



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112306020 B

(45) 授权公告日 2021.10.26

(21) 申请号 202011183291.4

(22) 申请日 2020.10.29

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112306020 A

(43) 申请公布日 2021.02.02

(73) 专利权人 西北工业大学
地址 710072 陕西省西安市碑林区友谊西路127号

(72) 发明人 张育林 周昊 党朝辉 潘政旭
袁建平

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任
公司 61200
代理人 马贵香

(51) Int. Cl.
G05B 19/418 (2006.01)
G05B 13/04 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 109084774 A, 2018.12.25

CN 111273685 A, 2020.06.12

CN 105045285 A, 2015.11.11

CN 109445447 A, 2019.03.08

CN 109062252 A, 2018.12.21

CN 108549407 A, 2018.09.18

CN 107367944 A, 2017.11.21

CN 111651705 A, 2020.09.11

CN 111766783 A, 2020.10.13

CN 107992090 A, 2018.05.04

US 2019122568 A1, 2019.04.25

US 2014232987 A1, 2014.08.21

US 2018356842 A1, 2018.12.13

GB 201421540 D0, 2015.01.21

薛向宏等. 主从式编队航天器连通性保持与碰撞规避.《宇航学报》.2020,第41卷(第7期),

审查员 李一鸣

权利要求书2页 说明书9页 附图5页

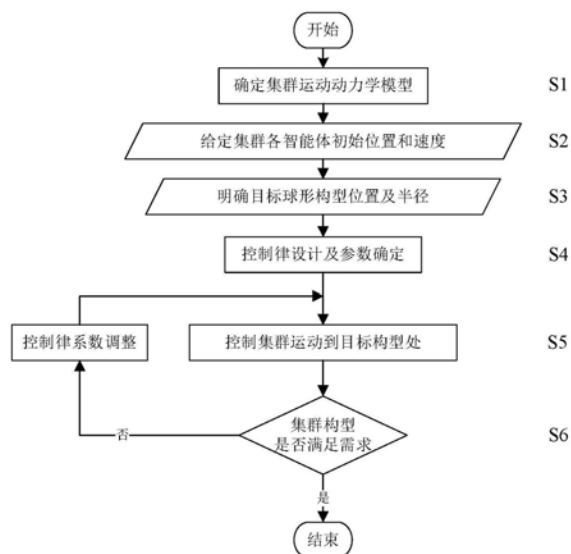
(54) 发明名称

一种多智能体集群对指定目标位置的均匀球面分散控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种多智能体集群对指定目标位置的均匀球面分散控制方法,包括步骤如下:S1:确定三维空间直角坐标系,以及所应满足的动力学模型;S2:获得集群智能体的个数,以及各智能体在指定坐标系下的初始状态量;S3:获得多智能体集群所需生成的目标构型参数;S4:根据智能体集群的当前运动初始状态量以及目标构型参数,为每个智能体设计控制律,并确定控制律的参数取值;S5:根据控制律进行多智能体集群运动控制,并以某一终止时刻或集群状态量稳定在一定误差范围内为终止条件。本发明由于控制律设计较为简单,需要人为调节的参数较少,因此适用于大规模多智能体集群的自主队形控制。

CN 112306020 B



1. 一种多智能体集群对指定目标位置的均匀球面分散控制方法,其特征在于,包括步骤如下:

S1: 确定多智能体集群运动所处的三维空间直角坐标系,以及所应满足的动力学模型;

S2: 获得集群智能体的个数,包括目标位置在内的集群通信网络拓扑,以及各智能体在指定坐标系下的初始状态量;

S3: 获得多智能体集群所需生成的目标构型参数;

S4: 根据智能体集群的当前运动初始状态量以及目标构型参数,为每个智能体设计控制律,并确定控制律的参数取值;

S5: 根据所设计的控制律,进行多智能体集群运动控制,并根据具体需要,以某一终止时刻或集群状态量稳定在一定误差范围内为终止条件;

S6: 判断集群运动形成的构型是否满足要求,若不满足则根据S4重新进行参数调整;

所述目标构型参数包括目标构型的中心位置和目標构型半径;

所述S4中的控制律具体包括群集力、阻尼力、个体间排斥项和目标位置排斥项四项,每个智能体的运动设计如下形式的控制律:

$$\mathbf{u}_i(t) = \sum_{j=1}^n \mathbf{F}_{cij} + \sum_{j=1}^n \mathbf{F}_{dij} + \sum_{j=1}^n \mathbf{F}_{pij} + \mathbf{F}_{ti}$$

第一项称为群集力,第二项称为阻尼力,第三项称为个体间排斥项,第四项称为目标位置排斥项,其形式分别为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{cij} = -c \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} (\xi_i(t) - \xi_j(t)) + b(\xi_i(t) - \xi_t(t)) \right) \\ \mathbf{F}_{dij} = -\gamma \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} (\zeta_i(t) - \zeta_j(t)) + b\zeta_i(t) \right) \\ \mathbf{F}_{pij} = -k \nabla_{\xi_i} \sum_{j=1}^n V_{ij} \\ \mathbf{F}_{ti} = -k_0 V_{it} \end{cases}$$

其中, $\xi_i(t)$ 和 $\zeta_i(t)$ 分别表示t时刻下智能体i的位置坐标和速度坐标, $\xi_t(t)$ 表示t时刻下智能体i的期望位置坐标,即目标构型中心位置; a_{ij} 表示个体i与j之间的通信关系,b为目标状态量比例系数, V_{ij} 为集群个体i与j间的排斥势函数, V_{it} 为集群个体i与目标间的排斥势函数,c、 γ 、k、 k_0 分别为群集力系数、阻尼力系数、个体间排斥力系数以及个体与目标位置间排斥力系数。

2. 根据权利要求1所述的一种多智能体集群对指定目标位置的均匀球面分散控制方法,其特征在于,多智能体均采用质点模型,各智能体运动状态量仅考虑指定空间直角坐标系下的三维位置坐标和三维速度坐标,共6个状态分量,不考虑智能体的加速度,也不考虑智能体的姿态及其变化率。

3. 根据权利要求1所述的一种多智能体集群对指定目标位置的均匀球面分散控制方法,其特征在于,所述初始状态量包括集群各智能体i的位置量和速度量。

4. 根据权利要求1所述的一种多智能体集群对指定目标位置的均匀球面分散控制方法,其特征在于,所述S2中集群通信网络拓扑包括目标位置,并且要求具有有向生成树结

构,同时各智能体均能明确测得阈值范围内的邻近个体位置,并不要求所有个体之间存在直接通信关系。

5.根据权利要求4所述的一种多智能体集群对指定目标位置的均匀球面分散控制方法,其特征在于,所述阈值范围 D_o 为集群智能体之间的排斥作用力距离检测阈值,可按如下公式取值

$$D_o = \frac{4r_d}{\sqrt{n}}$$

其中, r_d 为目标球面构型半径, n 为集群智能体的个数。

6.根据权利要求1所述的一种多智能体集群对指定目标位置的均匀球面分散控制方法,其特征在于,所述控制律最终球形构型为:

$$-c(n+b) + \frac{F_p(n,r,k)}{r} + \frac{k_0}{r^3} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{D_{ot}} \right) = 0$$

