

文章编号: 1001- 2486(2003) 05- 0001- 05

MAV 飞行控制器的 μ 综合设计方法*

曾庆华, 张为华

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:从 MAV 飞行控制系统的基本组成出发, 讨论了 MAV 飞行控制器设计的性能评估准则、鲁棒性评估准则、安全性评估准则和控制能量准则。重点研究了在 MAV 质量、展长、质心位置、飞行速度和气动计算误差等参数摄动情况下的线性化建模方法, 由此建立了 MAV 的 Δ - P - K 结构, 求取了广义被控对象的传递函数矩阵, 进一步讨论了利用 μ 综合手段进行 MAV 飞行控制器设计的方法和步骤。

关键词:微型飞行器; 飞行控制; 鲁棒控制; μ 综合

中图分类号: V211 **文献标识码:** A

 μ Synthesis Research on MAV Flight Controller Design

ZENG Qing-hua, ZHANG Wei-Hua

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: From Micro Air Vehicle (MAV) flight control system's basic constitution, this paper discusses MAV flight controller's performance criteria, robustness criteria, security criteria and control energy criteria. The linear model approach is presented based on MAV parametric uncertainty such as mass, span, length of fuselage, placement of mass, flight velocity, and aerodynamic compute errors. The MAV flight controller's Δ - P - K architecture is built, and generalized plant transfer function matrix obtained. And further more, we discuss the μ synthesis approach by which MAV flight controller is designed.

Key words: Micro Air Vehicle, flight control, robust control, μ synthesis

微型飞行器(Micro Air Vehicle, 简称 MAV) 不仅有着广阔的军用、民用前景, 而且它涉及微系统的大部分关键技术, 极有可能成为未来微系统持续发展的技术驱动力, 因此世界各国掀起了一个 MAV 研究的热潮。由于 MAV 几何尺寸小($< 15\text{cm}$)、重量轻($< 100\text{g}$), 受加工制造精度、飞行环境影响大, 稳定性差, MAV 几何参数和飞行状态参数的微小变化都有可能对 MAV 的正常飞行产生致命影响, 平台的稳定和导引将要求对飞行姿态的控制更为精确、快速, 具有更强的鲁棒品质, 因此, 传统飞行控制器设计分析方法受到了严重挑战, 应探索一种基于 MAV 多学科设计与综合的飞行控制器设计方法, 以提高飞行控制器的鲁棒性能指标^[1]。 μ 综合方法是鲁棒控制分析与综合的一种有效手段, 该方法克服了采用奇异值作为系统性能度量保守性过大的缺点, 能够同时兼顾系统的稳定性和动态性能, 它通过引入一个虚拟的“性能”不确定性块 Δ , 将控制系统的鲁棒性能要求转化为鲁棒稳定性能要求, 于是控制系统的鲁棒设计问题就转化为一个以目标函数的结构奇异值为性能指标的 H_∞ 控制问题。 μ 综合设计过程实际上包括 H_∞ 综合和 μ 分析两个连续的过程, 它们要反复迭代多次直至 $\mu < 1$, 最终可求得鲁棒控制器 $K(s)$, 这一求解方法称为 D-K 迭代算法。MATLAB 的鲁棒控制工具箱中提供了大量的 μ 分析工具, 从而使本文的研究能够专注于如何将 MAV 飞行控制问题转换为一个标准的 μ 综合设计问题, 摆脱了 μ 综合设计方法繁琐的理论推导和程序实现。

在 MAV 飞行控制器应用中, μ 综合设计方法包括如下几个步骤: 首先要对 MAV 飞行控制系统的基本组成结构进行分析, 明确系统的理想响应特性、不确定性来源、边界条件和优化指标等; 接着建立 MAV 多学科仿真模型, 进行参数的不确定性统计试验, 由此获得基于参数不确定性的线性化模型, 建立

* 收稿日期: 2003- 02- 18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60175032)

作者简介: 曾庆华(1966-), 男, 副教授。

进行鲁棒控制问题研究的广义对象, 实现模型的不确定性结构部分和确定性结构部分的分离; 针对广义对象, 利用 μ 综合设计方法进行鲁棒控制器的设计; 最后对设计出的鲁棒控制器进行性能评估, 并反复调整, 直至满足设计要求为止。

