

说明书摘要

一种基于平行控制的无人机编队变换控制方法

本发明公开了一种基于平行控制的无人机编队变换控制方法，属于控制技术领域，其特征在于，设计无人机编队标准构型下的控制律 u ，使得编队中各无人机在 u 的作用下保持期望队形，稳定向目标区域机动；当无人机编队接收编队变换控制指令后，在空间域对无人机编队系统做空间变换，利用虚拟空域中标准构型控制律 \bar{u} 指导真实空域下的控制律 u ，实现真实空域下编队稳定的队形变换；同时，在时间域对无人机编队控制律做时间变换，利用虚拟时域中的控制律 u' 指导真实时域下的控制量 \bar{u} ，实现编队系统预设时间收敛；通过同时在时域和空域上的变换，实现无人机编队预设时间收敛的稳定队形变换，变换后无人机编队继续向目标区域机动。本发明对提高无人机编队变换控制的收敛速度具有很好的改进效果，在保证编队系统控制鲁棒性的前提下，有效提高了编队队形变换效率，在控制领域具有很好的应用前景和重要的工程价值。

权 利 要 求 书

1. 一种基于平行控制的无人机编队变换控制方法，其特征为：

步骤 1：设计无人机编队标准构型下的控制律 \mathbf{u} ，使得编队中各无人机在 \mathbf{u} 的作用下保持期望队形，稳定向目标区域机动；

步骤 2：无人机编队接收编队变换控制指令，基于平行控制思想实现无人机编队相对位置变换控制，即对一般构型下的无人机编队做空间变换，将真实空域中一般构型的编队系统映射至虚拟空域中标准构型的编队系统，进而使虚拟空域的标准构型控制律 \mathbf{u}' 指导真实空域下的控制量 \mathbf{u} ，实现真实空域下编队稳定的队形变换；

步骤 3：基于平行控制思想实现无人机编队预设时间收敛控制，即对控制律 \mathbf{u}' 同时做时间变换，将 \mathbf{u}' 映射至以 z 为时间变量的虚拟时域，并满足当真实时域中的时间变量 $t \rightarrow T$ 时， $z \rightarrow \infty$ ；进而使虚拟时域中的控制律 \mathbf{u}' 指导真实时域下的控制量 \mathbf{u} ，实现编队系统预设时间收敛；

步骤 4：无人机编队通过同时在时域和空域上的变换，实现预设时间收敛的稳定队形变换，变换后无人机编队进行向目标区域机动；

步骤 5：转至步骤 1。

2. 权利要求 1 所述的设计无人机编队标准构型下的控制律 \mathbf{u} ，其特征在于：

步骤①：基于领导-跟随者模型，建立无人机编队模型，具体可以表示为：

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}}^L(t) = \mathbf{p}^L(t) \\ \dot{\mathbf{p}}^L(t) = \mathbf{u}^L(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}}_i(t) = \mathbf{p}_i(t) \\ \dot{\mathbf{p}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\mathbf{q}^L, \mathbf{p}^L, \mathbf{u}^L \in \mathbb{R}^3$ 分别为领航无人机的位置，速度和控制输入； $\mathbf{q}_i, \mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^3$ ， $i=1,2,\dots,N$ 分别为跟随无人机的位置，速度和控制输入；

步骤②：建立无人机编队标准构型，具体可以表示为：

$$\mathbf{L} = [\bar{\mathbf{L}}_{1l}, \bar{\mathbf{L}}_{2l}, \dots, \bar{\mathbf{L}}_{Nl}]^T \quad (3)$$

其中， $\bar{\mathbf{L}}_{il}$ 为第 i 架无人机与编队中领航无人机的期望距离；

步骤③：建立无人机编队标准构型下的编队控制律，具体可以表示为：

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i(t) = & - \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{\mathbf{q}_i} \phi(\|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j\|_\sigma) + c_1 \sum_{j \neq i} a_{ij} (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) \\ & + [c_2 (\mathbf{q}_i - \mathbf{B}(i) \mathbf{q}^L - \bar{\mathbf{L}}_{il}) + c_3 (\mathbf{p}_i - \mathbf{B}(i) \mathbf{p}^L)] \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N$, $c_m > 0, m = 1, 2, 3$, $\|\cdot\|_\sigma$ 为 σ 范数; a_{ij} 为邻接矩阵元素; 矩阵 $B \in R^N$ 为牵引矩阵; $N_i(t)$ 为第 i 架跟随无人机的邻域; r 表示无人机通信半径。 $\phi(z)$ 为势能函数, 其特征为, 当 $\|q_j - q_i\|_\sigma \rightarrow 0$ 时, ϕ 达到最大值; 当 $\|q_j - q_i\|_\sigma \rightarrow r$ 时, ϕ 也达到最大值; 当 $\|q_j - q_i\|_\sigma$ 处于期望范围内时, $\phi \rightarrow 0$ 。

