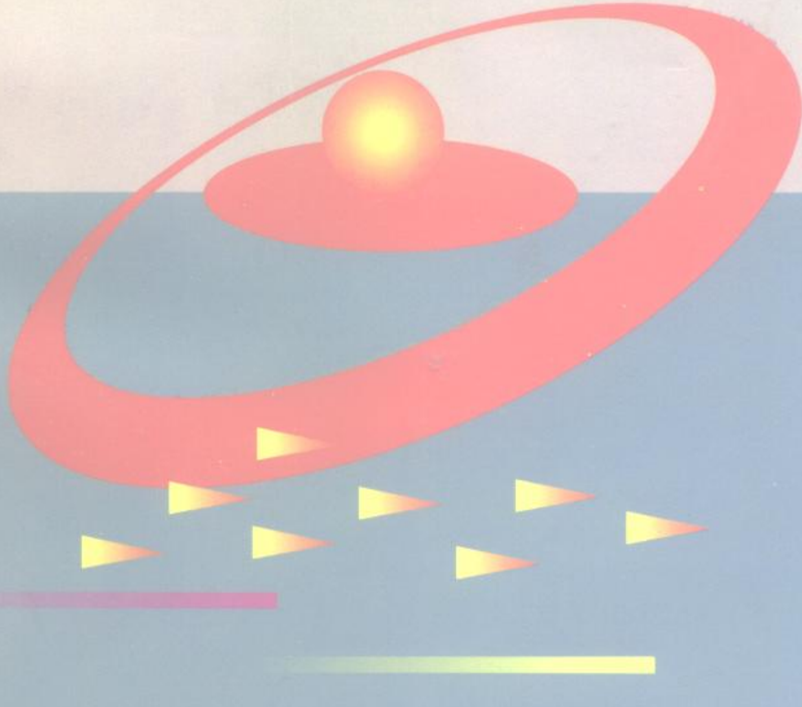
广义大系统的

分散控制与鲁棒控制

张庆灵 著



广义大系统的分散控制与鲁棒控制

张庆灵 著

国家自然科学基金资助项目
（项目批准号 69574004）
西北工业大学出版基金资助出版

西北工业大学出版社
1997 年 11 月 西安

(陕)新登字 009 号

V1150 63

【内容简介】 本书是作者根据他近几年的研究成果，特别是在西北工业大学航空宇航技术博士后流动站工作期间从事广义大系统分散控制与鲁棒控制研究所得到的结果，以及在东北大学为研究生讲授有关课程的基础上，收集当前国内外的最新研究成果整理撰写而成。全书共分九章，即广义大系统分散控制的实际背景及研究现状；涉及广义大系统分散固定模，分散能控性，分散传递零点，以及这些概念之间的关系；广义大系统的稳定性分析和控制问题，包括鲁棒稳定性问题、交联稳定性问题、动态补偿器问题、状态观测器问题、分散与鲁棒控制问题；还对离散广义大系统的分散控制问题进行了研究。本书总结了当前广义大系统分散控制与鲁棒控制理论发展的一些重要方面，利于引导读者迅速地进入广义大系统分散控制与鲁棒控制研究的前沿。本书是当前国内外这一研究领域第一部公开发表的专著，便于帮助读者有效地了解在控制领域中这一新的研究方向，具有一定的学术参考价值和收藏价值。