其中 r 为集群最终稳定构型的半径, D_{ot} 为集群智能体与目标位置间的排斥作用力距离检测阈值; $F_p(n,r,k)$ 表示各个智能体所受其他个体的排斥力之和的大小,由智能体集群在球面上均匀分散的数值仿真结果得到近似公式为

$$F_p(n,r,k) = \frac{0.0120n + 0.0811}{r^3} k_0$$

一种多智能体集群对指定目标位置的均匀球面分散控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及多智能体集群运动控制领域,也适用于机器人、无人机或航天器集群运动控制,尤其涉及大规模多智能体集群生成球面构型的运动控制方法。

背景技术

[0002] 多智能体集群编队运动控制是多智能体集群运动控制中的一个重要研究方向,其典型应用场景包括航天器/无人机集群编队形成与保持,地面上大型物资的协同搬运等等。但传统的编队运动控制依赖于各智能体期望位置的实时精确设定,这在集群个体数较为庞大、实际运动场景发生复杂变化等情况下会变得较为困难。受生物集群中的行为协同机制、自然界中物质扩散机制等的启发,人们设计了一些基于行为的多智能体编队运动控制方法。如沈林成等人基于拟态物理法为无人机集群设计运动控制律,使得无人机集群仅依赖局部信息即可形成均匀分布的环形编队构型。李维等人研究了球面上的多智能体运动控制问题,通过合适的吸引力与排斥力设计,使得智能体集群实现会合 (rendevous)、均匀分散 (uniform deployment) 等运动行为。但此类方法在三维甚至更高维空间中的集群运动控制问题中缺乏相关研究,或者普遍存在控制律形式复杂的缺点。在实际应用中,有些任务对智能体集群编队构型的精度并没有太高要求,如对空间物体的捕获、地面大型物资的协同运输等任务,或者面对大规模集群运动控制问题,需要控制律的设计以及参数选取方法较为简单,同时使得集群具有较灵活、适应复杂多变环境的运动特性。因此,有必要设计一种较为简单的控制律,实现多智能体集群三维构型的自主形成。

发明内容

[0003] 本发明的目的在于为多智能体集群对指定目标位置生成均匀球面分散构型提供一种较为简便的控制方法,从而解决现有技术中多智能体集群编队控制依赖于精确位置确定、灵活性较差的问题。

[0004] 为了解决上述问题,本文采用的技术方案如下:

[0005] 一种多智能体集群对指定目标位置的均匀球面分散控制方法,包括步骤如下:

[0006] S1:确定多智能体集群运动所处的三维空间直角坐标系,以及所应满足的动力学模型;

[0007] S2:获得集群智能体的个数,包括目标位置在内的集群通信网络拓扑,以及各智能体在指定坐标系下的初始状态量;

[0008] S3:获得多智能体集群所需生成的目标构型参数;

[0009] S4:根据智能体集群的当前运动初始状态量以及目标构型参数,为每个智能体设计控制律,并确定控制律的参数取值;

[0010] S5:根据所设计的控制律,进行多智能体集群运动控制,并根据具体需要,以某一终止时刻或集群状态量稳定在一定误差范围内为终止条件;

[0011] S6:判断集群运动形成的构型是否满足要求,若不满足则根据S4重新进行参数调

整。

[0012] 作为本发明的进一步改进,多智能体均采用质点模型,各智能体运动状态量仅考虑指定空间直角坐标系下的三维位置坐标和三维速度坐标,共6个状态分量,不考虑智能体的加速度,也不考虑智能体的姿态及其变化率。

[0013] 作为本发明的进一步改进,所述初始状态量包括集群各智能体*i*的位置量和速度量。

[0014] 作为本发明的进一步改进,所述目标构型参数包括目标构型的中心位置和目标构型半径。

[0015] 作为本发明的进一步改进,所述S2中集群通信网络拓扑包括目标位置,并且要求具有向生成树结构,同时各智能体均能明确测得阈值范围内的邻近个体位置,并不要求所有个体之间存在直接通信关系。

[0016] 作为本发明的进一步改进,所述阈值范围 D_o 为集群智能体之间的排斥作用力距离检测阈值,可按如下公式取值

$$[0017] \quad D_o = \frac{4r_d}{\sqrt{n}}$$

[0018] 其中, r_d 为目标球面构型半径, n 为集群智能体的个数。

[0019] 作为本发明的进一步改进,所述S4中的控制律具体包括群集力、阻尼力、个体间排斥项和目标位置排斥项四项,每个智能体的运动设计如下形式的控制律:

$$[0020] \quad \mathbf{u}_i(t) = \sum_{j=1}^n \mathbf{F}_{cij} + \sum_{j=1}^n \mathbf{F}_{dij} + \sum_{j=1}^n \mathbf{F}_{pij} + \mathbf{F}_t$$

[0021] 第一项称为群集力,第二项称为阻尼力,第三项称为个体间排斥项,第四项称为目标位置排斥项,其形式分别为

$$[0022] \quad \begin{cases} \mathbf{F}_{cij} = -c \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} (\xi_i(t) - \xi_j(t)) + b(\xi_i(t) - \xi_t(t)) \right) \\ \mathbf{F}_{dij} = -\gamma \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} (\zeta_i(t) - \zeta_j(t)) + b\zeta_i(t) \right) \\ \mathbf{F}_{pij} = -k \nabla_{\xi_i} \sum_{j=1}^n V_{ij} \\ \mathbf{F}_t = -k_0 V_{it} \end{cases}$$

[0023] 其中, $\xi_i(t)$ 和 $\zeta_i(t)$ 分别表示*t*时刻下智能体*i*的位置坐标和速度坐标, $\xi_t(t)$ 表示*t*时刻下智能体*i*的期望位置坐标,即目标构型中心位置; a_{ij} 表示个体*i*与*j*之间的通信关系, b 为目标状态量比例系数, V_{ij} 为集群个体*i*与*j*间的排斥势函数, V_{it} 为集群个体*i*与目标间的排斥势函数, c 、 γ 、 k 、 k_0 分别为群集力系数、阻尼力系数、个体间排斥力系数以及个体与目标位置间排斥力系数。

[0024] 作为本发明的进一步改进,所述控制律最终球形构型为:

$$[0025] \quad -c(n+b) + \frac{F_p(n,r,k)}{r} + \frac{k_0}{r^3} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{D_{ot}} \right) = 0$$

[0026] 其中 r 为集群最终稳定构型的半径, D_{ot} 为集群智能体与目标位置间的排斥作用力距离检测阈值; $F_p(n,r,k)$ 表示各个智能体所受其他个体的排斥力之和的大小,由智能体集群在球面上均匀分散的数值仿真结果得到近似公式为

$$[0027] \quad F_p(n,r,k) = \frac{0.0120n+0.0811}{r^3} k。$$

[0028] 本发明的有益效果是:

