第 30 卷 第 4 期
2004 年 7 月

自 动 化 学 报
ACTA AUTOMATICA SINICA

Vol. 30, No. 4
July, 2004

不确定非线性系统的鲁棒稳定性分析[1)]

董海荣[1] 耿志勇[2] 黄 琳[2]
[1](北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044)
[2](北京大学力学与工程科学系 北京 100871)
(E-mail: hrdong@center.njtu.edu.cn)

摘 要 基于泛函分析和算子理论的方法，从输入输出的角度研究了一类不确定反馈非线性系统的鲁棒稳定性问题. 利用 K 类函数分别描述非线性不确定环节和非线性系统的算子增益，对非线性反馈互联不确定系统的鲁棒稳定性问题进行了研究. 接着利用小增益条件的形式进行等价变化，就可将反馈不确定非线性系统的稳定性条件转化成系统非线性算子的范数条件. 并通过举例证明了该方法的有效性.

关键词 非线性系统，算子，鲁棒稳定性
中图分类号 O137

Robust Stability of Nonlinear Systems with Uncertainties

DONG Hai-Rong[1] GENG Zhi-Yong[2] HUANG Lin[2]
[1](*School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing* 100044)
[2](*Department of Mechanics and Engineering Science, Peking University, Beijing* 100871)
(E-mail: hrdong@center.njtu.edu.cn)

Abstract Based on functional analysis and operator theory, the problem of robust stability analysis of a more widespread class of nonlinear feedback uncertain system is considered from the view of input/output. It is supposed that the nonlinear uncertain part and the gain of nonlinear operator are described by the constraints of the so called class K functional. Some robust stability conditions are presented, and an equivalent condition which can be explained as small gain condition is given. The result is illustrated to be efficient through an example.

Key words Nonlinear system, operator, robust stability

1 引言

不确定反馈系统的 L_2 稳定性问题的研究是近年来控制理论的研究热点之一. Megretski

1) 国家自然科学基金(60304013, 60374039, 60204007)和北京交通大学论文基金资助
Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China(60304013, 60374039, 60204007) and BJTV Paper Foundation of P. R. China
收稿日期 2002-11-25 收修改稿日期 2004-01-18
Received November 25, 2002; in revised form January 18, 2004

和 Rantzer 等人基于积分二次约束方法来处理系统的输入输出稳定性问题是该方向的最新动态[1~3]. 对于一般意义下的 $L_p(1\leqslant p\leqslant\infty)$稳定性问题的研究进展非常缓慢,至今仍然是一个具有挑战性的研究难题. Desoer 和 Vidyasagar 研究了一类不确定反馈系统[4],其非线性不确定环节为无记忆函数 $\phi(t,\cdot)$: $R\rightarrow R$ 满足约束$\|\phi(t,v)-cv\|_p\leqslant r\|v\|_p$,其中 c 和 r 为实数. 1993 年 Vidyasagar 用小增益定理给出反馈不确定描述为满足$\|\Delta(v)-Mv\|_p\leqslant r\|v\|_p$(其中 M 为线性算子,r 为实数)的非线性动态算法[5]. Dong 等[6]考虑了带有反馈不确定线性系统的 L_p 稳定性问题. 对不确定环节 Δ 满足约束$\|N\Delta(v)-Mv\|_p\leqslant\|Zv\|_p$(其中 N,M,Z 均为因果有界算子)的反馈系统,用范数约束的概念给出不确定线性反馈系统在系统适定的假定条件下鲁棒 L_p 稳定的充分条件. 本文将对带有算子增益约束的非线性系统进行研究.

2 预备知识

基于系统的输入输出特性描述,任意的系统 F 可以看做是输入信号空间到输出信号空间的算子 F: $L_{pe}^m[0,\infty)\rightarrow L_{pe}^n[0,\infty)$,将其记为 $F\in\Psi(L_{pe}^m,L_{pe}^n)$,并记$\|f_\tau(t)\|$为$\|f(t)\|_\tau$.

