学校编码：10384 分类号 ________ 密级 ________

学号：22320051403222 UDC ________

博 士 学 位 论 文

奇异线性系统结构分解、控制和应用

The Structural Decomposition for Singular Systems and Its Applications

杨剑雄

指导教师姓名: 李茂青 教授, 陈本美 教授

专 业 名 称: 控制理论与控制工程

论文提交日期: 2009年6月

论文答辩日期: 2009年7月

学位授予日期: 2009年 月

答辩委员会主席: ____________

评 阅 人: ____________

2009年6月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为(　　　　　　　　　　　　　　　　)课题（组）的研究成果，获得(　　　　　　　　　　　　　　　　)课题（组）经费或实验室的资助，在(　　　　　　　　　　　　　　　　)实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。)

声明人（签名）：

年　　月　　日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

(　　)1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于　　年　　月日解密，解密后适用上述授权。

(　　)2.不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打" √"或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人（签名）：

年　　月　　日

摘　要

线性系统的标准规范形分解常常被用于系统控制和设计中，奇异系统的结构分解技术也是这样一种方法．它通过对状态、输入和输出变量进行等价变换，将系统动态方程的系数矩阵分解为具有不同结构特点的特殊形式，以显式地表现系统的结构性质．

奇异线性系统是一类比正常线性系统更具广泛性和复杂性的系统．本文通过改进和发展奇异系统的结构分解技术，以及讨论奇异系统的一系列特性，重点研究了奇异系统的不变子空间和输出反馈干扰解耦问题以及消除状态响应中脉冲项的反馈控制问题．

本文的主要工作包括以下几个方面：

1. 总结和分析线性系统特殊坐标基分解的核心思想和分解过程，以及线性系统弱不可观子空间、强可控子空间、强可观子空间等几何不变子空间的意义．重点展示了这种分解技术对线性系统的性质和几何子空间的显式表征．
2. 以特殊坐标基分解为基础对奇异系统结构分解的原有方法进行改进和调整，发展和完善了这一分解技术：采用新的算法，简化了分解过程，并且使分解结果变得更加简单；在输入变量和输出变量中各增加一个分向量，把原来的分解中未考虑到的特殊情况也包含进来，使分解结果更加明确；进一步对其中的状态分向量进行分解，使分解结果能够显式表征出奇异系统不变子空间和系统可逆性．
3. 提出和证明结构分解下奇异系统相关特性的判断方法，这些性质包括可控性、R-可控性、脉冲可控性、可观性、R-可观性、可镇定性、可检测性、正常化、正则秩、不变零点及可逆性等．并且利用这些性质研究了如何借助于状态反馈和输出馈入来消除系统响应中脉冲项的反馈控制问题．
4. 研究奇异系统输出零 $(A,E,\mathrm{Im}(B))$ 不变子空间，提出并证明这种子空间在结构分解下的显式表现形式，从而提供了获取该子空间的直观方法．
5. 利用结构分解技术研究左可逆奇异正则系统的输出反馈干扰解耦问题，给出这一问题存在解的充要条件，同时提供获得输出反馈增益矩阵的方法．

最后在总结全文的基础上提出有待进一步探索和研究的问题．

关键词： 奇异系统结构分解；几何子空间；干扰解耦

Abstract

The structural canonical form representation plays a useful role in the analysis and control of linear systems. So does the decomposition approach for singular linear systems. It is a technique dealing with a system by transforming its state, input and output variables such that the system under the new coordinate is decomposed into forms with special structural properties.

Singular systems are governed by the so-called singular differential equations, therefore the systems have many special features that are not found in proper linear systems. In this thesis, the structural properties, feedback control problem, geometric subspaces and disturbance decoupling by output feedback for singular systems are investigated based on the structural decomposition approach for singular systems. The major contributions of this thesis are as follows:

1. The key idea of Special Coordinate Basis decomposition for proper systems is analyzed. Some geometric invariant subspaces of proper systems are discussed to show that the transformed system is capable of explicitly displaying such invariant subspaces.

2. New algorithm and further decomposition are presented for the structural decomposition of singular systems based on the SCB decomposition and the original method. Under the new decomposition proposed, some subsystem of the transformed system is simplified and the supremal *output-nulling*$(A,E,\mathrm{Im}(B))$-*invariant subspace* of singular systems can be clearly expressed in an explicit form.

3. The properties of singular systems, including controllability, observability, stabilizability, detectability, normal rank, invariant zeros and invertibility, are discussed and related feedback controls are studied to eliminate the impulse term in the state response of singular systems.

4. The supremal *output-nulling*$(A,E,\mathrm{Im}(B))$-*invariant subspace* of singular systems is studied to give its clear expression under the structural decomposition of singular systems.

5. The disturbance decoupling by output feedback for regular singular sys-

tems with left invertibility is discussed. The necessity and sufficient condition for the solvability of the above disturbance decoupling problem is proposed and a method to get such an feedback gain by solving linear equation groups is presented.