[0029] 本发明基于一致性算法和人工势场法,提供了较为简便的多智能体球面构型形成控制方法,并根据最终构型平衡条件提供了一个表达式,为参数选取提供参考依据。无需指定目标构型中每一智能体的期望位置,只需指定目标构型中心位置和期望半径,便可通过合适的控制律参数取值,控制智能体集群自主生成目标构型,充分体现了多智能体集群的智能性与协同运动特性;控制律参数较少且明晰,并且与最终构形参数之间存在明确的关系式,可通过大规模搜索算法进行参数整定,并可根据对控制效果的具体要求添加更多的约束条件进行优化。由于控制律设计较为简单,需要人为调节的参数较少,因此适用于大规模多智能体集群的自主队形控制。

附图说明

[0030] 图1是本发明的多智能体集群生成指定均匀球面构型的计算流程示意图。

[0031] 图2是多智能体集群控制量中的一致性算法项示意图(显示了集群内部、集群向目标的聚集效果)。

[0032] 图3是多智能体集群控制量中的个体间排斥项以及个体与目标间排斥项示意图。

[0033] 图4是具体实施例中航天器集群在主航天器LVLH坐标系下的初始位置分布图。

[0034] 图5是具体实施例中航天器集群在主航天器LVLH坐标系下的运动轨迹图。

[0035] 图6是具体实施例中集群各航天器中心相对于主航天器中心的位置各分量随时间变化图。

[0036] 图7是具体实施例中集群各航天器中心相对于主航天器中心的速度各分量随时间变化图。

[0037] 图8是具体实施例中集群各航天器的控制量各分量随时间变化图。

[0038] 图9是具体实施例中集群各航天器间的最大和最小距离随时间变化图。

[0039] 图10是具体实施例中集群各航天器与主航天器表面间的最大和最小距离随时间变化图。

具体实施方式:

[0040] 为了使本领域人员更好地理解本发明中的技术方案,下面列举一个具体实施例,说明本专利所述的多智能体集群对指定目标位置的均匀球面分散控制方法的具体计算过程。应当理解,下面所描述的实施例仅是本专利中的部分实施例,而不是全部实施例。基于本发明中的实施例,在本领域及相关领域技术人员在未做出创造性劳动的前提下所获得的所有其他实施例,均属于本专利的保护范围。

[0041] 本发明一种多智能体集群对指定目标位置的均匀球面分散控制方法,包括步骤如下:

[0042] S1:明确多智能体集群运动所处的三维空间直角坐标系,以及所应满足的动力学模型;

[0043] 其中,各智能体均采用质点模型,即所述的各智能体运动状态量仅考虑指定空间直角坐标系下的三维位置坐标和三维速度坐标,共6个状态分量,不考虑智能体的加速度,也不考虑智能体的姿态及其变化率。

[0044] S2:给定集群智能体的个数 n ,包括目标位置在内的集群通信网络拓扑,以及各智能体在指定坐标系下的初始状态量。初始状态量包括集群各智能体 i ($i=1,2,3,\dots,n$)的位置量 $\xi_i(0)$ 和速度量 $\zeta_i(0)$ 。

[0045] 其中,所述S2中集群通信网络拓扑包括目标位置,并且要求具有向生成树结构(以目标位置为唯一根节点,即集群所有个体均可明确测得自身相对于目标位置的位置向量),同时各智能体均可明确测得由发明内容S4中公式(8)所述的阈值范围内的邻近个体位置,并不要求所有个体之间存在直接通信关系。

[0046] S3:明确多智能体集群所需生成的目标构型参数;

[0047] 其中,所设计的控制方法经过适当的参数调整后,能够使多智能体集群以自组织的方式形成满足S3中确定的目标构型参数条件的均匀球面分布构型,而无需一一指定各智能体的绝对或相对位置,因而对于大规模多智能体集群球形编队控制具有较好的适用性。目标构型参数包括目标构型的中心位置 $\xi_t(t)$ 和目标构型半径 r_d 。

[0048] S4:根据智能体集群的当前运动状态量以及目标构型参数,为每个智能体设计控制律,并根据发明内容S4中的公式(12)及参数调整规则,确定控制律的参数取值;

[0049] 其中,所述S4中的控制律由一致性算法聚集项(在发明内容S4的公式(4)中对应于群集力和阻尼力)和人工势场排斥项(在发明内容S4的公式(4)中对应于个体间排斥项和目标位置排斥项)组成,无需为了生成球面构型而特地考虑球面运动条件,控制律原理较为简单。最终球形构型效果的实现依赖于所述S4中的公式(12)及参数调整规则所确定的参数取值。

[0050] 其中,所述S4中的控制律具体包括群集力、阻尼力、个体间排斥项和目标位置排斥项四项。其中群集力基于一致性算法设计,用于实现集群中心向目标位置的趋近,同时集群整体实现自组织聚集(图2)。阻尼力亦基于一致性算法设计,用于减少个体间的相对运动以及个体相对于目标位置的运动。个体间排斥项基于人工势场法设计,用于使得集群在期望构型球面附近尽可能均匀分布(图3)。目标位置排斥项亦基于人工势场法设计,用于使得集群向目标构型球面上运动(图3)。

[0051] S5:根据所设计的控制律,进行多智能体集群运动控制,并根据具体需要,以某一终止时刻或集群状态量稳定在一定误差范围内为终止条件;

[0052] S6:判断集群运动形成的构型是否满足要求,若不满足则根据发明内容S4中的公式(12)及参数调整规则,重新进行参数调整。

[0053] 其中,所述S6中的参数调整步骤能够减少最终构型参数期望值与实际值间的差异,并能够增强最终构型的均匀性、球面性,改善集群运动所实现的效果。

[0054] 具体地,本发明一种多智能体集群对指定目标位置的均匀球面分散控制方法,具体包含如下步骤:

[0055] S1:(给定动力学模型)在指定的三维空间直角坐标系中,明确集群中各智能体 i 的

运动所遵循的动力学方程。其具体形式为

$$[0056] \quad \begin{cases} \dot{\xi}_i(t) = \zeta_i(t) \\ \dot{\zeta}_i(t) = f_i(\xi_i(t), \zeta_i(t), t) + \frac{u_i(t)}{m_i} \end{cases} \quad (1)$$

[0057] 其中 $\xi_i(t)$ 和 $\zeta_i(t)$ 分别表示t时刻下智能体i的位置坐标和速度坐标(可简写为 ξ_i 和 ζ_i ,但仍然为时变量)。如果不考虑智能体运动所受的动力学约束,则可将上式简化为

$$[0058] \quad \begin{cases} \dot{\xi}_i(t) = \zeta_i(t) \\ \dot{\zeta}_i(t) = \frac{u_i(t)}{m_i} \end{cases} \quad (2)$$