定义 1. 令 G 为信号空间 $L_{pe}^m[0,\infty)$的一个子集. 称算子 $F\in\Psi(L_{pe}^m,L_{pe}^n)$为在 $G\subset L_{pe}^m[0,\infty)$上有界,系指若对任意的 $\boldsymbol{u}\in G$ 当 $\boldsymbol{u}$ 是有界的(即$\|\boldsymbol{u}\|_p<\infty$),$F(\boldsymbol{u})$也是有界的(即$\|F(\boldsymbol{u})\|_p<\infty$);称算子 F 为增量有界的,系指对任意的 $\boldsymbol{u}_1,\boldsymbol{u}_2\in G$,当$\|\boldsymbol{u}_1-\boldsymbol{u}_2\|_p<\infty$时,有$\|F(\boldsymbol{u}_1)-F(\boldsymbol{u}_2)\|_p<\infty$.

命题 1. 令 $F\in\Psi(L_{pe}^m,L_{pe}^n)$,那么算子 F 为有界的,当且仅当

$$F\in\Psi(L_p^m,L_p^n) \tag{1}$$

证明. 必要性:对有界子空间 $L_p^m[0,\infty)\subset L_{pe}^m[0,\infty)$,有任意的 $\boldsymbol{u}\in L_p^m[0,\infty)$,$\|u\|_p<\infty$. 由 F 的有界性,可以得到$\|F(u)\|_p<\infty$,即 $F(u)\in L_p^n$,从而可知 $F\in\Psi(L_p^m,L_p^n)$.

充分性:仅需证当 $F\in\Psi(L_p^m,L_p^n)$时,它可把 $L_{pe}^m[0,\infty)$的任意有界子集映射到 $L_{pe}^n[0,\infty)$的有界子集.

令 G 是 $L_{pe}^m[0,\infty)$上的任意有界子集,则存在 $r>0$ 使得

$$G\subset B(r)=\{x\in L_{pe}^m[0,\infty)\,\big|\,\|x\|_p\leqslant r\}\subset L_p^m[0,\infty)$$

且

$$\sup_{u\in G}\|F(u)\|_p\leqslant\max_{u\in B(r)}\|F(u)\|_p=Z<\infty$$

反之,若存在 $\boldsymbol{u}^*\in B(r)\subset L_p^m$,使得$\|F(\boldsymbol{u}^*)\|=\infty$,可知 $F(\boldsymbol{u}^*)\notin L_p^n[0,\infty)$. 这表明 $F\notin\Psi(L_p^m,L_p^n)$,从而与式(1)矛盾. 证毕.

定义 2. 若有 $F\in\Psi(L_p^m,L_p^n)$,称算子 $F\in\Psi(L_{pe}^m,L_{pe}^n)$为 L_p 稳定的.

命题 2. 令 $F\in\Psi(L_{pe}^m,L_{pe}^n)$,则 F 在 $L_{pe}^m[0,\infty)$上一致连续,当且仅当存在 $\gamma(t)\in K$,对任意的 $\boldsymbol{u}_1,\boldsymbol{u}_2\in L_{pe}^m[0,\infty)$满足

$$\|F(\boldsymbol{u}_1)-F(\boldsymbol{u}_2)\|_p\leqslant\gamma(\|\boldsymbol{u}_1-\boldsymbol{u}_2\|_p) \tag{2}$$

证明. 必要性:在 $L_{pe}^m[0,\infty)$上定义

$$\gamma(t)\doteq\sup\{\|F(\boldsymbol{u}_1)-F(\boldsymbol{u}_2)\|_p\,\big|\,\boldsymbol{u}_1,\boldsymbol{u}_2\in L_{pe}^m[0,\infty),\|\boldsymbol{u}_1-\boldsymbol{u}_2\|_p\leqslant t\}$$

由于 $L_{pe}^m[0,\infty)$ 是凸的，当 F 在 $L_{pe}^m[0,\infty)$ 上一致连续时，可以得 $\gamma(t)\in K$. 若取 $t=\|u_1-u_2\|_p$，由以上 γ 的定义，可以得到 $\|F(u_1)-F(u_2)\|_p\leqslant\gamma(\|u_1-u_2\|_p)$.

