

## 基于路径跟踪的平流层飞艇柔性编队控制\*

杨希祥<sup>1,2</sup>, 张家实<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073;  
2. 湖北航天技术研究院总体设计所, 湖北武汉 430034)

**摘要:**建立平流层飞艇驻空阶段动力学模型,在定高飞行前提下,采用小扰动方法对动力学方程进行线性化处理。提出采用路径跟踪的平流层飞艇柔性领航-跟随编队控制方法,领航者和跟随者通过速度控制与航向控制,分别跟踪保持特定距离的参考路径,实现编队的柔性控制。以采用直线路径跟踪和采用圆路径跟踪的三平流层飞艇编队控制为例,对提出的柔性编队控制方法进行仿真验证。仿真结果表明:提出的路径跟踪方法控制精度高,提出的柔性编队控制方法可以实现编队稳定运行,避免编队成员碰撞现象的发生。

**关键词:**平流层飞艇;柔性编队控制;路径跟踪;领航-跟随方法

中图分类号:V429 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2018)05-040-05

## Flexible formation control of stratospheric airships based on path following

YANG Xixiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiashi<sup>1</sup>

(1. College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. Institute of Overall Design, Hubei Academy of Spaceflight Technology, Wuhan 430034, China)

**Abstract:** Dynamics model of the stratospheric airship during floating was established, and the model was linearized using linear perturbation theory based on the assumption which the flight altitude is constant. A flexible leader-follower formation control method for stratospheric airships based on path following was proposed, in which the leader and followers track the reference trajectory respectively through velocity and heading control. Linear formation and circular control of three stratospheric airships were simulated and the simulation results show that the control accuracy of the path following method is high while the formation can operate stably, and the collision among airships can be avoided.

**Key words:** stratospheric airship; flexible formation control; path following; leader-follower method

平流层飞艇工作在20 km高度附近的平流层下部,是可控飞行的飞行器,具有驻空时间久、时空分辨率高、覆盖范围大、使用效费比高等特点,在对地观测、通信中继、移动互联网等领域应用潜力巨大。近20年来,美、日、中、欧等多个国家和地区纷纷投入巨资开展研发工作<sup>[1-2]</sup>。

从当前平流层飞艇应用研究的成果来看,多艇编队协同工作将是平流层飞艇部署使用的主要形式。通过多艇编队协同工作,平流层飞艇系统执行任务的多样性得以拓展,工作性能得到提升,系统鲁棒性得到增强。编队控制是平流层飞艇编队有效完成任务必须解决的关键问题。

鉴于平流层飞艇目前尚处于技术攻关与演示验证阶段,国内外研究平流层飞艇编队控制的文献几近空白,仅有极少数文献研究了与平流层飞

艇具有部分相似特征的平流层气球编队控制问题。美国Global Aerospace Corporation为美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)设计了包含数百个超压气球的大规模全球平流层科学平台编队,用于地球科学研究,但仅提出了编队构形控制的基本策略和拟采用的基本算法<sup>[3]</sup>;文献[4]研究了大规模平流层超压气球编队控制问题,采用了分布式的分组循环反馈控制方式,但研究的队形较为单一,且对实际平流层风场的考虑不足。

平流层飞艇编队控制属于欠驱动多自主体编队控制问题,同时具有独特的技术难点,如编队工作模式多样化、抗风驻留控制与编队构形控制耦合、自主个体受环境风场扰动影响大、自主个体控制时延长等。按照编队构型的几何约束条件,多

\* 收稿日期:2017-07-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11102229)

作者简介:杨希祥(1982—),男,河北阜城人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:nkyangxixiang@163.com

自主体编队方式可以分为柔性编队和刚性编队<sup>[5]</sup>。前者仅要求个体在运动过程中保持在一定范围内,相互无须遵从严格的几何构型约束,也称松散编队;后者要求个体在运动过程中始终保持固定的几何构型,控制难度相对较高。

