

1987

中国自动化学会首届过程控制科学报告会论文集
工业过程模型化及控制

主编 孙优贤 钱积新

浙江大学出版社

中国自动化学会首届过程控制科学报告会论文集

工业过程模型化及控制

主 编 孙优贤 钱积新

浙江大学出版社

内 容 简 介

本书全面地介绍了全国高等院校过程控制领域中最新的科研成果。第一部分介绍了现代控制理论的新发展和新成果；第二部分着重反映了机理建模、辨识建模的新方法和应用实例；第三部分主要是控制系统的设计和综合，提出了一系列新方法和新程序；第四部分介绍了现代控制理论的应用及其显著的经济效益。

本书可作为大专院校自动控制专业教师教学参考书，博士研究生、硕士研究生和大学生的学习资料，也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

中国自动化学会首届过程控制科学报告会论文集 工业过程模型化及控制

主 编 孙优贤 钱积新
责任编辑 李桂云 龚建勋

* * *

浙江大学出版社出版
德清雷甸印刷厂印刷
浙江省新华书店发行

* * *

开本787×1092 1/16 印张28.125 字数702千字
1988年11月第1版 1988年11月第1次印刷
印数1—2200

ISBN 7-308-00183-0

N·003 定价：25.50元

首届科学报告会论文审查委员会

邵惠鹤
孙优贤
潘日芳
俞金寿
钱积新
杜 维
陆建中
黄 道
何声亮

教授
副教授
副教授
副教授
高级工程师
副教授
讲 师
讲 师
讲 师

中国自动化学会首届过程控制科学报告会

顾问:

周春晖
王骥程
沈承林

张钟俊
韩福田
庄兴稼

蒋慰孙
韩建勋
章光楼

方崇智
袁 瑛
项国波

主任委员:

吕勇哉

付主任委员:

邵惠鹤

常务委员:

吕勇哉

潘日芳

吕勇哉

潘日芳

俞金寿

钱积新

曹元珍

华向明

何声亮

孙优贤

邵惠鹤

席裕庚

邵惠鹤

席裕庚

徐用懋

张雪申

王树青

厉玉鸣

孙优贤

黄 道

孙优贤

潘立登

孙优贤

潘立登

高衿畅

杜 维

杨树勋

于士忠

潘日芳

何声亮

金以慧

朱学峰

金以慧

朱学峰

谭昌元

刘玉林

宋凤凯

黄 道

论文挑选委员会:

邵惠鹤

钱积新

前 言

中国自动化学会首届科学报告会是一个由周春晖教授和蒋慰孙教授提创的、由华东化工学院自动化研究所和浙江大学工业控制研究所共同发起成立的、并以全国高等院校为主体的过程控制学术交流中心。在成立这个学术组织的过程中,得到了清华大学、上海交通大学、华南工学院、北京化工学院、中国石化总公司和化工部自控业务建设中心站等几十个高等院校和兄弟单位的大力支持,学部委员张钟俊教授以及方崇智教授、吕勇哉教授、王骥程教授、沈承林教授、邵惠鹤教授和任理坚同志给予了很大的帮助。在筹备全国过程控制第一届科学报告会的过程中和会议期间高衿畅副教授、潘日芳副教授、俞金寿副教授、王树青副教授、杜维副教授、宋之熊工程师、何声亮同志、黄道同志、鲍伯良同志、陆建中同志、应依群同志、沈先明同志以及浙江大学工业控制研究所各研究室的秘书们做了大量的具体工作。会议还得到了奉化阀门厂的赞助。在此一并表示衷心的感谢。

目 录

第一部分 控制理论

预测控制的现状、机理及发展前景	席裕庚	许晓鸣 (1)
双线性系统的能观性研究	方肇锋	韩建勋 (7)
输出反馈鲁棒控制系统设计	施颂椒	孙 浩 (15)
一种新型的控制算法——推理控制	王桂增	秦晓丽 (24)
连续正交函数在卷积求解中的应用	范一平	俞金寿 蒋慰孙 (33)
量测噪声污染下的线性系统初值最小二乘估计的收敛性问题	程兆林	赵克友 郭 雷 (42)
有限时域上广义系统二次指标下的最优调节器问题	程兆林	阎九喜 (48)
连续随机信号的最小误差熵估计	田玉楚	徐功仁 (58)
非线性分布参数系统辨识	黄艳菊	韩建勋 (65)
典型过程预测控制的鲁棒性分析	席裕庚	孟祥凯 (74)
有约束的多变量系统预测控制	张佩星	席裕庚 (83)
等幅性原理及其应用	项国波	项良楫 (91)

