
《先进控制概论》期末论文

自适应控制算法及
在无人机编队控制中的应用

**Adaptive control with
Applications on UAVs formation control**

姓	名：方尧
学	号 190410102
专	业：自动化
学	院：机电工程与自动化学院

哈尔滨工业大学

2023 年 1 月

摘 要

本文首先回顾了自适应控制算法的内容，引入了多智能体系统，阐述了多智能体系统中的研究重点问题以及发展趋势并引出研究问题。罗列了无人机编队问题国内外的的工作，并以领导者和跟随者参数具有不确定性的无人机编队问题为例，设计多变量自适应控制方案成功解决了具有参数不确定性和外部干扰的多架无人机的一致性飞行控制问题。结果表明，与固定控制方法相比，多变量 MRAC 方案可以更好地实现编队飞行的稳定性和跟踪性能。

关键词： 自适应控制； 无人机编队； 一致性问题

目 录

摘 要.....	I
1 课程算法和研究对象介绍	- 1 -
1.1 课程算法介绍	- 1 -
1.2 研究对象简介	- 2 -
2 研究问题概述	- 3 -
3 国内外研究现状综述	- 4 -
4 控制算法及分析	- 6 -
参考文献	- 9 -

1 课程算法和研究对象介绍

1.1 课程算法介绍

实际系统的系统结构以及控制参数通常具有不确定性，另外系统可能存在无法预知的扰动特性，这些都会影响系统控制精度甚至会破坏系统稳定性。这些系统在这些不确定因素下仍然能保持良好的系统性能，这些系统需要存在一些能够随着干扰做出相应变化的结构，也就是对应的抗干扰结构。

传统的方法是采用反馈方法（例如鲁棒高增益控制）。这些方法在一些情况下可以使闭环响应趋于一致（比如处于高回路增益的频率段），但也可能没有作用。另外，对某些过程参数不确定性（比如参数符号变化），传统方法甚至可能无法保证系统稳定。

相比而言，使用自适应控制器能较好地解决上述问题。自适应控制器，指的是能够对过程的动态响应和扰动特性的变化做出反应，修改自身行为的一类控制器，其应当包含可调节参数以及参数调节机制。可以知道一个自适应控制系统应包含两个回路：一个回路是由过程 and 控制器构成的正常反馈回路，另一个回路是参数调整回路。参数调整回路的功能是根据输入输出信号及控制信号或者状态变量计算控制器参数，并反馈给控制器，以达到更新控制器参数保证精良控制效果的目的。

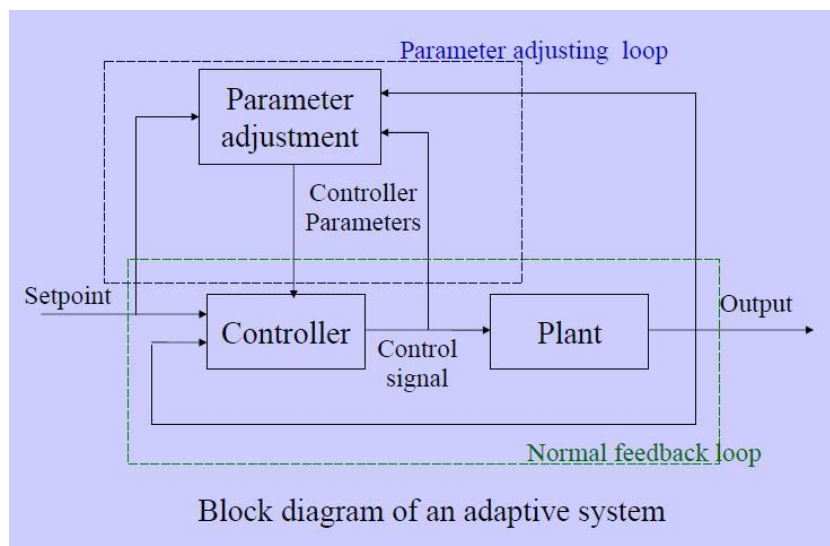


图 1-1 自适应系统结构框图

常见的自适应控制方法有增益调度、模型参考自适应控制、自适应调节器等等。

增益调度方法可以理解为：在过程参数和控制器参数之间形成一个映射关系，这个关系可以表现为函数或表格。优点是控制器参数可以根据对象系统动力学的改变迅速做出相应的变化；缺点：是一个开环的自适应机制，需要大量测算，没有真正的“学习”过程。

