

控制科学中的复杂性¹⁾

黄琳 段志生

(北京大学力学与工程科学系系统与amp;控制研究中心 北京 100871)

(E-mail: hl35hj75@pku.edu.cn)

摘要 首先讨论控制科学中的传统复杂性观点, 复杂性主要根源于非线性, 非定常性与不确定性, 高维数和系统模式的非单一性. 其次对于大系统提出一些新问题, 并且指出对于大系统关联是产生复杂性又一主要根源.

关键词 高维数, 模式非单一, 关联

中图分类号 TP273

Complexity in Control Science

HUANG Lin DUAN Zhi-Sheng

(Center for Systems and Control, Department of Mechanics and Engineering Science,

Peking University, Beijing 100871)

(E-mail: hl35hj75@pku.edu.cn)

Abstract There are two parts in this paper. One is about the traditional viewpoints on complexity in control science. The roots of complexity are mainly from nonlinearity, model uncertainty, high dimensions, and model non-singleness. The other part is about some new problems in large scaled systems. It is pointed out that the interconnection among subsystems is another root to produce complexity.

Key words High dimensions, model non-singleness, interconnection

1 传统的看法

控制科学是一门技术科学^[1]. 其任务是在给定一个受控对象后, 按工程或其它需要给定一个性能要求, 然后再依据实际实现上的限制, 设计控制器来控制这个对象以满足要求. 从理论上讲, 控制理论要回答的问题正是针对上述要求下能不能做和怎样去做两个问题, 这从

1) 国家自然科学基金(10272001, 60204007)与重点基础研究专项经费项目(G1998020302)资助

Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China(10272001, 60204007) and the National Key Basic Research Special Fund(G1998020302)

本文是由在一些国内、国际会议上宣读过的同名报告修改补充而成

收稿日期 2001-11-19 收修改稿日期 2002-05-14

Received November 19, 2001; in revised form May 14, 2002

控制理论几十年的发展可以清楚地说明. 正因为如此, 控制理论的发展总与当时的工业需求与科技水平紧密相关. 其成果的好坏首先看其是否解决控制科学中面临的问题而不是其他标准, 例如所用数学工具的难度. Automatica 杂志 1994 年第 4 期发了一个专辑^[2-11], 根据 IFAC 在 1993 年提出的一个 Benchmark, 由全世界 9 个研究机构来设计控制器, 看用什么办法更好, 即对一个系统只给出对应输入输出响应, 要求设计控制器以控制该系统. 最后, 自适应预测控制, 模型参考自适应, 鲁棒极点配置, 自适应 PI 控制, H_∞ 控制等各显神通. 看来一个时变的二阶系统, 在精度要求不高时, 各种方法都行, 差不多, 而在精度要求高时, 哪个理论也显现不出明显的优越性. 这刚好说明控制问题的复杂性和有效理论与方法的不足.

传统的控制系统由一个控制对象(可能包含传感器等单元)和主要是控制器的反馈装置组成(参见图 1), 以完成人们对输出的预期要求. 控制科学的一个主要任务就是提供理论与方法使能根据预期要求设计控制器. 早期的控制系统相对简单, 这主要表现在系统规模小, 回路少, 所提问题一般可用线性模式进行研究, 而且模式的表现形式(数学上)也是单纯的. 对于工程中的各种要求(超调, 过渡过程时间乃至震荡方面的要求)有时由于不要求精确, 采用工程上以列线图的方式进行设计也能满足要求. 但随着科技的发展, 现今的控制科学研究的系统^[12,13]其复杂程度的增大和控制要求的提高是并存的, 这样就使得原有的方法失效, 而又很难找到新的方法以满足要求. 于是, 人们纷纷把在控制科学中遇到的难题归结为复杂性, 具体有: 模式的无法或难以确定; 问题的难以研究与给出解答; 用计算机难以计算.

造成这些问题的因素主要在于非线性、非定常性与不确定性、高维数和系统模式的非单一性.

