

Proceedings of the 2012 Chinese Guidance, Navigation and Control Conference(CGNCC2012)

2012中国制导、导航与控制学术会议论文集



主 编 陈宗基
Editor-in-Chief Zongji Chen

副主编 张汝麟 王英勋
Associate Editors Rulin Zhang Yingxun Wang

魏金钟 焦宗夏
Jinzhong Wei Zongxia Jiao

宋科璞
Kepu Song



ISBN 978-7-89445-679-3

2012年8月10-12日
August 10-12, 2012
中国 北京
Beijing China



基于模糊逻辑的高超声速巡航飞行器变结构控制

Variable structure control based on fuzzy logic for hypersonic cruise vehicle

廉成斌^{1,2}, 史留宝^{1,2}, 任章^{1,2}, 邵兴悦^{1,2}

1. 北京航空航天大学飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191

2. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191

Page: 794-799



基于框架的空间飞行任务操作概念研究

The research of space mission operation concept based on framework

刘建平, 罗春艳, 杨帆

西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室, 西安, 710043

Page: 800-803



基于约束控制的覆盖区内边界求解方法

Method for Footprint Inner Boundary Problem Based on Constraints Control

李昭莹, 张冉, 李惠峰

北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191

Page: 804-809



重复使用飞行器基于反馈线性化法的变论域双级模糊控制制导技术研究

Reusable Launch Vehicle of a Guidance Method based on Feedback Linear Changing Domain of two-stage Fuzzy Control Method

倪雪松, 陈思嘉, 张庆振

北京航空航天大学飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191

Page: 810-814



基于间隙度量的高超声速飞行器包线划分方法研究

The Research of Envelope Division of HSV Based On the Gap Metric

何超凡¹, 杨凌宇¹, 申功璋¹, 张晶¹

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191

基于间隙度量的高超声速飞行器包线划分方法研究

何超凡¹, 杨凌宇¹, 申功璋¹, 张晶¹

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191

摘要: 相对于传统飞行器, 高超声速飞行器的飞行包线范围大大增加, 因而有必要进行包线划分以便设计子区域控制器。本文将间隙度量概念引入到包线划分过程中, 提出一种以间隙度量为衡量指标的包线划分方法, 该方法将划分依据量化统一, 便于包线划分。针对某型飞行器, 采用该方法分析间隙度量值随飞行轨迹参数变化的规律, 从而得到了飞行包线划分依据。最后通过设计PID控制器验证了此方法的可行性。

关键词: 高超声速飞行器; 包线划分; 间隙度量

The Research of Envelope Division of HSV Based On the Gap Metric

HE Chaofan¹, YANG Lingyui¹, SHEN Gongzhang¹, ZHANG Jing¹

1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: The flight envelope of HSV is much bigger than traditional vehicles generally, so it is necessary to be divided into series of sub-ranges. The theory of gap metric is proposed here as the measurement of envelope division. This idea is used to analyze the laws of gap value during the envelope division of some vehicle. At the end, the PID controller is used to verify the feasibility of this idea.

Key Words: HSV; Envelope division; Gap metric

1 引言

高超声速飞行器在空间上和速度上跨度越来越大, 飞行器的气动参数随高度、马赫数及动压而变化也越来越大, 仅设计一套控制器参数就难以兼顾较大包线范围内的飞行品质, 因而有必要按照某种方法将整个飞行包线划分为一系列子区域以方便控制器设计。

目前, 国内外针对全包线控制律的设计大多数采用传统的增益调参方法, 基本思想是将包线划分为一系列子区域, 每个子区域选取标称状态点设计一个线性控制器, 即采用多个线性控制器来近似替代所要求的非线性控制器。但是, 关于整个飞行包线内如何划分子区域, 还没有一套成熟的理论可以遵循, 多按照动压或高度、马赫数, 凭借经验及反复迭代验证来进行分区, 耗时耗力, 缺乏统一的分区衡量指标。

