

无人机容错性能边界估计方法研究

楼静梅, 张科

(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

摘要: 针对无人机舵面破损故障, 开展无人机控制系统容错性能边界估计方法研究。通过引入舵面破损故障特征参数, 建立了舵面破损故障与控制系统特征多项式间的关系; 结合无人机飞行品质, 将容错性能边界估计问题变为区间特征多项式的广义稳定性问题; 然后利用 Soh 多项式引理解决一类广义稳定区域的稳定问题, 并对另一类广义稳定区域, 利用映射变换的方法, 将广义稳定问题进一步转化为区间特征多项式的稳定性问题, 从而可以利用 Hurwitz 稳定性判据进行分析; 最后通过具体算例证明了该方法的可行性。

关键词: 无人机; 舵面破损; 容错性能边界; 广义稳定性

中图分类号: V249.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)11-0001-04

A Boundary Estimation Algorithm for UAV Fault-Tolerance Performance

LOU Jing-mei, ZHANG Ke

(School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The boundary estimation algorithm of fault-tolerance performance was researched. By introducing the characteristic parameters of control surface dilapidation, the relationship between the control surface dilapidation and the characteristic polynomial of the control system was established. Based on the UAV flight quality, the boundary estimation problem of fault-tolerance performance was converted into a generalized stability problem of interval polynomials. Then, one class of stability problem of generalized stable region was solved by using Soh polynomial lemma. And the other class is transformed into a stability problem of interval polynomials, which can be analyzed by the Hurwitz stability criterion. Finally, a specific example was adopted to prove the feasibility of the method.

Key words: UAV; control surface dilapidation; fault-tolerance performance bounds; generalized stability

0 引言

构造无人机的前提有两个方面: 一是低成本; 二是高可靠性。只有低成本, 无人机的存在才有意义; 只有高可靠性, 无人机才能真正“有用”。因此对无人机飞行控制系统来说, 不仅需要满足常规的控制性能, 还需具备一定的容错能力, 这就需要对设计的控制系统进行容错性能边界评估。目前对控制系统容错性能边界评估方法的研究相对较少, 针对这个问题, 本文以无人机单侧副翼故障为例, 基于区间多项式稳定性理论开展容错性能边界的评估方法研究。

1 研究思路

本文中, 控制系统容错性能边界评估主要研究给定舵面允许破损范围时的飞行品质评估方法。对于舵面破损在某一范围的情况, 可以通过引入在某区间变化的特征参数来表征舵面破损程度, 相应的飞行控制系统特征多项式系数也由通常情况的固定系数(对固定飞行条件)变为在区间内变化的系数, 特征多项式也变为区间多项式, 因此, 对这种特征多项式的飞行品质评估就转化为区间特征多项式的广义稳定性问题。

2 问题的标准化

本文以无人机一侧副翼破损故障为例, 给出将容错性能估计问题转化为广义稳定性问题的步骤及广义稳定性问题的解决方法。

收稿日期: 2013-11-26 修回日期: 2014-01-02

基金项目: 航空基金(20100153001)

作者简介: 楼静梅(1982-), 女, 浙江义乌人, 博士生, 研究方向为飞行器导航制导与控制技术。

2.1 无人机飞行品质指标要求确定

参考有人机的飞行品质规范 GJB 185-1986^[1], 给出横侧向基本模态飞行品质指标要求如下所述。

- 1) 荷兰滚模态: $\xi \geq 0.02, \xi\omega_n \geq 0.05, \omega_n > 0.4$ 。
- 2) 滚转模态: 滚转模态时间常数 $\tau_R < 3$ s。
- 3) 螺旋模态: 最小倍幅时间 $T > 8$ s (对应不稳定情况)。

2.2 s 平面广义稳定区域确定

根据横侧向基本模态飞行品质指标要求, 对应的 s 平面广义稳定区域如下。

1) 荷兰滚模态中, $\xi = \xi_s$ 和 $\omega_n = \omega_s$ 构成 s 平面扇形区域, 则 $\xi \geq \xi_s$ 和 $\omega_n > \omega_s$, 即要求荷兰滚对应共轭极点位于如图 1 所示阴影区域。