20 世纪 60 年代发展起来的线性控制理论已经基本完善. 从方法上讲, 其成功应归功于线性代数这一工具的比较完善和线性问题在计算上的相对简单. 对于非线性控制系统, 一方面利用微分几何进行非线性问题研究时其结果远不如其用于物理时那样辉煌; 而另一方面在控制中出现的很多非线性根本就不是解析的(饱和, 摩擦, 回滞, 死区). 这些在控制系统中出现的非线性完全不象物理学中的非线性那样美妙而显得特别别扭. 这类非线性不仅分析起来十分棘手, 而且从数学上如何说清在这类闭环系统中什么是解也并不容易. 在运动体控制上常碰到各种约束, 其中一些是不可积的, 即非完整的, 有时有些约束是不等式的, 这些都增加了解决问题的困难. 这类问题在车辆系统的受控动力学上已是常见的, 特别由于速度的提高而更为尖锐. 这使得控制工程师仇恨与害怕非线性远超过对非线性的热爱而寄予期望. 就以非线性系统控制而言, 不同的应用背景, 连稳定性的提法都不一样, 研究兴趣已不再限于系统一个平衡点附近的性质, 而着眼于总体性质, 例如多平衡态稳定性^[14]. 研究这些控制问题远比讨论一个平衡位置附近的性质要复杂. 由于实际的需要, 这种复杂性是无法避免的.

系统的非定常性又称时变性, 是指系统的模式不是固定不变的. 以时变线性系统为例, 一方面可以用适当的数学工具将常系数线性系统的众多结论平行地在这类系统上建立起来, 但另一方面, 它又不同于常系数线性系统, 几乎没有什么合适的解法与算法来解决其面临的问题. 有人认为时变问题的困难程度并不亚于非线性问题, 这是很有道理的. 这里还是指那些系统虽然时变, 但模式还是可以确定的而言.

