# 系统包含原理及其应用

陈雪波 著

科学出版社

# 系统包含原理及其应用

陈雪波　著

国家自然科学基金项目(60074002,60574010,60874017)
辽宁科技大学学术著作出版基金资助

科 学 出 版 社
北 京

## 内 容 简 介

本书首先介绍了系统包含原理中系统状态、输入和输出包含的一般概念，给出了包含原理在电力系统和自动车组系统重叠分散控制中的应用，以及在空间系统应用中模型降阶的方法。其次，提出了系统对偶包含的概念，说明了约束类和聚集类包含条件的对偶性，使得系统控制器与观测器的设计可以通过对偶性相互转换。最后，将系统包含原理推广到了子系统的包含，从而可以研究在任意信息结构约束变化下，系统的多重叠分散控制和系统分散的一致性协调控制。

本书是以控制科学与工程及其相关学科攻读硕士学位和博士学位的研究生为主要对象。同时，书中内容也可为相关学科领域的学者、教师、研究人员和工程技术人员提供参考。

**图书在版编目(CIP)数据**

系统包含原理及其应用/陈雪波著. —北京：科学出版社，2012
ISBN 978-7-03-033645-3

Ⅰ.系… Ⅱ.陈… Ⅲ.智能控制-控制系统-研究 Ⅳ.TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 030694 号

责任编辑：魏英杰 杨向萍 / 责任校对：郑金红
责任印制：赵 博 / 封面设计：陈 敬

科学出版社 出版
北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com

源海印刷有限责任公司印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2012 年 3 月第 一 版 开本：B5(720×1000)
2012 年 3 月第一次印刷 印张：15 1/2
字数：303 000

**定价：50.00 元**
(如有印装质量问题，我社负责调换)

# 前　言

系统的包含原理由包含的约束类条件和聚集类条件组成，可用于系统的扩展和收缩。在复杂系统和大系统理论的研究中，系统的包含原理作为一种简化系统分析与设计的方法，近些年来逐步为人们所了解，并且越来越多地应用于各个学科领域和工程领域。一方面，具有重叠互联结构的复杂系统和大系统，如重叠互联电力系统、交通网络系统、群体机器人系统、社会经济系统和空间结构系统等，应用系统的包含原理可扩展系统的空间结构，将系统的重叠结构分解，从而得到近似解耦的、可同时进行各种动态常规控制器和观测器设计的各个子系统。然后，利用包含原理的包含条件将分散的控制器和观测器设计的结果收缩并应用于原系统。另一方面，系统包含原理的约束类条件和聚集类条件，对复杂系统和大系统的模型降阶研究也具有一定的指导意义，即在一定的条件下，可将高阶系统收缩到低阶系统。目前，系统的包含原理已从系统状态的包含，推广到系统状态、输入、输出以及子系统的包含，而且适用于线性定常系统、线性时变系统、线性离散系统和非线性系统等。

第 1 章除综合介绍系统包含原理的理论发展和应用的研究方向外，还将线性随机离散时变状态方程和线性随机连续定常状态方程，作为系统的数学描述工具。第 2 章重点介绍系统包含原理的基本概念，以及系统包含的约束类条件和聚集类条件。第 3 章以重叠互联电力系统为例，详细讨论两区域电力系统重叠互联结构模型的分解，及其自动发电控制(AGC)的分散次优 LQG 控制方法。第 4 章以两类自动车组系统为例，给出自动车组系统中两两汽车构成子系统的重叠结构分解方法，及其重叠分散控制方法。第 5 章从系统对偶原理的角度，以一个空间结构系统为例，介绍利用系统的包含原理进行复杂系统和大系统模型降阶的一般方法，给出系统模型降阶控制器的设计方法；同时，归纳并提出系统的对偶包含原理。第 6 章通过系统的多重叠结构分解，研究特殊结构系统子系统的包含问题及其多重叠分散控制方法。第 7 章推广到更具普遍意义的一般结构系统的广义包含原理，即通过基本互联子系统的对对分解，设计子系统对的基本协调控制器和互联协调补偿器，进而给出了系统在任意信息结构约束变化下分散的一致性协调控制方法。这两章提出的控制方法，均应用于四区域重叠互联电力系统的 AGC。

