文章编号: 1001-0920(2006)01-0051-05

基于动态补偿的广义系统的正则化与极点配置

张 国 山
(天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘 要: 研究基于动态补偿的一般广义系统的正则化、无脉冲、稳定性与极点配置问题. 给出了补偿后闭环系统正则无脉冲的充要条件, 进而通过与正常系统相关结果的比较, 给出其补偿器存在且闭环极点可以配置在任意接近给定位置的充要条件. 此外给出了一般广义系统及其动态补偿器的对偶原理. 通过一个数字例子说明了所得结果的合理性.

关键词: 一般广义系统; 动态补偿; 正则化; 极点配置
中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

Regularization and Pole-placement of Descriptor Systems by Dynamic Compensation

ZHANG Guo-shan
(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China. E-mail: zhanggs@tju.edu.cn)

Abstract: The problems of regularization, freeness of impulse, stability and pole-placement of general descriptor systems (GDS) are studied by using dynamic compensation. A necessary and sufficient condition for making closed-loop systems both regular and impulse-free is given. By comparing with related results of normal systems, a necessary and sufficient condition is proposed for the existence of compensators and that the poles of closed-loop systems can be placed at arbitrarily approximating to the given positions. In addition, the duality principle of GDS and their dynamic compensators is elucidated. A numerical example is provided to illustrate the reasonability of the obtained results.

Key words: General descriptor systems (GDS); Dynamic compensation; Regularization; Pole-placement

1 引 言

广义系统理论, 经过几十年的发展已经日渐成熟, 而且已经应用于越来越多的领域[1]. 广义系统提供了更一般的描述, 是正常系统的推广. 一般来说, 广义系统与正常系统相比较有两个显著特征: 一是广义系统一般含有脉冲模式. 脉冲模式使系统不稳定或破坏系统, 所以在工程设计中必须消除. 二是正则性问题. 只有满足了正则性条件, 才能使广义系统的解存在且唯一. 因此, 一般要假设广义系统满足正则性条件或设其是可以反馈正则化的. 围绕着这两个特征, 许多学者作了深入的研究. 文献[2, 3]研究了状态及状态导数反馈的正则性问题; [4～6]研究了输出及输出导数反馈的正则性与无脉冲问题; [7]重新定义并研究了非方形(矩形)广义系统的脉冲能控性与脉冲能观性问题; [8]对非方形广义系统给出了另一种脉冲模能控的定义, 并证明该定义与通过反馈消除脉冲模是等价的. 对于稳定性与极点配置问题, 已有很多成熟的结果, 文献[9]综述了正常系统静态输出反馈已有的结果, 其中包含了动态补偿与基于静态输出反馈闭环系统极点可以任意配置的必要条件和充分条件.

本文将正则与非正则、方形与非方形广义系统称为一般广义系统(GDS)[8]. 首次考虑了基于动态补偿的一般广义系统的正则化、脉冲消除(无脉冲)、

收稿日期: 2005-02-16; **修回日期**: 2005-04-05.
基金项目: 辽宁省教育厅重大基础研究计划项目(202022010); 教育部科技重点项目(02039).
作者简介: 张国山(1961—), 男, 吉林农安人, 教授, 博士, 从事广义系统、鲁棒控制等研究.

稳定性与极点配置问题, 给出了一般广义系统可正则化且无脉冲的充要条件. 首次用原参数给出了正则广义系统在静态输出反馈下, 极点可以配置在任意接近给定位置的充分条件. 在这个基础上, 给出一般广义系统动态补偿器存在且使其闭环极点可以配置在任意接近指定位置的充要条件, 及补偿器动态阶的估计. 而且进一步给出了一般广义系统及其动态补偿器的对偶原理. 将非方形广义系统归结为非正则系统考虑, 方形系统作为其特殊情况. 本文所得结果说明, 通过动态补偿, 非正则(非方形)广义系统与正则广义系统对于消除脉冲及保持系统稳定性的条件在形式上是一致的, 这也说明本文结果是正则广义系统结果的自然推广.

2 基本知识

考虑线性一般广义系统模型

$$E\dot{x} = Ax + Bu,\ Ex(0_-) = Ex_0, \tag{1a}$$

$$y = Cx + Du. \tag{1b}$$

这里: $x \in R^n$ 为状态向量, $u \in R^q$ 为控制输入, $y \in R^p$ 为系统输出向量. $E, A \in R^{m\times n}$, $B \in R^{m\times q}$ 和 $C \in R^{p\times n}$ 为常量矩阵. 假设矩阵 B 和 C 是满秩的, 并设矩阵 E 的秩为 $\mathrm{rank}(E) = r$, 显然 $0 \le r \le \min\{m, n\}$. 如果 $m = n$ 且 $\det(sE - A) \ne 0$, 则称系统是正则的(regular), 否则对于 $m \ne n$ 或 $\det(sE - A) = 0$ 时, 均称系统(1) 为非正则的. 当 $m = n$ 时, 称系统(1) 为方形系统, 否则称系统(1) 为非方形(或矩形) 系统. 记系统(1) 为 (E, A, B, C, D), 当 $D = 0$ 时也简记系统(1) 为 (E, A, B, C).

