

文章编号: 1001-0920(2010)06-0831-05

基于自稳定域和相依锥判据的一类 二阶不确定系统的控制设计

霍鑫¹, 姚郁¹, 郑凯²

(1. 哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 哈尔滨 150080; 2. 大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对一类二阶不确定系统, 构造了以线性 Lipschitz 曲面作为边界的自稳定域, 并依此设计控制律, 利用 Filippov 解与空间非光滑曲面的相依锥判据, 证明在该控制律的作用下系统轨迹将在有限时间到达所设计的自稳定域边界并进入其内部, 从而系统轨迹将收敛到原点. 所得结果放宽了对自稳定域边界光滑性的要求, 提高了设计的灵活性. 仿真结果验证了设计的正确性和有效性.

关键词: 自稳定域; Filippov 解; 非光滑分析; 相依锥; Lipschitz 曲面

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Control design of a class of uncertain second-order systems via SSR and contingent cone criteria

HUO Xin¹, YAO Yu¹, ZHENG Kai²

(1. Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China; 2. Information Science and Technology College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China. Correspondent: HUO Xin, E-mail: huoxin.ieee@gmail.com)

Abstract: By utilizing the notion of self-stable region (SSR), a SSR with linear Lipschitz surface boundary is constructed for a class of uncertain second-order systems. A control law is proposed based on the constructed SSR, Filippov solution and contingent cone criteria, which is attached to nonsmooth analysis. It is proved that the trajectories of the closed-loop system reach the boundary of the SSR and enter into its interior in finite time, then converge to the origin by the notion of SSR. Through the results, the SSR can be constructed in a more general sense, which improves the flexibility of the control design. Finally, the simulation results show the correction and effectiveness of the design.

Key words: SSR; Filippov solution; Nonsmooth analysis; Contingent cone; Lipschitz surface

1 引言

在滑模控制中, 有一类研究是基于扩展滑模面设计的, 即将原来的单一滑模面扩展为扇形区域^[1]. Xu^[2]和 Yang^[3]分别从各自角度给出了控制设计, 其结果在很大程度上削弱了滑模控制的抖振. 然而, 这些方法并没摆脱滑模控制的框架, 所设计的扇形区域形式单一, 灵活性不足, 没有通用性. Han 等^[4]从二阶系统的特点出发, 提出了自稳定域 (SSR) 的概念, 在自稳定域中的系统轨迹将收敛至系统的平衡点. Huang 和 Han^[5, 6]又在此基础上给出了二阶和高阶系统的自稳定域的构造, 并证明了其收敛性. 借助自稳定域的概念, 控制设计的收敛域已不同于以往的

选择平衡点或超平面, 而是扩展为一个包含平衡点的区域, 这将为控制设计带来方便. 由于 SSR 放宽了滑模运动对滑模超平面的依赖, 避免了抖振的发生. 但 Huang 所构造的自稳定域边界是光滑的, 这在一定程度上限制了设计的灵活性.

Filippov 借助微分包含的概念定义了一种非连续微分方程的解, 并给出了解关于状态空间中光滑曲面的关系判据^[7]. Zheng^[8, 9]基于 Filippov 和 Clarke 等的研究成果, 利用非光滑分析中关于 Lipschitz 曲面几何性质的切锥描述, 将原 Filippov 的梯度判据扩展为新的相依锥判据.

Lipschitz 曲面可以是分段光滑的, 因此相对于光

收稿日期: 2009-04-15; 修回日期: 2009-10-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60674043).

作者简介: 霍鑫(1981-), 男, 河北阜平人, 博士生, 从事非光滑控制理论的研究; 姚郁(1963-), 男, 黑龙江北安人, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制理论等研究.

