

一类非线性系统的量化控制器的设计

王 隔 霞¹

摘 要 研究了一类非线性离散系统的量化反馈控制. 对于一类满足齐次性质的非线性系统, 针对有界的初始状态, 我们设计了具有可数个固定控制输入的控制方式, 实现了用“可数”去镇定“不可数”这一控制问题. 值得指出的是, 我们的结论可以直接应用到线性的情形, 并与已有的关于线性系统的结论保持一致. 同时, 给出了例子验证了结论的有效性.

关键词 非线性系统, 量化反馈, 镇定, 可数个

引用格式 王隔霞. 一类非线性系统的量化控制器的设计. 自动化学报, 2016, 42(1): 140–144

DOI 10.16383/j.aas.2016.c150394

Design of Quantizer for a Class of Nonlinear Systems

WANG Ge-Xia¹

Abstract This paper deals with a class of nonlinear systems which satisfy the homogeneous property and considers quantized feedback control for these nonlinear systems. On the assumption that the initial condition is bounded, a countable fixed control input is designed to stabilize these nonlinear systems, which makes it possible to stabilize “uncountable” by “countable”. Moreover, it is worthy to point out that the result can be applied to the linear case directly, which is consistent with the existing result. Meanwhile, an example is given to illustrate the result.

Key words Nonlinear systems, quantized feedback, stabilization, countable

Citation Wang Ge-Xia. Design of quantizer for a class of nonlinear systems. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(1): 140–144

Elia 等在 2001 研究了线性离散系统的具有可数个固定输入的镇定问题^[1]. 事实上, 他们考察了如下系统的镇定问题:

$$\mathbf{x}(k+1) = A\mathbf{x}(k) + B\mathbf{u}(k)$$

其中, $\mathbf{x}(k) \in \mathbf{R}^n$ 为状态, $\mathbf{u}(k) \in \mathbf{R}$ 是单输入, A 和 B 是适维矩阵. 针对该系统, 当初始状态 $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(0) \in \chi_0$, 且可任意选取时, 其中 χ_0 为 \mathbf{R}^n 中某个有界集合, 找到固定个可数输入

$$U = \{\dots, u_{-2}, u_{-1}, u_0, u_1, u_2, \dots\}$$

来镇定原系统.

这一问题, 本身就比较有意思, 一方面, 不可数的任意初始状态 \mathbf{x}_0 ; 另一方面, 固定的可数个输入 $\{u_k\}$, 用“可数”去镇定“不可数”, 这里面一定存在

量化问题, 即将不可数对应(量化)到可数, 所以解决这类问题的关键就是设计量化器.

Elia 等在文献 [1] 中, 将上述问题转化为量化器的设计问题, 并通过引入二次 Lyapunov 函数, 解决了上述问题, 并指出最优的量化器是对数形式的.

然而, 他们只考虑了线性系统, 并没有考虑非线性系统. 即使是后续这方面的工作中, 关于非线性系统的研究也非常少^[2–11]. 这是因为 Elia 等的工作中, 量化器的设计依赖于线性系统的特殊结构, 不宜于推广到一般非线性系统.

本文尝试将 Elia 等工作推广到一类特殊的非线性系统, 具体而言, 就是要考虑一类满足齐次性质的非线性系统的量化控制问题. 值得指出的是, 本文得到的结果, 与线性情况还是有很大的不同, 这里我们发现对状态空间的划分仍然是对数形式的, 但控制输入却不再是对数形式的; 另外, 这里的结论可以直接应用到线性系统中, 并与 Elia 等的结论是一致的.