充分性：对任意的 $\varepsilon>0$，由 γ 的连续性可知，存在 $\delta(\varepsilon)>0$ 当 $\|u_1-u_2\|_p<\delta$ 时满足 $\gamma(\|u_1-u_2\|_p)<\varepsilon$. 进而可以得到

$$\|F(u_1)-F(u_2)\|_p\leqslant\gamma(\|u_1-u_2\|_p)<\varepsilon$$

由于 δ 与 u_1 和 u_2 无关，可知连续且有一致性.　　证毕.

命题 3. 令 $F\in F(L_{pe}^m,L_{pe}^n)$，若存在 $\gamma(t)\in K$，对任意的 $u\in L_{pe}^m[0,\infty)$ 满足

$$\|F(u_T)\|_p\leqslant\gamma(\|u_T\|_p),\ \forall T\in R^+ \tag{3}$$

则

$$F\in\Psi(L_p^m,L_p^n)$$

证明. 对任意的 $u\in L_p^m[0,\infty)$，有

$$\sup_{T\in Z^+}\|u_T\|_p=\|u\|_p<\infty,$$

$$\|F(u)\|_p=\sup_{T\in Z^+}\|F(u_T)\|_p\leqslant\sup_{T\in Z^+}\gamma(\|u_T\|_p)\leqslant\gamma(\|u\|_p)<\infty$$

因此可知 $F(u)\in L_p^n$，即 $F\in\Psi(L_p^m,L_p^n)$.

推论 1. 若 F 在 $L_{pe}^m[0,\infty)$ 上一致连续，且 $F(0)=0$，则称算子 $F\in\Psi(L_{pe}^m,L_{pe}^n)$ 是 L_p 稳定的.

命题 4. 令 $F\in\Psi(L_p^m,L_p^n)$，则一定存在单调非减函数 $\gamma:R^+\to R^+$ $(\gamma(0)=0)$ 对所有的 $u_1,u_2\in L_{pe}^m[0,\infty)$ 满足

$$\|F(u_1)-F(u_2)\|_T\leqslant\gamma(\|u_1-u_2\|_T),\ \forall T\in R^+ \tag{4}$$

证明. 对任意的 $t\in R^+$，定义

$$\gamma(t)=\sup\left\{\|F(u_1)-F(u_2)\|\,\middle|\,u_1,u_2\in L_p^m[0,\infty),\|u_1-u_2\|\leqslant t\right\},$$

则可知 γ 是单调非减函数且满足 $\gamma(0)=0$. 对任意的 $t\in R^+$ 和任意的 $u_1,u_2\in L_p^m$ 满足 $\|u_1-u_2\|\leqslant t$. 由于 $F\in\Psi(L_p^m,L_p^n)$ 可知 $F(u_i)\in L_p^n[0,\infty)$，$i=1,2$. 于是可有 $F(u_1)-F(u_2)\in L_p^n[0,\infty)$，即 $\|F(u_1)-F(u_2)\|<\infty$.

记任意的 $u\in L_{pe}^m[0,\infty)$ 在 $T\in R^+$ 的截断函数为

$$u_T(t)=\begin{cases}u(t), & t\leqslant T\\ 0, & t>T\end{cases} \tag{5}$$

对于任意的 $u_1,u_2\in L_{pe}^m[0,\infty)$ 和 $T\in R^+$，可知 $u_{1T},u_{2T}\in L_p^m[0,\infty)$. 由

$$\|u_{1T}-u_{2T}\|=\|u_1-u_2\|_T=t$$

可得

$$\|F(u_{1T})-F(u_{2T})\|\leqslant\gamma(t)=\gamma(\|u_1-u_2\|_T),\ \forall T$$

由截断函数的定义，显然可以得到 $\|F(u_1)-F(u_2)\|_T\leqslant\|F(u_{1T})-F(u_{2T})\|$. 于是可得

$$\|F(u_1)-F(u_2)\|_T=\|F_T(u_1)-F_T(u_2)\|\leqslant\|F(u_{1T})-F(u_{2T})\|\leqslant\gamma(\|u_1-u_2\|_T),\ \forall T$$

定义 3. 称算子 $F\in\Psi(L_{pe}^m[0,\infty),L_{pe}^n[0,\infty))$ 满足因果律，当且仅当

$$X_TF=X_TFX_T,\ \forall T\geqslant 0$$

其中 X_T 为截断算子，即 $X_TF=F_T$.