本书可供控制与系统科学、应用数学以及与之相关的工程与应用专业的研究人员及教师参考，也可作为相关专业的研究生与高年级本科生的选修课教材。

广义大系统的分散控制与鲁棒控制

张庆灵 著

责任编辑 王夏林

责任校对 樊 力

*

（710072 西安市友谊西路 127 号 电话 8493844）

全国各地新华书店经销

陕西省咸阳市印刷厂印装

ISBN 7-5612-0929-0/TP·117

*

开本：850×1168 毫米 1/32 印张：7.125 字数：170 千字

1997 年 11 月第 1 版 1997 年 11 月第 1 次印刷

印数：1—2 000 册 定价：19.00 元

序

众所周知，对于诸如电力系统、化工过程、大型空间结构和计算机通讯网络等大规模系统，集中控制将会使整个控制系统信息交换异常复杂，通讯费用十分昂贵，因而使得集中控制在大系统控制中变得非常不切实际。有鉴于此，一种为克服集中控制的上述缺陷而采用分散化结构的分散控制便在 70 年代应运而生，并显示出其十分光明的应用前景而受到控制理论界和工程界的高度重视和广泛研究。然而，分散控制由于采取了不完全的信息交换模式，使得控制系统出现了在正常的完全的信息交换模式下未曾产生的一些有趣而又不容忽视的问题。因此，20 多年来，大系统分散控制的研究一直成为很多学者研究的热点并取得了一系列重要的成果。

与此同时，随着现代控制理论与方法应用于工程系统的深入和向其它学科领域的渗透，一类更具广泛形式的系统被发现。它与我们通常讨论的正常系统相对应，被称之为“广义大系统”。自 70 年代 H. H. Rosenbrok 在讨论互联系统时提出广义大系统概念以来，人们又在经济管理、电子网络、生物工程和航空航天技术等领域发现了很多很多广义系统的实例。广义系统也因其理论上的学术价值和广泛的应用前景而吸引了国内外众多研究工作者的关注和重视。20 多年来，广义大系统的研究工作也取得了十分丰硕的成果，尤其是对线性定常广义系统的研究在理论上已渐臻完善。

广义分散控制系统既可看作为一般分散控制系统的自然延伸，又可被视为广义大系统的一种形式。它既具有区别于集中控制的分散控制系统的特征，又具有区别于正常情况的广义大系统的特点，因而在研究工作上更增加了不少新的特色。从 80 年代中期

广义大系统分散控制的研究成果在国际上首次公开发表后，10多年来，其研究工作一直成为国内外很多学者研究的一个热点并取得了很多研究成果。但时至今日，这一领域的研究工作仍方兴未艾。多数研究工作仅局限在分散控制系统的结构性质方面，其成果亦不够完善。在其它方面，尤其是在广义分散控制系统的控制与综合问题上，其研究成果尚不多见，有待于深入研究与探索。

为使更多的研究工作者，尤其是有志于从事这一领域研究的青年学者了解该领域的研究现状和掌握有关的一些知识，张庆灵博士在总结自己的研究工作和他人的研究成果的基础上写出了这本专著。它以代数方法作为处理问题的主要数学工具，行文流畅，论述严谨。全书大体可分为两个部分。第一部分对广义分散控制系统的结构性质进行了很好的阐述。作者根据自己的研究工作特色，把一些分散于众多出版物中的成果纳入自己统一设计的框架，使之各就其位，一目了然。第二部分内容主要涉及广义大系统的镇定与控制问题，其中的大部分是作者近几年来研究成果的总结，有其特色与独到之处。

值得提出的是这本著作是这一领域迄今为止公开发表的第一本专著，并且出自一位年轻学者之手，实属难能可贵。日出江花红胜火，春来江水绿如蓝。愿这本著作像一颗石子能激起这一研究长河的层层浪花。出现更多的成果，问世更多的专著。

李光泉

1997年7月

前　言

自广义大系统分散控制的首篇文章1986年在国际上发表之后，许多国内外学者致力于这一领域的研究工作，并取得了飞速的进展。尤其，国内的一些高校和研究机构更是做了出色的工作，不仅在理论上奠定了有关进一步研究的基础，而且在应用上，对经济管理、水翼艇、惯性导航系统和飞行器等实际问题的研究取得了一定进展。同时，国外对机器人、电子网络工程和机场管理等实际问题也作了一些应用研究。有关广义大系统的应用研究已在世界范围内悄然兴起。为了使有志从事于这一领域研究的读者了解和掌握有关知识和现状，我们撰写了这本专著。