塞尔维亚贝尔格莱德大学电气工程学院的 Srdjan S. Stankovic(斯坦科维奇)教授审阅了本书部分英文原稿，提出了宝贵的意见；大连理工大学王伟教授、大连海事大学任光教授也给予了有益的建议和支持；作者的多位研究生徐望宝、黄天

云、张颖、欧阳鑫玉、吴丽娟、王茜等和学校有关方面的领导和同事，也为本书的完成提供了诸多的帮助，在此作者谨表感谢。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(60074002,60574010,60874017)的资助，在此深表感谢。

作　者

2011年12月于鞍山

# 目　　录

# 第1章 绪　　论

## 1.1　系统包含的意义

一般来说，除特殊情况外，复杂系统和大系统是由其各个部分或子系统组成的。系统可呈现出以子系统为节点、互联关系为连接的具有网络化的、相互关联的动态拓扑结构形式。正是系统的各个部分或者子系统之间的动态互联，使得系统的整体结构、运行过程和内在性质趋于复杂。系统结构中的某一部分，或是状态变量，或是输入、输出，或是子系统本身，都可能成为系统其他部分所共有的互联部分，我们称之为系统的重叠部分。从这一角度来看，系统具有的重叠结构是系统趋于复杂化的因素之一。系统的包含原理可以作为分析系统重叠结构的工具，同时也可以作为推广应用到系统一般结构的分析，特别是系统具有信息结构约束变化的分析。

系统的包含原理，作为简化系统分析与设计的方法之一，在复杂系统和大系统的研究领域内，已经逐步引起相关学科学者和研究生们的注意和兴趣。系统的包含原理有两个方面，即系统的扩展与收缩。就子系统具有重叠互联结构组成的系统而言，利用系统的包含原理将描述原系统的状态空间扩展，得到各个子系统近似解耦的更为广大的扩展空间。对应扩展空间的系统，我们称为扩展系统。在满足系统包含原理相关的扩展条件下，扩展系统状态方程的解包含了原系统状态方程的解，即扩展系统包含了原系统的所有性质。这样，根据我们熟知的系统常规设计方法，在扩展空间中，可以分别为各个解耦的子系统进行独立的、分散的观测器设计和控制器设计。然后，通过系统结构参数矩阵的补偿，在满足系统包含原理相关的收缩条件下，将扩展空间中分别设计的各个子系统的观测器和控制器整合收缩回原系统空间，进而实现对原系统的重叠分散动态控制器的设计。这类系统动态控制器的设计，可作为复杂系统和大系统的分散控制和一致性协调控制的方法之一。就复杂系统和大系统的模型降阶而言，利用系统包含原理相关的收缩条件，完全或不完全地将描述原系统的状态空间收缩到更为简约的状态空间，从而得到原系统近似的收缩空间。对应收缩空间的系统，我们称为收缩系统。同样，根据系统常规的设计方法，在收缩空间中可以为收缩系统分别进行观测器和控制器的动态设计。一方面，在满足系统包含原理相关的扩展条件下，可以将设计结果扩展回并且应用于原系统；另一方面，也可以直接将设计结果作为原系统

的降阶动态控制器而应用于原系统。这类系统的模型简化和动态控制器的设计，不失为复杂系统和大系统模型降阶及其控制的选择方法之一，特别是降阶动态控制器的设计方法具有一定的启示作用。

系统包含原理开拓性的理论研究和应用研究工作，始见于20世纪60年代末(Aoki,1968,1971,1978;Isaksen,et al,1973;Ikeda,et al,1981,1984,1986;Ohta,et al,1984;Siljak,1991)。1968年，Aoki针对大系统的高维阶次，提出了类似于系统状态向量线性变换的广义线性变换——聚集(aggregation)方法(Aoki,1968)，用以尝试降低描述系统模型的阶次。聚集的概念与随后陆续提出的非聚集(disaggregation)和约束(restriction)等概念，为系统的包含原理奠定了基础。