Keywords: Structural Decomposition of Singular System; Geometric Subspace; Disturbance Decoupling

目　录

摘要 i

Abstract iii

目录 v

Contents vii

基本符号 1

第一章　绪论 3

1.1 奇异系统概述 3

1.2 结构分解技术 8

1.3 本文的组织结构 9

第二章　线性系统的结构分解 11

2.1 严格正则系统的结构分解 11

2.2 非严格正则系统的结构分解 17

2.3 SCB分解下的特性 18

2.4 线性系统的不变子空间 20

第三章　奇异系统的结构分解 27

3.1 定理描述 27

3.2 算法描述 31

3.3 结构分解实例 43

第四章　奇异系统的特性 51

4.1 预备知识 51

4.2 可控性 56

4.3 可观性 61

4.4 不变零点和可逆性 64
4.5 其他性质及简单控制问题 67

第五章 奇异系统的几何子空间 73

5.1 奇异系统的几何子空间 73
5.2 奇异系统的输出零 $(A, E, \mathrm{Im}(B))$ 不变子空间 75

第六章 左可逆奇异正则系统的静态输出反馈干扰解耦问题 89

6.1 问题的提出 89
6.2 左可逆奇异正则系统的静态输出反馈干扰解耦问题 90

第七章 结论和展望 97

7.1 本文主要工作 97
7.2 后续的研究工作 98

附录 A 程序代码 99

A.1 奇异系统结构分解 Step 2 99
A.2 奇异系统结构分解 Step 5 100
A.3 两种方法获得输出零 $(A, E, \mathrm{Im}(B))$ 不变子空间 102

参考文献 105

博士期间发表文章目录 111

致谢 113

Contents

Abstract in Chinese i

Abstract in English iii

Contents in Chinese v

Contents in English vii

Notation 1

1 Introduction 3

1.1 Introduction to Singular Systems 3

1.2 Introduction to Structural Decomposition Approach 8

1.3 Arrangement of The Thesis 9

2 Structural Decomposition and Its Proporties for Linear Systems 11

2.1 Structural Decomposition for Strictly Proper Systems 11

2.2 Structural Decomposition for Nonstrictly Proper Systems 17

2.3 Properties of Structural Decomposition 18

2.4 Geometric Subspaces for Linear Systems 20

3 Structural Decomposition for Singular Systems 27

3.1 Description of Theorem 27

3.2 Description of Algorithm 31

3.3 An Example of Structural Decomposition 43

4 Properties of Singular Systems 51

4.1 Preliminary Knowledge 51

4.2 Controllability 56

4.3 Observability 61
4.4 Invariant Zeros and Invertibility 64
4.5 Other Properties and Some Problems by Feedback Control 67

5 Geometric Subspace for Singular Systems **73**
5.1 Introduction to Geometric Subspace for Singular Systems 73
5.2 Output-nulling $(A,\ E,\ \mathrm{Im}(B))$ Invariant Subspace for Singular Systems 75

6 Disturbance Decoupling with Static Output Feedback for Left Invertible Singular Systems **89**
6.1 Problem Formulation 89
6.2 Disturbance Decoupling with Static Output Feedback for Left Invertible Singular Systems 90

7 Conclusions and Further Research **97**
7.1 Summary and Conclusions 97
7.2 Further Research 98

Appendix A Matlab Codes **99**
A.1 Step 2 of Structural Decomposition for Singular Systems 99
A.2 Step 5 of Structural Decomposition for Singular Systems 100
A.3 Output-nulling $(A,\ E,\ \mathrm{Im}(B))$ Invariant Subspace for Singular Systems 102

References **105**

List of Publications **111**

Acknowledgements **113**

基本符号

$\mathbb{R}$	实数域	I	具有适当阶数的单位矩阵
$\mathbb{R}^n$	n 维实向量全体	I_n	$n\times n$ 阶单位矩阵
$\mathbb{R}^{n\times m}$	$n\times m$ 实矩阵全体	J	Jordan 标准形
$\mathbb{C}$	复数域	0	数值0 或零向量或零矩阵
$\mathbb{C}^n$	n 维复向量全体	A^{T}	矩阵 A 的转置
$\mathbb{C}^{n\times m}$	$n\times m$ 复矩阵全体	A^{-1}	矩阵 A 的逆
$\mathbb{C}^-$	左半开复平面	$\dim(\cdot)$	向量的维数或矩阵的阶数
$\oplus$	直和	$\ker(A)$	矩阵 A 的核空间
$\equiv$	恒等于	$\mathrm{Im}(A)$	矩阵 A 的像空间
$\not\equiv$	不恒等于	$\mathrm{rank}(A)$	矩阵 A 的秩
$\in$	属于	$\mathrm{rank}_{\mathrm{n}}(A)$	矩阵 A 的正则秩
$\notin$	不属于	$\det(A)$	方阵 A 的行列式
$\subset$	包含于	$\deg\det(A(s))$	方阵 $A(s)$ 的行列式的次数
$\not\subset$	不包含于	$\lambda(A)$	方阵 A 的特征值
$\cup$	并	$\mathcal{X}$	向量空间或子空间
$\cap$	交	Σ	连续的正常或奇异系统
$\Rightarrow$	推导出	$P_\Sigma(s)$	Σ的系统矩阵
$P_{n\times m}(s)$		$n\times m$ 阶 s 多项式矩阵全体	
$\mathcal{V},\mathcal{S},\mathcal{T},\mathcal{R},\mathcal{N}$		满足某种定义下的不变子空间	
$\mathbb{C}_p^h$		p 维复向量分段连续 h 阶可导函数集	
$B^{-1}\{\mathcal{V}\}$		子空间的逆像，即$B^{-1}\{\mathcal{V}\}=\{x\in\mathcal{X}\mid Bx\in\mathcal{V}\}$ 其中 B 是 $n\times m$ 阶矩阵	