本文假设系统控制输入 $u(t)$ 与初始值 $Ex(0_-)$ 是容许的[8], 即满足

$$\text{normal-rank}[sE - A \quad B \quad Ex_0] = \text{normal-rank}[sE - A \quad B]. \tag{2}$$

对于方形系统, 下面几个引理是基本的.

引理 1[1] 方形系统(1) 是有限模能控能观(即 R-能控能观) 的充要条件是

$$\mathrm{rank}[sE - A \quad B] = n,\ \forall s \in \sigma(E, A), \tag{3}$$

$$\mathrm{rank}[sE^{\mathrm{T}} - A^{\mathrm{T}} \quad C^{\mathrm{T}}] = n,\ \forall s \in \sigma(E, A). \tag{4}$$

引理 2[1, 10, 11] 方形系统(1) 是脉冲能控与脉冲能观的充要条件是

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix} 0 & E & 0 \\ E & A & B \end{bmatrix} = n + \mathrm{rank}[E], \tag{5}$$

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix} 0 & E \\ E & A \\ 0 & C \end{bmatrix} = n + \mathrm{rank}[E]. \tag{6}$$

引理 3[8] 方形系统(1) 是正则且无脉冲的充要条件是

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix} 0 & E \\ E & A \end{bmatrix} = n + \mathrm{rank}[E]. \tag{7}$$

设"$\mathrm{g.r.}_K$"表示一般秩, 即 $\mathrm{g.r.}_K[A_0 + BKC]$ 表示 $A_0 + BKC$ 对于几乎所有的 $K \in R^{q\times p}$ 可能取得的秩. 当 A_0 为给定时, 有

$$\mathrm{g.r.}_K[A_0 + BKC] = \max\mathrm{rank}\{A_0 + BKC, K \in R^{q\times p}\}.$$

引理 4[12] 设 $A_0 \in R^{m\times n}$, $B \in R^{m\times q}$ 和 $C \in R^{p\times n}$ 是固定矩阵, $K \in R^{q\times p}$ 是变矩阵, 则

$$\mathrm{g.r.}_K[A_0 + BKC] = \min\left\{\mathrm{rank}[A_0, B],\ \mathrm{rank}\begin{bmatrix} A_0 \\ C \end{bmatrix}\right\}. \tag{8}$$

3 主要结果

3.1 正则化与脉冲消除

为方便起见, 设系统(1) 中 $D = 0$. 当 $D \ne 0$ 时, 可通过扩大系统的非动态变量的阶而消除 D 项[13]. 这时系统(1) 的动态补偿器具有如下结构:

$$E_c\dot{x}_c = A_cx_c + B_cy, \tag{9a}$$

$$u = C_cx_c + D_cy. \tag{9b}$$

其中: $x_c \in R^{n_c}$ 是补偿器的状态; $E_c, A_c \in R^{m_c\times n_c}$, $B_c \in R^{m_c\times q_c}$, $C_c \in R^{p_c\times n_c}$ 是常阵; 且

$$0 \le \mathrm{rank}(E_c) = r_c \le \min\{m_c, n_c\}.$$

则闭环系统为

$$\begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & E_c \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + BD_cC & BC_c \\ B_cC & A_c \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix}. \tag{10}$$

通常要求闭环系统对任意容许初始条件有唯一光滑解, 即系统(10) 是正则且无脉冲的, 则该系统一定是方形系统, 因此设补偿器的维数满足

$$n + n_c = m + m_c. \tag{11}$$

由引理 3 可以直接得到系统(10) 是正则且无脉冲的充要条件是

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix} 0 & 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_c \\ E & 0 & A + BD_cC & BC_c \\ 0 & E_c & B_cC & A_c \end{bmatrix} = n + n_c + r + r_c. \tag{12}$$

为了简化表达形式, 令

$$n_0 := \mathrm{rank}\begin{bmatrix} 0 & E \\ E & A \end{bmatrix},$$

$$n_1 := \mathrm{rank}\begin{bmatrix} 0 & E & 0 \\ E & A & B \end{bmatrix},$$

$$n_2 := \operatorname{rank}\begin{bmatrix} 0 & E \\ E & A \\ 0 & C \end{bmatrix}.$$