考虑图 1 所示反馈系统，用输入输出方法描述有

$$\begin{cases} \boldsymbol{g} = -G(\boldsymbol{u}) + \boldsymbol{y} \\ \boldsymbol{f} = \boldsymbol{u} - P(\boldsymbol{y}) \end{cases} \tag{6}$$

其中$(\boldsymbol{u},\boldsymbol{y}),(\boldsymbol{f},\boldsymbol{g}) \in L_{pe}^m[0,\infty) \times L_{pe}^l[0,\infty)$，非线性系统 $G: L_{pe}^m[0,\infty) \to L_{pe}^l[0,\infty)$ 和不确定环节 $P: L_{pe}^l[0,\infty) \to L_{pe}^m[0,\infty)$ 均为因果有界算子.

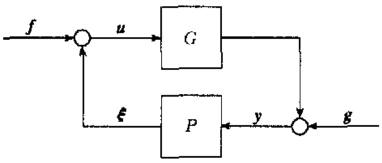

图 1 不确定反馈非线性系统

Fig. 1 The configuration of the systems with feedback uncertainties

定义 4. 称图 1 所示反馈不确定系统(6)为适定的，系指由式(6)确定的映射$(\boldsymbol{u},\boldsymbol{y}) \to (\boldsymbol{f},\boldsymbol{g})$在 $L_{pe}^{l+m}[0,\infty)$上有因果逆.

3 问题的描述

对图 1 所示不确定反馈非线性系统中，若非线性系统 $G: L_{pe}^m[0,\infty) \to L_{pe}^l[0,\infty)$ 和不确定环节 $P: L_{pe}^l[0,\infty) \to L_{pe}^m[0,\infty)$ 均为因果有界算子，且其增益分别为 K 类函数 γ_G 和 γ_P，即

$$\|G(\boldsymbol{u})\|_T \leqslant \gamma_G(\|\boldsymbol{u}\|_T),\ \forall T \geqslant 0 \tag{7}$$

和

$$\|P(\boldsymbol{y})\|_T \leqslant \gamma_P(\|\boldsymbol{y}\|_T),\ \forall T \geqslant 0 \tag{8}$$

假定算子 P 的摄动系统 $\tilde{P}$ 满足约束

$$\|\tilde{P}(\boldsymbol{y}) - P(\boldsymbol{y})\|_T \leqslant \gamma_\Delta(\|\boldsymbol{y}\|_T),\ \forall T \geqslant 0 \tag{9}$$

且 $\gamma_\Delta \in K$.

问题是当系统满足什么样的条件时，带有增益约束(9)的不确定反馈非线性系统是鲁棒稳定的.

4 主要结果

定理 1. 假定图 1 所示不确定非线性反馈互联系统(6)对所有摄动系统 $\tilde{P}$ 是适定的，其中$(\boldsymbol{u},\boldsymbol{y}),(\boldsymbol{f},\boldsymbol{g}) \in L_{pe}^m[0,\infty) \times L_{pe}^l[0,\infty)$，非线性系统 $G: L_{pe}^m[0,\infty) \to L_{pe}^l[0,\infty)$ 和不确定环节 $P: L_{pe}^l[0,\infty) \to L_{pe}^m[0,\infty)$ 均为因果有界算子，且其增益分别为 K 类函数 γ_G 和 γ_P. 不确定环节 P 的摄动系统 $\tilde{P}$ 满足约束

$$\|\tilde{P}(\boldsymbol{y}) - P(\boldsymbol{y})\|_T \leqslant \gamma_\Delta(\|\boldsymbol{y}\|_T),\ \forall T \geqslant 0 \tag{10}$$

若存在一个 $\varepsilon \in K_\infty$，使得

$$(I_d - (\gamma_P + \gamma_\Delta)(2\gamma_G))(x) \geqslant \varepsilon(x),\ \forall x \in [0,\infty) \tag{11}$$

其中 I_d 是 R^+ 上的恒等算子，则不确定非线性反馈系统是鲁棒稳定的.