需要补充的是, 虽然关于非线性系统的量化反馈设计研究不多, 但仍有部分学者关心, 例如文献 [11], 与本文相同, 它同样针对一类满足特殊性质的非线性系统给出了其量化反馈控制的设计. 然而他们所考察的非线性系统与本文是不同的. 事实上文献 [11] 中的结论可较好地解决弦函数这样一些非线性

收稿日期 2015-06-23 录用日期 2015-10-19
Manuscript received June 23, 2015; accepted October 19, 2015
国家自然科学基金 (61203006, 11502141), 上海市自然科学基金 (12ZR1444400), 上海市教委科研创新项目 (14ZZ151) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61203006, 11502141), Natural Science Foundation of Shanghai (12ZR1444400), and the Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (14ZZ151)
本文责任编辑 陈积明
Recommended by Associate Editor CHEN Ji-Ming
1. 上海电力学院数理学院 上海 201300
1. Department of Mathematics and Physics, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201300

性系统, 也可以适用于某些无界的非线性系统. 然而, 它的设计方案并不适用于本文中的非线性系统, 例如, 当系统含有 x^3 时文献 [11] 中的假设条件 2 将不再成立.

众所周知, 量化控制问题本身内容就是非常丰富的, 请查看相关文献 [1-11]. 尤其是随着网络化控制系统的应用和发展^[12-14], 又促使量化控制成为了解决网络化控制系统控制问题的一种有效方式. 因此, 本文讨论的量化问题是有意义的. 值得注意的是, 本文只是考虑了一类特殊非线性系统的量化控制设计, 并没有涉及优化量化器这一块, 在后续工作中将进一步考虑该问题.

1 问题描述

考虑如下系统:

$$x(k+1) = a\phi(x(k)) + bu(k) \quad (1)$$

其中, $x(k) \in \mathbf{R}$ 是一维状态, $u(k) \in \mathbf{R}$ 是单输入, $a \in \mathbf{R}$ 和 $b \in \mathbf{R}$ 为已知常数, 非线性函数 $\phi(x)$ 满足:

- 1) $\phi(-x) = -\phi(x), \forall x \in \mathbf{R}$;
- 2) $\phi(x)$ 为 m 次的齐次函数, 即:

$$\phi(kx) = k^m \phi(x), \quad \forall k, x \in \mathbf{R} \quad (2)$$

我们的控制问题就是:

问题 1. 对上述系统 (1), 找到可数个固定控制输入 $\mathbf{U} = \{u_0, \pm u_1, \pm u_2, \dots\}$, 以及量化函数

$$q: \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{U} \quad (3)$$

其中, 量化函数 $q(x)$ 满足:

$$q(-x) = -q(x), x \in \mathbf{X}$$

使得闭环系统

$$x(k+1) = a\phi(x(k)) + bq(x(k))$$

渐近稳定. 这里 $\mathbf{X} \subseteq \mathbf{R}$ 是上述闭环系统的一个不变集, 且关于原点对称, 其中 \mathbf{R} 是为整个实数轴.

2 主要结论

先讨论 $a = 1, b = 1$ 的特殊情况.

定理 1. 当 $a = 1, b = 1$ 时, 对于给定的 $M_0 > 0$, 定义控制输入 $\mathbf{U} = \{u_0, \pm u_1, \pm u_2, \dots\}$ 如下:

$$u_i = \begin{cases} -(\rho^m)^i \phi(M_0) - \rho^i M_0, & i = 1, 2, \dots \\ (\rho^m)^{-i} \phi(M_0) + \rho^{-i} M_0, & i = -1, -2, \dots \\ 0, & i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $0 < \rho < 1$ 为待定参数, 相应地, 定义量化函数 $q: [-M_0, M_0] \rightarrow \mathbf{U}$ 如下:

$$q(x) = \begin{cases} u_i \text{sgn}(x), & |x| \in (\rho^i M_0, \rho^{i-1} M_0] \\ u_0, & x = 0 \end{cases} \quad (5)$$

对于上述量化函数 (4) 和 (5) 设计的控制器 $u(k) = q(x(k))$, 当 ρ ($0 < \rho < 1$) 满足:

$$\frac{1 + \rho}{1 - \rho^m} > \frac{|\phi(M_0)|}{M_0} \quad (6)$$

时, 对于任意初始状态 $x_0 \in [-M_0, M_0]$, 闭环系统 (1), (4) 和 (5) 是渐近稳定的.