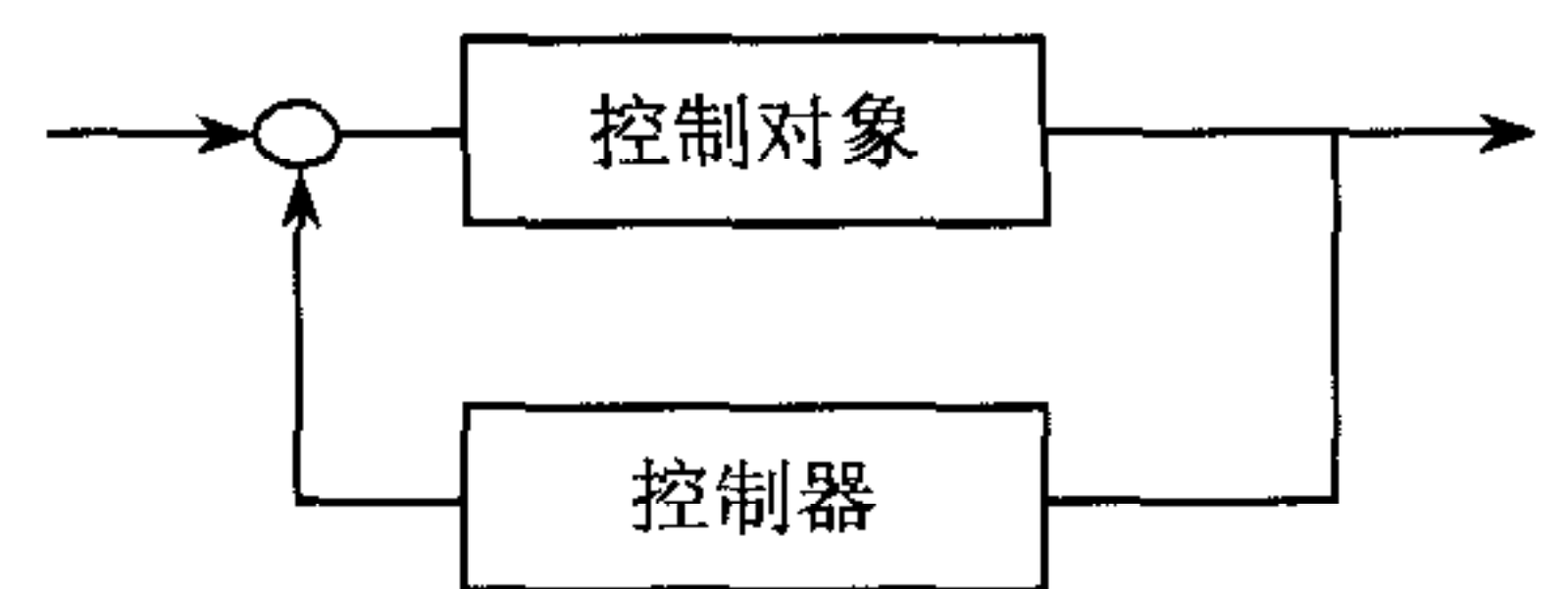


图 1 反馈系统

Fig. 1 Feedback system

控制系统所工作的环境以及系统本身常常具有不确定性. 马克思在资本论序言^[15]中曾指出“物理学家是在自然过程表现得最确实、最少受干扰的地方观察自然过程的, 或者, 如有可能是在保证过程以其纯粹形态进行的条件下从事实验的”, 关肇直也曾经在文章中特别提到这一点^[16]. 这一思想从 19 世纪直到今天一直是物理学研究的一个特点. 控制科学与物理学, 控制装置总是在非纯化的环境中工作. 因此, 控制科学的研究必须针对非纯化的环境, 即必须讨论不确定性对系统性能的影响和研究能适应这种不确定性的控制器的设计与对应的理论. 随着控制科学应用的广泛化, 不确定性是处处皆有的, 为了保证系统能正常工作, 人们想出了多种办法来对付不确定性. 例如, 自适应控制、鲁棒控制等等. 在考虑到系统中存在不确定性这一情况, 研究时一个自然的想法是将不确定性出现的可能均予以考虑, 这样一个实际的系统就只好用多个(常常是无穷多个)系统模式(即系统族)来描述, 而系统族对某个性能是否具有凸性就成为关键. 不幸的是就连稳定性在系统族中也不具有凸性, 即两个系统是稳定的并不能保证其不确定参数之间作凸组合时对应系统还能保证稳定. 于是如何在一个系统族中选取代表, 只要这些代表稳定就保证整个族稳定, 就成了一个有价值的课题. 但当这些代表的数目比较多时, 判定的困难依然存在. 在 Blondel V 和 Gevers M 的一篇文章^[17]中指出“任给三个控制对象, 判断是否存在一个控制器对这三个对象均能镇定这一问题本身是非有理判断的, 即由三对象的数字信息经四则运算和逻辑运算将无法判断对应控制器是否存在”. 这如同由有理数出发经有限步四则运算和逻辑运算无法实现无理数一样. 这一研究和相关研究的推动使控制理论界出现了一批工作, 讨论什么问题是有理判断的和什么样的控制器算法是非 NP 复杂的. 这反映了在处理不确定性问题上的复杂性. 近来人们已开始采用一种新的描述方式, 即微分包含来描述系统族的问题. 这种描述的系统解的唯一性基本上没有保证. 于是就衍生出关于解簇的性质、最大解、极端解、集合映射…的研究. 这比在由经典微分方程框架界定的问题要复杂得多.

高维数是现今控制科学面临的又一难点. 一个卫星用的太阳能帆板, 由于轻与薄的要求, 就只能用弹性体来刻画. 就连卫星本身的控制用刚体模型代替弹性体已经出了不少事故, 而弹性体本质上却是无穷维的. 无穷维系统^[18]从本质上会出现一些在有限维系统中不可能出现的现象, 例如在时不变情况下也不能简单地用特征值判断稳定性、出现波动现象, 以及在系统可控、可观、可镇定等一系列的问题上与有限维系统很不一样的结论. 即使是有限维的系统当维数较高时也依然带来大量困难. 一个自然的想法是用低维近似模型来代替真实的高维对象, 即各种意义下的模型降阶. 利用近似模型设计测量与控制, 然后装在真实的高维系统上, 其主要问题是此时测量到的系统信号已不再是设想的近似系统的信号. 而控制作用也不能期望真实系统象近似系统一样那样作出合乎要求的响应. 这种真实系统由近似系统逼近在信息上的多余常称为溢出, 而控制溢出与输出溢出的影响都是令人头疼的. 模型降阶是用一个低阶模型来代替真实系统, 而与之相类似的则是用若干个互相关联较小的小系统来代替真实的高维系统. 这种思想来源于解代数方程组的分块迭代, 其主要出发点是希望尽量用小系统的办法来解决大系统的问题, 这种思想在 60 年代的所谓大系统的分解研究中曾热过不短时间, 也得到了内容大致雷同的大量文章, 正如没有免费午餐这一基本事实所揭示的, 这种恐惧关联并希望尽可能压低其作用的简单想法必然带来很大的保守性. 同样是 60 年代有人提出如何在组成大系统的子系统中重视协调作用, 但可惜这一思想始终没有实质性进展.