已有多自主体编队控制方法主要分为两大类:集中式控制方法和分布式控制方法。分布式控制方法中,每个自主体仅需获得邻近的少数自主体信息,即可实现对整个编队的控制,交互信息量小、灵活可靠,是近年的研究热点。领航-跟随控制方法是典型的分布式编队控制方法,其基本思想是,指定编队中某一个自主体为领航者,其余自主体为跟随者,领航者沿预定轨迹运动,跟随者通过调整相对距离和相对方位跟随领航者,其突出特点是简单易实现,在非完整移动机器人、无人机编队控制领域应用广泛<sup>[6-7]</sup>。

考虑平流层飞艇编队控制问题的探索性、创新性与挑战性,本文选择领航-跟随控制方法进行柔性编队控制作为切入点,为平流层飞艇应用模式研究、轨迹控制等提供理论参考。

## 1 平流层飞艇驻空阶段动力学模型

### 1.1 动力学方程

根据平流层飞艇的特点和飞行特性,为研究问题方便,建立驻空阶段动力学模型时做如下假设:①将飞艇视为刚体,忽略柔性艇体的弹性变形;②忽略由于排放浮升气体导致的质量、转动惯量、质心变化;③飞艇为轴对称外形,体积中心和浮心重合。

基于上述假设,采用牛顿欧拉方法,在体坐标系( $o_b-x_b y_b z_b$ ,如图1所示)中建立平流层飞艇浮心动力学方程,其矢量形式<sup>[8]</sup>为:

$$\mathbf{M} \frac{d\mathbf{V}_o}{dt} + \mathbf{M}\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V}_o + m \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r}_G + \mathbf{M}\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_G) = \mathbf{B} + \mathbf{G} + \mathbf{T} + \mathbf{R} + \mathbf{F}_w \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = m\mathbf{E}_{3 \times 3} + \mathbf{M}_a \quad (2)$$

其中: $m$ 为平流层飞艇质量; $\mathbf{M}_a$ 为附加质量矩阵; $\mathbf{E}_{3 \times 3}$ 为单位矩阵; $\mathbf{V}_o = [u, v, w]$ 为体坐标系中的速度, $u, v, w$ 分别为速度在三轴的分量; $\boldsymbol{\omega} = [p, q, r]$ 为艇体绕浮心的转动角速度, $p, q, r$ 分别为滚转角速度、俯仰角速度和偏航角速度; $\boldsymbol{\omega} \times$ 为 $\boldsymbol{\omega}$ 的叉乘矩阵; $\mathbf{r}_G = [x_G, y_G, z_G]$ 为浮心到质心的距离; $\mathbf{B}, \mathbf{G}, \mathbf{T}, \mathbf{R}, \mathbf{F}_w$ 分别为作用在飞艇上的浮力、重力、螺旋桨推力、气动力和风场产生的环境力。

在体坐标系中建立平流层飞艇绕浮心动力学

方程,其矢量形式为:

$$\mathbf{I}_o \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}_o \boldsymbol{\omega}) + m[\mathbf{r}_G \times \dot{\mathbf{V}}_o + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{r}_G \times \mathbf{V}_o)] = N_R + N_C + N_g \quad (3)$$

$$\mathbf{I}_o = \mathbf{I}_o + \mathbf{I}_a \quad (4)$$

其中, $\mathbf{I}_o$ 为相对于浮心的转动惯量矩阵, $\mathbf{I}_a$ 为附加惯量矩阵, $N_R, N_C, N_g$ 分别为气动力矩、矢量控制力矩、重力矩。 $\mathbf{I}_o$ 定义为:

$$\mathbf{I}_o = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}$$

式中, $I_x, I_y, I_z$ 分别为绕体坐标系 $x_b$ 轴、 $y_b$ 轴、 $z_b$ 轴的转动惯量, $I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}$ 分别为对体坐标系中 $x_b o_b y_b$ 平面、 $x_b o_b z_b$ 平面和 $y_b o_b z_b$ 平面的惯量积。