本书是根据作者近几年的科研与教学工作总结撰写而成，介绍了当前在这一领域中对一些重要课题研究所得到的主要成果。这也是当前这一研究领域的第一部公开出版的专著。目的是向读者介绍广义大系统分散控制与鲁棒控制的基本理论和研究现状，使读者能在短期内方便迅速地掌握这一控制领域最新研究分支。全书分成九章，前五章介绍广义大系统分散控制的研究背景和理论基础，涉及广义大系统的分散固定模、分散能控性、分散传递零点以及它们之间的关系等。后四章讨论广义大系统的稳定性分析和控制问题，包括鲁棒稳定性问题、交联稳定性问题、动态补偿器问题、状态观测器问题以及分散与鲁棒控制问题等；还对离散广义大系统的分散与鲁棒控制问题进行了简要论述，结果与连续情况相平行。考虑到 Lyapunov 方程和 Riccati 方程是广义大系统鲁棒稳定性分析和控制在广义状态空间的基本工具，这里将有关的基本结论作为附录列在书后。读者可根据自己的兴趣和需要对本

书的内容进行选读。

本书适合于控制与系统科学、应用数学以及与之相关的工程与应用专业的研究人员及教师阅读与参考，也可供有关专业的研究生和高年级本科生作为选修课教材。为适合于本科生和研究生，这里将尽量使用代数方法作为论述的数学工具。一般要求读者具备线性系统理论、广义大系统理论和正常线性大系统分散控制理论基础，有关内容在本书中不加论述。

天津大学校长李光泉教授在百忙之中为本书作序，在此深表谢意。

借此作者要感谢东北大学理学院院长谢绪恺教授，东北大学研究生院常务副院长徐心和教授和西北工业大学校长戴冠中教授在工作上和学术上给予的有力帮助和指导，作者的成长与进步与三位恩师的辛勤培养是分不开的。同时，作者也要感谢西北工业大学出版社对出版此书的大力支持和帮助。谢绪恺教授在百忙中仔细审阅了原稿，并提出了许多宝贵的修改意见，作者在此表示衷心的感谢。国家自然科学基金委员会、中国博士后科学基金委员会、冶金工业部科学基金委员会、辽宁省科学技术基金委员会、中国科学院自动化研究所复杂系统工程学开放实验室和东北大学对作者的研究工作给予了多次的基金资助，尤其是本书的出版又得到了西北工业大学出版基金和西北工业大学自动控制系的资助，作者在此一并表示感谢。

由于作者水平有限和时间上的紧迫，书中定有许多不完善和遗漏之处，恳请读者指正。

张庆灵　于西北工业大学

1996年12月27日

目 录

第一章 绪　论

随着现代控制理论和应用研究的不断深入和发展，以及向其它学科的渗透，一类具有广泛形式的系统已经出现。这类系统表示为[1]

$$E\mathrm{d}\boldsymbol{x}/\mathrm{d}t = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}, t) \tag{1.0.1a}$$

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}, t) \tag{1.0.1b}$$

这里 $\boldsymbol{x}$，$\boldsymbol{u}$ 和 $\boldsymbol{y}$ 分别表示 n 维状态向量，m 维输入向量和 l 维输出向量；$\boldsymbol{E}$ 表示 $n\times n$ 阶矩阵，一般不满秩。这类系统通常称为非线性广义大系统。式(1.0.1a) 和式(1.0.1b) 又分别称为状态方程和输出方程。它们大量出现于经济管理[2]、电子网络[3]、机器人[4]、工业生产过程、生物工程和航空航天以及航海技术等领域[1,5~8]，具有广泛的实际背景。自 70 年代，它得到普遍关注与研究，并取得了一定进展[9~11]。本章将简要介绍有关课题的研究现状以及要研究的主要问题。

1-1 实际背景

当广义大系统(1.0.1) 为线性模型时，通常表示为

$$\boldsymbol{E}\mathrm{d}\boldsymbol{x}/\mathrm{d}t = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u} \tag{1.1.1a}$$