控制理论从其数学模式常可分为连续型与离散型的,这两种系统中的状态都是时间的函数,其动态特性分别采用微分方程与差分迭代方程描述这类系统.这两类系统的研究成果已相当丰富而且在众多问题上其成果可以互通,即采用适当的数学工具就可以将连续系统的成果转植到离散系统上,并且反过来也一样.这两类系统看来比较类似相当亲和,但当他们组合在一起时,就会带来一些很复杂的问题,这是所谓混杂(hybrid)系统的最简单的一种.当有多个采样器,其采样周期不可公度时,这种混杂系统至今还不存在合适的理论进行研究.80年代开始出现的离散事件动态系统(DEDS)经过20年的发展,显示出这种不是以时间为基准来研究动态过程和控制的控制的系统比起以往的动态系统具有更大的复杂性.但这一系统不仅仅反映很多工程实际,而且在近代通讯、计算机科学中均有广阔的应用前景.遗憾的是至今对它的研究还缺乏有效的方法,特别是在如何对这类系统进行控制器综合方面.当一个系统是由DEDS和通常的动态系统组成时,这种分层的上层是基于运筹,而下层基于动态系统的混杂系统的研究表现出一种两重性,即一方面反应了大量的工程系统实际而另一方面是理论研究的一筹莫展,这是不同模式的系统集成在一起的复杂性的代表.

2 新的问题与机遇

传统的控制理论都是建立在信息流基础上的,对于一个单个系统基于信息反馈可以设计控制使其具有预期的品质,在这方面传统控制理论已发展得很完善.但是一些单个子系统通过相互间的信息传递可以产生复杂的大系统,对于一般的大系统目前还没有较好的统一处理方法.由此可见,系统间的信息关联是产生复杂性的一个根源.由于利用系统的联网以提高效率和大量复杂的具有多个子系统组合的系统的大量出现,使得这一复杂性变得日益突出.

大系统理论从20世纪70年代至今,曾经热了一下又长期停滞不前,有很大程度上是由于人们习惯于用处理小系统的思维和方法去处理大系统的问题.这同生物力学发展的初期,人们只是将生物的器官当作无生命的对象,再用力学方法分析,即用死物力学的思维研究生物力学类似.现今的大系统问题由于联网而变得突出起来,这既是指例如大的电网,交通网...的出现,也指由于大量通讯数据交换、收送、处理的现代大网络.一方面希望将小系统联结起来以更好地发挥效益,这就要求充分发挥关联的作用,而另一方面现在大系统研究的思想至少在稳定性上则仍寄希望于小系统本身稳定而后压低关联的影响,使大系统实际上成为若干少关联的小系统的并立,这就成了一个相互矛盾的局面.这一矛盾说明现行研究大系统的不少做法实际上并不能满足人们对大系统的厚望.

神经网络的出现与其奇妙的功能给人以启示,并对人们长期以来畏惧与逃避非线性的心理产生了很大震动.事实上大量的线性元件组合在一起并没有给人展示新的天地,而一定数量的非线性元件组合在一起,从总体上却显示出一种崭新的效能,这种1加1可能大于2的前景反映出非线性元件再经过迭加以后产生的奇妙结果.它启发了人们从一种还原论思潮中的觉醒,即不要总是把系统分得越简单越好,可能把简单的系统集成起来形成一个综合的整体将更有利于实现控制学家的目的.对于大规模的电网系统,一个合理的想法应该是研究如何控制,以使大事故不发生或概率成为最小而允许以小事故发生为代价.一个复杂的系统要求其每个子系统均处于最优状态是很难实现而且是没有必要的.以社会经济现象为

例,在市场经济条件下,发展速度快也常常以局部企业的亏损乃至破产为代价,这正象具有某些特定关联的大系统一样,要使系统整体稳定,常常需要有部分子系统不稳定,也就是这类系统的局部子系统与整体系统不可能同时稳定.因此对于大系统而言,如何从总体上提出指标,并设计控制使对应指标满足要求就成为研究复杂大控制系统的一个重要任务.

由子系统组成的大系统从总体的观点与从个体的观点进行研究是研究的两个方面.对一个动物个体的解剖并不能真正了解动物种群的演化,而要了解这一点还要把动物种群作为一个整体并将它放在更复杂的系统中进行研究才有可能.这是从生态系统研究的基本考虑.