证明. 不失一般性, 假定 $\phi(x)$ 与 x 同号, 即 $\phi(x)x > 0$ ($x \neq 0$).

令 $V(x) = x^2$, 则 $V(x)$ 沿着系统 (1) 的差分满足: 对于固定的 $x(k)$,

$$\begin{aligned} \Delta V(x(k)) < 0 &\Leftrightarrow \\ -\phi(x(k)) - x(k) < u(k) < &-\phi(x(k)) + x(k) \end{aligned}$$

对于 $[-M_0, M_0]$ 内任意正常数 c , 当状态选为 $x(k) = c$ 时, 使得 $\Delta V(x(k)) < 0$ 的输入 $u(k)$ 应该属于如下区域

$$(-\phi(c) - c, -\phi(c) + c) \quad (7)$$

当状态选为 $x(k) = \rho c$ 时 (这里 $0 < \rho < 1$ 为比例系数), 对应地使得 $\Delta V(x(k)) < 0$ 的输入 $u(k)$ 应该属于如下区域

$$(-\phi(\rho c) - \rho c, -\phi(\rho c) + \rho c) \quad (8)$$

因此, 当状态 $x(k) \in (\rho c, c]$ 时, 希望控制输入 $u(k)$ 保持常数, 则必须有上述两区间 (7) 和 (8) 能够相交 (可参看图 1), 即

$$-\phi(c) + c > -\phi(\rho c) - \rho c \Leftrightarrow \frac{1 + \rho}{1 - \rho^m} > \frac{|\phi(c)|}{c} \quad (9)$$

由于 $m \geq 1$, 因此 $|\phi(c)|/c = c^{m-1}\phi(1)$ 为 c 的增函数, 所以, 只要式 (6) 成立, 则式 (9) 对任意的正数 c 均成立.

类似, 当 $\phi(x)$ 与 x 同号时, 对于固定的 $x(k) < 0$, 也有上述结论. 略.

同理, 可证 $\phi(x)$ 与 x 异号的情形. 略. \square

注 1. 当条件 (6) 成立时,

$$\Delta V(x(k)) < 0, \quad \forall x(k) \in [-M_0, M_0]$$

恒成立, 故 $[-M_0, M_0]$ 为闭环系统 (1), (4) 和 (5) 的一个不变集.

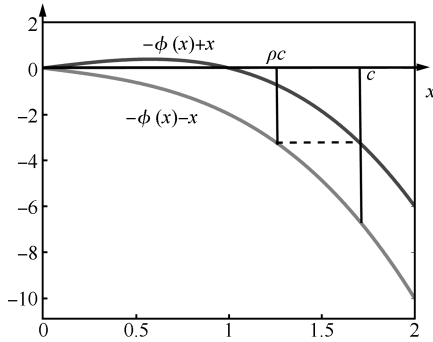


图 1 $\phi(x)$ 与 x 同号时, 控制输入在 $x \in (\rho c, c]$ 的图形
Fig. 1 The input for $x \in (\rho c, c]$ when $\phi(x)x > 0$ ($x \neq 0$)

注 2. 图 1 显示了函数 $\phi(x)$ 与 x 同号时定理 1 的证明情形. 这里需要指出的是, 与线性系统不同的是, 我们的控制输入不再是限定在从原点出发的两条直线内, 而是限定在从原点出发的两条曲线内. 这也就解释了为什么我们的量化器对状态的划分是对数的, 但输入不再是对数的这一结论. 注意上面那条曲线 $-\phi(x) + x$, 当 x 从右侧趋于零时, 会在 x 轴的上方, 但这不影响我们的结论.

下面讨论一般情形, 即 a 和 b 可任意选取的情形.