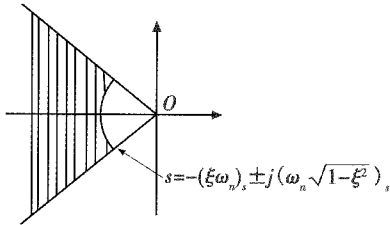


图 1 $\xi \geq \xi_s$ 和 $\omega_n > \omega_s$ 对应的广义稳定区域

Fig. 1 Corresponding generalized stable region of $\xi \geq \xi_s$ and $\omega_n > \omega_s$

2) 荷兰滚模态中, $\xi\omega_n = (\xi\omega_n)_s$ 对应 s 平面中与虚轴平行的线, 则 $\xi\omega_n \geq (\xi\omega_n)_s$, 即要求荷兰滚对应的共轭极点位于直线 $s = -(\xi\omega_n)_s$ 的左侧, 如图 2 所示的阴影区域。

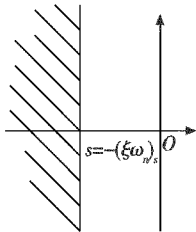


图 2 $\xi\omega_n \geq (\xi\omega_n)_s$ 对应的广义稳定区域

Fig. 2 Corresponding generalized stable region of $\xi\omega_n \geq (\xi\omega_n)_s$

3) 滚转模态时间常数 $\tau_R < \tau_s$, 即要求对应实极点不大于 $-1/\tau_s$, 如图 3 所示阴影区域。

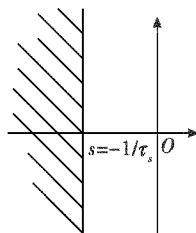


图 3 $\tau_R < \tau_s$ 对应的广义稳定区域

Fig. 3 Corresponding generalized stable region of $\tau_R < \tau_s$

4) 螺旋模态最小倍幅时间 $T > T_s$, 即要求对应实极点不大于 $1/T_s$, 如图 4 所示阴影区域。

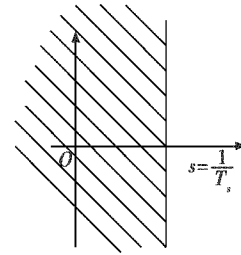


图 4 最小倍幅时间 $T > T_s$ 对应的广义稳定区域

Fig. 4 Corresponding generalized stable region of $T > T_s$

2.3 单侧副翼舵面破损的线性数学模型

本文通过引入破损故障特征参数来描述舵面破损故障下的无人机数学模型, 破损故障特征参数定义如下。

定义 1 破损故障特征参数。对任意一个舵面, 定义破损故障特征参数 f_δ 为舵面破损部分的面积与无破损时舵面面积的比值。

表征舵面破损程度的特征参数可以在一个连续区间内任意取值, 本文则通过引入下面的假设来建立舵面破损故障特征参数与舵面的操纵力和力矩间的对应关系。

假设 1 舵面破损程度与力和力矩间的线性关系。假定舵面破损程度与舵面的操纵力矩成线性比例关系, 即舵面破损后的操纵力矩系数计算为 $\bar{M}_\delta = (1 - f_\delta) \cdot M_\delta$ 。

至此, 就可以将故障特征参数引入到无人机数学

模型中, 即
$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B(f_\delta)u \\ y = Cx \end{cases}$$

对采用状态反馈的无人机横航向控制系统短周期线性化模型来说, 其特征多项式为

$$D(s) = s^4 + t_1s^3 + t_2s^2 + t_3s + t_4 \quad (1)$$

对给定的状态反馈系数, 舵面破损故障特征参数 f_δ 对应不同的特征多项式系数, 即

$$t_1 = t_1(f_{\delta_s}), t_2 = t_2(f_{\delta_s}), t_3 = t_3(f_{\delta_s}), t_4 = t_4(f_{\delta_s}) \quad (2)$$

结合破损故障特征参数变化范围, 由式(2)可得特征多项式系数 $t_1 \sim t_4$ 的变化范围为 $\underline{t}_1 \leq t_1 \leq \bar{t}_1$, $\underline{t}_2 \leq t_2 \leq \bar{t}_2$, $\underline{t}_3 \leq t_3 \leq \bar{t}_3$, $\underline{t}_4 \leq t_4 \leq \bar{t}_4$ 。