针对复杂系统和大系统，Ikeda和Siljak等提出了动态系统的包含原理，并发现包含原理特别有利于具有重叠互联结构系统的分析与设计，以及系统模型降阶的设计。这些基于系统包含原理的研究工作包括：

① 系统最优控制性能指标的包含与其不变性(Ikeda,et al,1981;Chen,1994)。

② 动态确定性线性系统关于包含原理约束和聚集的两类特殊包含条件(Ikeda,et al,1984)。

③ 将系统中状态的包含逐步推广到输入的包含、输出的包含(Ikeda,et al,1986;Iftar,et al,1990,1998;Iftar,1993a,1993b;Siljak,1991;Chen,1994;Bakule,et al,2000a,2000b;Stankovic,et al,2001)，并进一步推广到子系统的包含(Chen,et al,2005,2007,2012)。

④ 约束类和聚集类包含条件在系统不同扩展空间中的收缩性问题(Hodzic,et al,1986,Chen,et al,2004)。

⑤ 线性随机系统的包含原理(Hodzic,et al,1983;Krtolica,et al,1991;Chen,1994)。

⑥ 线性随机离散时变系统和线性连续时变系统的包含原理(Chen,1994;陈雪波，等，1997;Stankovic,2004)。

⑦ 非线性系统包含原理的基本形式(Siljak,1991;Siljak,et al,1995)。

系统包含原理的应用范围很宽，并且还在扩展。除了包含原理在大系统降阶模型中的应用(Sezer,et al,1982;Chen,1994)以外，诸如重叠互联电力系统的自动发电控制(Siljck,1978;Calovic,et al,1978;Calovic,1984;Chen,1994;Chen,et al,1996,2002a,2002b,2002c,2005,2007,2012;Stankovic,et al,1999)、经济社会系统(Aoki,1976)、自动车组系统(Levine,et al,1966;Isaksen,et al,1973;Papageorgiou,1984;Stankovic,et al,2000;陈雪波，2001)、多控制器系统(Siljak,1980;Palacios-Quinonero,et al,2010;Chen,et al,2005,2007,2012)、大型空间结构系统(Yousuff,et al,1987;Young,1990;Chen,1994)、高层建筑的结构振动控制(Palacios-Quinonero，et al，2010，2011）等，都可以在系统的扩展和收缩框架下进行分析、研究和设计。

在理论方面，本书的意义在于以线性随机离散时变动态系统为例，阐述了系统包含原理的理论、相关的包含条件和定理证明。书中将以连续时不变动态系统为背景的包含原理，推广到以线性随机离散时变动态系统为背景的包含原理（Chen，1994）。不仅如此，在线性随机离散时变描述的动态系统情况下，本书还将包含原理中系统状态的包含，推广到系统状态、输入和输出的包含。特别的，通过状态、输入和输出包含的排列组合，得到不同于状态包含的约束类和聚集类对偶的包含条件，作为概括性的、具有一般性的包含原理的基本包含结构。这样，系统状态的包含不仅与其自身的重叠互联结构有关，还分别与对应系统状态的输入和输出的重叠互联结构有关。根据系统包含原理的约束类和聚集类状态的基本包含条件，可以分别推出系统不同类型的包含条件。因此，在系统的原空间与系统的扩展空间之间、系统的原空间与收缩空间之间，可以通过不同类型的包含条件或收缩条件进行系统的扩展或收缩。在系统扩展和收缩的框架中，可以方便地进行系统的分析与设计。为了设计复杂系统和大系统的动态控制器，本书不仅考虑了系统观测器的包含问题，即观测器的扩展与收缩，离散时间情况下预估器和滤波器的包含问题，以及作为状态估计性能指标的包含问题，而且还考虑了动态控制器在随机情况下系统状态反馈的包含问题和输出反馈的包含问题。