证明.

令 $\xi=\tilde{P}(y)$，$y=g+G(f+\xi)$，则有 $\|\xi-P(g+G(f+\xi))\|_\tau\geqslant\|\xi\|_\tau-\|P(g+G(f+\xi))\|_\tau$.

由于

$$
\begin{aligned}
\|P(g+G(f+\xi))\|_\tau \leqslant \gamma_P(\|g+G(f+\xi)\|_\tau) \leqslant \\
\max\{\gamma_P(2\|g\|_\tau),\gamma_P(2\|G(f+\xi)\|_\tau)\} \leqslant \\
\max\{\gamma_P(2\|g\|_\tau),\gamma_P(2\gamma_G)(\|f+\xi\|_\tau)\} \leqslant \\
\max\{\gamma_P(2\|g\|_\tau),\gamma_P(2\gamma_G)(2\|f\|_\tau),\gamma_P(2\gamma_G)(2\|\xi\|_\tau)\} \leqslant \\
\gamma_P(2\gamma_G)(\|\xi\|_\tau)+\max\{\gamma_P(2\|g\|_\tau),\gamma_P(2\gamma_G)(2\|f\|_\tau)\}
\end{aligned}
$$

于是可以得到

$$
\begin{aligned}
\|\xi-P(g+G(f+\xi))\|_\tau \geqslant \|\xi\|_\tau-\gamma_P(2\gamma_G)(\|\xi\|_\tau)-\max\{\gamma_P(2\|g\|_\tau),\gamma_P(2\gamma_G)(2\|f\|_\tau)\}= \\
(I_d-\gamma_P(2\gamma_G))(\|\xi\|_\tau)-\max\{\gamma_P(2\|g\|_\tau),\gamma_P(2\gamma_G)(2\|f\|_\tau)\}
\end{aligned}
$$

同样可以有

$$
\gamma_\Delta(\|y\|_\tau)=\gamma_\Delta(\|g+G(f+\xi)\|_\tau)\leqslant\gamma_\Delta(2\gamma_G)(\|\xi\|_\tau)+\max\{\gamma_\Delta(2\|g\|_\tau),\gamma_\Delta(2\gamma_G)(2\|f\|_\tau)\}
$$

由于算子 P 的摄动系统 $\tilde{P}$ 满足约束 $\|\tilde{P}(y)-P(y)\|_\tau\leqslant\gamma_\Delta(\|y\|_\tau)$，则可以得到

$$
\begin{aligned}
(I_d-\gamma_P(2\gamma_G))(\|\xi\|_\tau)-\gamma_\Delta(2\gamma_G)(\|\xi\|_\tau) \leqslant \\
\max\{\gamma_\Delta(2\|g\|_\tau),\gamma_\Delta(2\gamma_G)(2\|f\|_\tau)\}+\max\{\gamma_P(2\|g\|_\tau),\gamma_P(2\gamma_G)(2\|f\|_\tau)\}
\end{aligned}
$$

令

$$
\begin{aligned}
\rho(\|g\|_\tau+\|f\|_\tau)=\max\{\gamma_\Delta(2\|g\|_\tau),\gamma_\Delta(2\gamma_G)(2\|f\|_\tau)\}+ \\
\max\{\gamma_P(2\|g\|_\tau),\gamma_P(2\gamma_G)(2\|f\|_\tau)\}
\end{aligned}
$$

显然 $\rho\in K$. 由已知条件，存在 $\varepsilon\in K_\infty$，使得

$$
\varepsilon(\|\xi\|_\tau)\leqslant(I_d-(\gamma_P+\gamma_\Delta)(2\gamma_G))(\|\xi\|_\tau)\leqslant\rho(\|g\|_\tau+\|f\|_\tau)
$$

等价于

$$
\|\xi\|_\tau\leqslant\varepsilon^{-1}\rho(\|g\|_\tau+\|f\|_\tau)=\phi(\|g\|_\tau+\|f\|_\tau)
$$

于是可以得到

$$
\begin{aligned}
\|y\|_\tau=\|g+G(f+\xi)\|_\tau\leqslant\|g\|_\tau+\gamma_G(\|f\|_\tau+\|\xi\|_\tau)\leqslant \\
\|g\|_\tau+\gamma_G(\|f\|_\tau+\varepsilon^{-1}\rho(\|g\|_\tau+\|f\|_\tau))=\varphi(\|g\|_\tau+\|f\|_\tau)
\end{aligned}
$$

显然 ϕ 和 φ 都是 K 类函数. 此时反馈互联不确定非线性系统是鲁棒稳定的.　　证毕.