第二部分 建模与仿真

建立精馏塔降阶双线性模型的新方法	华向明	俞金寿	李忠东 (99)
造纸机数学模型的开发	李 平	孙优贤	应依群 周春晖 (108)
一种建立塔系模型的新方法及其应用	孙优贤	王庆国 (117)	

GMDH + 模型法结构优化方法及其在工业过程建模中的应用.....	陈雨田	俞金寿	邵惠鹤 (129)
线性规划理论在参数估计中的应用.....	于士忠	郭 骏	杨善林 (134)
老窖大曲酒前期发酵过程中糖化酶系综合行为特性的求取.....	彭明启	石为人	柏 梁 (142)
原油加热炉的数学模型及仿真.....	张育林	高衿畅	周春晖 (148)
大型化工企业递阶多目标生产计划建模与优化研究.....	胡泽新	邵惠鹤	蒋慰孙 (156)
间歇发酵过程的辨识——螺旋霉素发酵动力学参数估计.....	周 斌	杜仰光	李惠忠 方 林 (162)

第三部分 控制算法

基于优化方法的非线性观测器设计	陶洛文	方崇智 (169)
一种改进DDC算法的分析与实验研究	朱学峰 (177)	
一类非线性系统的预测控制算法	顾钟文	邹志云 罗文巍 (186)
一类非线性系统的模型算法控制的研究	黄河清	黄 道 俞金寿 (195)
多变量稳定容错控制器的设计问题	叶银忠	潘日芳 蒋慰孙 (203)
PID调节器按 积分准则的最优整定参数	王士杰 (210)	
程序变给定控制算法的选择及实现	徐博文	范全义 杨佃福 (218)
模型算法控制 (MAC) 初探	朱学峰 (224)	
一类智能补偿型自校正控制器	陈建平	吴 滨 张钟俊 (233)
一类按阶次递推的辨识算法	牛绍华	肖德云 (238)
一种基于数学模型的故障诊断新方法	葛 卫	方崇智 (247)
分散化的在线优化控制策略	张雪亚	夏圉世 俞金寿 (253)

基于模式识别的在线稳态优化控制策略.....	夏鬯世	俞金寿	蒋慰孙 (261)
一种具有多采样时间的多变量预报控制算法.....	于静江	顾钟文	周春晖 (269)
线性约束系统的预测控制.....	邹志云	顾钟文	周春晖 (275)
一类非线性系统的状态反馈控制.....	龚建平	高衿畅	周春晖 (283)

第四部分 控制理论与应用

最佳渐消卡尔曼滤波器及其在造纸过程中的应用.....	夏启军	孙优贤	应依群	周春晖 (291)
内模控制原理及其实验研究.....	钱幸生	何衍庆	俞金寿 (303)	
一种新的故障诊断的 Fuzzy 模型化方法及其应用.....	傅春生	张明华	王骥程 (312)	
模糊控制器在造纸生产过程中的应用.....	王 慧	钱积新	周春晖 (320)	
带有扩展卡尔曼滤波器的最优控制系统.....			金以慧 (329)	
精馏塔的优化仿真软件及其工业应用.....	余昌斌	祝雪姝	王骥程	殷惠南 李云飞 (339)
预估控制及其在过程控制中的应用.....			袁 璞 (347)	
观测器理论在催化裂化装置中的应用研究.....	杨双华	郑远扬	袁 璞 (357)	
活性污泥法废水好氧处理过程的状态估计.....	柯益华	吴 强 (365)		
一种有效的确定大系统故障源位置的图表法.....	戴文战	刘鸿强	潘日芳 (373)	
采用微机检测动态转速的研究.....			沈宪章 (381)	
甲醛生产过程两级微机优化控制系统.....	邵惠鹤	秦丽君	蒋慰孙	
	纪 纲	张瑞同	方昭稚 (388)	
大型氨厂数学模型与操作优化.....	黄 道	蒋慰孙 (396)		