在更为广泛的意义上，本书还介绍了将系统中状态、输入和输出的包含，推广到以子系统作为系统重叠部分的子系统的包含（Chen，et al，2005，2007，2012）。实际上，如果在系统中的一个子系统与任意其他两个以上的子系统互联，这个子系统就可以被认为是其本身分别与其他子系统组成的基本互联子系统对的重叠部分。通过基于包含原理的多重叠分解方法，或称为对对分解方法，将每一对基本互联子系统分解。作为研究复杂系统和大系统的基本单元，基本互联子系统可以揭示系统互联结构及其变化的本质。这一概念的提出，特别有利于一类复杂系统，如群体系统的群聚与分散一致性的协调控制研究。

在应用方面，本书的意义在于结合实例应用阐述系统的包含原理。例如，以电力系统的自动发电控制（automatic generation control，AGC）为例，通过两区域或四区域重叠互联电力系统的模型描述、系统分析与分散控制或协调控制的设计，揭示了系统包含原理应用的方法。针对线性离散时变随机情况下描述的重叠互联电力系统，研究系统的最优控制二次性能指标的包含关系和系统最优 LQG 控制器的收缩性，将包含原理作为设计重叠互联电力系统 AGC 分散控制器的主要手段。我们知道，系统的状态观测器和状态反馈控制器具有对偶关系，系统包含的约束类条件和聚集类条件也具有对偶关系。因此，在不同类型的包含条件

中，讨论系统观测器和控制器的设计，可以选择在同一扩展空间内既有利于观测器的收缩又有利于控制器收缩的包含条件的动态控制器设计。更一般的情形是，具有系统状态观测和状态反馈的闭环控制系统包含，包括了系统各个部分的包含情况。在此框架内，可以利用闭环系统的包含条件，来获得系统状态、输入和输出的包含，系统观测器、控制器以及性能指标的包含。因此，充分利用闭环系统的扩展性和收缩性，可以构造具有重叠互联结构系统的重叠分散控制方法。同样，自动车组系统的重叠分散控制、空间系统降阶模型的建立和群体系统一致性的协调控制，也都为系统的包含原理提供了应用的范例。

## 1.2 系统包含的一个引例

为了便于理解系统的包含问题，我们给出一个在状态空间描述下，具有状态、输入和输出包含的系统的包含问题，说明系统包含的扩展、收缩、重叠和分解等概念。

考虑一对线性连续时不变系统 S 和 $\widetilde{\mathrm{S}}$，分别表示为

$$\mathrm{S}: \dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx$$

$$\widetilde{\mathrm{S}}: \dot{\widetilde{x}} = \widetilde{A}\widetilde{x} + \widetilde{B}\widetilde{u}, \quad \widetilde{y} = \widetilde{C}\widetilde{x} \tag{1-1}$$

其中，$x(t)\in\mathbf{R}^n$，$u(t)\in\mathbf{R}^m$ 和 $y(t)\in\mathbf{R}^l$ 分别表示系统 S 在时间 $t\in\mathbf{R}$ 的状态、输入和输出向量；$\widetilde{x}(t)\in\mathbf{R}^{\widetilde{n}}$，$\widetilde{u}(t)\in\mathbf{R}^{\widetilde{m}}$，$\widetilde{y}(t)\in\mathbf{R}^{\widetilde{l}}$ 分别为系统 $\widetilde{\mathrm{S}}$ 在时间 $t\in\mathbf{R}$ 的状态、输入和输出向量。