下面用小增益条件的形式对定理 1 中反馈不确定非线性系统的稳定性条件进行等价变化.

定理 2. 假定 $(I_d-(\gamma_P+\gamma_\Delta)(2\gamma_G))\in K_\infty$，那么 $(I_d-(\gamma_P+\gamma_\Delta)(2\gamma_G))(x)\geqslant\varepsilon(x)$，$\forall x\in[0,\infty)$ 当且仅当

$$
\gamma_\Delta(2\gamma_G)(I_d-\gamma_P(2\gamma_G))^{-1}(y)<y,\ \forall y\in[0,\infty) \tag{12}
$$

证明. 必要性：令 $y=(I_d-\gamma_P(2\gamma_G))(x)$，由于 $(I_d-(\gamma_P+\gamma_\Delta)(2\gamma_G))(x)\geqslant\varepsilon(x)$，且 $\varepsilon\in K_\infty$，可以得到

$$
(I_d-(\gamma_P+\gamma_\Delta)(2\gamma_G))\in K_\infty
$$

于是可知存在 $(I_d-\gamma_P(2\gamma_G))^{-1}$. 这样，可有 $x=(I_d-\gamma_P(2\gamma_G))^{-1}(y)$，从而可以得到

$$(I_d-(\gamma_P+\gamma_\Delta)(2\gamma_G))(x)=\boldsymbol{y}-(\gamma_\Delta(2\gamma_G))(x)>0$$

等价于

$$\gamma_\Delta(2\gamma_G)(I_d-\gamma_P(2\gamma_G))^{-1}(\boldsymbol{y})<\boldsymbol{y},\ \forall\,\boldsymbol{y}\in[0,\infty)$$

充分性：令 $x=(I_d-\gamma_P(2\gamma_G))^{-1}(y)$，于是有 $(I_d-(\gamma_P+\gamma_\Delta)(2\gamma_G))(x)>0,\forall x\in[0,\infty)$. 由于 $(I_d-(\gamma_P+\gamma_\Delta)(2\gamma_G))\in K_\infty$，一定存在一个 $\varepsilon\in K_\infty$，使得

$$(I_d-(\gamma_P+\gamma_\Delta)(2\gamma_G))(x)\geqslant\varepsilon(x),\ \forall\,x\in[0,\infty)$$

证毕.

例 1. 考虑图 1 所示互联系统，其线性部分为 $G:\begin{cases}\dot{x}_1=\begin{bmatrix}-2 & 3\\ 1 & -4\end{bmatrix}x_1+\begin{bmatrix}3\\2\end{bmatrix}\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}=[1\quad -3]x_1+\boldsymbol{u}\end{cases}$，非线性部分为

$$\Delta:\begin{cases}\dot{x}_2=\begin{bmatrix}-3 & -2\\ 8 & -2\end{bmatrix}x_2+\begin{bmatrix}1\\-5\end{bmatrix}v+\begin{bmatrix}-2\\1\end{bmatrix}\sin x_2\tilde{\phi}(v)\\ \xi=[1\quad 2]x_2\end{cases}$$

其中 $\tilde{\phi}(v)=\begin{cases}1, & v\geqslant 1\\ v, & -1<v<1\\ -1, & v\leqslant -1\end{cases}$

非线性反馈不确定环节可表示为 $\|\phi(x_2,v)\|_2\leqslant\left\|\begin{bmatrix}-2\\1\end{bmatrix}v\right\|_2$.