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x} \tag{1.1.1b}$$

这里 $\boldsymbol{A}$,$\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{C}$ 分别表示具有相应阶数的矩阵。假定广义大系统 (1.1.1) 正则，即矩阵($s\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}$) 的行列式不恒等于零。这时，广义大系统(1.1.1) 对给定的允许初始状态有唯一解。这一类系统模型来源于实际，对它的研究有着普遍性理论意义和实际意义。

下面我们举几个实际例子来说明。

例 1.1.1 熟知的动态投入产出模型[2](Leontief model)

$$\boldsymbol{B}\boldsymbol{x}(k+1)=[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B}]\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{d}(k) \tag{1.1.2}$$

式中，

$$\boldsymbol{x}(k)=[x_1(k)x_2(k)\cdots x_n(k)]^T$$
$$\boldsymbol{d}(k)=[d_1(k)d_2(k)\cdots d_n(k)]^T$$

$x_i(k)$ 表示第 i 个生产部门的产品总量；$d_i(k)$ 表示第 i 个部门向社会提供的最终产品量；$\boldsymbol{A}$ 为直接消耗系数矩阵；$\boldsymbol{B}$ 为投资系数矩阵。

当它不包含大修费用时，$\boldsymbol{B}$ 为奇异矩阵，式(1.1.2) 表示一个实际的离散广义大系统。一般把 $d_i(k)$ 看作集中控制条件下的输入。从信息传递角度讲，每个 $d_i(k)$ 享有的信息量是不一样的。因此，把这个系统作为一个广义分散控制大系统来考虑会适宜一些。

例 1.1.2 惯性导航系统中的模型经分解后有(这里只给出慢子系统部分)[6]

$$\mathrm{d}\boldsymbol{x}_s/\mathrm{d}t=\boldsymbol{A}_{11}\boldsymbol{x}_s+\boldsymbol{A}_{12}\boldsymbol{z}_s+\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u}_{1s} \tag{1.1.3a}$$

$$0=\boldsymbol{A}_{21}\boldsymbol{x}_s+A_{22}\boldsymbol{z}_s+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{u}_{2s} \tag{1.1.3b}$$

$$\boldsymbol{y}_{1s}=\boldsymbol{C}_1\boldsymbol{x}_s,\boldsymbol{y}_{2s}=\boldsymbol{C}_2\boldsymbol{z}_s \tag{1.1.3c}$$

易见，式(1.1.3) 代表一个广义分散控制大系统模型。

例 1.1.3 两机械手协助抓一物体的动力学方程[4]

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_1(\boldsymbol{q}_1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{M}_2(\boldsymbol{q}_2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m\boldsymbol{I} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \mathrm{d}\boldsymbol{p}_1/\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}\boldsymbol{p}_2/\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}^2\boldsymbol{p}/\mathrm{d}t^2 \\ \mathrm{d}^2\boldsymbol{f}_1/\mathrm{d}t^2 \\ \mathrm{d}\boldsymbol{f}_2/\mathrm{d}t \end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{T}_1 + \boldsymbol{G}_1(\boldsymbol{q}_1,\boldsymbol{p}_1) + \boldsymbol{J}_1^T(\boldsymbol{q}_1)\boldsymbol{f}_1 \\ \boldsymbol{T}_2 - \boldsymbol{G}_2(\boldsymbol{q}_2,\boldsymbol{p}_2) + \boldsymbol{J}_2^T(\boldsymbol{q}_2)\boldsymbol{f}_2 \\ -\boldsymbol{f}_1 - \boldsymbol{f}_2 - m\boldsymbol{g} \\ \boldsymbol{H}_1(\boldsymbol{q}_1) - \boldsymbol{P} \\ \boldsymbol{H}_2(\boldsymbol{q}_2) - \boldsymbol{P} \end{bmatrix} \tag{1.1.4}$$