定理 2. 当 $a \in \mathbf{R}, b \in \mathbf{R}$ 时, 对于给定 $M_0 > 0$, 定义控制输入 $\mathbf{U} = \{u_0, \pm u_1, \pm u_2, \dots\}$ 如下:

$$u_i = \frac{1}{b} \begin{cases} -(\rho^m)^i \phi(M_0) - \rho^i M_0, & i = 1, 2, 3, \dots \\ (\rho^m)^{-i} \phi(M_0) + \rho^{-i} M_0, & i = -1, -2, -3, \dots \\ 0, & i = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中, $0 < \rho < 1$ 为待定参数, 相应地, 定义量化函数 $q: [-M_0, M_0] \rightarrow \mathbf{U}$ 如下:

$$q(x) = \begin{cases} u_i \text{sgn}(x), & |x| \in (\rho^i M_0, \rho^{i-1} M_0] \\ u_0, & x = 0 \end{cases} \quad (11)$$

对于上述量化函数 (10) 和 (11) 设计的控制器 $u(k) = q(x(k))$, 当 ρ ($0 < \rho < 1$) 满足:

$$\frac{1 + \rho}{1 - \rho^m} > |a| \frac{|\phi(M_0)|}{M_0} \quad (12)$$

时, 对于任意初始状态 $x_0 \in [-M_0, M_0]$, 闭环系统 (1), (10) 和 (11) 是渐近稳定的.

证明. 令 $\tilde{\phi}(x) = a\phi(x)$, $\tilde{u}(k) = bu(k)$, 则系统 (1) 可化为定理 1 中特殊情形:

$$x(k+1) = \tilde{\phi}(x) + \tilde{u}(k)$$

□

特别地, 当 $\phi(x) = x$ 时, 系统 (1) 变为线性系统, 相应地, 我们有如下结论. 考察如下线性系统

$$x(k+1) = ax(k) + bu(k) \quad (13)$$

其中, $x(k) \in \mathbf{R}$ 是一维状态, $u(k) \in \mathbf{R}$ 是单输入, $a \in \mathbf{R}$ 和 $b \in \mathbf{R}$ 为已知常数. 不失一般性, 假定 $|a| \geq 1$, 即开环系统 (13) 不稳定.

推论 1. 对于给定 $M_0 > 0$, 定义控制输入 $\mathbf{U} = \{u_0, \pm u_1, \pm u_2, \dots\}$ 如下:

$$u_i = \frac{1}{b} \begin{cases} -(a+1)\rho^i M_0, & i = 1, 2, 3, \dots \\ (a+1)\rho^{-i} M_0, & i = -1, -2, -3, \dots \\ 0, & i = 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中, $0 < \rho < 1$ 为待定参数, 相应地, 定义量化函数 $q: [-M_0, M_0] \rightarrow \mathbf{U}$ 如下:

$$q(x) = \begin{cases} u_i \text{sgn}(x), & |x| \in (\rho^i M_0, \rho^{i-1} M_0] \\ u_0, & x = 0 \end{cases} \quad (15)$$

当 $|a| \geq 1$ 时, 由上述量化函数 (14) 和 (15) 设计的控制器 $u(k) = q(x(k))$, 当 ρ ($0 < \rho < 1$) 满足:

$$\frac{1 + \rho}{1 - \rho} > |a| \left(\Leftrightarrow \rho > \frac{|a| - 1}{|a| + 1} \right) \quad (16)$$

时, 对于任意初始状态 $x_0 \in [-M_0, M_0]$, 闭环系统 (1), (14) 和 (15) 是渐近稳定的.

证明. 由定理 2 可直接得证. 略. □

注 3. 当 $|a| < 1$, 开环系统 (13) 是稳定的. 此时, 令输入恒为零即可.

注 4. 推论 1 中关于量化参数 ρ 满足的条件 (16), 与 Elia 在文献 [1] 中关于一维线性系统的结论是一致的.