[0059] 即控制量直接对应于智能体的加速度。

[0060] 本发明不考虑智能体的异构性,即认为各个智能体具有相同的质量。为简化问题讨论,假设每个智能体均具有时不变的单位质量,从而控制量具有加速度量纲,于是系统动力学方程可简化为

$$[0061] \quad \begin{cases} \dot{\xi}_i(t) = \zeta_i(t) \\ \dot{\zeta}_i(t) = f_i(\xi_i(t), \zeta_i(t), t) + u_i(t) \end{cases} \quad (3)$$

[0062] S2:(指定通信网络结构和初始状态)给定n个智能体组成的集群通信网络拓扑结构(用于控制律中的群集力和阻尼力确定,与个体间排斥项和目标位置排斥项无关),以及各智能体i的初始位置 $\xi_i(0)$ 和速度 $\zeta_i(0)$;

[0063] S3:(指定目标构型)给定集群运动目标构型中心位置 $\xi_t(t)$ (可简写为 ξ_t)及半径R;

[0064] S4:(控制律设计)为每个智能体的运动设计如下形式的控制律:

$$[0065] \quad u_i(t) = \sum_{j=1}^n F_{cij} + \sum_{j=1}^n F_{dij} + \sum_{j=1}^n F_{pij} + F_u \quad (4)$$

[0066] 第一项称为群集力,第二项称为阻尼力,第三项称为个体间排斥项(沿 V_{ij} 的负梯度方向, V_{ij} 称为集群个体i与j间的排斥势函数),第四项称为目标位置排斥项(沿 V_{it} 的负梯度方向, V_{it} 称为集群个体i与目标间的排斥势函数),其形式分别为

$$[0067] \quad \begin{cases} F_{cij} = -c \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} (\xi_i(t) - \xi_j(t)) + b(\zeta_i(t) - \zeta_j(t)) \right) \\ F_{dij} = -\gamma \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} (\zeta_i(t) - \zeta_j(t)) + b\zeta_i(t) \right) \\ F_{pij} = -k \nabla_{\xi_i} \sum_{j=1}^n V_{ij} \\ F_u = -k_0 V_{it} \end{cases} \quad (5)$$

[0068] 其中, $\xi_i(t)$ 和 $\zeta_i(t)$ 分别表示t时刻下智能体i的位置坐标和速度坐标(可简写为 ξ_i 和 ζ_i), $\xi_t(t)$ 表示t时刻下智能体i的期望位置坐标(即目标构型中心位置), a_{ij} 表示个体i与j之间的通信关系(如果个体j的信息能传给个体i,则 $a_{ij}=1$,否则 $a_{ij}=0$),b为目标状态量比例系数, V_{ij} 为集群个体i与j间的排斥势函数(其公式详见具体实施方式中的公式6), V_{it}

为集群个体*i*与目标间的排斥势函数(其公式详见具体实施方式中的公式7),*c*、 γ 、*k*、 k_0 分别为群集力系数、阻尼力系数、个体间排斥力系数以及个体与目标位置间排斥力系数。

[0069] 控制律后两项中的势函数形式分别为

$$[0070] \quad V_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\|\xi_i - \xi_j\|} - \frac{1}{D_o} \right)^2, & \|\xi_i - \xi_j\| < D_o, \\ 0, & \|\xi_i - \xi_j\| \geq D_o \end{cases}, \quad i=1,2,\dots,n, \quad j=1,2,\dots,n, \quad i \neq j \quad (6)$$

$$[0071] \quad V_{it} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\|\xi_i - \xi_t\|} - \frac{1}{D_{ot}} \right)^2, & \|\xi_i - \xi_t\| < D_{ot}, \\ 0, & \|\xi_i - \xi_t\| \geq D_{ot} \end{cases}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (7)$$

[0072] D_o 为集群智能体之间的排斥作用力距离检测阈值,可按如下公式取值

$$[0073] \quad D_o = \frac{4r_d}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

[0074] 其中, r_d 为目标球面构型半径,*n*为集群智能体的个数。

[0075] (该值大于智能体在半径为 r_d 的球面上均匀分布时对应的多面体平均棱长,可保证周围的最近邻个体均处于该阈值确定的范围内), D_{ot} 为集群智能体与目标位置间的排斥作用力距离检测阈值, a_{ij} 为集群通信网络拓扑(在集群个体数较少时可取为双向全连通拓扑)中个体*i*与*j*之间的通信关系权值,其取值为

$$[0076] \quad a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{个体}j\text{的信息可传递给个体}i \\ 0, & \text{个体}j\text{的信息无法传递给个体}i \end{cases} \quad (9)$$

[0077] *c*称为群集项增益系数, γ 称为阻尼系数,*b*称为牵制系数,*k*称为个体间排斥系数, k_0 称为目标位置排斥系数。

[0078] 控制律公式10可对集群整体写成矩阵形式为

$$[0079] \quad \begin{aligned} U(t) = & -c((L_n + G_n) \otimes I_3)(X(t) - \mathbf{1}_{n \times 1} \otimes \xi_t) - \gamma((L_n + G_n) \otimes I_3)V(t) \\ & -k \left[\nabla_{\xi_1} \sum_{j=1}^n V_{1j}, \nabla_{\xi_2} \sum_{j=1}^n V_{2j}, \dots, \nabla_{\xi_n} \sum_{j=1}^n V_{nj} \right]^T \\ & -k_0 \left[\nabla_{\xi_1} V_{1t}, \nabla_{\xi_2} V_{2t}, \dots, \nabla_{\xi_n} V_{nt} \right]^T \end{aligned} \quad (10)$$

[0080] 其中 $X(t) = (\xi_1(t), \zeta_1(t), \xi_2(t), \zeta_2(t), \dots, \xi_n(t), \zeta_n(t))^T$ 为集群各智能体状态量构成的列向量; L_n 为集群通信网络拓扑邻接矩阵 $A_n = (a_{ij})_{n \times n}$ 对应的拉普拉斯矩阵; $G_n = bI_n$ 为牵制矩阵,可取 $b=n$ 。其他系数可根据由最终稳定构型平衡条件

$$[0081] \quad \sum_{j=1}^n F_{cij} (+ \sum_{j=1}^n F_{dij}) + \sum_{j=1}^n F_{pij} + F_{ti} = 0 \quad (11)$$

[0082] (加括号的项在集群运动稳定时为0,可以略去)得到的如下关系式取值:

$$[0083] \quad -c(n+b) + \frac{F_p(n,r,k)}{r} + \frac{k_0}{r^3} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{D_{ot}} \right) = 0 \quad (12)$$

[0084] 其中 r 为集群最终稳定构型的半径(为期望的值), D_{ot} 为集群智能体与目标位置间的排斥作用力距离检测阈值(可取为目标球面构型半径 r_d); $F_p(n,r,k)$ 表示各个智能体所受其他个体的排斥力之和的大小,由智能体集群在球面上均匀分散的数值仿真结果得到近似公式为

$$[0085] \quad F_p(n,r,k) = \frac{0.0120n+0.0811}{r^3} k \quad (13)$$

[0086] 为了保证集群在指定位置成功生成接近于某一半径均匀分布的球面分布构型,控制律各参数取值可参考具体实施例,在此基础上给出如下参数调整规则:

[0087] 1.一般地,在控制律各参数参考取值的基础上,目标构型半径 r 接近于1时,将智能体与目标作用力方向变化阈值 D_{ot} 取为目标构型半径即可;

[0088] 2.如果上一步参数取值无法满足要求,则尽可能只通过改变智能体与目标作用力方向变化阈值 D_{ot} ,来使期望构型半径 r 满足要求, D_{ot} 的变化方向与 r 的变化方向一致;

[0089] 3.如果上一步参数调整无法满足需求,则将个体间排斥系数 k 、目标位置排斥系数 k_0 分别向各自的 r^3 倍和 r^2 倍方向调整;

[0090] 4.如果集群生成的构型相对于标准球面存在波动,则通过适当增大群集项增益系数 c 可抑制这种波动;

[0091] 5.如果集群最终构型的中心位置相对于期望位置存在偏移,则通过适当增大牵制系数 b 可抑制这种偏移。

[0092] S5:(集群运动控制)利用上述控制律及系数取值,控制多智能体集群运动到目标构型处,可以取指定时刻、集群状态量稳定在一定误差范围内等条件为终止条件;

[0093] S6:(效果评价与迭代调整)通过定性或定量分析,评价集群运动是否实现了期望的运动效果,如果不满足需要则对控制律各系数进行迭代调整。

[0094] 以下结合具体实施例对本发明进行详细说明。

[0095] 实施例

[0096] 本发明选择航天器编队控制问题,来验证本发明中的控制方法在航天器球形编队形成控制中的有效性。

[0097] S1:给出航天器集群运动的动力学模型。考虑绕主航天器做近距离运动的 n 颗航天器组成的集群。在主航天器当地水平-当地垂直(LVLH)坐标系下,每颗航天器的动力学方程可由航天器相对运动的CW方程表示为如下形式:

$$[0098] \quad \dot{X}_i(t) = DX_i(t) + BU_i(t) \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

[0099] 其中 $X_i(t) = (\xi_i(t), \zeta_i(t))^T$ 为当前时刻 t 下航天器 i 的状态向量, $\xi_i(t) = (x_i(t), y_i(t), z_i(t))^T$ 为当前时刻 t 下航天器 i 的位置向量, $\zeta_i(t) = (\dot{x}_i(t), \dot{y}_i(t), \dot{z}_i(t))^T$ 为当前时刻 t 下航天器的速度向量, $U_i(t)$ 为当前时刻 t 下航天器 i 的控制向量(由于不考虑航天器质量,与航天器的加速度对应)。D为航天器的系统动力学矩阵,B为航天器的控制矩阵,其形式分别为

$$[0100] \quad D = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} O_3 \\ I_3 \end{pmatrix}$$

[0101] 其中

$$[0102] \quad D_{11}=0_3, D_{12}=I_3, D_{21}=\begin{pmatrix} 3\omega^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega^2 \end{pmatrix}, D_{22}=\begin{pmatrix} 0 & 2\omega & 0 \\ -2\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0103] 0_n 和 I_n 分别表示 n 阶零矩阵和 n 阶单位矩阵, ω 表示主航天器绕中心天体公转角速度。这里我们假设主航天器在距地面901km的圆轨道上运动,在不考虑地球非球形引力摄动、大气阻力等摄动因素的情况下,算得 $\omega \approx 0.0010\text{rad/s}$ (在本实施例中,默认长度单位为km,时间单位为s,角度单位为rad,因而可将单位名称省略)。

[0104] S2:给定航天器集群通信网络拓扑结构和初始状态。取集群航天器个数 $n=100$ 。集群内部通信网络拓扑采用全连通结构,并假设集群所有个体均可获知目标位置和目标构型半径信息。集群初始时刻在主航天器LVLH坐标系中的 $[0,1] \times [0,1] \times [0,1]$ 区间内随机分布,但各航天器中心与其他航天器中心保持0.4km以上的安全距离,同时与原点(即主航天器中心位置)保持0.8km以上的距离。集群初始速度为0。

[0105] S3:给定航天器集群的目标球形构型位置及半径。这里我们让航天器集群在主航天器周围形成球形包围构型,因此取目标构型中心为原点,即 $\xi_t = (0,0,0)^T$,并给定期望构型半径为0.8km,即 $R=0.8$ 。根据公式12可算得集群期望生成的构型半径 $r=0.7503$ 。

[0106] S4:控制律参数确定。取主航天器通信权值 $b=100$,群集项增益系数 $c=1.0 \times 10^{-6}$,阻尼系数 $\gamma=1.0 \times 10^{-4}$,集群航天器间排斥系数 $k=1.0 \times 10^{-6}$,主航天器排斥系数 $k_0=1.0 \times 10^{-3}$,主航天器作用力变化阈值 $D_{ot}=0.8$ 。

[0107] S5:运用上述控制律,控制航天器集群由初始运动状态出发运动2000s,得到仿真结果如附图4~图10所示。由航天器与目标位置间最大和最小距离随时间变化图(图10)可以发现,集群运动较好地收敛到以主航天器为中心、半径为 $0.7724 \pm 0.0001\text{km}$ 的球形构型上,较好地接近于目标构型。

[0108] S6:如果认为所生成的构型无法满足要求,则根据发明内容S4中的参数调整规则进行参数调整。如可通过向上微调 D_{ot} ,使得生成的构型半径更接近于0.8km。

[0109] 以上披露的所有文章和参考资料,包括发明申请和出版物,出于各种目的通过援引结合于此。描述组合的术语“基本由...构成”应该包括所确定的元件、成分、部件或步骤以及实质上没有影响该组合的基本新颖特征的其他元件、成分、部件或步骤。使用术语“包含”或“包括”来描述这里的元件、成分、部件或步骤的组合也想到了基本由这些元件、成分、部件或步骤构成的实施方式。这里通过使用术语“可以”,旨在说明“可以”包括的所描述的任何属性都是可选的。

[0110] 多个元件、成分、部件或步骤能够由单个集成元件、成分、部件或步骤来提供。另选地,单个集成元件、成分、部件或步骤可以被成分离的多个元件、成分、部件或步骤。用来描述元件、成分、部件或步骤的公开“一”或“一个”并不说为了排除其他的元件、成分、部件或步骤。

[0111] 应该理解,以上描述是为了进行图示说明而不是为了进行限制。通过阅读上述描述,在所提供的示例之外的许多实施例和许多应用对本领域技术人员来说都将是显而易见的。因此,本教导的范围不应该参照上述描述来确定,而是应该参照前述权利要求以及这些权利要求所拥有的等价物的全部范围来确定。出于全面之目的,所有文章和参考包括发明

申请和公告的公开都通过参考结合在本文中。在前述权利要求中省略这里公开的主题的任何方面并不是为了放弃该主体内容,也不应该认为申请人没有将该主题考虑为所公开的发明主题的一部分。