式中，$\boldsymbol{M}_i(\boldsymbol{q}_i)$ 表示惯性矩阵，$\boldsymbol{G}_i(\boldsymbol{q}_i,\boldsymbol{p}_i)$ 表示 Coriolis Centrifugal and Gravitational 效应，m 为所抓物体的质量，$\boldsymbol{T}_i$ 为第 i 个机械手的输入力矩，一般视为控制量，$\boldsymbol{P}$ 代表所抓物体的中心位置坐标，$\boldsymbol{H}_1(\boldsymbol{q}_1)$ 和 $\boldsymbol{H}_2(\boldsymbol{q}_2)$ 分别表示两机械手的直接运动学关系，$\boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q}_i)$ 表示 Jacobian 矩阵。显而易见，控制量 $\boldsymbol{T}_i$ 只依赖于第 i 个机械手，$\boldsymbol{p}_i = \mathrm{d}\boldsymbol{q}_i/\mathrm{d}t$。从控制角度说，式(1.1.4) 代表一个非线性广义分散控制大系统。

例 1.1.4 一个电子网络模型为[3]

$$\begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{d}x_1/\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}x_2/\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}x_3/\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}x_4/\mathrm{d}t \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -r & r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1/N \\ N_2/N \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \tag{1.1.5}$$

式中，$x_i, i = 1,2,3$，表示通过相应电感器的电流；L_i 表示第 i 个电感器的感抗；x_4 表示流经电阻为 r 的电阻器时的电压降；N_i 和 N 表示互感器的系数。这些量值为在实数域上的待定数，这是一个典型的结构广义集中控制大系统。

例 1.1.5 包括管理在内的石油裂化模型为[9]

$$\mathrm{d}\boldsymbol{x}_1/\mathrm{d}t = \boldsymbol{A}_{11}\boldsymbol{x}_1 + \boldsymbol{A}_{12}\boldsymbol{x}_2 + \boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u} + \boldsymbol{f}_1\boldsymbol{v} \tag{1.1.6a}$$

$$0 = \boldsymbol{A}_{21}\boldsymbol{x}_1 + \boldsymbol{A}_{22}\boldsymbol{x}_2 + \boldsymbol{B}_2\boldsymbol{u} + \boldsymbol{f}_2\boldsymbol{v} \tag{1.1.6b}$$

式中，$\boldsymbol{x}_1$ 表示裂化过程的物理量状态；$\boldsymbol{x}_2$ 表示管理，政策和效益等状态；$\boldsymbol{u}$ 表示调节；$\boldsymbol{v}$ 表示附加扰动。这是一个带有扰动的广义集中控制大系统。

例 1.1.6 水翼艇的纵向运动方程为[8]

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{d}h_1/\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}h/\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}g_1/\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}g/\mathrm{d}t \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -a_{15} & 0 & a_{16} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_{35} & 0 & -a_{36} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h \\ g_1 \\ g \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} b_{11} \\ 0 \\ b_{21} \\ 0 \end{bmatrix} r_1 + \begin{bmatrix} b_{12} \\ 0 \\ b_{11} \\ 0 \end{bmatrix} r_2 + \begin{bmatrix} z_s \\ 0 \\ m_s \\ 0 \end{bmatrix} \tag{1.1.7a}$$

$$y_1 = [c_{11}\ c_{12}\ c_{13}\ c_{14}\ c_{15}\ c_{16}]\boldsymbol{z} \tag{1.1.7b}$$

$$y_2 = [c_{21}\ c_{22}\ c_{23}\ c_{24}\ c_{25}\ c_{26}]\boldsymbol{z} \tag{1.1.7c}$$