丙烷丙烯精密精馏塔的控制模型及微机优化算法.....	刘鸿强	杜仰光	邵惠鹤	蒋慰孙 (405)
间歇发酵过程放罐时机的启发式 Fuzzy 识别与预报.....	傅春生	谢卫东	王骥程 (413)	
IBM-PC 机在工业过程 控制中的应用.....	王 慧	钱积新	周春晖	黄承祉 (419)
四极质谱仪微机控制和数据处理系统的研制.....	许海密	张雪申	章先楼 (425)	
可消除系统余差的模糊控制器研究.....	杜 维	倪华方 (432)		

第一部分

控制理论

预测控制的现状、机理及发展前景

席裕庚 许晓鸣

上海交通大学

内 容 摘 要

本文概述了预测控制算法的研究现状,从控制论和信息论的角度分析了算法中蕴含的方法机理,并讨论了预测控制与人工智能及大系统方法结合的可能性,指出了把预测控制提高到方法高度加以研究的必要性。

关 键 词

复杂系统,预测控制,大系统控制,人工智能

一、预测控制算法的研究概况

预测控制算法是一类特定的计算机控制算法的总称。它最早起源于法、美等国的过程控制领域,并且一开始就与实际工业应用,如电站控制^[1]、石油加工控制^[2]等紧密地结合在一起。它的原理介绍与理论分析始于七十年代末期^[1~3],但工业应用则早在七十年代中期就开始了。

预测控制的产生,是有着深刻的实际背景的,这主要是由于传统的控制理论对信息描述的要求和优化的模式都难以适合复杂工业系统的要求。1977年起,文献中开始出现关于预测控制算法的首批报导,这些算法,如MPHC^[1]、DMC^[2]、MAC^[3]等,突破了传统控制的束缚,把非经典的阶跃响应或脉冲响应模型、滚动式的优化方式作为其鲜明特点,并以应用软件包的形式在过程控制中得到了初步的成功应用。

预测控制在应用中所表现出的建模的简易性及控制的鲁棒性,使它很快引起了工业控制界的广泛重视。从八十年代起,除了对其理论性质进一步探讨外,一些大公司和高校相继开展了这类算法的应用研究。目前,从事预测控制研究的已包含California、Wisconsin、Huston、Alberta、Munich、Oxford等高校、ADERSA/GERBIOS (France)、Scientific、Systems(U.S.A)等研究中心及Shell等大公司。1984年起美国ACC年会上已有预测控制的

专题组,最近召开的第十届IFAC世界大会上,也有讨论预测控制应用的专题讨论会。目前,预测控制已在国外很多领域内得到应用,商用算法软件包亦已出现。在我国,目前也有不少高校开展了这方面的研究与探索,并在工业大系统中获得了初步的成功应用。

到目前为止,对于预测控制的理解和研究几乎都集中在算法上。在这一领域中出现的形形色色的预测控制算法,就其依据的模型而言,主要集中于两类,一是阶跃或脉冲响应模型^[1~3],二是辨识模型^[4]。就研究的内容而言,大致集中在以下几个方面:

1. 提出基础算法和改进算法技巧;
2. 分析算法的理论框架及闭环动态特性,稳定性、鲁棒性;
3. 探索设计参数的整定规则;
4. 根据实际系统的特点,推广基础算法,如有约束预测控制算法,大系统的递归与分散预测控制算法;
5. 开发包含有预测控制算法的工业应用软件包。

预测控制算法在工业中的成功应用,并不意味着对它的研究只须停留在目前的单一算法模式基础上。恰恰相反,目前预测控制中的单一算法模式在很大程度上束缚了其应用的范围及处理复杂问题的能力。因此我们认为,有必要通过预测控制算法中所蕴含的方法机理来分析其成功应用的原因,并以此来探讨预测控制在更高层次上的发展,这对于在复杂系统中发展新的预测控制算法,无疑有着重大的意义。