1 MAV 飞行控制器基本结构及其评估准则

和传统飞行器一样, MAV 飞行控制器包括飞行品质控制器和航迹控制器^[2], 它是通过在飞行控制算法中以内、外控制回路的形式来实现的。从控制方式来看, 可以将 MAV 的控制方式划分为几个主要的航段, 即起飞和着陆阶段的控制、水平直线飞行和盘旋转弯飞行, MAV 飞行控制器的设计仍可按照纵向通道和横向通道分别设计, 控制装置采用传统的空气舵操纵机构, 测量通道遵循数量少、重量轻的原则进行选取, 选择三个姿态角和飞行高度四个测量信号。图 1 就是 MAV 飞行控制器系统的典型组成框图。下面的讨论都以此为出发点而展开。

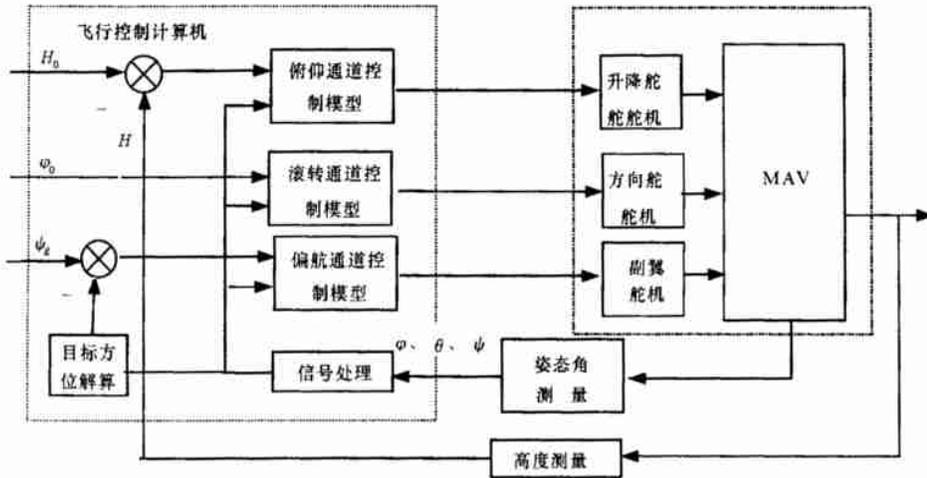


图 1 MAV 飞行控制器系统组成框图

Fig. 1 MAV flight control system block diagram

由于 MAV 体积小、重量轻, 对几何参数与状态参数的变化很敏感, 飞行控制器的设计要求和传统飞行器相差较大, 常规飞行器的设计标准已不能满足 MAV 飞行控制器的设计要求, 因此, 有必要针对 MAV 特点建立一套合理的 MAV 飞行控制器评估准则, 以确保在 MAV 整个飞行包线和各种飞行条件下都具有良好的飞行品质。我们通过对传统飞行控制器设计要求以及 MAV 飞行动力特性的综合研究, 根据鲁棒控制器设计的具体要求^[3,4], 提出了如下几个评估准则:

(1) 飞行性能评估准则 它反映了控制器对给定信号的跟踪误差以及抗扰动特性, 一般包括上升时间、调整时间和超调量。对于图 1 的飞行控制器组成来说, 必须定义三个姿态角和高度的理想响应特性。如定义高度响应指标为: 上升时间 $t_r < 12s$, 调整时间 $t_s < 30s$, 最大超调量 $M_p < 15\%$ 。

(2) 鲁棒性评估准则 它反映了控制器在参数变化情况下的稳定边界。具体来说包括: MAV 几何设计参数变化、质量变化、质心位置变化、系统时延、传感器测量误差、气动系数计算误差等边界条件。

(3) 安全性评估准则 它定义了 MAV 飞行时某些关键参数的变化范围, 反映了 MAV 安全飞行的边界条件。主要包括: 飞行速度、滚转角、俯仰角、迎角等参数的变化范围。

(4) 控制能量评估准则 飞行控制器设计时, 要求对控制装置的能量消耗进行量测, 并希望控制能量最小, 例如可用 $\int_0^{\infty} u^T u dt$ 来进行度量。