式中，$\boldsymbol{z}^T = [h_1\ \mathrm{d}h_1/\mathrm{d}t\ h\ g_1\ \mathrm{d}g_1/\mathrm{d}t\ g]$；$h$ 表示水翼艇的重心偏离标准位置的距离，即水翼艇由海的波浪引起的垂直方向的位移变化；h_1 表示水翼艇的纵向偏移角度；r_1 和 r_2 分别表示前后襟翼角的控制量；z_s 和 m_s 分别表示干扰波浪力和干扰波浪力矩；c_{ij} 表示系统状态的组合系数；a_{ij} 和 b_{ij} 随波浪的不同呈慢性变化而往往使

$$E = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

是奇异的。此时，式（1.1.7）是一个带有干扰项的广义时变分散控制大系统。

此外，我们熟悉的 N 个子系统组成的交联控制大系统模型

$$\mathrm{d}\boldsymbol{x}_i/\mathrm{d}t = \boldsymbol{A}_i\boldsymbol{x}_i + \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{u}_i + \boldsymbol{C}_i\boldsymbol{z}_i \tag{1.1.8a}$$

$$\boldsymbol{z}_i = \sum_{j=1}^{N}\boldsymbol{D}_{ij}\boldsymbol{x}_j \tag{1.1.8b}$$

合到一起表示为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \mathrm{d}\boldsymbol{x}_i/\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}\boldsymbol{z}_i/\mathrm{d}t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_i & \boldsymbol{C}_i \\ 0 & -\boldsymbol{I} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_i \\ \boldsymbol{z}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_i \\ 0 \end{bmatrix}\boldsymbol{u}_i + \sum_{j=1}^{N}\begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{D}_{ij} \end{bmatrix}\boldsymbol{x}_j \tag{1.1.9}$$

这是一类特殊形式的广义交联控制大系统。这里的矩阵具有适当的阶数。

上面这些例子，分别从经济管理、航空、航天、航海、机器人、电子网络和工业生产等几个方面举例说明了广义大系统的实际背景。它们分为离散、线性、非线性、结构和干扰五种情况。尤其强调了宜于分散控制的客观条件。除此之外，一些早期文献中还从不同方面给出了有关广义大系统模型的实际例子。可以说，广义大系统代表了大量经济管理模型和物理模型，有着广泛的实际背景。有必要给予系统的分析和研究。

1-2　研究现状

广义分散控制大系统（以下简称广义大系统）通常用线性微

分方程组和代数方程组表示为[12]

$$E\mathrm{d}x/\mathrm{d}t = Ax + \sum_{i=1}^{N} B_i u_i \qquad (1.2.1a)$$

$$y_i = C_i x, \qquad i = 1,2,\cdots,N \qquad (1.2.1b)$$

式中，x，u_i 和 y_i 依次表示 n 维状态向量，m_i 维输入向量和 l_i 维输出向量；E，A，B_i 和 C_i 分别表示具有相应阶数的矩阵。假定广义大系统（1.2.1）正则，即 $\det(sE - A) \neq 0$，这里“det”表示矩阵的行列式。为了书写简便，有时记广义大系统（1.2.1）为（E，A，B，C）。

广义（分散控制）大系统问题也可以说是广义大系统（见式（1.1.1））的分散控制问题。一方面是由实际问题产生的，许多实际模型的控制结构本身具有分散性，因而适合于进行分散控制；另一方面，从信息结构上讲，每个子系统的输入只能得到它对应的子系统的输出信息时，有效的控制只能采取分散控制。另外，从理论意义上讲，广义大系统的分散控制，也是正常大系统分散控制的自然推广。正因为如此，才使得对于广义大系统的研究，在短暂的几年里取得飞跃的发展。由于广义大系统具有正常大系统所不具有的无穷零极点、脉冲解和带有多项式形式的传递函数阵[9]，在研究上自然又增加了不少新的特色。

在1986年美国控制与决策学术会议上（IEEE CDC），加拿大多伦多大学的Chang和Davison两人发表了关于广义大系统分散控制内容的首篇文章，其中涉及与分散伺服机问题有关的一些理论性课题，提出了广义大系统有穷分散固定模（generalized decentralized fixed modes）和脉冲分散固定模（impulsive decentralized fixed modes）两个重要概念[12]。继此之后，国内的一些高校和科研机构展开了深入系统的研究，并取得了一系列理论成果。Xie利用导出系统概念研究了广义大系统存在有穷分散固定模的判别问题[13]。王朝珠和王恩平独立地从闭环正则大系统研