二、预测控制算法的方法机理

目前出现的各类预测控制算法,虽然在表现形式上各不相同,但都具有某些共同点。Richalet等人把它归结为预测模型、滚动优化、在线柔化或校正,并把它们称为是预测控制算法的三条基本原理。鉴于算法形式的多样性,在这里我们不打算介绍具体的算法公式,其一般介绍可参见文献[6]。在本节中,我们将着重分析这些基本特征中所蕴含的方法原理,并以此来说明预测控制算法对复杂系统的适用性。

1. 预测模型

在预测控制算法中,需要一个描述系统动态行为的基础模型,称为预测模型。它应具有预测的功能,即能够根据系统的现状和未来输入,预测其未来输出值。作为从工业过程控制领域中产生的早期的预测控制算法,如MPHC、DMC等,都把脉冲响应或阶跃响应作为预测模型,这是因为这类非参数模型在实际工业系统中较易直接辨识。然而,这并不意味着预测控制一定要用阶跃或脉冲响应作为预测模型。例如,在另一些预测控制算法中,就分别应用了状态方程模型(如MPC^[5])和辨识模型(如GPC^[4])。这表明,从方法的角度讲,只要是具有预测功能的模型,不论其有什么样的表现形式,都可作为预测模型。在这里,强调的只是模型的功能,而不是其结构形式。因此,预测控制打破了传统控制中对模型结构较严格的要求,更着眼于在信息的基础上根据功能要求按最方便的途径建立系统模型。

2. 滚动优化

从方法机理上说,预测控制也是一种优化控制算法,但它与通常的最优控制算法不同,即采用了滚动式的有限时域输出优化。这种优化方式具有下述特点

- (1) 优化目标是随时间推移的,即在每一时刻都提出一个立足于该时刻的局部优化目

标,而不是采用不变的全局优化目标。因此,优化过程不是一次离线进行,而是反复在线进行的。这种滚动优化目标的局部性,使其在理想情况下只能得到全局的次优解。然而,当模型失配或有时变、非线性或其它干扰因素时,却能顾及这种不确定性,及时进行弥补,减小偏差,保持实际上的最优。

(2) 由于采用了有限时域输出优化,结合模型的输入输出功能,易于得到简便的在线控制律,能适合在线反复进行优化的需要。此外,由于在优化目标中出现的参数直接与系统的外部表现有关,物理意义明确,便于离线设计和在线调整。

3. 反馈校正

所有的预测控制算法在进行滚动优化时,都强调了优化的基点应与实际系统一致。这意味着在控制的每一步,都要检测实际输出并与预测值比较,以此修正预测的不准确性。这种反馈校正的必要性在于:作为基准的预测模型,只是对象动态特性的粗略描述,由于实际系统中存在的非线性、时变、模型失配、干扰等因素,基于模型的预测不可能和实际完全相符,这就需要用投影预测的手段对模型预测进行补充,使优化建立在较准确的预测基础上。这种双重预测手段,是克服系统中所存在的不确定性的有效手段。

因此,如果舍去预测控制所包含的算法内容而从其中蕴含的方法机理加以分析,则预测控制的三个重要特征:信息建模、滚动优化,反馈校正,正是一般控制论中模型、控制、反馈概念的具体体现。由于模型的非经典性,使它可以根据对象的特点和控制的要求,以最简易的方式集结信息建立预测模型;由于优化模式和预测模型的非经典性,使它可以把实际对象中的不确定因素包含在优化过程中,形成动态的优化控制;由于优化指标的特殊形式,可以简化控制律的计算和设计参数的整定。因此,预测控制算法所体现的预测、优化模式是对传统最优控制的修正,它使建模过程简化,并考虑了不确定性,因而更加贴近复杂系统控制的实际要求。这是预测控制在工业过程领域中受到重视的根本原因。