滑曲面而言, Lipschitz 曲面是一类范围更为广泛的空间曲面. 本文基于 SSR 的定义构造具有线性 Lipschitz 边界的自稳定域, 放宽了对自稳定域边界的限制. 在此基础上, 依据系统轨迹与自稳定域边界上相依锥的关系设计控制律, 使闭环系统满足相依锥判据中的穿越条件, 从而保证 SSR 外的系统轨迹将在有限时间内到达 SSR 的边界并进入其内部. 根据 SSR 的定义, 自稳定域内部和边界上的点将收敛到其顶点, 即平衡点. 于是, 在该控制律的作用下, 闭环系统轨迹最终将收敛到平衡点.

2 数学基础

首先给出文中用到的一些记号的定义. 设子集 $\Omega \subset \mathbf{R}^n$, $\overline{\text{co}}\{\Omega\}$ 表示集合 Ω 凸的闭包, $f(\Omega)$ 表示集合 Ω 上的函数值 $f(x)$ 的集合, 即 $f(\Omega) = \{f(x) : x \in \Omega\}$; $\|\cdot\|$ 为欧式 2 范数; $B_\delta = \{y \in \mathbf{R}^n : \|y-x\| < \delta\}$ 表示以 x 为中心, δ 为半径的开球; $d_\Omega = \inf\{\|x-y\| : y \in \Omega\}$ 表示 \mathbf{R}^n 中的点 x 与子集 Ω 的距离.

2.1 自稳定域

对于二阶系统的滑模控制, 所有稳定的滑模面都在相平面的第 2 和第 4 象限. Han 等学者从二阶系统的固有特性出发, 给出了 n 阶系统自稳定域的概念.

定义 1 (自稳定域^[4]) 设 $G_n \subset \mathbf{R}^n$ 是状态空间中包含原点的区域, 即 $0 \in G_n$. 对于 $x(t_0) \in G_n$, 若 $\exists T > 0$, 使得 $x(t_0 + \tilde{t}) \in G_n$ 对于 $\forall \tilde{t} > T$ 成立, 且 $x(t) \rightarrow 0$, 则称 G_n 为系统的自稳定域.

自稳定域是构造性的, 同一系统可以有不同的自稳定域, 因此可根据设计的需要构造不同的自稳定域.

2.2 Filippov 解

考虑如下微分方程:

$$\Sigma_n : \dot{x} = f(x, t), x(t_0) = x_0. \quad (1)$$

其中: $x \in \mathbf{R}^n$ 表示状态向量, 可测实函数 $f : \mathbf{R}^n \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}^n$ 有界且几乎处处有定义.

定义 2 (Filippov 解^[7]) 向量函数 $x(t)$ 在时间区间 $[t_0, t_1]$ 上是式 (1) 的 Filippov 解, 若 $x(t)$ 绝对连续且对于几乎所有的 $t \in [t_0, t_1]$ 满足

$$\dot{x} \in \overset{\text{a.e.}}{K}[f](x). \quad (2)$$

其中

$$K[f](x) = \bigcap_{\delta > 0} \bigcap_{\mu N = 0} \overline{\text{co}}f(B_\delta(x) \setminus N) \quad (3)$$

表示 Filippov 集值映射, $\mu N = 0$ 表示集合 N 的 Lebesgue 测度为零.

2.3 相依锥判据

在给出系统解关于状态空间中非光滑曲面的相依锥判据之前, 首先给出 n 维空间中线性 Lipschitz

曲面的定义及其切锥描述.

定义 3 (Lipschitz 函数) 设 $f : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ 为一个给定函数. 称 f 在 x 附近是 Lipschitz 的, 当存在正数 K 和 δ 使得

$$\|f(x) - f(x')\| \leq K\|x - x'\| \quad (4)$$

对于所有 $x, x' \in B_\delta(x)$ 成立.