定义 2 实系数区间多项式。考虑多项式

$$p(s) = t_0s^n + t_1s^{n-1} + \dots + t_n \quad (3)$$

当 $t_i \in [\alpha_i \ \beta_i] \in \mathbf{R}, i = 1, 2, \dots, n$ 且 $\alpha_i < \beta_i$ 时, 式(3)称为实系数区间多项式。

由实系数区间多项式定义可知, 式(1)是一个典

型的实系数区间多项式,下文首先给出实系数区间多项式广义稳定区域为阻尼区域的飞行品质估计方法——Soh 多项式引理。

2.4 Soh 多项式引理

考虑多项式

$$D(s) = t_0 s^n + t_1 s^{n-1} + \dots + t_n \quad (4)$$

实向量 t 可表征为 $(n+1)$ 维欧氏空间中的一点,定义 S^n 是满足 $\underline{t}_i \leq t_i \leq \bar{t}_i, i=0,1,\dots,n$,具有式(4)形式的集合, S_1^n 是每个 t_i 参数分别等于 \underline{t}_i 或 \bar{t}_i 组成的具有式(4)形式的集合^[2]。

考虑 s 平面中的闭合围线 C_1, C_1 由以原点为中心、 R 为半径的圆弧 L_2 , 短线 L_1 和 L_3 组成,见图 5。

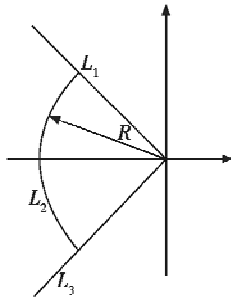


图 5 系统阻尼区域

Fig. 5 The system damping region

设 M^n 是具有式(4)形式且所有零点都在 C_1 区域内的多项式集合,如下引理给出了多项式应满足的充要条件。

引理 1 (Soh C B,1988)^[3] 集合 S^n 包含于集合 M^n 的充要条件是集合 S_1^n 包含于集合 M^n 。

对于广义稳定区域边界与虚轴平行的情况,基于映射的方法可以将 s 平面的广义稳定区域映射为左半平面,从而将区间多项式的广义稳定证明问题转化为区间多项式的 Hurwitz 稳定性证明问题。

2.5 典型映射变换

下文给出本文使用的映射关系形式^[4]:广义稳定区域为左半开平面时, $T(s) = s - \sigma, \sigma > 0$ 。这种变换是将左半开平面映射为左半平面,如图 6 所示。

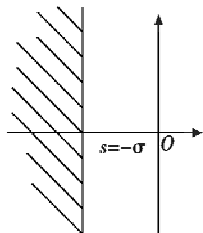


图 6 $T(s) = s - \sigma$

Fig. 6 $T(s) = s - \sigma$

2.6 Routh-Hurwitz 稳定性判据

定理 1 Routh-Hurwitz 稳定性判据^[5]。假定线性系统特征方程为

$$D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0 \quad (5)$$

Routh 判定表定义如表 1 所示。系统稳定的充分必要条件是劳斯表第一列各值为正。

定理 2 区间多项式 Routh-Hurwitz 稳定性判据。特征多项式为

$$D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0 \quad (6)$$

假定所有多项式系数与特征参数 f 有关, $f \in [f_{\min}, f_{\max}]$,可以表示为 $a_0(f), a_1(f), \dots, a_n(f)$, 计算可得 Routh-Hurwitz 判定表第一列的表达式 $a_0(f), a_1(f), \dots, a_n(f)$, 求取这些表达式的特征根以及极值点,可以给出这些表达式随特征参数 f 变化所对应的正负符号,根据 Routh-Hurwitz 判据,可判断出特征多项式(6)是否稳定。

表 1 劳斯表

Table 1 Routh table

| | | | | |
|-----------|---|---|----------|---------|
| s^n | a_0 | a_2 | a_4 | \dots |
| s^{n-1} | a_1 | a_3 | a_5 | \dots |
| s^{n-2} | $c_{13} = \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1}$ | $c_{23} = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1}$ | c_{33} | \dots |
| s^{n-3} | $c_{14} = \frac{c_{13} a_3 - a_1 c_{23}}{c_{13}}$ | $c_{24} = \frac{c_{13} a_5 - a_1 c_{33}}{c_{13}}$ | c_{34} | \dots |
| \vdots | \vdots | | | |
| s^0 | $c_{1,n+1} = a_n$ | | | |