注 5. 值得指出的是, 定理 1 和定理 2 以及推论 1 中均有一个前提,

$$x_0 = x(0) \in [-M_0, M_0]$$

这个假设其实是要求系统的初始状态要有界. 这里需要注意的是这个初始状态的界可以任意选定, 因此, 我们的结论是半全局的.

上述结果都是针对一维系统, 我们的结论也可以应用到高维系统可解耦的系统. 特别地, 我们只给出两维的情形, 其余情形类似, 故略去.

考察如下系统

$$\begin{cases} x_1(k+1) = a_1 \phi_1(x_1(k)) + b_1 u_1(k) \\ x_2(k+1) = a_2 \phi_2(x_2(k)) + b_2 u_2(k) \end{cases} \quad (17)$$

其中, $x_i(k) \in \mathbf{R}$ 是状态, $u_i(k) \in \mathbf{R}$ 是单输入, $a_i \in \mathbf{R}$ 和 $b_i \in \mathbf{R}$ 为已知常数, 非线性函数 $\phi_i(x_i(k))$ 满足问题描述中假设条件, 且分别为 $m_i \geq 1$ 次的齐次函数 ($i = 1, 2$).

为了便于叙述, 这里令 $\mathbf{x}(k) = [x_1(k) \ x_2(k)]$.

定理 3. 当 $a \in \mathbf{R}, b \in \mathbf{R}$ 时, 对于给定 $M_{01} > 0$ 和 $M_{02} > 0$, 定义控制输入

$$U = \left\{ \left[\begin{array}{c} u_j^{(1)} \\ u_k^{(2)} \end{array} \right], j \in \mathbf{Z}, k \in \mathbf{Z} \right\}$$

如下

$$u_j^{(1)} = \frac{1}{b_1} \begin{cases} -(\rho^{m_1})^j a_1 \phi_1(M_{01}) - \rho^j M_{01}, & j \in \mathbf{Z}^+ \\ (\rho^{m_1})^{-j} a_1 \phi_1(M_{01}) + \rho^{-j} M_{01}, & j \in \mathbf{Z}^- \\ 0, & i = 0 \end{cases}$$

$$u_k^{(2)} = \frac{1}{b_2} \begin{cases} -(\rho^{m_2})^k a_2 \phi_2(M_{01}) - \rho^k M_{02}, & k \in \mathbf{Z}^+ \\ (\rho^{m_2})^{-k} a_2 \phi_2(M_{02}) + \rho^{-k} M_{02}, & k \in \mathbf{Z}^- \\ 0, & i = 0 \end{cases}$$

其中, $0 < \rho < 1$ 为待定参数, \mathbf{Z} 为整数集, 相应地, 定义量化函数 $q(\mathbf{x}) = [q_1(x_1) \ q_2(x_2)]$, 如下:

$$q_1(x_1) = \begin{cases} u_j^{(1)} \operatorname{sgn}(x_1), & |x_1| \in (\rho^j M_{01}, \rho^{j-1} M_{01}] \\ u_0^{(1)}, & x_1 = 0 \end{cases}$$

$$q_2(x_2) = \begin{cases} u_k^{(2)} \operatorname{sgn}(x_2), & |x_2| \in (\rho^k M_{02}, \rho^{k-1} M_{02}] \\ u_0^{(2)}, & x_2 = 0 \end{cases}$$

($j, k \in \mathbf{Z}$). 对于上述量化函数 (18) ~ (21) 设计的控制器 $u(k) = q(\mathbf{x}(k))$, 当参数 ρ ($0 < \rho < 1$) 满足:

$$\frac{1 + \rho}{1 - \rho^{\max\{m_1, m_2\}}} > \max_{i=1,2} \left\{ |a_i| \frac{|\phi_i(M_{0i})|}{M_{0i}} \right\}$$

时, 对于任意初始状态 $\mathbf{x}_0 \in [-M_{01}, M_{01}] \times [-M_{02}, M_{02}]$, 闭环系统 (17) ~ (21) 是渐近稳定的.