定义 4 设 $D_i \subseteq \mathbf{R}^n, i = 1, \dots, r$, 满足 $\bigcup_{i=1}^r D_i = \mathbf{R}^n$, 且 $D_i \cap D_j = \emptyset$, 其中 $i \neq j, i, j \leq r$, 称 S 为 \mathbf{R}^n 中的线性 Lipschitz 连续曲面, 若 S 构成一个单连通集, $0 \in S$ 且满足

$$S = \{x | S_i(x) = C_i x + d_i = 0, C_i^T \in \mathbf{R}^n, d_i \in \mathbf{R}, x \in D_i, i = 1, \dots, r\}. \quad (5)$$

\mathbf{R}^n 空间被 S 分成两个单连通域, 即

$$S^+ = \bigcup_{i=1}^r \{x | S_i(x) > 0\}, \quad (6)$$

$$S^- = \bigcup_{i=1}^r \{x | S_i(x) < 0\}, \quad (7)$$

其中 $S^+ \cap S^- = \emptyset$.

为叙述方便, 将 S 记作

$$S = \{x | f_x(x) = 0, x \in \mathbf{R}^n\}, \quad (8)$$

其中 $f_x(x)$ 是线性 Lipschitz 连续函数.

定义 5 (相依锥^[10]) 紧集 $\Omega \subset \mathbf{R}^n, x \in \mathbf{R}^n$, 则在 x 处 Ω 的相依锥定义为

$$T_\Omega^B(x) = \left\{ y \in \mathbf{R}^n : \liminf_{h \downarrow 0} \frac{d_\Omega(x + hy)}{h} = 0 \right\}. \quad (9)$$

相依锥仅对紧集 Ω 边界上的点有意义, 可以认为 $T_\Omega^B(x)$ 是集合 Ω 边界曲面的相依锥, 即从 Ω 边界点 x 指向 Ω 内部所有方向向量的集合.

定理 1 (相依锥判据穿越条件^[9]) 空间 Lipschitz 曲面 S 及区域 S^+ 和 S^- 分别由式 (5), (6) 和 (7) 给出, 若微分方程 (1) 的 Filippov 解存在, 且

$$\bigcup_{x \in S^- + S} K[f](x) \subseteq \bigcap_{x \in S} \text{Int}\{T_{S^+ + S}^B(x)\}, \quad (10)$$

则当初始条件满足 $x(t_0) \in S^-$ 时, 微分方程 (1) 的所有 Filippov 解将在有限时间由 S^- 穿越 S 到 S^+ .

同理可得所有 Filippov 解在有限时间由 S^+ 穿越 S 到 S^- 的相依锥判据.

定理 1 给出了判定由 Filippov 微分包含解所描述的动力系统轨迹与状态空间中非光滑 Lipschitz 曲面关系的条件, 扩展了原有 Filippov 判据的结论. 相依锥判据穿越条件如图 1 所示. 图中扇形阴影部分表示相依锥的范围, 三角形阴影部分表示 Filippov 微分包含右端向量场集合. 从图中可以看出, 相依锥判据实际上是利用微分包含右端向量场与指向曲面一侧方向

之间的关系建立穿越判断条件的.

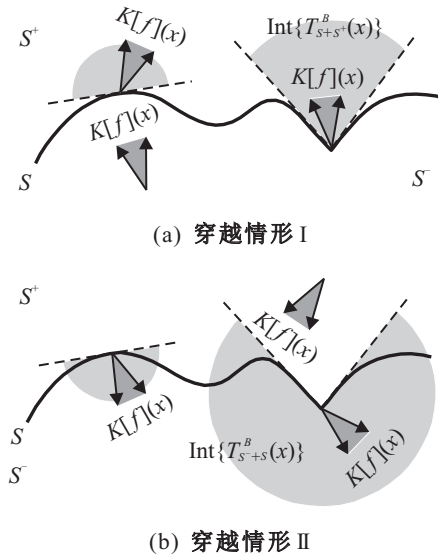


图1 相依锥判据的穿越条件

3 主要结果

考虑二阶系统

$$\Sigma_2: \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \Delta(x_1, x_2) + u. \end{cases} \quad (11)$$

其中: $\Delta(x_1, x_2)$ 为不确定项, 可以是状态的非连续函数, 假设其满足 $|\Delta(x_1, x_2)| \leq \sigma$ 且 $\Delta(0, 0) = 0$.