模型参考自适应控制顾名思义给定参考模型，该参考模型满足要求的性能需求：超调、调整时间、振荡次数、稳态精度等。实际对象输出与参考模型输出作差作为自适应控制率输入，设计相应的参数调整机制，以使系统稳定是模型参考自适应控制的关键问题。

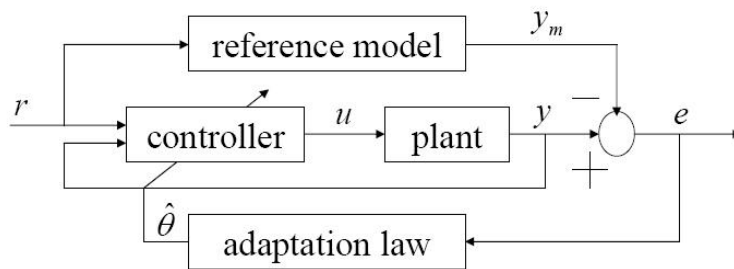


图 1-2 模型参考自适应控制（MRAC）结构图

自校正调节器的思路是在不断系统辨识的过程中进行控制器参数的优化更新，可以认为该方法是在自动地在线完成过程辨识和控制器设计两个步骤。该方法通常包括两个回路：内部回路包含过程和参数可变的常规控制器；外部回路包含一个过程参数实时估计器和一个控制器参数计算器。

1.2 研究对象简介

多智能体协同控制领域的常见研究对象有无人机、无人车、无人水下载具等。其中又以无人机较为主流。无人机（UAV，Unmanned Aerial Vehicle）一般指通过基站遥控或自主控制的具有完备动力装置系统的无驾驶舱飞行器，也被称为“空中机器人”。常用的无人机包括固定翼机、多旋翼飞行器、扑翼飞行器、伞翼机等。

随着电子信息技术的进步，无人机发展迅速、表现出色。21 世纪，得益于电池、控制、通信、芯片等相关领域的发展，无人机尤其是四旋翼无人机发展迅速，民用消费级无人机逐渐走进人们生活的各个角落，代替人们完成危险、繁琐、枯燥的任务，例如科学研究、交通运输、高空拍摄、农业自动化、地质探测、自然灾害救援等。

本文的研究对象为四旋翼无人机。结构示意图如下。



图 1-3 四旋翼无人机结构图

2 研究问题概述

本文研究问题为多智能体系统领域无人机编队控制问题。

大自然集群现象启发多智能体协同控制理论研究，工程需求推动理论研究，理论研究指导工程应用。



图 2-1 大自然集群现象

研究人员们观察自然界中鸟类的编队飞行，动物界中动物成群季节性迁徙以及蚁群搬运等自然现象^[1]，发现单无人机执行任务具有一定的局限性，多智能体之间的协同行为能起到节能、省力、省时等积极作用。

多无人机协同的优势有：

- (1) 执行侦察任务时，多无人机视野广阔，侦察效率高；
- (2) 减少飞行阻力，提高效率，节省能量，提高续航；
- (3) 单无人机故障，编队其余无人机仍可继续执行任务；

(4) 执行任务成功率和抗突发事件能力比单机任务高^[2]。

多智能体发展前沿趋势有无人机分布式空中作战、无人舰艇/无人机编队、多无人机协同搬运、智能电网等。多智能体协同控制前沿问题有：一致性问题、蜂拥问题、编队问题、领导跟随问题、多领导-跟随者包含控制问题、二分一致性问题等等。

多无人机编队的协同控制问题是多智能体系统领域研究重点之一。多无人机编队控制问题是指在任务过程中，如何形成和保持一定的几何形状，以适应平台性能、战场环境和战术任务。多无人机编队控制主要有两个问题需要解决。一个是编队队形形成，另一个是编队队形保持。编队形成包括如何生成指定队形。编队保持包括在不同几何形状下的转换问题。此外，编队保持另外一个主要问题是在保持几何形状不变的同时收缩或者扩大队形形状。