通过计算，此反馈系统线性部分的传递函数为 $G(s)=\dfrac{s^2+3s+2}{s^2+6s+5}$，其非线性部分分别为 $Q(s)=\dfrac{-9s-2}{s^2+5s+22}$ 和 $Z(s)=\dfrac{-32}{s^2+5s+22}$. 最后计算可以得到

$$ZG(I-QG)^{-1}=\frac{-s^4-256s^3-1248s^2-2432s-1408}{s^6+25s^5+208s^4+1051s^3+2911s^2+4552s+2508}$$

通过验证可知 $ZG(I-QG)^{-1}\in ZH_\infty$，$\|ZG(I-QG)^{-1}\|_\infty=0.6882<1$. 由定理 2 可知此反馈不确定系统是鲁棒稳定的.

5 结论

本文通过用 K 类函数描述非线性系统和不确定约束的方法，对非线性反馈互联不确定系统的鲁棒稳定性问题进行了研究，并给出系统鲁棒稳定的条件.

References

1 Megretski A, Rantzer A. Systems analysis via Integral Quadratic Constraints. IEEE *Transaction on Automatic Control*, 1997, **42**(5): 819~832

2 Rantzer A, Megretski A. Stability criteria based on Integral Quadratic Constraints. In: Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control. Kobe, Japan: 1996. 215~220

3 Jösson U. Robust analysis of uncertain and nonlinear Systems. Lund: 1996

4 Desoer C A, Vidyasagar M. Feedback Systems: Input-Output Properties. New York: Academic Press, 1975

5 Vidyasagar M. Nonlinear System Analysis. New Jersey: Prentice-Hall, 1993

6 Dong H, Geng Z, Huang L. Stability analysis for the systems with feedback norm constraint uncertainties. *International Journal of Control*, 2001, **74**(9): 949～956

董海荣　2002 年在北京大学获博士学位，之后在北京交通大学电子信息工程学院工作．研究兴趣包括鲁棒控制、非线性系统控制理论．

(**DONG Hai-Rong**　Received her Ph. D. degree from Peking University in 2002. Now she is working in the School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University. Her research interests include robust control and nonlinear systems control theory.)

耿志勇　1995 年于中科院系统科学所获理学博士，1995 年 7 月到 1997 年 6 月在北京大学力学与工程科学系从事博士后研究工作．现为北京大学力学与工程科学系副教授．研究兴趣包括系统鲁棒控制、非线性系统控制理论．

(**GENG Zhi-Yong**　Received his Ph. D. degree from Institute of Systems Science, Academy of Mathematics and System Science, Chinese Academy of Sciences. Now he is an associate professor in the Department of Mechanics and Engineering Science, Peking University. His research interests include robust control and nonlinear systems control theory.)

黄　琳　中国科学院院士．研究方向为稳定性理论与应用、鲁棒控制和复杂控制系统理论．

(**HUANG Lin**　Member of the Chinese Academy of Sciences. His research interests include stability theory and its applications, robust control and complex control systems theory.)

不确定非线性系统的鲁棒稳定性分析

作者： 董海荣， 耿志勇， 黄琳
作者单位： 董海荣(北京交通大学电子信息工程学院,北京,100044)， 耿志勇,黄琳(北京大学力学与工程科学系,北京,100871)

刊名： 自动化学报 ISTIC EI PKU
英文刊名： ACTA AUTOMATICA SINICA
年，卷(期)： 2004,30(4)
被引用次数： 2次

参考文献(6条)

1. Rantzer A;Megretski A Stability criteria based on Integral Quadratic Constraints. In: Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control 1996

2. Megretski A;Rantzer A Systems analysis via Integral Quadratic Constraints[外文期刊] 1997(05)

3. Dong H;Geng Z;Huang L Stability analysis for the systems with feedback norm constraint uncertainties[外文期刊] 2001(09)

4. VIDYASAGAR M Nonlinear System Analysis 1993

5. Desoer C A;Vidyasagar M Feedback Systems: Input-Output Properties 1975

6. Josson U Robust analysis of uncertain and nonlinear Systems 1996

引证文献(2条)

1. 陈连贵.杨卫东.杨斌虎 非最小相MIMO非线性系统的自适应鲁棒控制[期刊论文]-信息与控制 2008(2)

2. 赵万春 模糊控制在油水分离过程中的应用研究[学位论文]硕士 2005