引理 1^[5] 对于系统 Σ_2 , 设 $g(x_1)$ 为任意连续正定函数, 且 $g(0) = 0$, 则

$$G_2 = \{(x_1, x_2) : |x_2 + 2g(x_1)\text{sgn}(x_1)| \leq g(x_1)\} \quad (12)$$

为系统 Σ_2 的一个自稳定域.

定理 2 若 $g(x_1)$ 是线性 Lipschitz 连续正定函数, 且满足 $g(0) = 0$, 则

$$S_u(x) = \{(x_1, x_2) : x_2 + g(x_1)(2\text{sgn}(x_1) - 1) = 0\}, \quad (13)$$

$$S_d(x) = \{(x_1, x_2) : x_2 + g(x_1)(2\text{sgn}(x_1) + 1) = 0\} \quad (14)$$

分别为 \mathbf{R}^2 中的两个线性 Lipschitz 曲面.

证明 首先证明 $S_u(x)$ 是线性 Lipschitz 曲面, 即当 $(x_1, x_2) \in \mathbf{R}^2$ 时, $f_x = x_2 + g(x_1)(2\text{sgn}(x_1) - 1)$ 是线性 Lipschitz 函数.

- 1) 当 $x_1 > 0$ 时, $f_x = x_2 + g(x_1)$, 命题成立;
- 2) 当 $x_1 < 0$ 时, $f_x = x_2 - 3g(x_1)$, 命题成立;
- 3) 当 $x_1 = 0$ 时, 因为 $g(0) = 0$, 所以 $f_x = x_2$, 命题成立. 因此, $S_u(x)$ 是 \mathbf{R}^2 中的线性 Lipschitz 曲面.

同理, $S_d(x)$ 也是 \mathbf{R}^2 中的线性 Lipschitz 曲面. 所以定理 2 结论成立. \square

根据定义 4 关于线性 Lipschitz 曲面的定义, $S_u(x)$ 和 $S_d(x)$ 可分别记为

$$S_u(x) = \{x | S_{ui}(x) = c_{ui}x_1 + x_2 + d_{ui} = 0, c_{ui}, d_{ui} \in \mathbf{R}\}, \quad (15)$$

$$S_d(x) = \{x | S_{di}(x) = c_{di}x_1 + x_2 + d_{di} = 0, c_{di}, d_{di} \in \mathbf{R}\}. \quad (16)$$

定理 3 设 $G_2 = \{(x_1, x_2) : (x_1, x_2) \in \overline{S_u^+} \cap \overline{S_d^-}\}$, 其中 \bar{S} 表示集合 S 在 \mathbf{R}^2 中的补集, 则 G_2 是系统 Σ_2 的一个自稳定域.

证明 根据 $S_u(x)$ 和 $S_d(x)$ 的定义, 有

$$S_u^+ = \{(x_1, x_2) : x_2 + g(x_1)(2\text{sgn}(x_1) - 1) > 0, (x_1, x_2) \in \mathbf{R}^2\},$$

即

$$\overline{S_u^+} = \{(x_1, x_2) : x_2 + 2g(x_1)\text{sgn}(x_1) \leq g(x_1)\},$$

同理

$$\overline{S_d^-} = \{(x_1, x_2) : x_2 + 2g(x_1)\text{sgn}(x_1) \geq -g(x_1)\},$$

于是

$$\overline{S_u^+} \cap \overline{S_d^-} = \{(x_1, x_2) : |x_2 + 2g(x_1)\text{sgn}(x_1)| \leq g(x_1)\}.$$

根据引理 1, 则定理 3 结论成立. \square

定理 3 构造了一类二阶不确定系统的自稳定域, 其边界为线性 Lipschitz 曲面, 如图 2 所示.