3. 权利要求 1 所述的基于平行控制思想实现无人机编队相对位置变换控制, 其特征在于:

步骤①: 建立空间变换关系, 使真实空域中无人机编队的一般构型映射为虚拟空域中的标准构型; 其中, 真实空域与虚拟空域通过利用全空间变换矩阵 T_s 相互映射, 具体可以表示为:

$$q = T_s \tilde{q} \quad (5)$$

其中, q 为真实空域下无人机编队的位置矩阵; \tilde{q} 为虚拟空域下编队的位置矩阵;

步骤②: 利用全空间变换矩阵 T , 将真实空域中的编队无人机位置映射至虚拟空域中;

步骤③: 在虚拟空域中, 基于无人机编队标准构型下的编队控制律, 得到编队虚拟空域下的控制律 \bar{u}' ;

步骤④: 利用虚拟空域的标准构型控制律 \bar{u}' 指导真实时域下的控制量 u , 实现真实空域下编队稳定的队形变换;

4. 权利要求 1 所述的基于平行控制思想实现无人机编队预设时间收敛控制, 其特征在于:

步骤①: 建立时间变换关系, 使得真实时域中的时间变量 t 映射为虚拟时域中的时间变量 z , 即从 $t \rightarrow T$ 拉伸为 $z \rightarrow \infty$, 其中, 定义时间变换函数 $t = \eta(z)$, $\eta(z)$ 具体可以表示为:

$$\eta(z) = T(1 - e^{-z}) \quad (6)$$

步骤②: 通过时间变换, 将虚拟空域中的控制律 \bar{u}' 映射至以 z 为时间变量的虚拟时域;

步骤③: 基于式 (6) 所示的时间变换关系, 得到虚拟时域中的控制律 u' ;

步骤④: 利用虚拟时域中的控制律 u' 指导真实时域下的控制量 \bar{u}' , 实现编队系统预设时间收敛;

说明书

一种基于平行控制的无人机编队变换控制方法

技术领域

本发明涉及一种无人机编队变化控制方法，尤其是一种基于平行控制的无人机编队变换控制方法，属于控制技术领域。

背景技术

相较于单个无人机来说，无人机编队因具有较高的工作效率被广泛应用于军事和民用领域。然而，编队变换控制是编队系统中一个不可忽略的重要研究问题。尤其对于一些具有特定任务要求的无人机编队系统，往往需要在限定的时间内完成队形变换，否则不仅难以实现编队期望队形，还会引发编队中无人机的链式碰撞。在实际应用中，编队变换收敛速度的快慢对能否完成相关任务尤为重要，如在军事方面的无人机编队作战中，需要编队在一定时间内通过队形变换躲避障碍、敌方攻击、并完成多目标探测及打击等任务。

在当前的编队控制中，常用的控制方法有：领航者跟随法、基于行为的方法、虚拟结构法和基于图论的方法。基于这些方法能够实现一般简单任务环境下的无人机编队作业，但对于复杂、有限定时间要求的编队作业任务，往往还需要将上述控制方法与收敛时间的控制方法相结合。目前常用的收敛时间控制方法有：有限时间收敛、固定时间收敛和预设时间收敛。其中，有限时间收敛的控制过于依赖于系统初始状态，固定时间收敛又无法给出确切得误差收敛时间，预设时间收敛的相关研究较少，仍然需要大量的探究。

因此，亟需研究一种更有效的无人机编队变换控制方法，使得无人机编队在预设时间内实现稳定的队形变换。

发明内容

为了克服现有技术的缺陷，本发明提出一种基于平行控制的无人机编队变换控制方法，来保证无人机编队系统在快速、高效收敛前提下，实现编队队形变换，同时，提高了编队系统的控制稳定性和鲁棒性，