文献[1]按照动压等高线进行包线划分, 文献[2]按照高度、马赫数进行包线划分, 这些划分依据均不易量化, 很大程度凭借经验进行包线划分。文献[3]提出根据扰动分析理论, 按照模型矩阵特征值变化设计一种衡量指标, 以此判定标称点所能代表的区域, 具有一定的可行性。

针对上述问题, 鉴于间隙度量是一种相对于范数度量, 更适合用来衡量线性系统之间的差异大小, 本

文提出利用间隙度量作为区域划分的指标, 通过分析参数变化规律来得到初步区域划分依据, 并根据区域划分结果进行控制器设计验证。

2 间隙度量 (Gap Metric)

间隙度量是一种不同于范数度量的系统度量概念, 相比之下应用广泛且更加直观。间隙度量的概念最先由Hausdorff提出, 随后Zames和El-Sakkary利用间隙度量建立了在保证闭环系统稳定下所能容许的最大不确定度量化指标^[4-6]。并且El-Sakkary的研究显示, 相对于基于范数的度量指标, 间隙度量更适合用来衡量两个线性系统之间的差异大小, 这也是本文选取间隙度量作为评价指标的原因。

2.1 两子空间的间隙

令 φ 、 ψ 为Banach空间中的两个闭线性子空间, 则有如下定义。

定义1 Banach空间 φ 、 ψ 的有向间隙为:

$$\bar{\delta}(\varphi, \psi) = \sup_{x \in B_M} \inf_{y \in \psi} \|x - y\| \quad (1)$$

式中, B_M 为 φ 中的单位球集合, 表示为:

$$B_M = \{u \in \varphi : \|u\| = 1\} \quad (2)$$

在此基础上, 给出两子空间间隙的定义。

定义2 φ 、 ψ 两子空间的间隙定义为:

*通讯作者, E-mail: hcf.89@163.com

$$\delta = \max(\bar{\delta}(\varphi, \psi), \bar{\delta}(\psi, \varphi)) \quad (3)$$

特别的, 当 φ 为零空间时, 则定义 $\bar{\delta}(0, \psi) = 0$ 。当 ψ 为零空间, φ 不为零空间时, 定义 $\bar{\delta}(\varphi, 0) = 1$ 。

2.2 题目及摘要

对于线性系统

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

其传递函数为 $P(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$, 若 P_1, P_2 为两系统的传递函数, 则这两个系统之间的间隙可以利用算子的间隙表示为:

$$\bar{\delta}(P_1, P_2) = \bar{\delta}(G(P_1), G(P_2)) = \|\Pi_{G(P_1)}, \Pi_{G(P_2)}\| \quad (4)$$

式中, $G(P_i) (i=1, 2)$ 为系统的图(graph)。

其中, $\Pi_{G(P_1)}, \Pi_{G(P_2)}$ 按定理1计算。

定理1 假设 $P \in \square^{n \times m}(s)$, 并且有 (M, N) 与 (\tilde{N}, \tilde{M}) 分别为被控对象P的左右互质分解, 则有正交投影矩阵为:

$$\begin{aligned} \Pi_{G(P)} &= \begin{bmatrix} M \\ N \end{bmatrix} (M^*M + N^*N)^{-1} [M^*, N^*] \\ &= I - \begin{bmatrix} -\tilde{M}^* \\ \tilde{N}^* \end{bmatrix} (\tilde{M}M^* + \tilde{N}N^*)^{-1} [-\tilde{M}, \tilde{N}] \end{aligned} \quad (5)$$

P的左右互质分解形式如式(6)所示,

$$P = NM^{-1} = \tilde{M}^{-1}\tilde{N} \quad (6)$$

其中, $N, M, \tilde{N}, \tilde{M} \in \square H_\infty$, 而且满足

$$N'N + M'M = \tilde{N}'\tilde{N} + \tilde{M}'\tilde{M} = I$$

互质分解方法描述如下:

Step 1: 求传递函数 $P(s)$ 的最小状态空间实现:

$P(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$, 其中(A, B)稳定, (A, C)可检测;

Step 2: 求取矩阵F、H, 使得 $A_F = A + BF$,

$$A_H = A + HC \text{ 稳定, 并令 } C_F = C + DF,$$

$$B_H = A + HD;$$

Step 3: 互质分解形式为

$$P = NM^{-1} = \tilde{M}^{-1}\tilde{N}$$

其中,

$$\begin{cases} M(s) = F(sI - A_F)^{-1}B + I \\ N(s) = C_F(sI - A_F)^{-1}B + D \\ \tilde{M}(s) = C(sI - A_H)^{-1}H + I \\ \tilde{N}(s) = C(sI - A_H)^{-1}B_H + D \end{cases} \quad (7)$$

由此可以得出间隙度量的计算公式。

定理2 间隙度量的计算公式为:

$$\begin{aligned} \bar{\delta}(P_1, P_2) &= \bar{\delta}(G(P_1), G(P_2)) \\ &= \|\Pi_{G(P_1)}, \Pi_{G(P_2)}\| \quad (8) \\ &= \inf_{Q \in H_\infty} \left\| \begin{bmatrix} M_1 \\ N_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M_2 \\ N_2 \end{bmatrix} Q \right\|_\infty \end{aligned}$$

$$\delta(P_1, P_2) = \max(\bar{\delta}(P_1, P_2), \bar{\delta}(P_2, P_1)) \quad (9)$$

由间隙度量计算公式(8)、(9), 可归纳出间隙度量的一些特性: $0 \leq \delta(P_1, P_2) \leq 1$, 如果 δ 接近于0, 则表明两个系统近似; 相反, 若接近于1, 则表明两系统的动态特性差别很大^[7-9]。

间隙度量计算的是两个线性系统空间差异, 并不要求两个系统有相同的正极点。如果两个开环系统(可能不稳定)的间隙度量值很小, 则其对应的闭环系统也近似。

3 基于间隙度量的包线划分

当飞行器处于不同状态点时, 高度、马赫数、攻角、侧滑角等飞行参数均存在不同程度的差异, 进而造成基于状态点的线性化模型的不同。由间隙度量的定义, 当线性化模型差异较大时, 间隙度量值更接近于1。因此, 间隙度量值的大小可反映参数变化的大小, 依此可作为包线划分的评判依据。

基于间隙度量的包线划分方法分为以下步骤:

- 根据飞行器的飞行包线, 按状态均匀分布取一系列状态点 $A_i (i=1, 2, \dots, n)$, 针对每个状态点建立线性化模型 $P_{Ai} (i=1, 2, \dots, n)$, 计算该一系列线性化模型中相邻模型的间隙度量值 $\delta(i, j) (1 \leq i < j \leq n)$;
- 分析间隙度量值变化与飞行参数变化的关系;
- 将间隙度量值较大的状态点取出

$A_{k1}, A_{k2}, \dots, A_{km}$, 其相应的状态值(高度、马赫数、攻角、侧滑角)则作为包线划分的初步依据。

针对某型飞行器, 由于该飞行器任务固定, 故取一段飞行轨迹数据进行分析。首先按一定时间间隔 Δt 取一系列状态点, 并建立线性化模型, 计算相邻状态点的线性化模型的间隙度量值。若相邻线性模型的间隙度量值较大, 则说明此段时间某些飞行参数发生显著变化。