3 算例

以某无人机左侧副翼破损故障为例,进行容错性能边界估计。

1) 无人机数学模型。

无人机横航向增稳系统特征多项式系数为: $t_1 = 8.20 - 0.21 \cdot f_{\delta_{ad}}; t_2 = 14.08 - 2.14 \cdot f_{\delta_{ad}}; t_3 = 10.22 - 5.06 \cdot f_{\delta_{ad}}; t_4 = 0.06 - 0.07 \cdot f_{\delta_{ad}}$ 。

2) 基于 Soh 引理的容错性能边界估计。

$f_{\delta_{ad}} \in [0, 1]$ 时,基于 Soh 引理可得,横航向增稳回路满足二级飞行品质对阻尼比和带宽的要求。

3) 基于映射变换的容错性能边界估计。

$\xi_{\omega_n} \geq 0.05, \tau_R < 3 \text{ s}, T > 8 \text{ s}$,即要求 $D(s)$ 其中的一对共轭复根的实部满足 $s_{1,2} \leq -0.05$, 一个实根 $s_3 \leq -0.33$,所有根的实部小于 0.125。先引入映射 $T(s) = s - 0.33$,则 $D(T(s)) = s^4 + t'_1 s^3 + t'_2 s^2 + t'_3 s + t'_4$ 。其中, $t'_1 = 6.88 - 0.21 \cdot f_{\delta_{ad}}; t'_2 = 6.62 - 1.93 \cdot f_{\delta_{ad}}; t'_3 = 3.46 - 3.72 \cdot f_{\delta_{ad}}; t'_4 = -2.06 + 1.37 \cdot f_{\delta_{ad}}$ 。

根据区间多项式的 Routh-Hurwitz 判据,当 $f_{\delta_{xz}} \in [0 \ 0.75]$ 时, $D(T(s))$ 的 4 个根中,有 3 个根的实部小于 -0.33 , 1 个根实部大于 -0.33 , 满足 $s_{1,2} \leq -0.05$ 和 $s_3 \leq -0.33$ 的约束;再引入映射 $T(s) = s + 0.125$, 同上文方法类似,根据区间多项式的 Routh-Hurwitz 判据, $f_{\delta_{xz}} \in [0 \ 1]$ 时, $D(T(s))$ 的 4 个根都在左半平面,对 $D(T(s))$ 来说,4 个根的实部都小于 0.125 , 满足 $T > 8$ s 的约束。

根据上文的分析可知,对左侧副翼破损故障,正常模式控制器横航向通道的工作边界是 $f_{\delta_{xz}} \in [0 \ 0.75]$ 。

4 结 论

本文通过引入舵面破损故障特征参数,将针对舵面破损的容错性能估计问题转变为区间特征多项式的广义稳定问题,在此基础上,针对无人机飞行品质的特点,利用 Soh 多项式引理、映射变换方法及区间多项式的 Routh-Hurwitz 判据,给出了广义稳定问题的解决方法。本文最后通过一个具体算例证明了这种方法针对单一舵面破损故障是有效的,且方法可行。当然,对于多舵面破损故障,这种方法是否适用还需要进一步研究。

参 考 文 献

[1] 国防科学技术委员会. GJB185-1986 有人驾驶飞机

(固定翼)飞行品质[S].北京:国防科工委军标出版发行部,1986.

National Defense Science and Technology Committee. GJB185-1986 Flying qualities of piloted airplanes (fixed-wing)[S]. Beijing: Military Standard Press of People's Republic of China, 1986.

[2] 杨军,凡永华,于云峰,等.参数空间方法与飞行控制系统[M].北京:航空工业出版社,2008.

YANG J, FAN Y H, YU Y F, et al. Parameter space method and flight control system [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008.

[3] SOH C B, BERGER C S, DADKE K P. On the stability properties of polynomials with perturbed coefficients[J]. IEEE Transactions on Automatic control, 1985 (AC-35): 1033-1036.

[4] SOH C B, BERGER C S. Damping margins of polynomials with perturbed coefficients[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1988:509-511.

[5] 胡寿松.自动控制原理[M].北京:科学出版社,2002. HU S S. Automatic control theory [M]. Beijing: Science Press, 2002.

声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司等在其网络平台和系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文,著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。



请扫描二维码
关注我刊