3 国内外研究现状综述

随着高科技科技在航空领域的广泛应用，无人机的发展取得了突破性的成就。经过几十年的发展，无人机已广泛应用于军事和民用应用。然而，单架无人机对完成复杂的任务有许多局限性。例如，当一架无人机在执行侦察任务时，由于传感器的检测限制，它可能无法从不同的方向观察目标。因此，无人机之间的协作通常是不可或缺的。为了提高飞行效率和扩大应用范围，无人机编队飞行展开研究，使得无人机能够在编队飞行中完成一致性飞行、空中加油、合作作战任务等。在军事应用中，无人机编队飞行可以扩展调查视野，提高任务完成率。在民用应用中，它在气象勘探、森林防火和应急救援等领域具有广阔的应用前景。在这些应用中，需要解决几个关键的技术问题，如协同路径规划、协同任务规划、编队相对导航、编队控制和避碰等。

目前，编队飞行的具体编队策略主要包括：领导-跟随编队、基于行为的编队、虚拟结构编队和一致性控制方法。

(1)领航-跟随法 该方法中需要僚机跟随长机，僚机利用与长机之间的相对位姿信息与期望信号作对比，辅以比例控制，实现编队控制。该方法常见且使用广泛，但是这种控制策略十分依赖于长机，长机坠毁或者出现故障，整个机群会失去控制，没有很好得去中心化，将控制决定权分布在系统每一个智能体上，这是该方法的最大缺点。

(2)虚拟结构法 在领航-跟随法的基础上，虚拟结构法定义一虚拟中心点

代替长机作用，即各无人机利用其与该虚拟中心点的位置关系进行编队控制。该方法将编队队形看做一虚拟刚体，通过各无人机与该刚体的相对位置进行定位。该方法解决了长机问题，但是由于编队是一动态过程，不能时刻保持这种刚体结构，该方法仍需进一步优化改善。

(3)行为法 该方法的基本思想是将编队中可能发生的事件用基本行为如避撞、状态保持、伺服等描述出来。该方法是一种先因后果的运动控制系统方法，该方法难点在于如何抽象这些行为以及如何将事件描述成这些行为。其优点是仅需知道临近无人机信息，通讯量小，系统简单；缺点是难以描述动态特性、难以精确控制。

(4)一致性控制方法 该方法设计思想是所有个体仅接收相邻个体状态信息，通过控制程序，使得所有个体状态达到一致，其要求的通讯带宽不高，且能取得较好的控制效果，是当下一种十分火热的编队策略。2004 年，Olfati-Saber 等人提出一致性控制方法，其分别对有向固定拓扑、有向切换拓扑以及无向有时延拓扑进行分析，建立了多智能体与网络拓扑结构的一致性理论^[3]。三年后，Olfati-Saber 等人提出了多智能体系统一致性分析的基本方法，考虑了通讯节点故障下多智能体稳定性，奠定了一致性控制理论的基础^[4]。

许多编队控制算法也相继提出，如：反馈线性化、 H_∞ 控制、PID 控制、线性二次（LQ）控制、自适应控制^[5]、基于神经网络的动态面控制等。

当一组无人机保持一个期望的特殊距离并在一个稳定的、特定的结构中飞行时，编队飞行问题可以等于一个一致性问题。达成一致性就意味着跟随者最终会对领导者的状态或者输出达成一致。近年来，具有一般线性动力学的领导-跟随系统问题已经展开研究。[6]解决了在外部干扰下具有不同动力学的领导-跟随系统的问题。Peng 等人为[7][8]中的不确定非线性多智能体系统分别提出了使用虚拟结构策略和先导跟踪策略的分布式自适应控制方案。在许多情况下，领导-跟随模型参数都是未知的，因此很难用一个固定的控制器来控制编队飞行。现有的研究大多集中在跟随者参数不确定情况下的领导者跟随一致性问题上，而很少有文献同时考虑领导者和跟随者的动态不确定性。

4 控制算法及分析

无人机通常是一个具有六个自由度的非线性系统,根据小扰动理论可以线性化^[9],表示为

$$E\dot{X} = \tilde{A}X + \tilde{B}U \quad (4-1)$$

可以重写为标准形式

$$\dot{X} = \underline{A}X + \underline{B}U \quad (4-2)$$

一般来说,基于地表惯性参考系,将线性模型解耦为纵向模型和横向模型

$$\begin{aligned} \dot{X}_{lon} &= A_{lon}X_{lon} + B_{lon}U_{lon} \\ \dot{X}_{lat} &= A_{lat}X_{lat} + B_{lat}U_{lat} \end{aligned} \quad (4-3)$$