系统的系数矩阵 $A,B,C$ 和 $\widetilde{A},\widetilde{B},\widetilde{C}$ 具有适当的维数。一般情况下，总有 $n\leqslant\widetilde{n}$，$m\leqslant\widetilde{m}$，$l\leqslant\widetilde{l}$。在初始时刻 $t_0$、初始状态向量 $x_0$ 和确定的控制输入 $u$ 条件下，称 $x(t;t_0,x_0,u)$ 和 $y[x(t)]$ 分别表示系统 S 状态方程和输出方程的唯一解；同样，在初始时刻 $t_0$、初始状态向量 $\widetilde{x}_0$ 和确定的控制输入 $\widetilde{u}$ 条件下，称 $\widetilde{x}(t;t_0,\widetilde{x}_0,\widetilde{u})$ 和 $\widetilde{y}[\widetilde{x}(t)]$ 分别是系统 $\widetilde{\mathrm{S}}$ 状态方程和输出方程的唯一解。

系统 S 和 $\widetilde{\mathrm{S}}$ 系数矩阵之间具有如下关系，即

$$\widetilde{A} = VAU + M_A, \quad \widetilde{B} = VBQ + M_B, \quad \widetilde{C} = TCU + M_C \tag{1-2}$$

其中，$M_A$，$M_B$ 和 $M_C$ 是具有适当维数的补偿矩阵；$V,U,R,Q,T$ 和 $S$ 分别是维数为 $\widetilde{n}\times n$，$n\times\widetilde{n}$，$\widetilde{m}\times m$，$m\times\widetilde{m}$，$\widetilde{l}\times l$ 和 $l\times\widetilde{l}$ 的满秩变换矩阵，且满足 $UV=I_n$，$QR=I_m$ 和 $ST=I_l$（$I_n$，$I_m$ 和 $I_l$ 是具有下标维数的单位矩阵）。

**定义 1-1** 系统 $\widetilde{\mathrm{S}}$ 包含系统 S，即 $\widetilde{\mathrm{S}}\supset\mathrm{S}$，如果存在一组满秩矩阵 $\{V,U,R,S\}$，且满足 $UV=I_n$，使得对于任意初始条件 $x_0\in\mathbf{R}^n$ 和任意输入 $u\in\mathbf{R}^m$，当 $\widetilde{x}_0=Vx_0$ 和

$\tilde{u}=Ru$ 时，对于所有的 $t \geqslant t_0$，有 $x(t;t_0,x_0,u)=U\tilde{x}(t;t_0,\tilde{x}_0,\tilde{u})$ 和 $y[x(t)]=S\tilde{y}[\tilde{x}(t)]$。

定义 1-1 说明如果系统 $\tilde{\mathrm{S}}$ 包含系统 S，则 $\tilde{\mathrm{S}}$ 包含了 S 所有的性质和信息，如系统的稳定性和最优性能指标等。我们称系统 $\tilde{\mathrm{S}}$ 是系统 S 的一个扩展，称 S 是 $\tilde{\mathrm{S}}$ 的一个收缩，系统的扩展和收缩满足式(1-2)。式(1-2)所代表系统的包含关系可以转化为系统的包含条件之一，如约束条件，可以由下述定理给出(Ikeda, et al, 1986; Siljak, 1991; Stankovic, et al, 1999)。

**定理 1-1** 系统 S 是系统 $\tilde{\mathrm{S}}$ 的一个典型约束，存在一组满秩矩阵$(V,R,T)$，使得

$$VA=\tilde{A}V,\quad VB=\tilde{B}R,\quad TC=\tilde{C}V \tag{1-3}$$

或

$$M_AV=0,\quad M_BR=0,\quad M_CV=0 \tag{1-4}$$

**例 1-1** 考虑一个由两个子系统 $\mathrm{S}_1$ 和 $\mathrm{S}_2$ 重叠互联系统 S 的扩展问题。系统的状态方程和输出方程为

$$\mathrm{S}:\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A_{11} & A_{12} & A_{13}\\ A_{21} & A_{22} & A_{23}\\ A_{31} & A_{32} & A_{33}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}B_{11} & 0 & 0\\ 0 & B_{22} & 0\\ 0 & 0 & B_{33}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_1\\ u_2\\ u_3\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}y_1\\ y_2\\ y_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11} & 0 & 0\\ 0 & C_{22} & 0\\ 0 & 0 & C_{33}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\end{bmatrix} \tag{1-5}$$