复杂的控制系统是人为的系统,在人们构造这种系统时时常是按传统的观念进行的,传统的观念在飞机制造上首先想到的是在无控制时飞机应是稳定的,但现今先进的飞机却是可以使机翼活动使其上对应的空气动力特性能由控制作用来布局.这是人们冲破传统看法取得成功的一个例子,类似的要求冲破传统看法的事例很多.事实上传统的控制观念从不要求一个大系统中的子系统之间能互相帮助,而是力求彼此孤立,以邻为谿,即尽量减少彼此的往来.所谓分散控制的思想基本上也是由各子系统的信息建立局部控制以保证总体的性能,而并不考虑子系统之间的互相帮助.传统的控制器设计从不考虑与本身系统之外的其它系统之间的协调,因而如何实现子系统之间的组织,相互协调以使实现 $1+1>2$ 的效果.特别是在一些子系统出现故障时,别的子系统能给以补救使系统总体不致受损过大而子系统本身又赢得了修复的时间,这种机制相当于赋予大系统一种生机.这样,在子系统之间就有可能实现盲人与跛子之间的互相帮助,而不是未经配合的陌生人进行三足竞走时的别扭.要做到这一点,在子系统之间关联与信息交换作为设计控制时应该利用的原则而不是尽量互相隔离.在研究不同系统的合作,特别是不同具有残缺的系统之间的合作,关键在于首先应有一个符合这类特征的模型,而研究这类问题一般化的系统理论将是难以奏效的.最近在这方面也出现了一些工作^[19],两个控制有效(作用不为零)的子系统可以通过关联实现整体稳定.

在一个复杂大控制系统中,为了运行正常必须有一个分层递阶的结构,即从总体上应有控制器或协调器来从总体上处理好子系统之间的协调、互相配合,而在子系统上又应有控制器,其主要任务是控制好子系统本身.总体上与子系统上的控制器的时间常数将有大的量级上的区别,这刚好对应系统在总体上的变化与局部子系统中变化在时间量级上的不同.为了总体的目标子系统应处于合适的地位,在这方面目前在工业大过程的优化中已原则上有了一些优化算法^[20].但从理论上讲,当总体与子系统间具有不同工作模型时,例如上层基于运筹优化而下层是普通动态模型,或上层是 DEVS 下层是普通动态模型时,在上下层之间合适的接口和描述问题的合理的理论提法与解决方法上,……都有很多问题需要解决.

在力学研究中,由于被研究问题的尺度的不同而分为宏观的、微观的和处于两者之间的细观力学.这三个范围内讨论的问题与处理方法均很不一样,但其间的界限并不清楚.从系统的角度,单个简单的系统、由子系统组成的系统和大规模的系统从问题提法与研究方法上自然应有差别.但如何根据系统的规模,所提要解决的问题给出不同的界定,进而针对不同类别的系统与问题寻求合理的研究方法也是具挑战性的.

从物质系统运动的分类考虑,大致可分为机械运动和与之类似的物理运动、化学运动、生物的带生命特征的运动,以及社会运动等等.这些运动形式来源于不同特征的系统.目前的控制科学基本上只研究物理运动这一层次.从控制科学的角度如何将研究对象由物理运动的对象扩展到其他系统运动形式则更是意义深远的.在这方面长期以来控制学家研究问

题的思想方法主要限于“经典科学”的思维,如何建立适应这类新形式思维的理论与方法也是十分重要的.

以系统科学与经典科学相结合、以更高运动形式为背景来研究复杂动态系统的控制,其前景将十分诱人.

3 结束语

控制科学自从 20 世纪 30 年代开始发展至今,经历了经典控制理论和现代控制理论,目前它的发展正经历新的挑战.在经典控制理论时期,由于积分变换与常微分方程这些上个世纪就已出现的数学工具就足以给出其研究的理论基础,而在应用中则配合以各种带很强工程色彩的图表,不存在采用计算机进行复杂处理问题的情况.20 世纪 60 年代进入现代控制理论,一方面是大量成套的现代数学工具的应用并为之提供坚实的数学基础,另一方面则是计算机的大量应用,但从处理系统的模式上依然是相对简单的,其复杂性的问题(非线性,不确定性,高维数与非单一模式)也常常是互相分离的.当前面临的挑战是这些复杂性常并存于一个具分层结构的大系统之中.而作为更为复杂对象的控制理论的研究目前几乎没有什么实质性的进展,这既是一个挑战也是一个很好的机遇.