### 1.2 运动学方程

平流层飞艇运动学方程矢量形式可表示为:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{V} \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\eta} = [x_e, y_e, z_e, \theta, \psi, \phi]^T$ 为广义位置姿态向量, $x_e, y_e, z_e$ 为地面坐标系( $O_a-x_a y_a z_a$ ,如图1所示)下三轴位置分量, $\theta, \psi, \phi$ 分别为俯仰角、偏航角和滚转角; $\mathbf{V} = [u, v, w, p, q, r]^T$ 为广义速度向量, $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ 由坐标转换矩阵构成,且有

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b^e & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_\omega^\Omega \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{C}_b^e$ 为体坐标系到地面坐标系( $o_a-x_a y_a z_a$ )的转换矩阵, $\mathbf{C}_\omega^\Omega$ 为体坐标系中的姿态角速率与地面坐标系中的姿态角速率之间的转换矩阵。

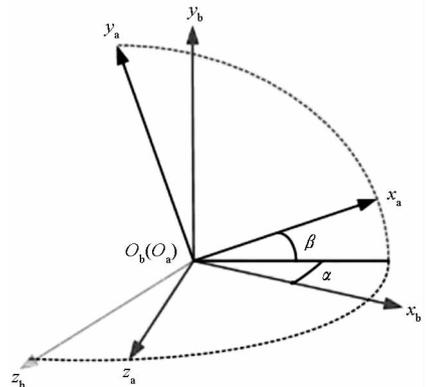


图1 体坐标系与地面坐标系

Fig. 1 Body fixed coordinate system and earth fixed coordinate system

### 1.3 线性化的动力学方程

为研究问题方便,将浮心动力学方程和绕浮心动力学方程解耦,分为横侧向运动和纵向运动。研究平流层飞艇编队控制,假定飞艇定高飞行,忽略纵向运动,这里仅给出横侧向动力学方程和运动学方程。

平流层飞艇横侧向动力学方程标量形式<sup>[9]</sup>为:

$$\begin{cases} (m + m_{11})\dot{u} + mz_G\dot{q} - my_G\dot{r} \\ = (B - G)\sin\theta + T_u + X_a + F_{w,x} \\ (m + m_{22})\dot{v} - mz_G\dot{p} + mx_G\dot{r} + (m + m_{11})ur \\ = (G - B)\sin\phi + Y_a \\ (I_z + m_{66})\dot{r} - I_{xz}\dot{p} + mx_G(\dot{v} + ur) - my_G\dot{u} \\ = x_G G\sin\phi + N_a + N_{c,r} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $m_{11}$ 、 $m_{22}$ 、 $m_{66}$  分别为附加质量  $M_a$  的分量, 对应的附加质量系数分别为  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_6$ ,  $B$ 、 $G$  分别为浮力和重力的大小,  $X_a$ 、 $Y_a$  分别为气动力轴向和侧向分量,  $N_a$  为气动力矩,  $T_u$ 、 $N_{c,r}$  分别为控制力和控制力矩,  $F_{w,x}$  为风致附加惯性力的大小,  $\theta$ 、 $\phi$  分别为俯仰角和滚转角,  $p$ 、 $q$ 、 $r$  分别为滚转角速度、俯仰角速度和偏航角速度。

进一步, 基于小扰动线性化方法, 对动力学方程进行线性化, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} (m + m_{11})\dot{u} - my_G\dot{r} = X_a^u \cdot u + X_a^v \cdot v + X_a^r \cdot r + \\ (m_{11} - m_{22})v_w \cdot r + \bar{T}_u \\ (m + m_{22})\dot{v} + m \cdot x_G \cdot \dot{r} = Y_a^u \cdot u + Y_a^v \cdot v + Y_a^r \cdot r + \\ (m_{11} - m_{22})u_w \cdot r - m \cdot y_G \cdot \dot{u} + \\ m \cdot x_G \cdot \dot{v} + (I_z + m_{66})\dot{r} \\ = N_a^u \cdot u + N_a^v \cdot v + N_a^r \cdot r + \bar{N}_{c,r} \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $X_a^u$ 、 $X_a^v$ 、 $X_a^r$  为轴向气动力导数,  $Y_a^u$ 、 $Y_a^v$ 、 $Y_a^r$  为侧向气动力导数,  $N_a^u$ 、 $N_a^v$ 、 $N_a^r$  为气动力矩导数, 具体计算公式可参见文献[9];  $v_w$ 、 $u_w$  为风速在轴向和侧向的分量,  $\bar{T}_u$ 、 $\bar{N}_{c,r}$  为线性化后的控制力和控制力矩。