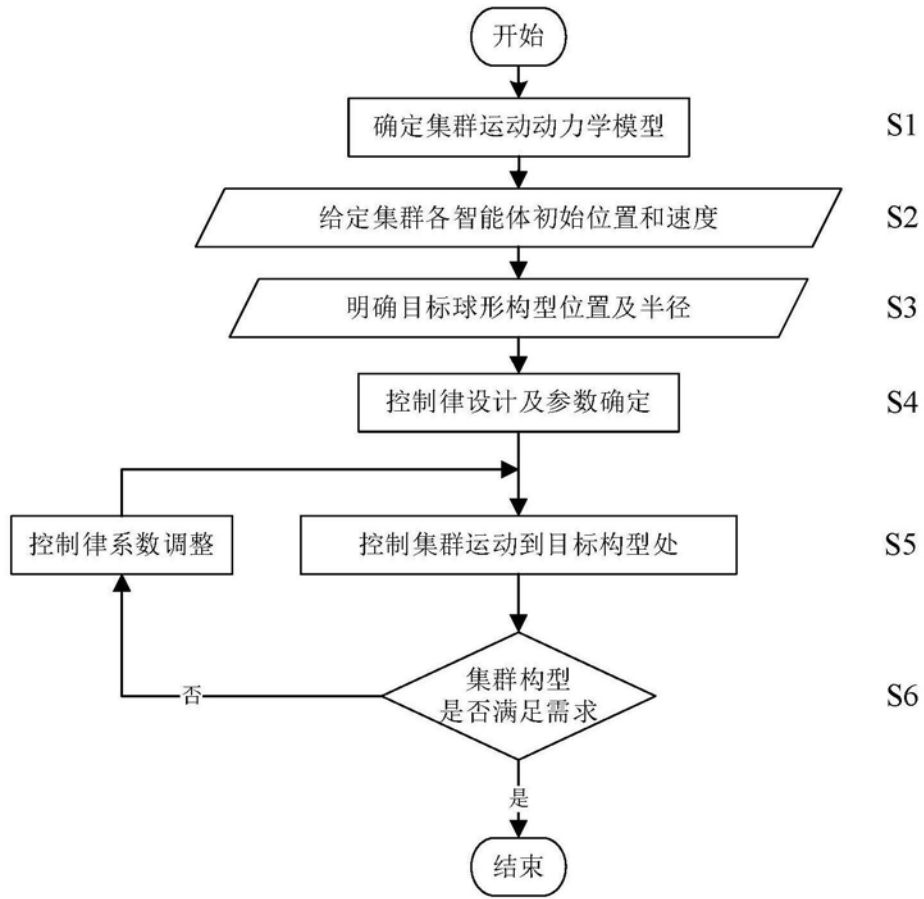


图1

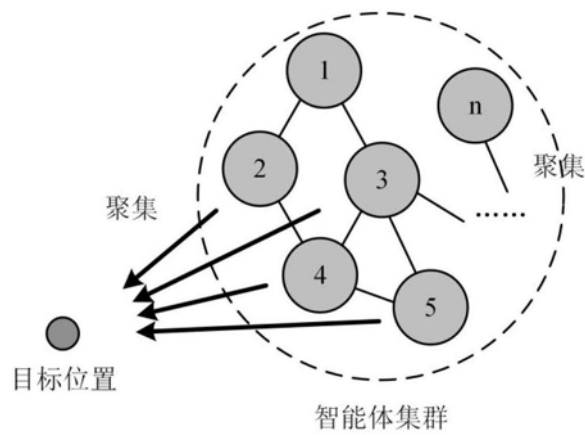


图2

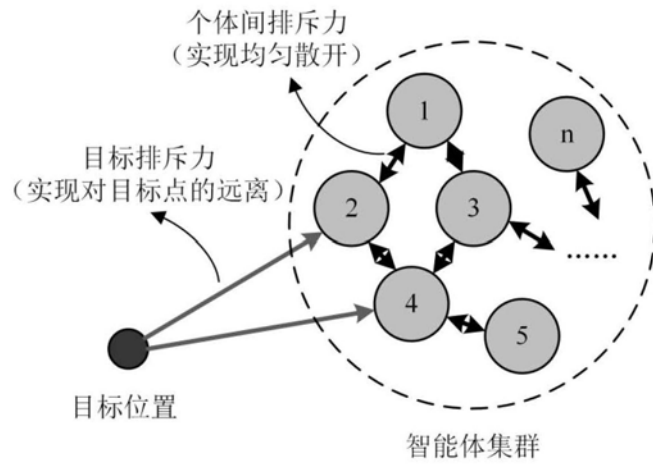


图3