将式(12) 表示为如下的形式:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_c \\ E & 0 & A + BD_cC & BC_c \\ 0 & E_c & B_cC & A_c \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_c \\ E & 0 & A & 0 \\ 0 & E_c & 0 & 0 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ B & 0 \\ 0 & I_{m_c} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} D_c & C_c \\ B_c & A_c \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 & 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{n_c} \end{bmatrix}. \tag{13}$$

注意到 4 元组(A_c, B_c, C_c, D_c) 是完全参数化矩阵. 由引理 4 容易证明式(13) 当参数(A_c, B_c, C_c, D_c) 变化时的最大秩为

$$\min\{m_c + r_c + n_1, n_c + r_c + n_2\}.$$

因此, 由式(12) 和(13) 可得如下定理:

定理 1　存在动态补偿器(9) 使闭环系统(10) 正则且无脉冲的充要条件为

$$n_1 = m + r, \tag{14}$$

$$n_2 = n + r. \tag{15}$$

条件(14) 与(15) 当$m = n$ 时恰为条件(5) 和(6), 即是方形广义系统脉冲能控脉冲能观的充要条件. 而且如果$m = n$ 且$n + r = n_0$, 则系统本身是正则且无脉冲的. 这时式(14) 和(15) 总成立.

3.2　稳定性与极点配置

如果系统(1) 是正常系统($E = I$), 且是能控和能观的, 则通过静态输出反馈将极点配置在任意接近指定位置的充分条件是 $\operatorname{rank}(B) + \operatorname{rank}(C) \geq n + 1$[9, 14]. 对于强能控与强能观的正则广义系统, 存在全阶广义动态补偿器与全阶正常动态补偿器, 且可以进一步给出降阶正常动态补偿器[15], 其阶数为 $n - l(n - \operatorname{rank}C)$.

设方形广义系统(1) 是正则且无脉冲的, 则总存在受限等价分解形式如下[1]:

$$\left[\begin{bmatrix} I_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & I_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, [C_1 \quad C_2]\right]. \tag{16}$$

考虑系统(16) 在静态输出反馈下的闭环系统结构, 不难求得

$$\det\begin{bmatrix} sI - A_1 - B_1KC_1 & -B_1KC_2 \\ -B_2KC_1 & -I - B_2KC_2 \end{bmatrix} =$$

$$\det(sI - A_1 - B_1\overline{K}C_1)\cdot\det(-I - B_2KC_2). \tag{17}$$

这里 $\overline{K} = K(I + C_2B_2K)^{-1}$, 对于几乎所有的 $\overline{K}$ 可以求出 K 满足(17). 因此, 根据正常系统的有关结果[9, 14] 可以得出如下定理:

定理 2　如果方形广义系统(1) 是正则无脉冲的, 且是R—能控与R—能观的, 并具有受限等价分解形式(16), 则该系统通过静态输出反馈使闭环极点配置在任意接近指定位置上的充分条件是 $\operatorname{rank}B_1 + \operatorname{rank}C_1 \geq r + 1$.

定理 2 是通过系统(1) 的受限等价分解形式得到的, 有时应用很不方便, 而且对于系统(1) 含有脉冲模的情况就不适用. 为此, 需要考虑系统(1) 含有脉冲模情况, 而且用系统原参数给出解决极点配置问题的条件. 如果系统(1) 含有脉冲模式且是强能控强能观的[11], 则通过静态输出反馈可以消除系统中的脉冲模式, 这时系统转化为无脉冲模式的情况. 因此引入如下记号:

$$f_B := \operatorname{rank}\begin{bmatrix} E & 0 \\ A & B \end{bmatrix},$$

$$f_C := \operatorname{rank}\begin{bmatrix} E & A \\ 0 & C \end{bmatrix}. \tag{18}$$

注意到无论系统(1) 是否为方形系统, 定义(18) 均有意义, 而且将式(18) 中的A 替换为$A + BKC$, f_B, f_C 的值不变. 因此, 如果系统(1) 是正则无脉冲的, 则按受限等价分解(16), 可以得到

$$f_B = n + \operatorname{rank}(B_1),$$

$$f_C = n + \operatorname{rank}(C_1). \tag{19}$$

如果系统(1) 是可以反馈正则化的, 且是脉冲能控与脉冲能观的, 这时存在 K 使系统$(E, A + BKC)$ 正则无脉冲. 因此有下面的定理:

定理 3　设方形广义系统(1) 是强能控强能观的, 则通过静态输出反馈使闭环系统正则无脉冲且闭环极点配置在任意接近指定位置的充分条件是

$$f_B + f_C \geq 2n + r + 1. \tag{20}$$

证明　1) 如果系统(1) 无脉冲, 由定理 2 可直接证得定理 3;

2) 如果系统(1) 含有脉冲模, 由假设存在 K 使 $\deg\det(sE - A - BKC) = \operatorname{rank}(E)$, 即系统$(E, A + BKC)$ 正则无脉冲. 用$A + BKC$ 代替等式(18) 中的A, 等式(18) 不变, 这时系统已经不含脉冲模, 再由 1) 可得定理仍然成立. □

下面考虑系统(10) 的极点配置问题. 与正常系统的结果类似[9, 14], 系统(10) 可以看成如下系统:

$$\begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & E_c \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & I_{m_c} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u \\ u_c \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} y \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & I_{n_c} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix}. \tag{21}$$

是通过静态输出反馈

$$\begin{bmatrix} u \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_c & C_c \\ B_c & A_c \end{bmatrix}\begin{bmatrix} y \\ y_c \end{bmatrix} \tag{22}$$

得到, 这里

$$K_c = \begin{bmatrix} D_c & C_c \\ B_c & A_c \end{bmatrix} \tag{23}$$

是任意变化参数矩阵. 因此结合定理 3, 有:

定理 4 对于广义系统(1), 存在动态补偿器(9) 使闭环系统(10) 正则无脉冲且闭环极点配置在任意接近指定位置的充要条件是:

1) $\mathrm{rank}[sE - A \quad B] = m$,

$\mathrm{rank}[sE^{\mathrm{T}} - A^{\mathrm{T}} \quad C^{\mathrm{T}}] = n$, 对任意 $s \in S$;

2) $n_1 = m + r$, $n_2 = n + r$;

且其动态补偿器(9) 的动态阶 r_c 满足

3) $f_B + f_C + r_c \geq n + m + r + 1$.

证明 应用定理 1 和定理 3 可证得定理 4 成立, 从略. □

注 1 如果系统(1) 是正则的, 则定理 4 中条件 1) 和 2) 表示系统的有限模与脉冲模是能控能观的(即系统是强能控强能观的). 因此, 条件 1) 和 2) 可以看成一般广义系统强能控强能观的充要条件. 条件 3) 给出了补偿器的动态阶 r_c 满足的条件, 通常可以取其最小值, 即动态阶可取为

$$r_{c\min} = \max\{0, n + m + r + 1 - f_B - f_C\}. \tag{24}$$

对于正常系统(A, B, C), 等式(24) 为

$$r_{c\min} = \max\{0, n + 1 - \mathrm{rank}(B) - \mathrm{rank}(C)\}. \tag{25}$$

式(25) 中, 如果 $\mathrm{rank}(B) + \mathrm{rank}(C) \geq n + 1$, 补偿器动态阶可以取为 0, 这时取静态输出反馈即可达到任意极点配置要求, 这与已有的结果一致.

注 2 对于非方形系统(1), 可能系统状态方程是多解的(解不唯一), 或形式上是"无解"的(取容许初始条件与容许控制, 系统才能有解), 这种情况表示系统是不完全的. 但通过动态补偿, 闭环系统变为方形, 即变为完全系统, 这时可以考虑其解的存在性与唯一性. 因此, 动态补偿是必要的, 也只有通过动态补偿, 才能使非方形(不完全) 系统变为完全系统, 这也充分体现了补偿器中"补偿"的意义.

称系统$(E^{\mathrm{T}}, A^{\mathrm{T}}, C^{\mathrm{T}}, B^{\mathrm{T}}, D^{\mathrm{T}})$ 为系统(1), 即系统(E, A, B, C, D) 的对偶系统. 易见, 如果一个系统是另一个系统的对偶系统, 则这两个系统互为对偶系统, 且对偶系统补偿器也为原系统补偿器的对偶形式. 因此有如下定理:

定理 5 如果系统$(E_c, A_c, B_c, C_c, D_c)$ 是系统(E, A, B, C) 的动态补偿器, 则系统$(E_c^{\mathrm{T}}, A_c^{\mathrm{T}}, C_c^{\mathrm{T}}, B_c^{\mathrm{T}}, D_c^{\mathrm{T}})$ 是系统($(E^{\mathrm{T}}, A^{\mathrm{T}}, C^{\mathrm{T}}, B^{\mathrm{T}})$ 的动态补偿器, 而且其闭环系统的正则性、无脉冲性、稳定性及极点位置保持不变.

该定理可以看成是一般广义系统及其动态补偿器的对偶原理.