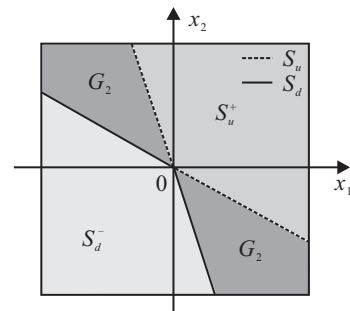


图2 \mathbf{R}^2 中的自稳定域

下面对具有线性 Lipschitz 边界的区域设计控制律, 使得系统轨迹在自稳定域的两个边界之外分别满足相依锥判据的穿越条件, 保证自稳定域外部的系统轨迹在有限时间到达自稳定域的边界并进入其内部. 根据自稳定域的定义, 其内部和边界上的系统轨迹将收敛于平衡点. 因此, 闭环系统轨迹也将收敛于平衡点.

定理 4 令 $M = \max_{i \leq r} (|c_{ui}|, |c_{di}|)$, 则系统 Σ_2 的轨迹在有限时间到达 G_2 的边界并进入其内部, 如果满足

$$u = -(M|x_2| + \sigma + \varepsilon) \times \text{sat}\left(\frac{x_2 + 2g(x_1)\text{sgn}(x_1)}{g(x_1)}\right), \quad (17)$$

其中 $\varepsilon > 0$ 是一个任意小的正数.

证明 为叙述方便, 记 $\Gamma = \frac{x_2 + 2g(x_1)\text{sgn}(x_1)}{g(x_1)}$.

由于 $\Delta(x_1, x_2)$ 可能是状态的非连续函数, 且 $\Delta(x_1, x_2)$ 有界, 满足 $|\Delta(x_1, x_2)| \leq \sigma$. 根据 Filippov 关于右端非连续微分方程的相关理论, 闭环系统的微分包含形式为

$$\dot{x} \in K[f](x),$$

其中

$$K[f](x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ K[\Delta](x) - (M|x_2| + \sigma + \varepsilon)\text{sat}(\Gamma) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

若 $x \in S_u^+ \cup S_u$ 或 $x \in S_d^- \cup S_d$, 有

$$\text{sat}(\Gamma) = \text{sgn}(\Gamma),$$

则 $x \in S_u^+ \cup S_u$ 时, 有

$$K[f]^+(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ K[\Delta]^+(x) - M|x_2| - \sigma - \varepsilon \end{bmatrix}; \quad (19)$$

同理, $x \in S_d^- \cup S_d$ 时, 有

$$K[f]^-(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ K[\Delta]^-(x) + M|x_2| + \sigma + \varepsilon \end{bmatrix}. \quad (20)$$

由 $S_u(x)$ 的定义可知, $S_u^- + S_u$ 的相依锥为

$$\bigcap_{x \in S_u} T_{S_u^- + S_u}^B(x) = \{\nu : [c_{ui} \ 1]\nu \leq 0, \forall i \leq r\}; \quad (21)$$

同理, 由 $S_d(x)$ 的定义可知, $S_d^+ + S_d$ 的相依锥为

$$\bigcap_{x \in S_d} T_{S_d^+ + S_d}^B(x) = \{\nu : [c_{di} \ 1]\nu \geq 0, \forall i \leq r\}. \quad (22)$$

令 $\Delta^+(x)$ 为 $K[\Delta]^+(x)$ 中的元素, 则

$$f^+(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ \Delta^+(x) - M|x_2| - \sigma - \varepsilon \end{bmatrix} \quad (23)$$

为 $K[f]^+(x)$ 中的元素.

若 $x \in S_u^+ \cup S_u$, 则有

$$[c_{ui} \ 1]f^+(x) = c_{ui}x_2 + \Delta^+(x) - M|x_2| - \sigma - \varepsilon \leq -\varepsilon < 0,$$

故

$$\bigcup_{x \in S_u^+ + S_u} K[f](x) \subseteq \bigcap_{x \in S_u} \text{Int}\{T_{S_u^- + S_u}^B(x)\}.$$

同理, 若 $x \in S_d^- \cup S_d$, 则有

$$\bigcup_{x \in S_d^- + S_d} K[f](x) \subseteq \bigcap_{x \in S_d} \text{Int}\{T_{S_d^+ + S_d}^B(x)\}.$$