为实现上述目的，本发明采用以下技术方案：

步骤 1：设计无人机编队标准构型下的控制律 u ，使得编队中各无人机在 u 的作用下保持期望队形，稳定向目标区域机动；

步骤 2：无人机编队接收编队变换控制指令，基于平行控制思想实现无人机编队相

对位置变换控制，即对一般构型下的无人机编队做空间变换，将真实空域中一般构型的编队系统映射至虚拟空域中标准构型的编队系统，进而使虚拟空域的标准构型控制律 $\bar{\mathbf{u}}'$ 指导真实空域下的控制量 \mathbf{u} ，实现真实空域下编队稳定的队形变换；

步骤 3：基于平行控制思想实现无人机编队预设时间收敛控制，即对控制律 $\bar{\mathbf{u}}'$ 同时做时间变换，将 $\bar{\mathbf{u}}'$ 映射至以 z 为时间变量的虚拟时域，并满足当真实时域中的时间变量 $t \rightarrow T$ 时， $z \rightarrow \infty$ ；进而使虚拟时域中的控制律 \mathbf{u}' 指导真实时域下的控制量 $\bar{\mathbf{u}}'$ ，实现编队系统预设时间收敛；

步骤 4：无人机编队通过同时在时域和空域上的变换，实现预设时间收敛的稳定队形变换，变换后无人机编队进行向目标区域机动；

步骤 5：转至步骤 1。

本发明所述的设计无人机编队标准构型下的控制律 \mathbf{u} ，其特征在于：

步骤①：基于领导-跟随者模型，建立无人机编队模型，具体可以表示为：

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}}^L(t) = \mathbf{p}^L(t) \\ \dot{\mathbf{p}}^L(t) = \mathbf{u}^L(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}}_i(t) = \mathbf{p}_i(t) \\ \dot{\mathbf{p}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\mathbf{q}^L, \mathbf{p}^L, \mathbf{u}^L \in \mathbb{R}^3$ 分别为领航无人机的位置，速度和控制输入； $\mathbf{q}_i, \mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^3$ ， $i=1,2,\dots,N$ 分别为跟随无人机的位置，速度和控制输入；

步骤②：建立无人机编队标准构型，具体可以表示为：

$$\mathbf{L} = [\bar{\mathbf{L}}_{1l}, \bar{\mathbf{L}}_{2l}, \dots, \bar{\mathbf{L}}_{Nl}]^T \quad (3)$$

其中， $\bar{\mathbf{L}}_{il}$ 为第 i 架无人机与编队中领航无人机的期望距离；

步骤③：建立无人机编队标准构型下的编队控制律，具体可以表示为：

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i(t) = & - \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{\mathbf{q}_i} \phi(\|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j\|_\sigma) + c_1 \sum_{j \neq i} a_{ij} (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) \\ & + [c_2 (\mathbf{q}_i - \mathbf{B}(i) \mathbf{q}^L - \bar{\mathbf{L}}_{il}) + c_3 (\mathbf{p}_i - \mathbf{B}(i) \mathbf{p}^L)] \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $i=1,2,\dots,N$ ， $c_m > 0, m=1,2,3$ ， $\|\cdot\|_\sigma$ 为 σ 范数； a_{ij} 为邻接矩阵元素；矩阵 $\mathbf{B} \in R^N$ 为牵引矩阵； $N_i(t)$ 为第 i 架跟随无人机的邻域； r 表示无人机通信半径。 $\phi(z)$ 为势能函数，其特征为，当 $\|\mathbf{q}_j - \mathbf{q}_i\|_\sigma \rightarrow 0$ 时， ϕ 达到最大值；当 $\|\mathbf{q}_j - \mathbf{q}_i\|_\sigma \rightarrow r$ 时， ϕ 也达到最大值；当 $\|\mathbf{q}_j - \mathbf{q}_i\|_\sigma$ 处于期望范围内时， $\phi \rightarrow 0$ 。

