弧的组合，对直线和圆弧分别采用时间—状态转换形式分别在直角坐标系下和极坐标系下设计跟踪控制器，并采用一种保证闭环稳定的控制器切换策略，仿真研究表明文中所设计的控制器能够实现舰载机牵引路径的跟踪。

参考文献：

[1] 张智, 林圣琳, 邱兵, 等. 舰载机牵引系统甲板调运路径避碰规划 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36 (8): 1551-1557.

[2] 张智, 林圣琳, 夏桂华, 等. 舰载机甲板调运过程避碰路径规划研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35 (1): 9-15.

[3] 王能建, 刘红博, 周丽杰. 甲板上舰载机牵引系统的行驶特性分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2013, 44 (6): 2305-2310.

[4] 刘亚杰, 李忠猛, 陈晓山. 考虑空间约束的机库舰载机调运路径规划方法 [J]. 海军工程大学学报, 2014, 26 (3): 100-107.

[5] Ryan J C, Cummins M L, Roy N, et al. Designing an interactive local and global decision support system for aircraft carrier deck scheduling [C]. AIAA. Cambridge Town, USA, 2011.

[6] 刘昱, 马保离. 离轴式拖车移动机器人的任意路径跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30 (4): 526-529.

[7] 张勇, 张晓华, 程金, 等. 拖挂式移动机器人非连续反馈镇定控制 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23 (6): 1229-1232.