纵向和横向控制器通常是单独设计。因此,为了方便控制器的设计,建立了无人机纵向运动或横向运动的统一状态空间模型

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4-4)$$

这里,对于纵向控制器设计, x 表示 X_{lon} , A 表示 A_{lon} , B 表示 B_{lon} , U 表示 U_{lon} ; 对于横向控制器设计, x 表示 X_{lat} , A 表示 A_{lat} , B 表示 B_{lat} , U 表示 U_{lat} 。

无人机在编队飞行中的一致性飞行控制问题可以描述为领导-跟随问题。在这个问题中,领导者和跟随者都有不确定的参数和未知的外部干扰。考虑一个状态空间形式的线性时不变跟随者

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Bd(t) \\ d(t) = d_0 + \sum_{\beta=1}^q d_{\beta} f_{\beta}(t) \end{cases} \quad (4-5)$$

领导者系统如下

$$\begin{cases} \dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m u_m(t) + B_m d_m(t) \\ d_m(t) = d_{m0} + \sum_{\beta=1}^{q_m} d_{m\beta} f_{m\beta}(t) \end{cases} \quad (4-6)$$

控制目标是设计一个包含干扰补偿器的有界状态反馈控制律 $u(t)$, 使跟随系统状态 $x(t)$ 有界, 并渐近跟踪先导系统 $x_m(t)$, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x_m(t)) = 0$, 并不受外部未知干扰的影响。

选择一个带有干扰补偿器的标称控制器为

$$u^*(t) = k_1^{*T} (x(t) - x_m(t)) + k_2^* u_m(t) + k_3^{*T} x_m(t) + k_5^*(t) \quad (4-7)$$

其中有如下关系

$$\begin{aligned} A_e &= A + Bk_1^{*T}, B_m = Bk_2^* \\ A_m &= A + Bk_3^{*T}, B_e = Bk_4^* \end{aligned} \quad (4-8)$$

且有 $M_s = k_4^* S = (k_4^* S)^T > 0$ 正定。

可以得出跟踪误差满足

$$\dot{e}(t) = A_e e(t), e(0) = x(0) - x_m(0) \quad (4-9)$$

也就意味着 $\lim_{t \rightarrow 0} e(t) = 0$ ，且指数收敛。

当参数未知时，设计自适应控制器如下

$$u(t) = k_1^T (x(t) - x_m(t)) + k_2 u_m(t) + k_3^T x_m(t) + k_5(t) \quad (4-10)$$

其中 $k_1(t), k_2(t), k_3(t), k_5(t)$ 是对应参数的估计。

设计目标是选择自适应律来更新这些估计参数，使得即使存在参数不确定性和未知的外部干扰，控制目标仍然可以实现。设计自适应律如下

$$\begin{aligned} \dot{k}_1^T(t) &= -S^T B_e^T P e(t) e^T(t) \\ \dot{k}_2(t) &= -S^T B_e^T P e(t) u_m^T(t) \\ \dot{k}_3^T(t) &= -S^T B_e^T P e(t) x_m^T(t) \\ \dot{k}_{50}(t) &= -S^T B_e^T P e(t) \\ \dot{k}_{5\beta}(t) &= -S^T B_e^T P e(t) f_\beta^T(t), \beta = 0, 1, 2, 3, \dots \\ \dot{k}_{5m\beta}(t) &= -S^T B_e^T P e(t) f_{m\beta}^T(t), \beta = 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (4-11)$$

其中 $P = P^T > 0$ 满足 $A_e^T P + P A_e = -Q$ ， Q 满足 $Q = Q^T > 0$

可以得到

$$\dot{e}(t) = A_e e(t) + B_e k_4^{*-1} [\tilde{k}_1^T(t) e(t) + \tilde{k}_2(t) u_m(t) + \tilde{k}_3^T(t) x_m(t) + \tilde{k}_5(t)] \quad (4-12)$$