本发明所述的基于平行控制思想实现无人机编队相对位置变换控制，其特征在于：

步骤①：建立空间变换关系，使真实空域中无人机编队的一般构型映射为虚拟空域中的标准构型；其中，真实空域与虚拟空域通过利用全空间变换矩阵 T_s 相互映射，具体可以表示为：

$$q = T_s \tilde{q} \quad (5)$$

其中， q 为真实空域下无人机编队的位置矩阵； \tilde{q} 为虚拟空域下编队的位置矩阵；

步骤②：利用全空间变换矩阵 T ，将真实空域中的编队无人机位置映射至虚拟空域中；

步骤③：在虚拟空域中，基于无人机编队标准构型下的编队控制律，得到编队虚拟空域下的控制律 \bar{u}' ；

步骤④：利用虚拟空域的标准构型控制律 \bar{u}' 指导真实时域下的控制量 u ，实现真实空域下编队稳定的队形变换；

本发明所述的基于平行控制思想实现无人机编队预设时间收敛控制，其特征在于：

步骤①：建立时间变换关系，使得真实时域中的时间变量 t 映射为虚拟时域中的时间变量 z ，即从 $t \rightarrow T$ 拉伸为 $z \rightarrow \infty$ ，其中，定义时间变换函数 $t = \eta(z)$ ， $\eta(z)$ 具体可以表示为：

$$\eta(z) = T(1 - e^{-z}) \quad (6)$$

步骤②：通过时间变换，将虚拟空域中的控制律 \bar{u}' 映射至以 z 为时间变量的虚拟时域；

步骤③：基于式(6)所示的时间变换关系，得到虚拟时域中的控制律 u' ；

步骤④：利用虚拟时域中的控制律 u' 指导真实时域下的控制量 \bar{u}' ，实现编队系统预设时间收敛；

本发明与现有技术相比，其显著优点：

(1) 本发明针对无人机编队变换控制系统，采用一种平行控制方法，对编队系统同时在时域和空域中做时间、空间变换，保证编队变换控制误差在预设时间内收敛到零，编队保持期望队形飞行。该方法有效提高了无人机编队的队形变换效

率，同时也提高了无人机编队变换系统的控制可靠性和鲁棒性；

- (2) 本发明具有较强的可移植性，本发明基于时域、空域变换，搭建了针对复杂控制系统的多反馈、大闭环控制架构，对于诸多复杂系统的控制问题均具有较好的控制效果，具有重要的工程应用前景。

附图说明

图 1 是本发明提供的基于平行控制的无人机编队变换控制方法流程图示意图。

图 2 是本发明提供的基于平行控制的无人机编队变换控制框图。

图 3 是本发明提供的无人机编队空域变换示意图。

图 4 是本发明提供的无人机编队控制曲线时域变换示意图。

具体实施方式

现结合实施例对本发明做进一步描述：

实施例 1

参见图 1，本发明具体包括步骤如下：

步骤 1：设计无人机编队标准构型下的控制律 u ，使得编队中各无人机在 u 的作用下保持期望队形，稳定向目标区域机动；

步骤 2：无人机编队接收编队变换控制指令，基于平行控制思想实现无人机编队相对位置变换控制，即对一般构型下的无人机编队做空间变换，将真实空域中一般构型的编队系统映射至虚拟空域中标准构型的编队系统，进而使虚拟空域的标准构型控制律 \bar{u} 指导真实空域下的控制量 u ，实现真实空域下编队稳定的队形变换；

步骤 3：基于平行控制思想实现无人机编队预设时间收敛控制，即对控制律 \bar{u} 同时做时间变换，将 \bar{u} 映射至以 z 为时间变量的虚拟时域，并满足当真实时域中的时间变量 $t \rightarrow T$ 时， $z \rightarrow \infty$ ；进而使虚拟时域中的控制律 u' 指导真实时域下的控制量 \bar{u} ，实现编队系统预设时间收敛；

步骤 4：无人机编队通过同时在时域和空域上的变换，实现预设时间收敛的稳定队形变换，变换后无人机编队进行向目标区域机动，具体控制框图参见图 2；

步骤 5：转至步骤 1。

实施例 2

本发明中，设计无人机编队标准构型下的控制律 u ，其特征在于：

步骤①：基于领导-跟随者模型，建立无人机编队模型，具体可以表示为：

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}}^L(t) = \mathbf{p}^L(t) \\ \dot{\mathbf{p}}^L(t) = \mathbf{u}^L(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}}_i(t) = \mathbf{p}_i(t) \\ \dot{\mathbf{p}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\mathbf{q}^L, \mathbf{p}^L, \mathbf{u}^L \in \mathbb{R}^3$ 分别为领航无人机的位置，速度和控制输入； $\mathbf{q}_i, \mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^3$, $i=1,2,\dots,N$ 分别为跟随无人机的位置，速度和控制输入；