有人认为相对论的出现是对牛顿力学的否定,准确地说相对论的出现是界定了牛顿力学的适用范围并给出该范围以外的基本规律.但无论从研究规模,应用广度,今天相对论比起牛顿力学说来依然处于少数.控制科学中的复杂性问题可能也是一样,需要大量投入研究的依然是传统的复杂性问题.在非线性,不确定性,高维数与非单一模式这些方面,仍然存在着大量问题急需解决.而且现今控制系统中常常是这些因素同时出现,其难度亦大幅增加.新的综合性的复杂性问题已经提在面前,必须进行研究,而这方面的进展与突破,其意义将十分深远,影响也很巨大.但是新的问题能否用传统的、成熟的工具来解决,是一个值得研究的问题.建立在数学、计算机科学、系统科学、智能科学等学科之上的新复杂控制科学将可能是 21 世纪所要建立的新的体系.

References

- 1 Tsien H S. Engineering Cybernetics. New York: McGraw-Hill Book Company, 1954
- 2 Graebe S F. Robust and adaptive control of an unknown plant: a benchmark of new format. *Automatica*, 1994, **30**(4): 567~575
- 3 Chisci L, Giarre L, Mosca E. Indirect and implicit adaptive predictive control of the benchmark plant. *Automatica*, 1994, **30**(4): 577~584
- 4 Cook P A. Application of model reference adaptive control to a benchmark problem. *Automatica*, 1994, **30**(4): 585~588
- 5 Larminat Ph De, Houizot P. Application of ACSYDE(Automatic control system design) to the IFAC-93 benchmark. *Automatica*, 1994, **30**(4): 589~591
- 6 Foss B A, Wasbo S O. Benchmark IFAC 93: adaptive predictive PI-control of an unknown plant. *Automatica*, 1994, **30**(4): 593~598
- 7 Hecker O, Knapp T, Isermann R. Robust adaptive control of a time varying process using parallel recursive estimators. *Automatica*, 1994, **30**(4): 599~604
- 8 M'saad M, Hejda I. Partial state reference model(adaptive) control of a benchmark example. *Automatica*, 1994, **30**(4): 605~613
- 9 Postlethwaite I, Whidborne J F, Murad G, Gu D W. Robust control of the benchmark problem using H- infinity

- methods and numerical optimization techniques. *Automatica*, 1994, **30**(4): 615~619
- 10 Yoon T W, Clarke D W. Adaptive predictive control of the benchmark plant. *Automatica*, 1994, **30**(4): 621~628
- 11 Zhou T, Kimura H. Robust control of the sydney benchmark problem with intermittent adaptation. *Automatica*, 1994, **30**(4): 629~632
- 12 Huang L, Qin H S, Zheng D Z, Zheng Y P. The conception and prospects of complex control systems theory. *Acta Automatica Sinica*, 1993, **19**(2): 129~137(in Chinese)
- 13 Xie H M. Complexity and Dynamic Systems. Shanghai: Shanghai Science and Education Publishing House, 1994(in Chinese)
- 14 Leonov G A, Ponomarenko D V, Smirnova V B. Frequency Domain Methods for Nonlinear Analysis: Theory and Applications. Singapore: World Scientific, 1996
- 15 Marx K. Preface of 《On Capital》. Selected Works of Marx K and Engels F, Second Edition. Beijing: People's Publishing House, 1972(in Chinese)
- 16 Guan Z Z. Identification and control of complex systems. Collected Works of Guan Zhao-Zhi. Beijing: Science Publishing House, 1986. 175~178(in Chinese)
- 17 Blondel V G, Gevers M. Simultaneous stabilizability of three linear systems is rationally undecidable. *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, 1994, **6**(2): 135~145
- 18 Curtain R F, Zwart H J. An Introduction to Infinite Dimensional Linear System Theory. New York: Springer-Verlag, 1995
- 19 Duan Z S, Huang L, Wang J Z, Wang L. Harmonic control between two systems. *Acta Automatica Sinica*, 2003, **29**(1): 14~22
- 20 Wan B W, Huang Z L. Online Stable Optimal Control of Large Scale Industrial Processes. Beijing: Science Publishing House, 1998(in Chinese)

黄 琳 北京大学力学与工程科学系教授。研究兴趣包括鲁棒控制, 动力系统稳定性等。

(**HUANG Lin** Professor at the Department of Mechanics and Engineering Science, Peking University. His research interests include robust control, stability of dynamic systems.)

段志生 2000 年在北京大学获博士学位, 2002 年开始在北京大学力学与工程科学系工作。研究兴趣包括鲁棒控制, 大系统稳定性, 线性矩阵不等式。

(**DUAN Zhi-Sheng** Received his Ph. D. degree from Peking University in 2000. Now he is working with the Department of Mechanics and Engineering Science. His research interests include robust control, stability of large scale systems, linear matrix inequality.)