若不考虑攻角和侧滑角的影响, 即将各个状态点的攻角和侧滑角都取固定值, 则相邻线性模型的间隙度量值变化曲线如图1所示。

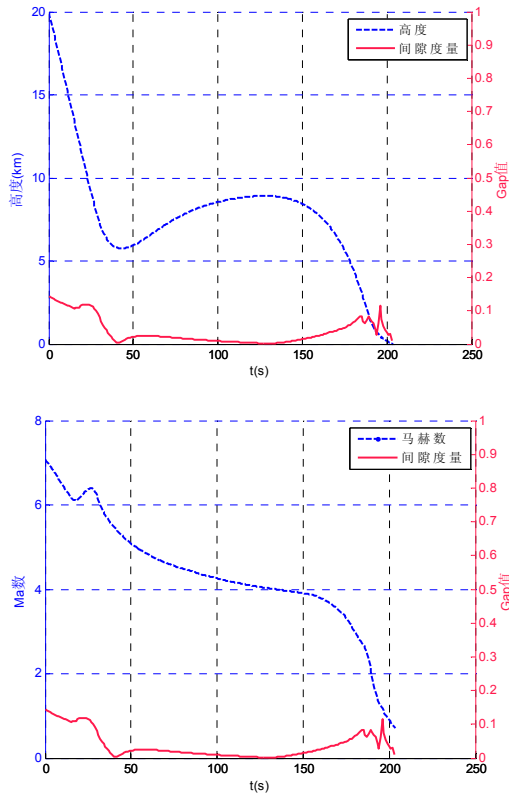


图1 不考虑攻角和侧滑角间隙度量值变化曲线

如图1所示，当不考虑攻角和侧滑角的影响时，在初始 $H > 6Km$ 时，飞行器高度迅速降低，间隙度量值基本都大于0.1，此时马赫数变化较小， $Ma > 5$ ；在此飞行轨迹末端， $H < 7.5Km$ ， $Ma < 3$ ，间隙度量值在 0.05 ~ 0.1 之间，该阶段高度和马赫数变化均较快，相应此阶段间隙度量值相对偏大，即线性化模型变化相对偏快。

若考虑攻角和侧滑角的影响，即攻角和侧滑角随飞行轨迹的变化，则相邻线性模型的间隙度量值变化曲线，如图2所示。

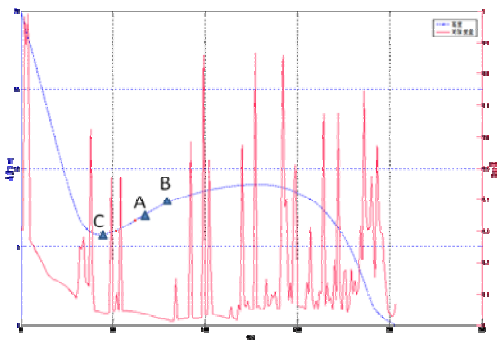


图2 考虑攻角和侧滑角的影响间隙度量值变化曲线

如图2所示，同时考虑四个状态变化对线性模型的影响，在飞行器拉起段 ($5.5Km < H < 6.5Km$) 及轨迹中末段，间隙度量值曲线出现一系列尖峰值 ($g > 0.4$)，即在这些状态点，攻角和侧滑角等飞行参数出现某些特殊的变化，导致线性模型出现跳变。

4 分区验证

根据理论分析，根据跳变点一边状态点线性模型设计出来的控制器很难实现对另一边状态点的控制。这里选取最基本的PID方法，选取A、B、C状态点，A点和C点之间有间隙度量值跳变。针对A状态点设计控制器，给正弦指令信号，所设计的控制器能很好的实现信号跟踪，如图3所示。