步骤②：建立无人机编队标准构型，具体可以表示为：

$$\mathbf{L} = [\bar{\mathbf{L}}_{1l}, \bar{\mathbf{L}}_{2l}, \dots, \bar{\mathbf{L}}_{Nl}]^T \quad (3)$$

其中， $\bar{\mathbf{L}}_{il}$ 为第 i 架无人机与编队中领航无人机的期望距离；

步骤③：建立无人机编队标准构型下的编队控制律，具体可以表示为：

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i(t) = & - \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{\mathbf{q}_i} \phi(\|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j\|_\sigma) + c_1 \sum_{j \neq i} a_{ij} (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) \\ & + [c_2 (\mathbf{q}_i - \mathbf{B}(i) \mathbf{q}^L - \bar{\mathbf{L}}_{il}) + c_3 (\mathbf{p}_i - \mathbf{B}(i) \mathbf{p}^L)] \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $i=1,2,\dots,N$ ， $c_m > 0, m=1,2,3$ ， $\|\cdot\|_\sigma$ 为 σ 范数； a_{ij} 为邻接矩阵元素；矩阵 $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^N$ 为牵引矩阵； $N_i(t)$ 为第 i 架跟随无人机的邻域； r 表示无人机通信半径。 $\phi(z)$ 为势能函数，其特征为，当 $\|\mathbf{q}_j - \mathbf{q}_i\|_\sigma \rightarrow 0$ 时， ϕ 达到最大值；当 $\|\mathbf{q}_j - \mathbf{q}_i\|_\sigma \rightarrow r$ 时， ϕ 也达到最大值；当 $\|\mathbf{q}_j - \mathbf{q}_i\|_\sigma$ 处于期望范围内时， $\phi \rightarrow 0$ 。

实施例 3

本发明中，参见图 3，基于平行控制思想实现无人机编队相对位置变换控制，其特征在于：

步骤①：建立空间变换关系，使真实空域中无人机编队的一般构型映射为虚拟空域中的标准构型；其中，真实空域与虚拟空域通过利用全空间变换矩阵 \mathbf{T}_s 相互映射，具体可以表示为：

$$\mathbf{q} = \mathbf{T}_s \tilde{\mathbf{q}} \quad (5)$$

其中， \mathbf{q} 为真实空域下无人机编队的位置矩阵； $\tilde{\mathbf{q}}$ 为虚拟空域下编队的位置矩阵；

步骤②：利用全空间变换矩阵 \mathbf{T} ，将真实空域中的编队无人机位置映射至虚拟空域中；

步骤③：在虚拟空域中，基于无人机编队标准构型下的编队控制律，得到编队虚

拟空域下的控制律 \bar{u}' ；

步骤④：利用虚拟空域的标准构型控制律 \bar{u}' 指导真实时域下的控制量 u ，实现真实空域下编队稳定的队形变换；

实施例 4

本发明中，参见图 4，基于平行控制思想实现无人机编队预设时间收敛控制，其特征在于：

步骤①：建立时间变换关系，使得真实时域中的时间变量 t 映射为虚拟时域中的时间变量 z ，即从 $t \rightarrow T$ 拉伸为 $z \rightarrow \infty$ ，其中，定义时间变换函数 $t = \eta(z)$ ， $\eta(z)$ 具体可以表示为：