横侧向运动学方程标量形式为:

$$\begin{cases} \dot{\psi} = r \\ \dot{x}_e = (u + u_w)\cos\psi - (v + v_w)\sin\psi \\ \dot{y}_e = (u + u_w)\sin\psi + (v + v_w)\cos\psi \\ V = \sqrt{(u + u_w)^2 + (v + v_w)^2} \\ \beta = \arcsin\left(\frac{v + v_w}{V}\right) \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $V$  为速度大小,  $\beta$  为侧滑角。

## 2 平流层飞艇柔性编队控制方法

### 2.1 柔性编队控制方法

采用领航-跟随方法对平流层飞艇编队进行控制, 如图 2 所示。一般的领航-跟随策略中, 领航者跟踪预设轨迹, 跟随者与领航者保持要求的距离和方位<sup>[10]</sup>。

由于是柔性编队控制, 不要求形成严格的队

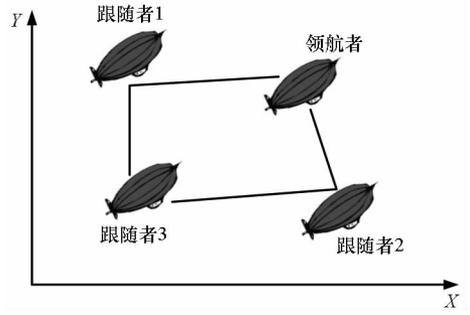


图 2 领航-跟随编队控制方法

Fig. 2 Leader-follower formation control method

形, 可适当放松对领航者与跟随者相对位置的约束。采用路径跟踪方法, 使领航者在水平面内跟踪参考轨迹, 跟随者轨迹与领航者轨迹保持特定距离。为避免碰撞, 参考轨迹不能为任意形状, 领航者与跟随者、跟随者与跟随者之间的距离应足够大。

### 2.2 路径跟踪方法

路径跟踪是指控制飞艇沿预先设定的航线飞行, 对期望位置无时间跟踪要求, 其控制难度小于轨迹跟踪控制的。采用基于比例微分(Proportion Derivative, PD)的路径跟踪方法, 控制平流层飞艇以特定速度按要求的路径飞行。

控制回路设计如图 3 所示。PD 控制器输入为实际路径与参考路径的速度差和位置差, 速度控制器对应的输出为控制力, 位置控制器对应的输出为控制力矩。

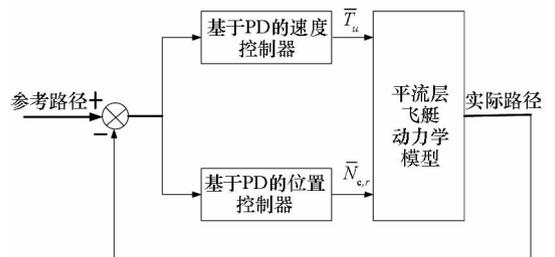


图 3 平流层飞艇路径跟踪方法

Fig. 3 Path following method for stratospheric airship

## 3 仿真结果及分析

以三艘同构平流层飞艇编队为对象, 分别以基于直线路径跟踪和基于圆路径跟踪的编队控制为例, 对提出的柔性编队控制方法进行仿真验证。平流层飞艇主要参数参照美国高空飞艇 HAA 项目的验证艇 HALE-D 选取, 如表 1 所示, 轴向风速和侧向风速分别取 3 m/s 和 1 m/s。两个仿真算例中, 均指定其中一艘飞艇为领航者, 另外两艘为跟随者。表 1 中,  $Cx1$ 、 $Cx2$  为轴向气动力系数分