根据定理 1 的相依锥判据穿越条件及其推论, 所有从 S_u^+ 出发的点将在有限时间穿越 S_u 进入 G_2 , 所有从 S_d^- 出发的点将在有限时间穿越 S_d 进入 G_2 . 而根据定理 3, 区域 G_2 为系统 Σ_2 的一个自稳定域, 所以在控制律 (17) 的作用下, 闭环系统轨迹将收敛于平衡点. \square

4 数值示例

下面通过一个数值例子验证定理 4 的结论. 设不

确定项 $\Delta(x_1, x_2) = 1.5x_1 \sin x_2 \text{sgn}(x_1)$, 因为 $\Delta(x_1, x_2)$ 有界且关于状态 x_1 不连续, 即微分方程右端非连续, 所以其解定义在 Filippov 意义下.

定义线性 Lipschitz 连续正定函数

$$g(x_1) = \begin{cases} -x_1 - 0.2, & x_1 \leq -1.5; \\ -2x_1 - 1.7, & -1.5 \leq x_1 \leq -1; \\ -0.3x_1, & -1 \leq x_1 \leq 0; \\ 2x_1, & 0 \leq x_1 \leq 0.4; \\ -x_1 + 1.2, & 0.4 \leq x_1 \leq 1; \\ x_1 - 0.8, & 1 \leq x_1. \end{cases}$$

显然 $g(0) = 0$. 根据定理 2, 有

$$S_u(x) = \begin{cases} 3x_1 + x_2 + 0.6 = 0, & x_1 \leq -1.5; \\ 6x_1 + x_2 + 5.1 = 0, & -1.5 \leq x_1 \leq -1; \\ 0.9x_1 + x_2 = 0, & -1 \leq x_1 \leq 0; \\ 2x_1 + x_2 = 0, & 0 \leq x_1 \leq 0.4; \\ -x_1 + x_2 + 1.2 = 0, & 0.4 \leq x_1 \leq 1; \\ x_1 + x_2 - 0.8 = 0, & 1 \leq x_1. \end{cases}$$

$$S_d(x) = \begin{cases} x_1 + x_2 + 0.2 = 0, & x_1 \leq -1.5; \\ 2x_1 + x_2 + 1.7 = 0, & -1.5 \leq x_1 \leq -1; \\ 0.3x_1 + x_2 = 0, & -1 \leq x_1 \leq 0; \\ 6x_1 + x_2 = 0, & 0 \leq x_1 \leq 0.4; \\ -3x_1 + x_2 + 3.6 = 0, & 0.4 \leq x_1 \leq 1; \\ 3x_1 + x_2 - 2.4 = 0, & 1 \leq x_1. \end{cases}$$

$S_u(x)$ 和 $S_d(x)$ 分别为 \mathbf{R}^2 中的线性 Lipschitz 曲面. 根据定理 3, 系统 Σ_2 的自稳定域 G_2 和 S_u 及 S_d 上的相依锥的交集如图 3 所示.

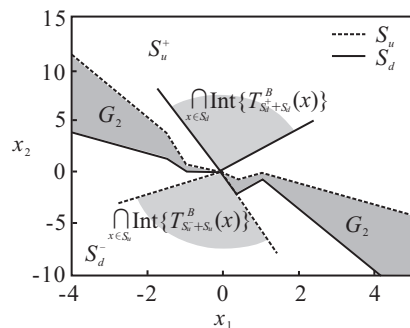


图 3 系统 Σ_2 的自稳定域及边界上相依锥的交集

取 $\sigma = 1.5|x_1|, \varepsilon = 1$, 则

$$u = -(6|x_2| + 1.5|x_1| + 1) \times \text{sat}\left(\frac{x_2 + 2g(x_1)\text{sgn}(x_1)}{g(x_1)}\right).$$

设系统初值分别为 $[1, -6]^T, [3, -6.6]^T, [3, 12]^T, [-2, -5]^T, [-3, 6.2]^T, [0, 7]^T$ 和 $[-2, 10]^T$, 仿真结果如

图 4 所示. 可以看出, 若初值在自稳定域外部, 则系统轨迹在有限时间内进入自稳定域, 并且最终收敛于原点. 若初值在自稳定域内部或边界上, 则系统轨迹直接收敛于原点.