$$\eta(z) = T(1 - e^{-z}) \quad (6)$$

步骤②：通过时间变换，将虚拟空域中的控制律 \bar{u}' 映射至以 z 为时间变量的虚拟时域；

步骤③：基于式 (6) 所示的时间变换关系，得到虚拟时域中的控制律 u' ；

步骤④：利用虚拟时域中的控制律 u' 指导真实时域下的控制量 \bar{u}' ，实现编队系统预设时间收敛；

说明书附图

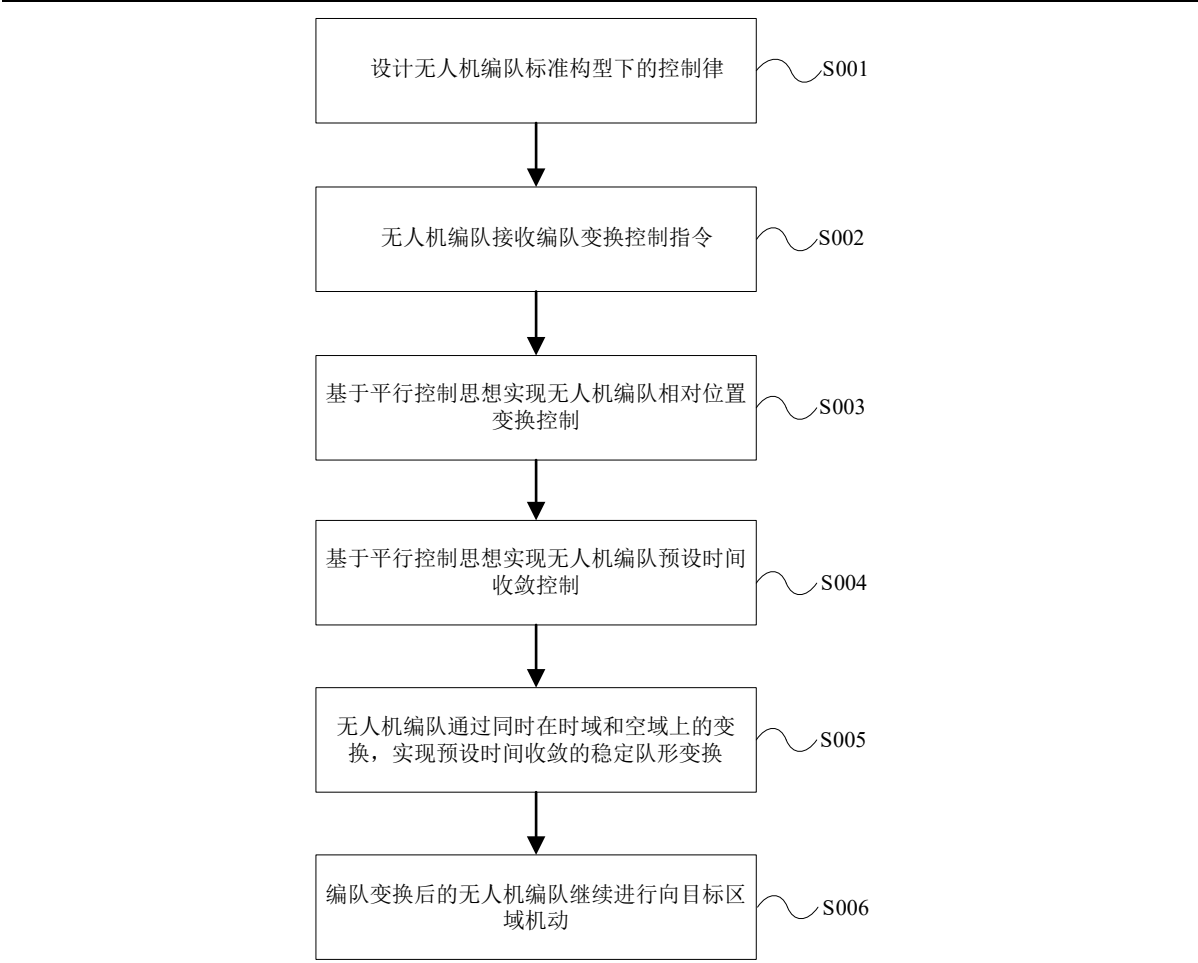


图 1

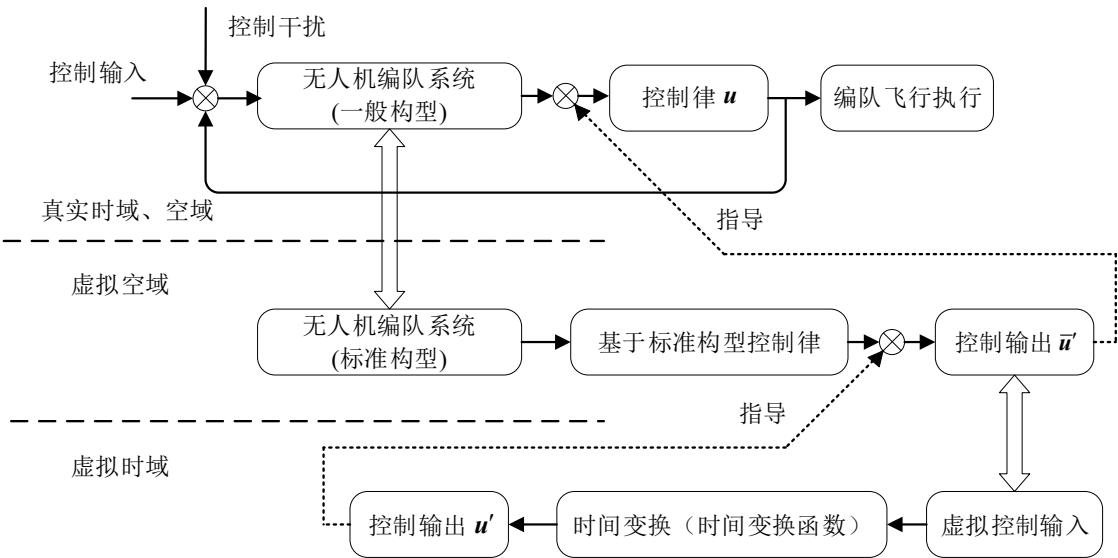


图 2

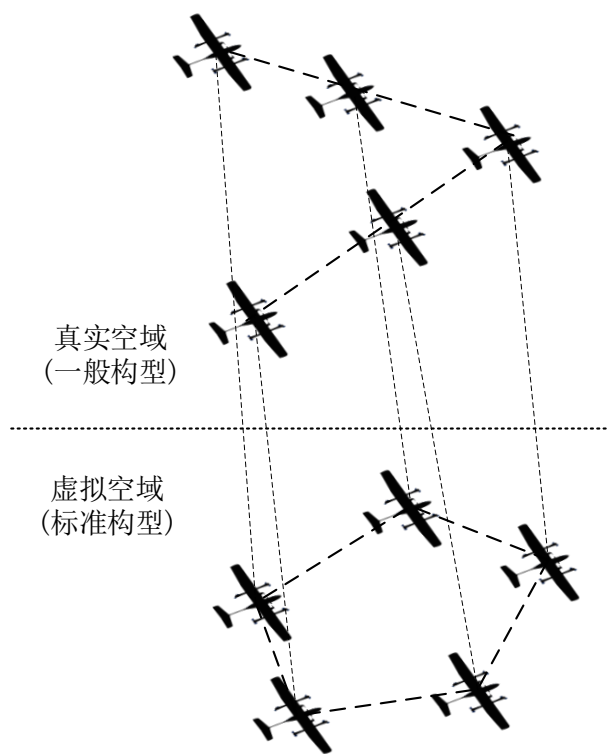


图 3

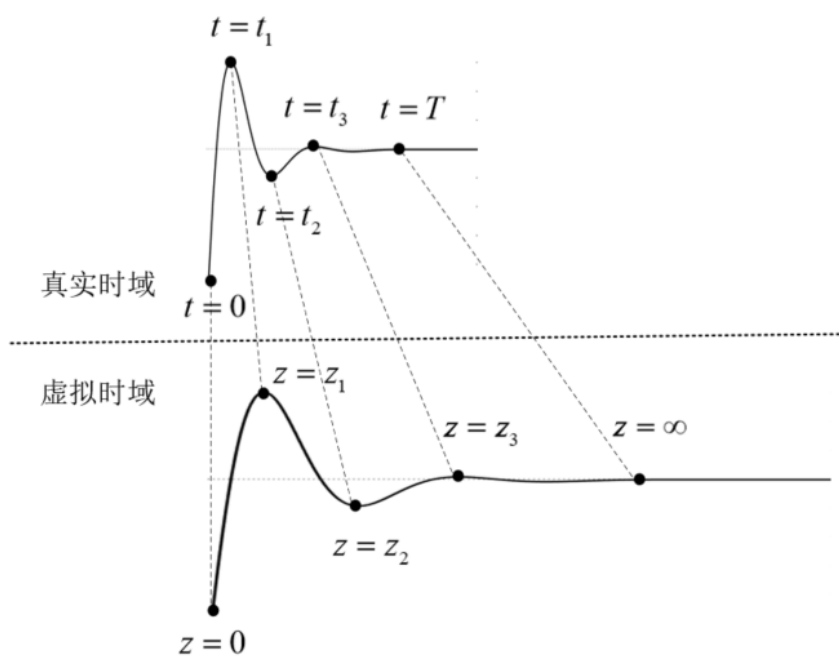


图 4

摘要附图