量,  $Cy_1$ 、 $Cy_2$ 、 $Cy_3$ 、 $Cy_4$  为侧向气动分量,  $Cn_1$ 、 $Cn_2$  为偏航气动力矩系数分量。

表1 平流层飞艇主要参数

Tab.1 Main parameters of stratospheric airship

参数名称	参数取值	参数名称	参数取值
体积/ $m^3$	14 150	驻空高度/km	20
质量/kg	136 0	$k_1$	0.105 3
$k_2$	0.526 0	$k_6$	0.225 6
$Cx_1$	0.051 3	$Cx_2$	0.045 1
$Cy_1$	0.148 9	$Cy_2$	0.290 1
$Cy_3$	1.824 7	$Cy_4$	0.163 3
$Cn_1$	0.191 0	$Cn_2$	0.060 2

### 3.1 直线编队控制

基于直线路径跟踪的平流层飞艇柔性编队控制中,领航者跟踪的参考路径为:

$$x(t) = t, \quad y(t) = t + 30$$

跟随者1跟踪的参考路径为:

$$x_1(t) = t, \quad y_1(t) = t$$

跟随者2跟踪的参考路径为:

$$x_2(t) = t, \quad y_2(t) = t + 60$$

路径跟踪控制器中,比例环节控制参数取  $-0.005$ ,微分环节控制参数取  $30$ 。编队仿真结果如图4~5所示。

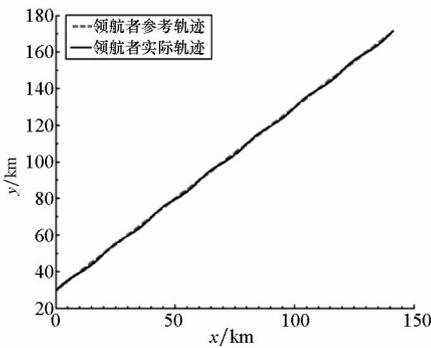


图4 领航者直线路径跟踪结果

Fig.4 Linear path following result of leader

由图4可以看出,领航者实际飞行路径与参考路径基本重合, $x$ 方向最大偏差约  $0.03$  km, $y$ 方向最大偏差约  $0.02$  km。这表明提出的路径跟踪方法控制精度高。

由图5可以看出,基于直线路径高精度跟踪,三艘飞艇构成的柔性编队运行稳定,编队成员保持稳定距离,不存在碰撞现象。

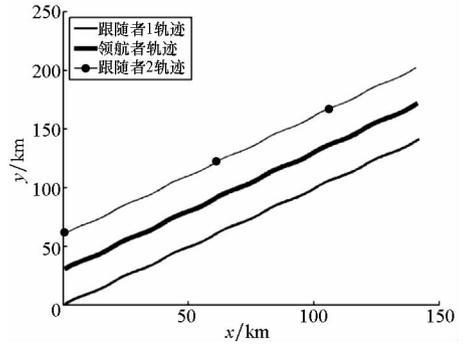


图5 直线编队队形控制结果

Fig.5 Linear formation control result

### 3.2 圆编队控制

以三艘平流层飞艇编队为例,对基于圆路径跟踪的柔性编队控制方法进行仿真。指定其中一艘飞艇为领航者,另外两艘为跟随者。领航者跟踪的参考路径为:

$$x(t) = 60\cos 0.01t, \quad y(t) = 60\sin 0.01t$$

跟随者1跟踪的参考路径为:

$$x_1(t) = 20\cos 0.01t, \quad y_1(t) = 20\sin 0.01t$$

跟随者2跟踪的参考路径为:

$$x_2(t) = 100\cos 0.01t, \quad y_2(t) = 100\sin 0.01t$$

路径跟踪控制器中,比例环节控制参数取  $-0.005$ ,微分环节控制参数取  $-0.1$ 。编队仿真结果如图6~7所示。

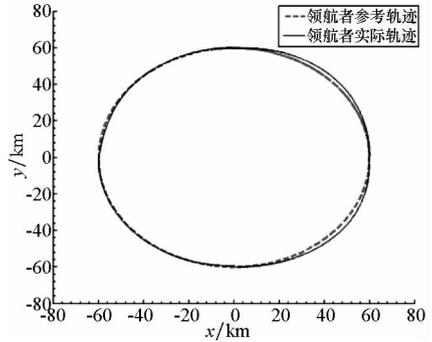


图6 领航者圆路径跟踪结果

Fig.6 Circular path following result of leader

由图6可以看出,领航者实际飞行路径与参考路径偏差很小, $x$ 方向最大偏差约  $0.06$  km, $y$ 方向最大偏差约  $0.05$  km。这表明提出的路径跟踪方法控制精度高。