三、预测控制方法原理在复杂

系统中的应用前景

预测控制算法自产生以来,在工业过程中已得到了普遍的应用。对于算法本身进行研究与开发,固然仍是当前预测控制研究的重要内容,但通过上节分析的预测控制方法原理,我们可以得到它在复杂系统控制中的若干有益启示。开展这些方面的研究,对于预测控制方法的结构化以及指导新算法的开发,将有着更为重要的意义。

预测控制算法的创新意义,首先在于其模型的非经典性即信息建模的思想。众所周知,要对动态系统实现有效的控制,必须有关于系统动态的先验信息,这些信息通常是用过程中观察到的现象或记录的数据表达的,把这些先验信息集结为特定类型的模型,就是辨识的过程。在传统的控制理论中,由于对模型的类型往往有确定的要求,对于复杂的工业系统,辨识过程需要化费很大的代价。但在预测控制中,由于只强调预测模型的功能性,对其结构类型没有限制,因而可以根据实际对象的复杂程度,建立恰如其分的预测模型,避免过于复杂的辨识。在这里,不但可以采取常规的建模手段,而且可以引入人工智能中的先进技术,建立以信息为基础的预测模型。例如,当对象动态比较简单,辨识易于进行时,可以按通常的辨识方法建立状态方程或传递函数作为预测模型。当对象的动态比

较复杂而实际过程允许进行某些试验时,可以把实测的阶跃响应或脉冲响应作为预测模型。而当对象的动态变化规律高度复杂时,甚至还允许采用表格模型,模糊模型乃至规则库作为预测模型。因此,建立预测模型的原则,一是正确反映输入输出的动态因果关系,二是使建模过程尽可能简易。这种对模型结构约束的突破为系统建模提供了很大的自由度,在复杂的工业过程系统中,我们可以利用预测模型的这一特点,在不同的层次上建立不同类型。

双重预测,也是预测控制中十分重要的策略思想。在传统控制中,对系统动态行为的预测完全是建立在模型基础上的,而在预测控制中,则把动态预测划分为基于模型的输出预测和基于偏差的误差预测两类。前者使用了模型预测方法,体现了预测模型所描述的控制量及已知干扰量与系统之间的已知关系。后者则是由缺乏先验知识,无法用预测模型加以描述的不确定性引起的,由于这部份信息无法用因果模型加以描述,因而只能采取投影预测的方法。在这里,可以充分利用经典运筹学中的各种非因果预测手段,例如时间序列的预测方法。投影预测的引入是对模型预测的重要补充,它可以弥补在基础模型中已简化或无法加以考虑的一切其它因素,例如非线性、时变、模型失配等。这种双重预测的手段,不但降低了对基础模型的要求,提高了控制的鲁棒性,而且可以把运筹学和人工智能中的有效方法应用到动态系统中,克服建模的困难,补偿不确定性的影响。它在工业过程系统中的应用,具有十分现实的意义。

预测控制的优化模式具有鲜明的特点,它的离散型式的有限优化目标以及滚动推进的实施过程,使其在控制的全过程中表现为动态优化,而在每一步的控制中表现为静态的参数优化,即确定有限控制参数 $u(k)$, $u(k+1)$, ...以满足性能指标最优的问题。这种静态参数优化可以推广到更为一般的情况,例如有约束、多目标、非线性性能指标等等。而相应的优化求解也可运用最优化技术中处理多目标的各种手段,如目标分层法、目标规划法等等。事实上,现有预测控制算法中的二次型性能指标也可看作是一个多目标问题,即要求在优化时域内,采样点上的控制偏差应为0,控制量(或增量)应尽可能小,只是我们把这一多目标优化问题通过加权写成了二次型指标的单目标而已。这种静态的参数优化问题还提供了除解析求解之外的其它优化可能性,例如用启发式寻优,甚至以计算机进行仿真预测来寻找最优的控制参数。在这里,优化方式的选用应能适应实时控制的要求,但从参数优化的角度来看,它所能处理的目标的多样性以及优化方式的灵活性,无疑可以增强预测控制对于复杂系统和复杂目标的控制能力。