在系统方程(1-5)中，虚线划分的向量 $x_i(t)\in\mathbf{R}^{n_i}$，$u_i(t)\in\mathbf{R}^{m_i}$ 和 $y_i(t)\in\mathbf{R}^{l_i}$，$i=1,2,3$ 分别组成了维数为 $n=\sum_{i=1}^{3}n_i$，$m=\sum_{i=1}^{3}m_i$ 和 $l=\sum_{i=1}^{3}l_i$ 的系统 S 的状态、输入和输出向量 $x(t)\in\mathbf{R}^n$，$u(t)\in\mathbf{R}^m$ 和 $y(t)\in\mathbf{R}^l$，其中 $x_2(t)$，$u_2(t)$ 和 $y_2(t)$ 分别是子系统 $\mathrm{S}_1$ 和 $\mathrm{S}_2$ 状态、输入和输出向量的重叠部分；常系数矩阵中的虚线标明了系统的重叠部分为子系统 $\mathrm{S}_1$ 和 $\mathrm{S}_2$ 所共有，各个子矩阵 $A_{ij}$，$B_{ii}$ 和 $C_{ii}$ 具有适当的维数。

通过定理 1-1，我们可以将系统 S 扩展为

$$\tilde{\mathrm{S}}:\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A_{11} & A_{12} & 0 & A_{13}\\ A_{21} & A_{22} & 0 & A_{23}\\ A_{21} & 0 & A_{22} & A_{23}\\ A_{31} & 0 & A_{32} & A_{33}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\\ x_2\\ x_3\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}B_{11} & 0 & 0 & 0\\ 0 & B_{22} & 0 & 0\\ 0 & 0 & B_{22} & 0\\ 0 & 0 & 0 & B_{33}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_1\\ u_2\\ u_2\\ u_3\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \hdashline y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc:cc} C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & 0 & 0 \\ \hdashline 0 & 0 & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{33} \end{array}\right] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \hdashline x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \tag{1-6}$$

从式(1-6)中可以看到子系统 $S_1$ 和 $S_2$ 已近似解偶，或者说我们可以从中获得解偶的子系统，即

$$S_i: \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{x}_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ii} & A_{i,i+1} \\ A_{i+1,i} & A_{i+1,i+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ x_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{ii} & 0 \\ 0 & B_{i+1,i+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_{i+1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_i \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{ii} & 0 \\ 0 & C_{i+1,i+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ x_{i+1} \end{bmatrix}, \quad i = 1,2 \tag{1-7}$$

在扩展过程中，我们选择扩展变换矩阵，即

$$V = \text{blockdiag}\,(I_{n_1}, I_{n_2} I_{n_2}, I_{n_3})^{\mathrm{T}}, \quad U = \text{blockdiag}\left(I_{n_1}, \frac{1}{2} I_{n_2}\ \frac{1}{2} I_{n_2}, I_{n_3}\right)$$

$$R = \text{blockdiag}\,(I_{m_1}, I_{m_2} I_{m_2}, I_{m_3})^{\mathrm{T}}, \quad Q = \text{blockdiag}\left(I_{m_1}, \frac{1}{2} I_{m_2}\ \frac{1}{2} I_{m_2},\ I_{m_3}\right)$$

$$T = \text{blockdiag}\,(I_{l_1}, I_{l_2} I_{l_2}, I_{l_3})^{\mathrm{T}}, \quad S = \text{blockdiag}\left(I_{l_1}, \frac{1}{2} I_{l_2}\ \frac{1}{2} I_{l_2}, I_{l_3}\right) \tag{1-8}$$

特别的，选择补偿矩阵为

$$M_A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & A_{12} & -A_{12} & 0 \\ 0 & A_{22} & -A_{22} & 0 \\ 0 & -A_{22} & A_{22} & 0 \\ 0 & -A_{32} & A_{32} & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_B = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{22} & -B_{22} & 0 \\ 0 & -B_{22} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_C = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & -C_{22} & 0 \\ 0 & -C_{22} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{1-9}$$