由图7可以看出,基于圆路径高精度跟踪,三艘飞艇构成的柔性编队运行稳定,编队成员保持稳定距离,不存在碰撞现象。

## 4 结论

本文研究了平流层飞艇柔性领航-跟随编队

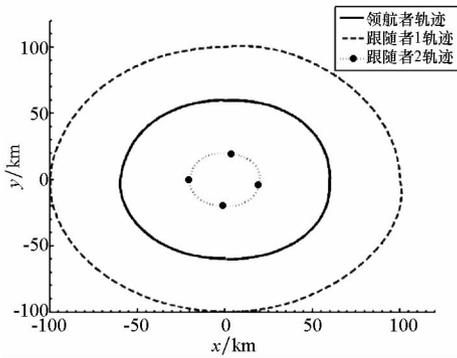


图 7 圆编队队形控制结果

Fig.7 Circular formation control result

控制方法,主要研究工作和结论如下:

1)建立了平流层飞艇驻空阶段动力学模型,在飞行高度不变的前提下,采用小扰动方法对横侧向动力学方程进行了线性化处理;

2)提出了基于路径跟踪的平流层飞艇柔性领航-跟随编队控制方法,编队个体通过速度控制与航向控制,分别跟踪保持特定距离的参考路径,实现编队的柔性控制。

3)以三艘同构平流层飞艇编队为对象,对提出的柔性编队控制方法进行了仿真验证。仿真结果表明,编队个体实际飞行路径与参考路径偏差小,采用基于路径跟踪的柔性编队控制方法,可以实现编队稳定运行,避免编队成员碰撞现象的出现。

## 参考文献 (References)

[1] D'Oliveria F A, de Melo F C L, Devezas T C. High-altitude platforms-present situation and technology trends [J]. Journal of Aerospace Technology Management, 2016, 8(3): 249-262.

- [2] 赵达,刘东旭,孙康文,等.平流层飞艇研制现状、技术难点及发展趋势[J].航空学报,2016,37(1):45-56.  
ZHAO Da, LIU Dongxu, SUN Kangwen, et al. Research status, technical difficulties and development trend of stratospheric airship [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 45-56. (in Chinese)
- [3] Global Aerospace Corporation. Global constellation of stratospheric scientific platforms: 510-02511-006 [R]. USA, 1999.
- [4] Sniderman A C, Broucke M E, D'Eleuterio G M. Formation control of balloons: a block circulant approach [C]// Proceedings of American Control Conference, 2015.
- [5] 向先波.二阶非完整水下机器人的路径跟踪与协调控制研究[D].武汉:华中科技大学,2010.  
XIANG Xianbo. Path following and coordinated control of second-order nonholonomic underwater autonomous vehicle [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [6] Consolini L, Morbidi F, Praticchizzo D, et al. Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints [J]. Automatica, 2008, 44(5): 1343-1349.
- [7] Danesh S O. Optimal leader-follower formation control using dynamic games [D]. Canada: Concordia University, 2015.
- [8] 郑伟,杨跃能.飞艇飞行力学与控制[M].北京:科学出版社,2016.  
ZHENG Wei, YANG Yueneng. Flight mechanics and control of airship [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [9] 周江华.平流层飞艇运动控制律与定点控制律设计[D].北京:中国科学院光电研究院,2009.  
ZHOU Jianghua. Path control law design for motion and station-keeping of stratospheric airship [D]. Beijing: Academy of Opto-Electronics of Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
- [10] Peng Z X. Formation control of multiple nonholonomic wheeled mobile robots [D]. France: University of Lille Nord de France, 2013.