选择一个正定函数

$$\begin{aligned} V(e_c) &= e^T P e + tr[\tilde{k}_1 M_s^{-1} \tilde{k}_1^T] + tr[\tilde{k}_2^T M_s^{-1} \tilde{k}_2] + tr[\tilde{k}_3 M_s^{-1} \tilde{k}_3^T] \\ &+ tr[\tilde{k}_{50}^T M_s^{-1} \tilde{k}_{50}] + \sum_{\beta=1}^q tr[\tilde{k}_{5\beta}^T M_s^{-1} \tilde{k}_{5\beta}] + \sum_{\beta=1}^{qm} tr[\tilde{k}_{5m\beta}^T M_s^{-1} \tilde{k}_{5m\beta}] \end{aligned} \quad (4-13)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2e^T P \dot{e} + tr[\tilde{k}_1 M_s^{-1} \dot{\tilde{k}}_1^T] + 2tr[\tilde{k}_2^T M_s^{-1} \dot{\tilde{k}}_2] + 2tr[\tilde{k}_3 M_s^{-1} \dot{\tilde{k}}_3^T] \\ &+ 2tr[\tilde{k}_{50}^T M_s^{-1} \dot{\tilde{k}}_{50}] + 2\sum_{\beta=1}^q tr[\tilde{k}_{5\beta}^T M_s^{-1} \dot{\tilde{k}}_{5\beta}] + 2\sum_{\beta=1}^{qm} tr[\tilde{k}_{5m\beta}^T M_s^{-1} \dot{\tilde{k}}_{5m\beta}] \end{aligned} \quad (4-14)$$

计算可以得出

$$\dot{V} = -e^T(t) Q e(t) \leq -q_m \|e(t)\|_2^2 \leq 0, \quad Q = Q^T > 0 \quad (4-15)$$

故可以得出结论：(1) 平衡点稳定 (2) 系统状态 $e, k_*, \dot{e}, * = 1, 2, 3, 50, 5\beta, 5m\beta$

有界 (3) 应用 Barbalat Lemma 定理，可以得出 $\lim_{t \rightarrow 0} e(t) = 0$

仿真结果如下

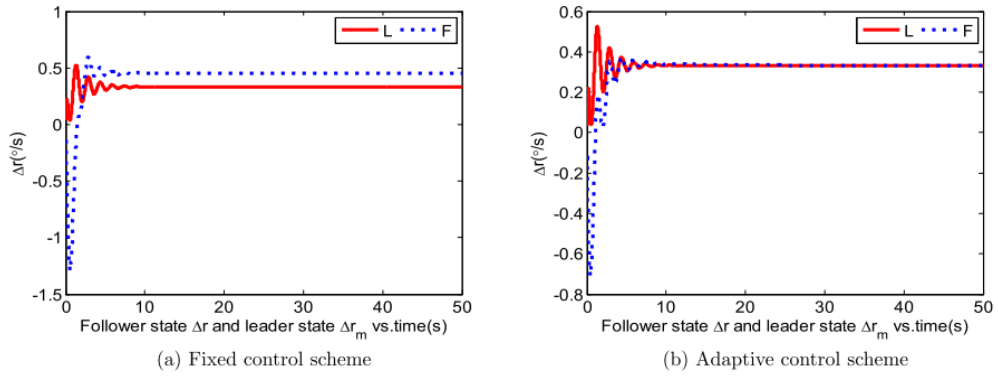


图 4-1 仿真结果^[9]

仿真结果表明，与固定控制方法相比，多变量 MRAC 方案可以更好地实现编队飞行的稳定性和跟踪性能。多变量自适应控制方案成功解决具有参数不确定性和外部干扰的多架无人机的一致性飞行控制问题。

参考文献

- [1] Seiler P, Pant A, Hedrick K. Analysis of bird formations[C]//Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002. IEEE, 2002, 1: 118-123.
- [2] 宗群,王丹丹,邵士凯,张博渊,韩宇.多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(03):1-14.
- [3] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on automatic control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [4] Olfati-Saber R, Fax J A, Murray R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215-233.
- [5] Semsar E, Khorasani K. Adaptive formation control of UAVs in the presence of unknown vortex forces and leader commands[C]//2006 American Control Conference. IEEE, 2006: 6 pp.
- [6] Liu Y, Jia Y. Adaptive leader-following consensus control of multi-agent systems using model reference adaptive control approach[J]. IET Control Theory & Applications, 2012, 6(13): 2002-2008.
- [7] Peng Z, Wang D, Zhang H, et al. Distributed model reference adaptive control for cooperative tracking of uncertain dynamical multi - agent systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2013, 7(8): 1079-1087.
- [8] Peng Z, Wang D, Zhang H, et al. Distributed neural network control for adaptive synchronization of uncertain dynamical multiagent systems[J]. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 2013, 25(8): 1508-1519.
- [9] Zhen Z, Tao G, Xu Y, et al. Multivariable adaptive control based consensus flight control system for UAVs formation[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 93: 105336.