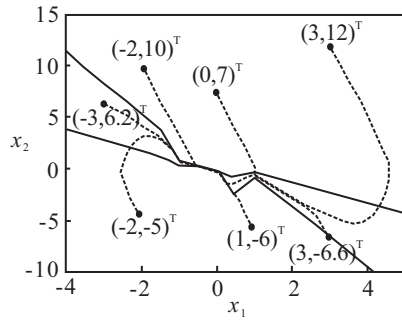


图 4 系统相轨迹

5 结 论

本文基于自稳定域的概念, 对一类二阶不确定系统的控制设计问题进行了深入讨论. 首先基于自稳定域的定义构造了具有线性 Lipschitz 边界的 SSR. 在此基础上, 利用 Filippov 解与空间曲面关系的相依锥判据中的穿越条件设计控制律, 并证明在给定控制律作用下, SSR 外的系统轨迹将在有限时间内到达 SSR 的边界并进入其内部, 从而使得系统轨迹收敛于平衡点. 由于不再强调系统轨迹沿着超平面运动, 而是扩展为一个稳定的构造性区域, 有效避免了抖振问题. 而 SSR 的边界设计为线性 Lipschitz 曲面, 扩展了原有基于 SSR 方法中对区域边界可微的限制, 提高了设计的灵活性和自由度. 另外, 本文的结论还可以扩展到 n 维系统的控制设计.

参考文献(References)

[1] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418.

(Liu J K, Sun F C. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(3): 407-418.)

[2] Xu J X, Lee T H, Wang M, et al. Design of variable structure controllers with continuous switching control[J]. Int J of Control, 1996, 65(3): 409-431.

[3] Yang D Y, Yamane Y, Zhang X J, et al. A new method for suppressing high-frequency chattering in sliding mode control system[C]. Proc of the 36th SICE Annual Conf. Tokushima: IEEE Press, 1997, 7: 1285-1288.

[4] Han J Q, Wang W, Huang Y. A synthesis method for two order uncertain systems: Auto-stable region approach[J]. Systems Science and Mathematical Science, 1997, 10(2): 152-159.

[5] Huang Y, Han J Q. A new synthesis method for uncertain systems: The self-stable region approach[J]. Int J of Systems Science, 1999, 30(1): 33-38.

[6] Huang Y, Han J Q. The self-stable region approach for second order nonlinear uncertain systems[C]. Proc of 1999 IFAC World Congress. Beijing, 1999(E): 135-140.

[7] Filippov A. Differential equations with discontinuous right-hand sides[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishersm, 1988.

[8] Kai Zheng, Tielong Shen, Yu Yao. Filippov solutions on a Lipschitz continuous surface[C]. Proc of the 27th Chinese Control Conf. Kunming, 2008: 577-581.

[9] Kai Zheng, Tielong Shen, Yu Yao. New approaching condition for sliding mode control design with a Lipschitz switching surface[J]. Science in China Series F: Information Science, 2009, 52(1): 1-13.

[10] Aubin J P, Cellina A. Differential inclusions: Set-valued maps and viability theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1984.

下 期 要 目

移动机器人路径规划技术综述 朱大奇, 颜明重

磁浮列车悬浮控制系统电磁铁故障诊断技术研究 龙志强, 等

一类非线性时滞系统的鲁棒模糊自适应控制 李晓强, 等

基于密度算子的多阶段群体评价信息集结方法及其应用 张发明, 等

混合概念格在案例相似性度量中的应用 鞠可一, 等

考虑时间因素的双目标应急召回闭环网络规划 陈娟, 等

一种安全有效的基于身份的门限签密方案 孙 华, 等

从数据中提取氧化铝生料浆配料过程运行控制的模糊规则 白 锐, 等