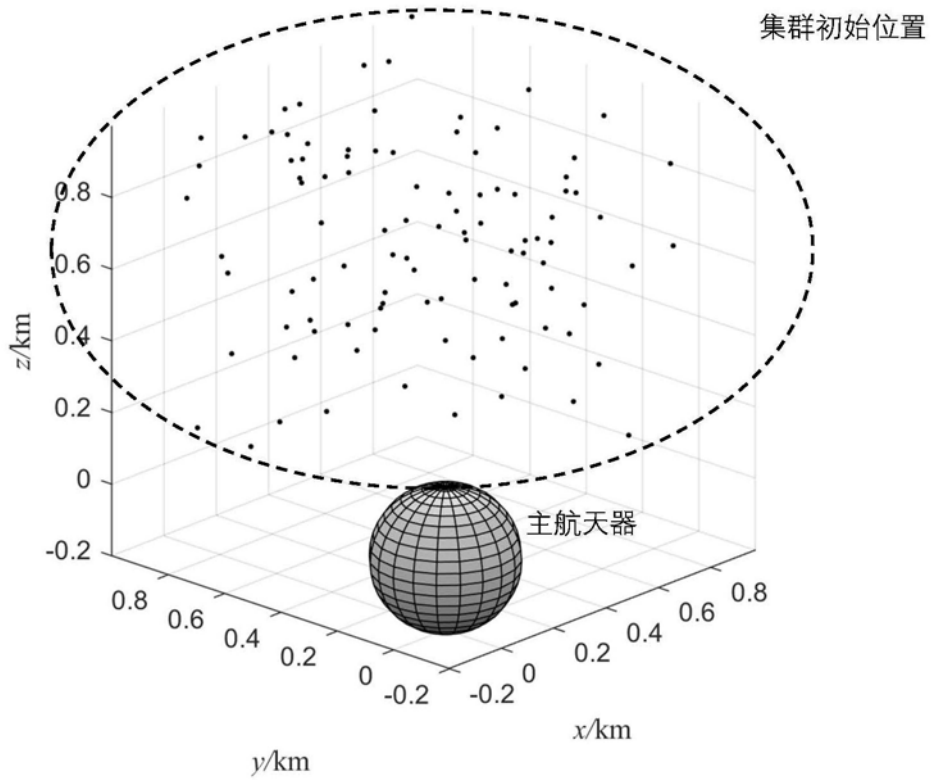


图4

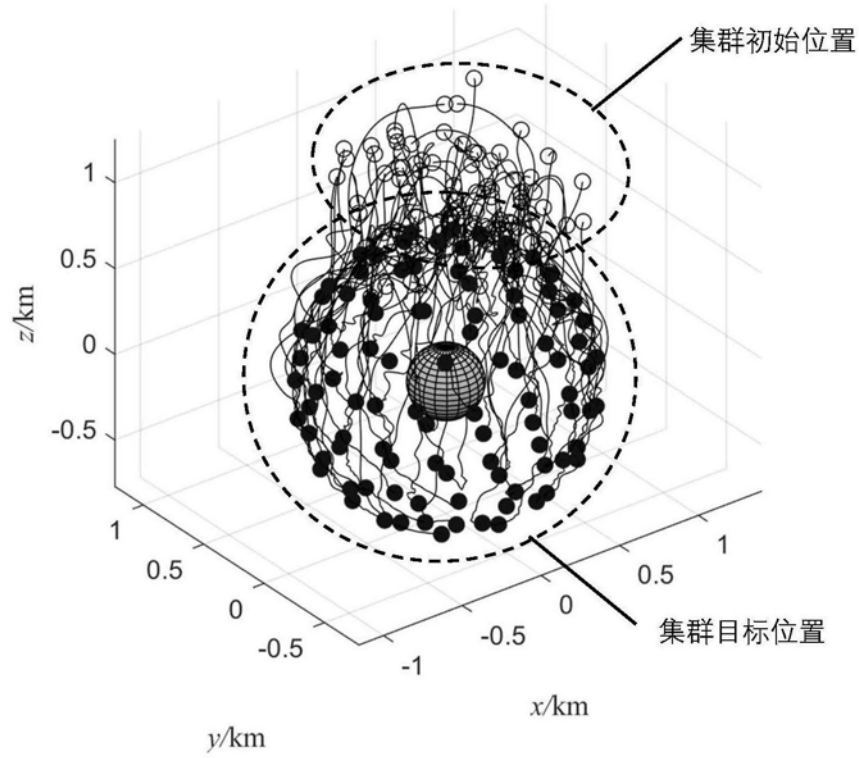


图5

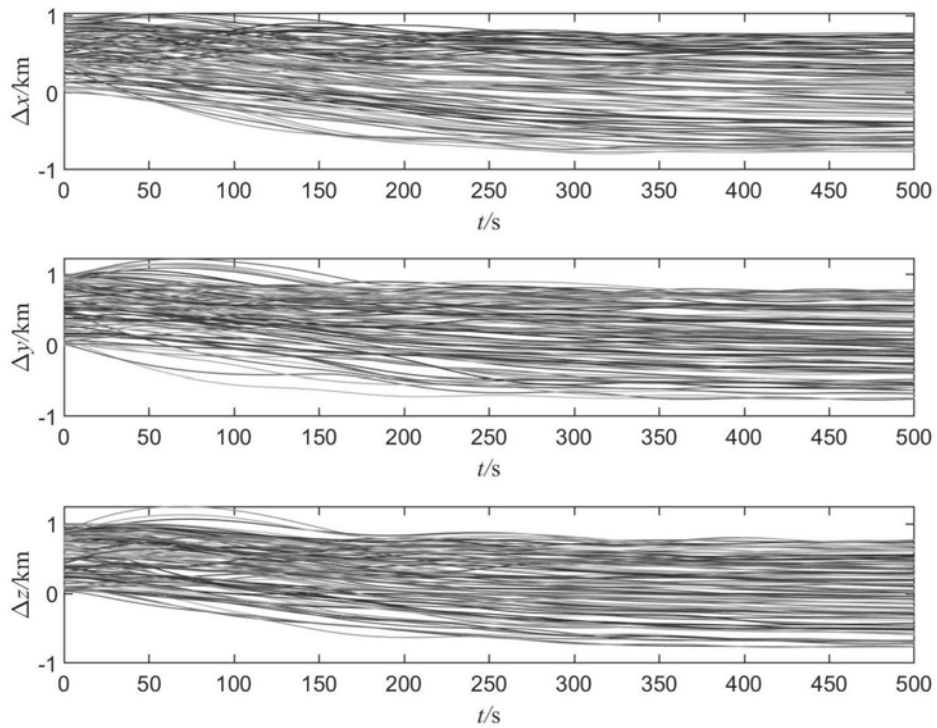


图6

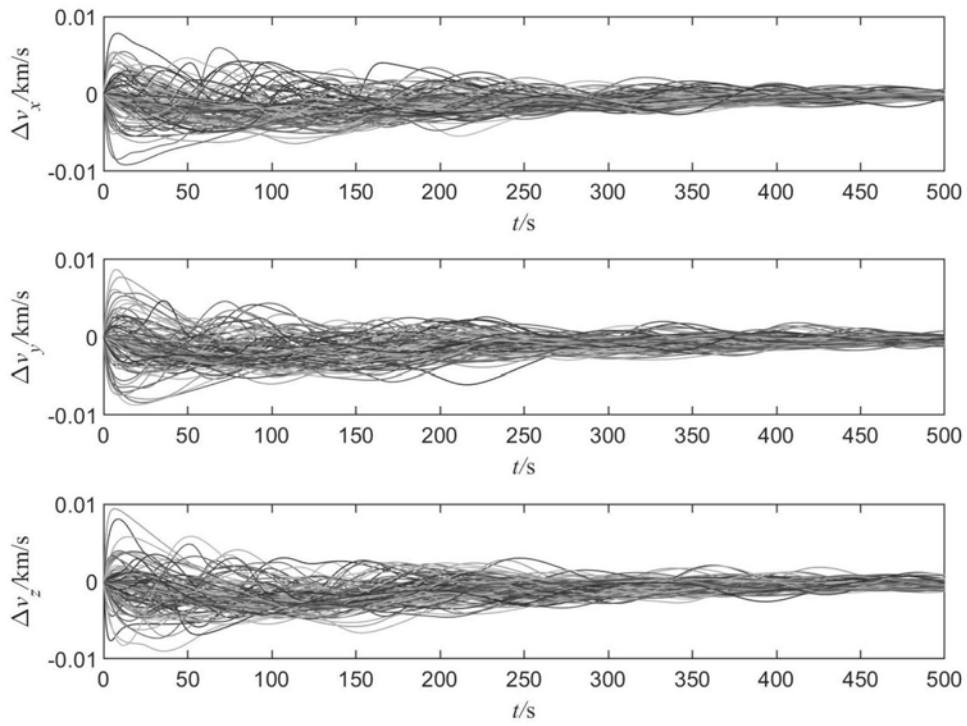