2 基于 MAV 参数不确定性的动力学模型线性化方法

MAV 飞行动力学模型由一组非线性方程组(以下简称非线性模型)组成, 在计算机上求解这类问题

没有任何困难,但是以非线性模型为基础进行飞行控制器的设计与综合非常复杂,一般均采用小扰动法使非线性模型线性化,得到纵向运动和横侧向运动的线性化模型。一般情况下,都没有考虑设计参数的变化对线性模型的影响,对常规飞行器而言这种影响不会太大,但对于 MAV 来说,这种影响就不可忽视了,例如, MAV 质量的变化以及质心位置的变化,对 MAV 飞行稳定性的影响就是非常关键的,我们曾对 MAV 质心位置变化对飞行器俯仰稳定性的影响进行过研究,结果表明:某型 MAV 质心位置产生 2mm 的偏差,俯仰通道的静稳定裕量就会产生 4% 以上的变化,往往会从静稳定的飞行器变为静不稳定的飞行器。因此,在多学科仿真环境中,在整个飞行包线内,将飞行器动态参数,如飞行速度、高度、攻角等造成的线性化误差,以及飞行器设计参数的摄动对模型线性化的影响结合起来进行研究,把 MAV 控制问题转化为标准的鲁棒控制控制问题,对于解决 MAV 飞行控制器设计有着良好前景。

假设 MAV 的动力学线性化模型采用传递函数的形式来描述,如下所示:

$$\begin{aligned}
 & (1) \text{ 纵向运动传递函数} & (2) \text{ 横侧向运动传递函数} \\
 & \begin{cases} \frac{\theta(s)}{\delta_e(s)} = \frac{a_{12}s + a_{11}}{s(s^2 + b_{12}s + b_{11})} \\ \frac{\alpha(s)}{\delta_e(s)} = \frac{a_{22}s + a_{21}}{s^2 + b_{22}s + b_{21}} \\ \frac{H(s)}{\theta(s)} = \frac{a_{31}}{s(s + b_{31})} \end{cases} & \begin{cases} \frac{\Psi(s)}{\delta_r(s)} = \frac{c_{12}s + c_{11}}{s(s^2 + d_{12}s + d_{11})} \\ \frac{\beta(s)}{\delta_r(s)} = \frac{c_{22}s + c_{21}}{s^2 + d_{22}s + d_{21}} \\ \frac{\phi(s)}{\delta_r(s)} = \frac{c_{31}}{s(s + d_{31})} \end{cases}
 \end{aligned}$$

以上方程中 θ 、 α 、 H 、 Ψ 、 β 、 ϕ 、 δ_r 、 δ_e 分别表示俯仰角、迎角、飞行高度、偏航角、侧滑角、滚转角、升降舵偏角、方向舵偏角和副翼偏角,而传递函数中的系数 $a_{11} \sim a_{31}$ 、 $b_{11} \sim b_{31}$ 、 $c_{11} \sim c_{31}$ 、 $d_{11} \sim d_{31}$ 等都是与模型参数相关的量,当给定一组飞行器的设计,在特定平衡点处相应的线性化模型也随之确定下来。MAV 不确定性模型线性化方法的一个关键就是要获得一个线性时变状态空间模型,它和模型参数摄动有关,并且是覆盖了非线性模型在所有飞行条件和所有模型参数值下的线性化近似。为此可采用如下方法:根据鲁棒性评估准则要求,确定摄动参数及其数量 k ,设计一个三水平 k 因素的正交试验;在 MAV 多学科仿真试验环境,按照正交试验要求,改变诸如质量、展长、机身长、质心位置、飞行速度、气动力和气动力矩系数的计算误差等 k 个参数的取值组合,进行 3^k 次仿真试验,获得纵向和横侧向传递函数中各个系数变化的最大、最小值,并对其进行规格化处理,得到统一的描述形式: $A_{i,j} = a_{i,j}(1 + w_{ai,j}\sigma_{ai,j})$,其中 $a_{i,j}$ 为标称值, $w_{ai,j}$ 为不确定性权重, $\sigma_{ai,j}$ 为 $[-1, +1]$ 区间变化的不确定性环节。用线性分式变化模型(即 LFT 模型)可将不确定性环节分离出来,即 $A_{i,j} = F_l \left[\begin{matrix} a_{i,j} & a_{i,j} \omega_{ai,j} \\ 1 & 0 \end{matrix} \right], \delta_{ai,j}$,如图 2 所示。