注 3 定理 5 适用于正则(广义) 系统与一般广义系统. 对一般广义系统, 原系统与其对偶系统状态方程解的存在性与唯一性可能不同, 因此不必考察原系统或其对偶系统本身状态方程解的状况, 只需考察补偿后闭环系统解的状况, 就可实现对系统分析与设计的目的.

4 算 例

设系统为

$$E = [1 \quad 0],\ A = [-1 \quad 1],$$

$$B = 1,\ C = I_2 (2\ \text{阶单位阵}).$$

注意该系统状态解不唯一, $m = 1$, $n = 2$, 且(E, A, B, C) 满足定理 4 中的条件 1) 和 2). 另外, $f_B = 2$, $f_C = 3$, 则由定理 4 中条件 3) 可得 $r_c \geq 0$. 因此, 取 $m_c = 2$, $n_c = 1$. 根据需要, r_c 可取为 1 或 0. 如果取 $r_c = 1$, 则闭环系统有两个极点, 不妨设其为一对共轭复极点, 即 $-1 \pm \mathrm{j}$, 不难求得该系统的一个动态补偿器(不唯一) 为

$$E_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},\ A_c = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix},\ B_c = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C_c = 1,\ D_c = [0 \quad -1].$$

如果取 $r_c = 0$, 则闭环系统只有一个极点, 且补偿器变为"静态"补偿. 取该极点为 -2, 容易求得另一个补偿器为

$$E_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix},\ A_c = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix},\ B_c = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$C_c = 1,\ D_c = [-1 \quad 0].$$

对于本例系统的对偶系统, 状态解唯一(取容许初始条件与容许控制), 其动态补偿器即为所求补偿器的对偶形式.

5 结 论

本文首次给出基于动态补偿的一般广义系统可正则化且无脉冲的充要条件, 首次用原参数给出了正则广义系统降阶控制器的阶的表示, 而且首次给出一般广义系统极点可以配置在任意接近给定位置的充要条件及补偿器动态阶的估计. 同时也给出了

一般广义系统及其动态补偿器的对偶原理. 所得结果说明, 采用动态补偿, 可以解决非方形系统的正则、稳定与无脉冲问题, 而且采用动态补偿, 非正则广义系统与正则广义系统对于脉冲能控能观(消除脉冲)条件及保持系统稳定性的条件, 在形式上是一致的, 这说明采用动态补偿研究一般广义系统更自然、更合理、更有理论与实际意义.

参考文献(References)

[1] Dai L. *Singular Control Systems-Lecture Notes in Control and Information Science*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989.

[2] Mukundan R, Dayawansa W. Feedback Control of Singular Systems—Proportional and Derivative Feedback of the State[J]. *Int J Syst Sci*, 1983, 14: 615-632.

[3] Ozcaldiran K, Lewis F L. On the Regularizability of Singular Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1990, 35(10): 1156-1160.

[4] Bunse-Gerstner A, Mehrmann V, Nichols N K. Regularization of Descriptor Systems by Output Feedback [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(8): 1742-1748.

[5] Chu D L, Ho D W C. Necessary and Sufficient Conditions for the Output Feedback Regularization of Descriptor Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(2): 405-412.

[6] Lovass-Nagy V, Powers D L, Schiling R J. On Regularizing Descriptor Systems by Output Feedback [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(7): 1507-1509.

[7] Ishihara J Y, Terra M H. Impulse Controllability and Observability of Rectangular Descriptor Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(6): 991-994.

[8] Hou M. Controllability and Elimination of Impulsive Modes in Descriptor Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49(10): 1723-1727.

[9] Symos V L, Abdallah C T, Dorato P, et al. Static Output Feedback—A Survey[J]. *Automatica*, 1997, 33(2): 125-137.

[10] Cobb D. Controllability, Observability, and Duality in Singular Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1984, 29(12): 1076-1082.

[11] Verghese G C, Levy B C, Kailath T. A Generalized State-space for Singular Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1981, 26(4): 811-831.

[12] Xie X K. A New Matrix Identity in Control Theory[A]. *Proc of 24th IEEE Conf Decision Control*[C]. 1985: 539-541.

[13] Kuijper M. Descriptor Representations Without Direct Feedthrough Term[J]. *Automatica*, 1992, 28(3): 633-637.

[14] 段广仁. *线性系统理论*[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
(Duan G R. *Linear System Theory*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004.)

[15] 杨冬梅, 张庆灵, 姚波, 等. *广义系统*[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
(Yang D M, Zhang Q L, Yao B, et al. *Singular Systems*[M]. Beijing: Science Press, 2004.)

下　期　要　目