例 1-1 是根据定理 1-1，将系统 S 的重叠部分展开并得到解偶的两个子系统的过程，我们称之为重叠分解。重叠分解以系统的包含原理为理论基础，并将作为系统重叠分散控制的基本方法。

## 1.3 本书结构

本书包括7章，第1章为绪论。

第2章提出了线性随机离散时变动态系统的包含原理(Chen,1994;陈雪波，等,1997)。针对具有重叠互联结构的系统，详尽全面地介绍系统包含原理的理论框架和内容，其中包括基于约束类和聚集类包含条件，系统的状态、输入和输出、闭环系统、状态观测器、反馈控制器和最优性能指标的包含问题，重点在于系统各个部分包含的组合包含条件，即收缩条件。

第3章主要介绍系统的包含原理，在两区域重叠互联电力系统自动发电控制的重叠分散控制器设计方面的应用(Chen,1994;Chen,et al,1996;Stankovic,et al,1996,1999)。主要包括三种LQG动态控制器的设计方案，即重叠分散或不完全分散控制、完全分散控制和采用最少量观测信息的完全分散控制。其中，考虑到两区域子系统在模型扩展时的平衡问题，根据包含原理的不同条件提出了几种类型的系统包含模式，来设计系统的重叠分散控制器。控制设计基本上涵盖了系统包含原理的约束类和聚集类组合的包含条件。所有控制设计结果，通过系统的最优性能指标和次优度进行了评价和比较。

第4章中给出的自动车组系统的重叠分散控制器的设计(陈雪波,2001)是另一个包含原理比较经典的应用实例。根据具有链型结构车组系统中车辆之间的距离、速度和加速度的关系，将自动车组系统的模型描述成两两车辆为子系统的重叠互联模型。因此，应用系统的包含原理对系统模型进行重叠分解，设计自动车组系统重叠分散控制的算法，并给出了较为详细的仿真分析和研究。

第5章主要讨论两方面的内容。其一是介绍系统扩展应用的对偶问题——系统收缩的应用。根据系统包含原理的条件，给出系统模型降阶设计的步骤以及系统模型降阶的控制器设计，并应用于一个空间系统的模型降阶，其中主要考虑了系统的不完全收缩问题(Chen,1994)。其二是通过系统的对偶原理，提出了对偶系统的对偶包含问题(Chen,et al,2002(d),2004)。主要揭示了状态观测器和反馈控制器分别在直接收缩和间接收缩过程中约束类和聚集类包含条件的对偶性，从而阐述了原系统与其对偶系统之间约束类和聚集类包含条件的对偶关系。因此，系统重叠分散控制器的设计问题，可以在对偶包含原理的框架内来考虑。

第6章将系统的包含原理推广到系统中子系统的包含，特别考虑了链型、环型和星型等三种特殊重叠互联结构系统的包含(Chen,et al,2005,2007)。通过多重叠分解方法将系统分解为基本互联子系统对。从而，可以对特殊结构的重叠互联系统进行多重叠分散控制的设计。其设计方法用于四区域重叠互联电力系统AGC的重叠分散控制，其中考虑了某些子系统之间存在信息结构约束缺失的

情况。

第 7 章将特殊结构系统的包含进一步推广到一般结构系统的包含(Chen, et al, 2012)。根据基本互联子系统的对对分解方法,建立了研究一般复杂系统和大系统互联关系的广义包含原理,也称作置换包含原理。其特点是将原系统在线性空间中扩展,得到基本互联子系统分解的循环逆序子系统对。每个已解耦的子系统对作为系统的基本协调单元,同时进行各自的控制设计,以满足其稳定性和协调性。通过互联协调补偿器的设计和系统联结稳定性的判定(陈雪波,等,1987),给出系统扩展空间中的动态控制器。在满足系统包含的条件下,将动态控制器收缩并应用于原系统,作为系统一致性的协调控制。