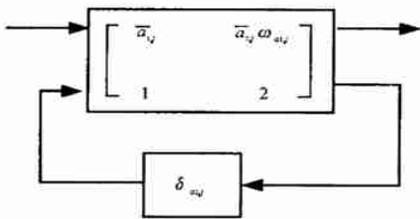


图 2 不确定性系数的 LFT 模型框图

Fig. 2 Uncertain coefficient as LFT

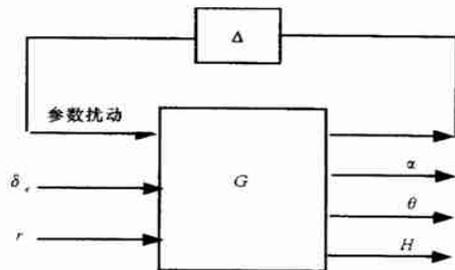


图 4 MAV 纵向不确定性模型紧凑形式

Fig. 4 MAV longitudinal uncertainty compact model

最后,观察系数最大、最小值变化范围,变化不大的参数仍作常系数处理,给出 MAV 不确定性线性化模型的结构图。如假设 MAV 纵向通道不确定性系数有 a_{11} 、 a_{12} 、 a_{21} 、 b_{11} ,那么可得到图 2 所示的不确定性模型结构图。据此可以很方便地求得系统的广义对象,其不确定性环节已经从系统中分离出来^[5],如图 3 所示。

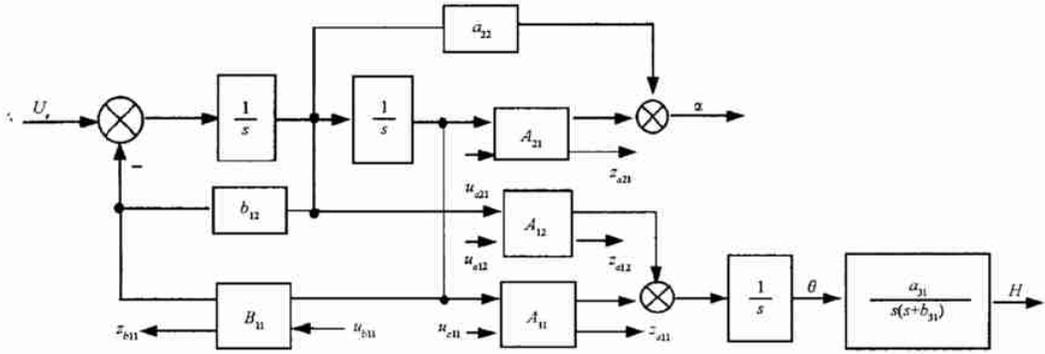


图 3 MAV 纵向不确定性线性化模型结构图

Fig. 3 MAV longitudinal uncertainty linear model architecture

3 MAV 飞行控制器的 μ 综合设计与评估

MAV 的空间运动可简化为纵向和横侧向两种运动, 两类控制器均可采用相似的控制结构实施控制。假定纵向或横侧向线性化模型为 G , 控制器采用由内外两个回路组成的 2 自由度控制器结构, 控制系统是由控制对象 G 、飞行品质控制器 K_1 以及航迹控制器 K_2 组成的一个命令跟踪反馈系统。在这个控制结构中, 控制器被分离为两个模块, K_1 主要对飞行器的姿态角或姿态角速率进行控制, 从而改善飞行运动的飞行品质, 增加飞行器的稳定性; 而 K_2 主要对给定的位置导航命令信号进行处理, 从而保证飞行器按照预定航迹飞行。控制系统的 LFT 模型如图 5 所示。图中, $G(s)$ 为纵向或横侧向运动的标称广义模型, Δ 表示模型参数摄动, $W_1(s)$ 为系统性能的加权函数, $W_2(s)$ 为控制能量的加权函数, M 为闭环系统的理想模型。 z_1 表示实际系统与理想系统的动态与稳态性能误差的加权值, 而 z_2 表示控制能量的加权值, z_3 表示模型摄动时的输出响应; 由于 MAV 对内外状态的微小变化都很敏感, 故在系统结构中对各种扰动信号都要进行考虑, 而 r_1, r_2, r_3, r_4 就分别用来表示外部命令信号、测量噪声、模型不确定性扰动和外部干扰。为了鲁棒设计方便, 将前馈控制器和反馈控制器组合在一起, 用控制器 K 来表示, 即 $K = [K_1 \ K_2]$ 。将图 5 系统结构图转换为 Δ - P - K 结构的标准反馈控制框图, 可得到广义被控对象 P 的传递函数阵为:

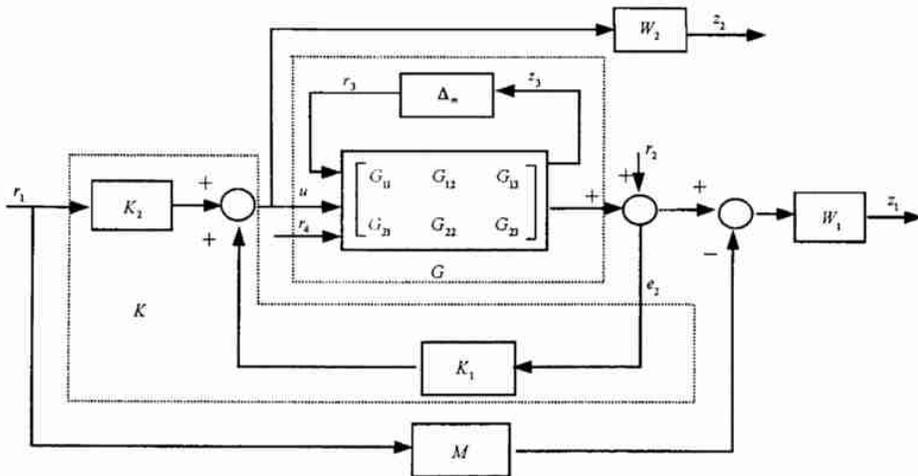


图 5 MAV 控制系统结构框图

Fig. 5 MAV control system architecture

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = P(s) \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -W_1 M & W_1 & W_1 G_{21} & W_1 G_{23} & W_1 G_{22} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W_2 \\ 0 & 0 & G_{11} & G_{13} & G_{12} \\ I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -M & I & G_{21} & G_{23} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ u \end{bmatrix}$$

至此, 可根据飞行性能评估准则构造理想响应模型 M , 并把控制系统的实时响应与理想模型的输出响应之差用性能权函数 $W_1(s)$ 加权作为系统设计的目标函数之一, 选取 $W_1(s)$, 使其在希望的频段内使系统输出与理想模型输出的跟踪误差最小; 根据舵偏、舵偏变化率的变化范围及其响应频率, 选取 $W_2(s)$; 在鲁棒控制器设计中, 考虑到外部输入信号 h 都可用单位球内的能量信号乘以相应的权函数来等效表示, 即: $h \in \{W_h \eta_k : \|\eta_k\|_2 \leq 1\}$, 将图 5 中的外输入信号 r_1, r_2, r_4 用以上形式表示, 从而可以虚拟一个“性能”不确定性块 Δ_p , 将控制系统的性能要求等效为鲁棒稳定性要求。由鲁棒性能定理可知, 当 $\mu(M) \leq 1$ 时, 控制系统具有希望的鲁棒性能^[6]。利用 D-K 迭代算法可求出相应的控制器为 K_μ 。将控制器 K_μ 嵌入到 MAV 的多学科仿真模型中, 定义几组典型的参数摄动值, 进行非线性的闭环仿真试验, 对各组仿真结果与理想响应进行对比分析, 调整加权函数, 直至满足要求为止。

4 结束语

由于 MAV 体积小、重量轻, 受环境影响大, 稳定性差, 平台的稳定和导引对飞行控制的鲁棒性指标提出了很高的要求。本文系统地给出了 MAV 飞行控制器的 μ 综合设计方法, 利用该方法我们曾对某无尾 MAV 的纵向控制器进行设计, 考虑 MAV 气动系数计算误差、质量、展长、机身长、质心位置、计算误差、系统延时和飞行速度的参数摄动, 可得到一个 4 输入、1 输出、24 状态的控制器 K_μ , 保证在参数摄动范围内满足飞行性能指标的要求。

参考文献:

- [1] Douglas Page MAV Flight Control: Realities and Challenges[EB], <http://www.Hightech-careers.com/doc198e/flightcontrol198e.html>.
- [2] 鲁道夫·布罗克豪斯. 飞行控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [3] Helmersson A. Robust Flight Control Design Challenge Problem Formulation and Manual: the Research Civil Aircraft Model (RCAM)[R]. GAPEUR/TP-088-3.
- [4] Muir, E.A.M. Robust Flight Control Design Challenge Problem Formulation and Manual: the High Incidence Research Model (HIRM)[R]. GAPEUR/TP-088-4.
- [5] Gary J Balas, John C Doyle and et al. μ -Analysis and Synthesis Toolbox for Use with MATLAB[CP]. The mathworks Inc., User's Guide Version 3.
- [6] 周克敏, Doyle J C, Glover K. 鲁棒与最优控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.