证明. 由定理 2 知, 当

$$\frac{1 + \rho}{1 - \rho^{m_i}} > |a_i| \frac{|\phi_i(M_{0i})|}{M_{0i}}, \quad i = 1, 2$$

分别成立时, 对于上述量化函数 (18) ~ (21) 设计的控制器 $u(k) = q(\mathbf{x}(k))$, 闭环系统 (17) ~ (21) 对于任意初始状态 $\mathbf{x}_0 \in [-M_{01}, M_{01}] \times [-M_{02}, M_{02}]$ 是渐近稳定的.

易知, 当 $0 < \rho < 1$ 且固定时, $(1 + \rho)/(1 - \rho^m)$ 为 m 的减函数, 因此,

$$\frac{1 + \rho}{1 - \rho^{m_i}} > \frac{1 + \rho}{1 - \rho^{\max\{m_1, m_2\}}}$$

显然, 当式 (22) 成立时, 式 (23) 成立. □

注 6. 值得指出的是, 定理 3 告诉我们, 当高阶系统可以解耦时, 定理 2 中的非线性条件 (12) 对于多个可解耦系统有公共的参数 ρ . 这个性质是很好的, 可以很容易推广到三阶或更高阶的可解耦高阶系统.

3 例子

考察如下系统

$$x(k+1) = 0.02\phi(x(k)) + u(k) \quad (18)$$

这里 $a = 0.02$ 和 $b = 1$ 为已知常数, 非线性函数 $\phi(x) = x^3$. 这里取 $M_0 = 10$. 因此, 依据定理 2 可计算的得到比例常数 ρ 需满足:

$$\frac{1 + \rho}{1 - \rho^3} > 2 \Rightarrow \rho > 0.59$$

因此, 可取 $\rho = 0.6$.

图 2 显示了当初始条件 $|x_0| \leq M_0$ 时, 在定理 2 中设计的固定控制输入下的闭环系统 (24) 的状态响应, 验证了我们结论的有效性. 图 3 和图 4 分别显示了按照定理 2 设计的控制输入 $u(k)$ 和中间变量 $i(k)$.

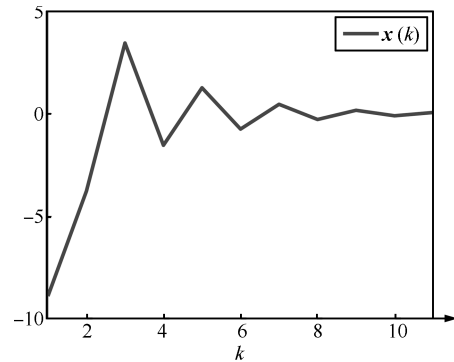


图 2 非线性系统的量化控制器下的闭环响应
Fig. 2 Response of the closed-loop nonlinear system with the quantized controller

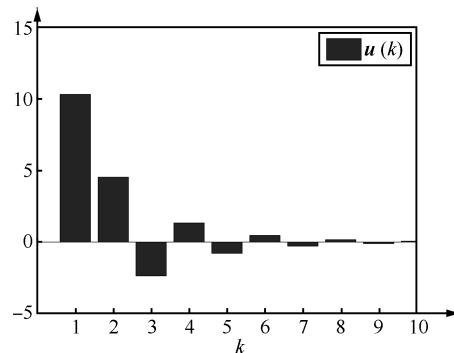


图 3 非线性系统的量化控制器下的输入
Fig. 3 Input of the closed-loop nonlinear system with the quantized controller