图7

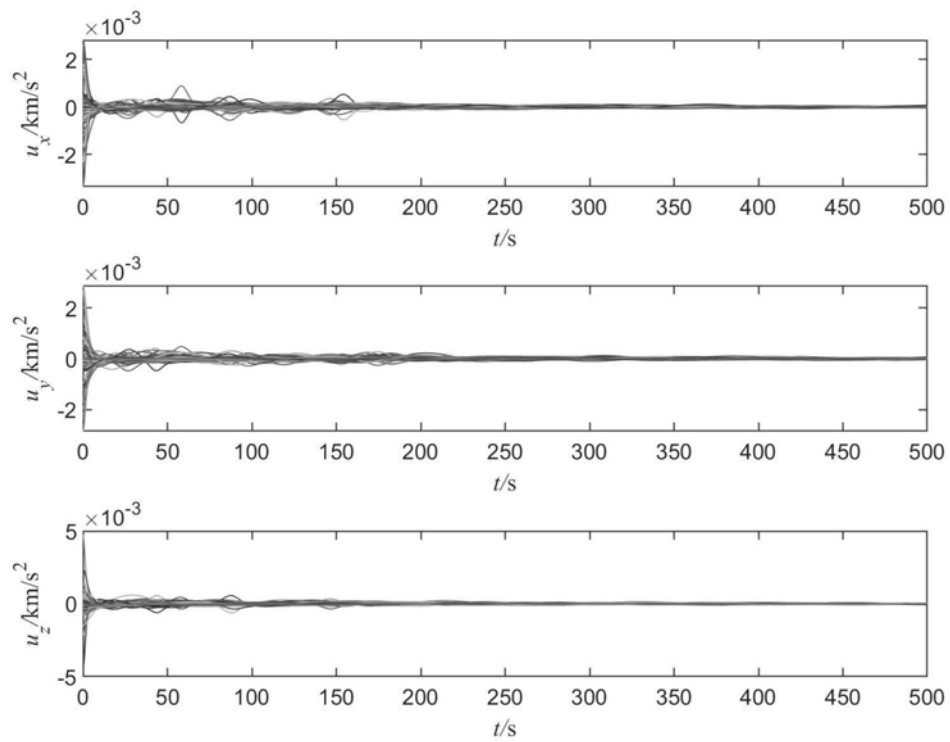


图8

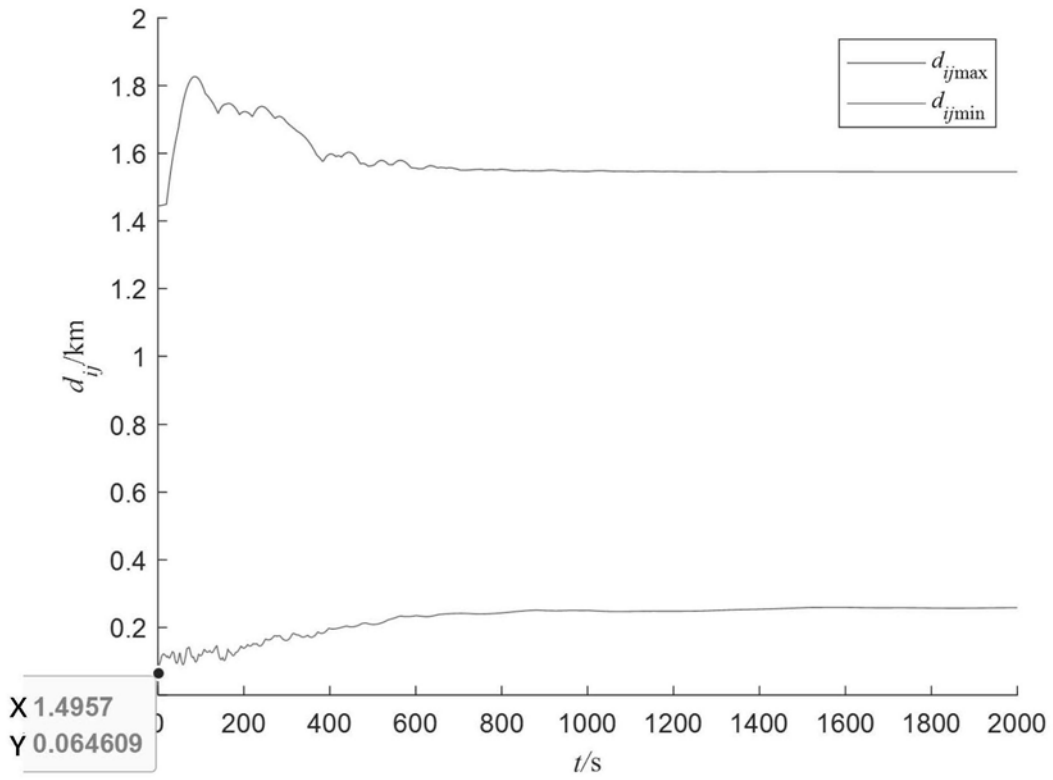


图9

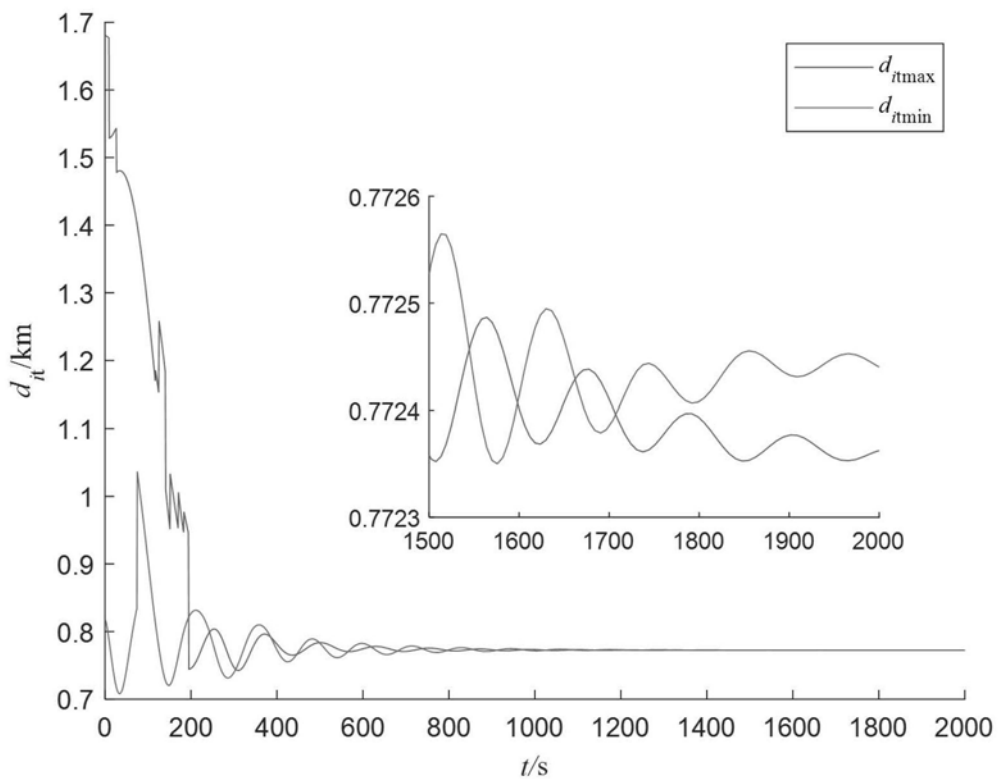


图10