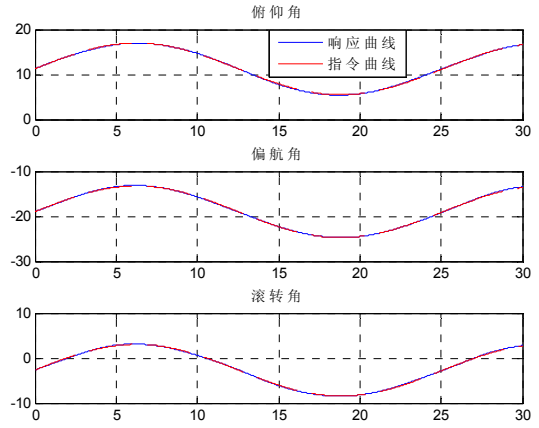


图3 A 状态点三轴姿态角响应曲线

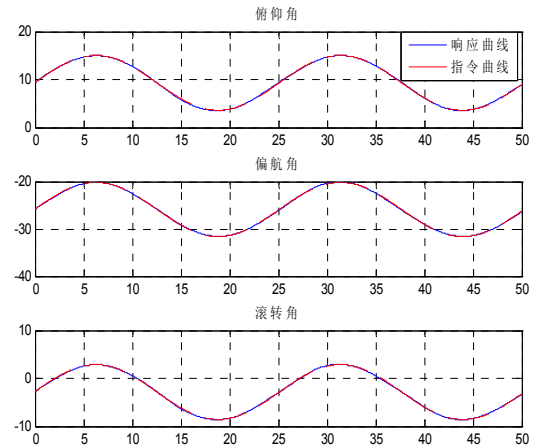


图4 B 状态点三轴姿态角响应曲线

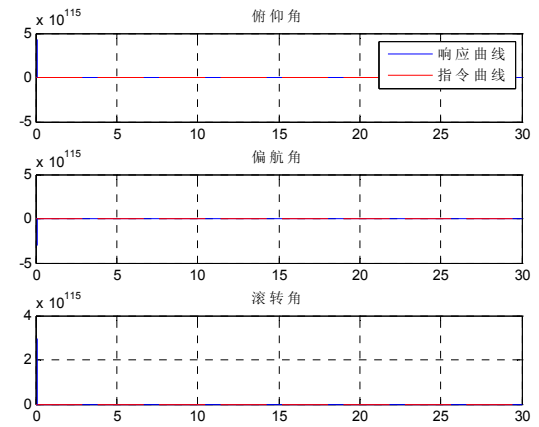


图5 C 状态点三轴姿态角响应曲线

所设计的控制器若用在B状态点处，依然能够实现姿态控制，如图4所示；而在C状态点处，给定相

同指令后系统很快发散，完全不能控制三轴姿态，如图 5 所示。

由图 3—图 5 可知，由于间隙度量峰值两边状态的差异，导致所设计的控制器不能通用，因此，按照间隙度量峰值来划分不同的子区域，分别设计子区域控制器，这种区域划分方法是可行的。

5 结论

本文利用间隙度量的特性，将其应用到包线划分工作中，并利用PID控制器验证了根据间隙度量划分区域的可靠性，最后结合某飞行器的飞行轨迹实现了飞行包线划分。根据此方法进行区域划分，可大幅减少划分时间，降低工作量，但存在划分过细的问题，该缺点可通过迭代验证来弥补。

参考文献

- [1] 李中建. 大包线飞行控制系统鲁棒设计研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2000.
- [2] 陶涛. 航空发动机鲁棒控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1997.
- [3] 王进, 李剑, 谢寿生. 航空发动机控制问题研究中飞行包线区域的划分方法[J]. 航空动力学报, 2003, 18(2).
- [4] 刘斌, 王常虹, 李伟. 间隙度量与跟踪系统中的鲁棒控制器设计[J]. 控制与决策, 2010, 25(11), 1714-1718.
- [5] Omar Galan, Jose A. Romagnoli, Ahmet Palazoglu, Yaman Arkun. Gap Metric Concept and Implications for Multilinear Model-Based Controller Design. Ind. Eng. Chem. Res. 2003, 42, 2189-2197
- [6] El-Sakkary A K. The gap metric: Robustness of stabilization of feedback systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1985, 30(3): 240-247.
- [7] Georgiou T T. On the computation of the gap metric[J]. Systems and Control Letters, 1988, 11(4): 253-257.
- [8] Zames G, El-Sakkary A K. Unstable systems and feedback: The gap metric[C]. Proc of Allerton Confon Communication, Control, and Computing. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1980: 380-385.
- [9] Tryphon T. Georgiou, Malcolm C. Smith. Robust Stabilization in the Gap Metric: Controller Design for Distributed Plants[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1992, 31(8), 1133-1139.