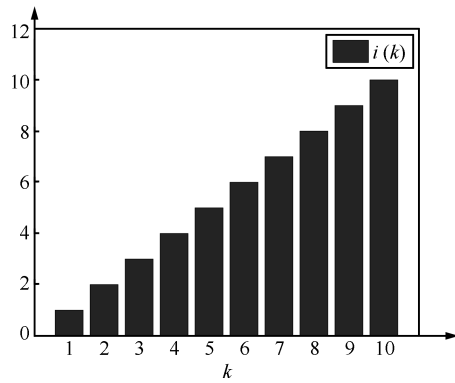


图 4 非线性系统的量化器的参数 $i(k)$

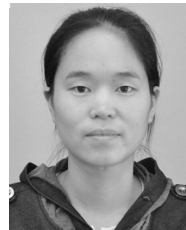
Fig. 4 Parameters $i(k)$ of the quantizer for the nonlinear system

4 结论

本文研究了一类非线性系统的量化反馈控制问题, 针对一类特殊的非线性系统, 在初始状态有界的假设下, 设计了可数个固定的控制输入这一控制方式. 同时, 文中的数值例子验证了结论的有效性.

References

- 1 Elia N, Mitter S K. Stabilization of linear systems with limited information. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, **46**(9): 1384–1400
- 2 Tatikonda S, Mitter S. Control under communication constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, **49**(7): 1056–1068
- 3 Liberzon D. Hybrid feedback stabilization of systems with quantized signals. *Automatica*, 2003, **39**: 1543–1554
- 4 Fu M Y, Xie L H. The sector bound approach to quantized feedback control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, **50**(11): 1698–1711
- 5 Ishii H, Francis B A. Quadratic stabilization of sampled-data systems with quantization. *Automatica*, 2003, **39**(10): 1793–1800
- 6 Sharon Y, Liberzon D. Input to state stabilizing controller for systems with coarse quantization. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, **57**(4): 830–844
- 7 Brockett R W, Liberzon D. Quantized feedback stabilization of linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, **45**(7): 1279–1289
- 8 Tarbouriech S, Gouaisbaud F. Control design for quantized linear systems with saturations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, **57**(7): 1883–1889
- 9 Wang Ge-Xia. Remote output regulation for linear uncertain systems via a limited capacity communication channel. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(4): 632–638
(王隔霞. 线性不确定系统信息受限下的远程跟踪. *自动化学报*, 2012, **38**(4): 632–638)
- 10 Zhai G S, Chen N, Gui W H. Design of quantised dynamic output feedback for decentralised H_∞ control systems. *IET Control Theory & Applications*, 2013, **7**(10): 1408–1414
- 11 Li F B, Shi P, Wu L G, Basin M V, Lim C C. Quantized control design for cognitive radio networks modeled as nonlinear semi-Markovian jump systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **62**(4): 2330–2340
- 12 Abdallah C T, Tanner H G. Complex networked control systems: introduction to the special section. *IEEE Control Systems*, 2007, **27**(4): 30–32
- 13 Antsaklis P, Baillieul J. Special issue on technology of networked control systems. *Proceedings of the IEEE*, 2007, **95**(1): 5–8
- 14 Premaratne U, Halgamuge S K, Mareels I M Y. Event triggered adaptive differential modulation: a new method for traffic reduction in networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, **58**(7): 1696–1706



王隔霞 上海电力学院数理学院副教授。2008 年于华东师范大学获得博士学位。2014 年起, 在墨尔本大学电气工程学院访学一年。主要研究方向为网络化控制系统的设计和分析, 奇异摄动系统稳定性分析, 非线性系统稳定性, 混沌系统的同步。E-mail: gxwang_2004@163.com

(WANG Ge-Xia Associate professor at Shanghai University of Electric Power. She received her Ph.D. degree from East China Normal University in 2008. She had visited the Electrical and Electronic Engineering Department of Melbourne University during 2014 for one year. Her research interest covers controller design and stability analysis of networked control systems, singular perturbation systems and nonlinear systems, and chaos synchronization.)