预测控制的在线优化与反馈校正结构,蕴含着分层分目标的决策思想。在这里,以模型为基础的优化控制,可看作是针对于优化性能指标的基础反馈控制。在这一层次上,出发点是系统的预测模型,目标是要实现性能指标最优。然而,由于实际系统中存在的不确定性,只依靠这一层控制是不能保持实际最优的,而依靠预测模型本身,也不可能获得更多的信息,以解决不确定性引起的困难。所以,在预测控制中又采用误差预测及校正手段,构成了第二层反馈控制。这一层次控制的目的是保持系统在模型失配或干扰时的鲁棒性,其出发点不再是预测模型,而是对不确定性进行非因果预测的校正模型。这种分层的控制结构体现了大系统方法中按决策的复杂性分层的多层递阶控制思想。但在目前的预测控制算法中,这种分层的概念仅是战术性的,并未把它提高到一般的结构角度加以理解。然而,如果我们用大系统控制论的思想来看预测控制算法中蕴含的这一方法机理,则可把这种分层算法结构化,形成更多目标、更多层次的预测控制方法模式。在这种模式中,系统

的目标划分到不同的层次中,每一层次都有与目标相适应的预测模型和优化模式,在较低层次中表现的不确定性,可以在较高层次上加以识别和描述,进而有针对性地进行优化处理。这种分层控制的思想,将大大提高预测控制处理多目标及不确定性的能力。

由此可以看到,在预测控制算法中蕴含着丰富的方法论思想。这种思想在目前的算法中虽然是以单一模式的形式表现出来的,但是一旦与大系统控制、人工智能的思想相结合,就可以打破算法单一模式的局限性,成为一种结构化的预测控制方法,这将为预测控制新算法的开发提供广阔的前景。

四、结 论

鉴于预测控制算法单一模式的局限性,如何把它提高到方法的高度加以研究,已成为预测控制在复杂系统中能否得到有效应用的关键。预测控制的一般方法,除了保持原算法中预测模型、滚动优化、反馈校正的基本原理外,应开拓和发展算法中蕴含的信息建模、综合预测、多目标优化、分层控制的思想。除了采用经典的建模、优化手段外,应充分吸取大系统控制和智能控制中的先进技术。以便对复杂系统实现多层次、多模型、多目标的控制。研究这种多层智能预测控制的结构、模式和算法,将是预测控制向高层次发展的主要内容。它不仅能够处理复杂系统的控制问题。而且还能把大系统的优化管理与控制均归范在同一框架下,实现系统管控的一体化。这将为复杂工业系统的控制与管理提供新的思想和方法。本文从对预测控制算法的特征分析出发,指出了这一研究的必要性和应用前景,旨在引起工业控制界的兴趣,以开发更有效的新型预测控制算法。

参 考 文 献

- [1] Richalet, J. et al, Model Predictive Heuristic Control, Applications to Industrial Processes, Automatica, 14, PP 413-428, 1978.
- [2] Cutler, C.R., Ramaker, B.L., Dynamic Matrix Control-a Computer Control Algorithm, JACC, PP 5-8, 1980.
- [3] Rouhani, R. Mehra, R.K., Model Algorithmic Control (MAC), Basic Theoretical Properties, Automatica, 18, PP 401-414, 1982.
- [4] Clarke, D.W. et al, Generalized Predictive Control, Automatica, 23, PP 137-160, 1987.
- [5] Reid, J.R., Mahmood, S., A State Space Analysis of the Stability and Robustness Properties of Model Predictive Control (MPC), ACC, 1986.
- [6] 席裕庚, 张钟俊, 一类新型计算机控制算法: 预测控制算法, 控制理论与应用, 2(1985), No3, 1.

ABSTRACT

In this paper, the state of the art of predictive control is briefly surveyed. The methodological mechanism which is implied in predictive control algorithms is analysed from the viewpoint of cybernetics and information theory. Three basic principles of predictive control, predictive model, moving horizon optimization and error correction, are studied in detail to illustrate the suitability of predictive control to complex industrial processes. The possibilities of combining the predictive control with artificial

intelligence and large scale system techniques are also discussed. Using the concepts of information-based modelling, heuristic optimization, mixed prediction and multilayer multiobjective control, a new control concept, multilayer intelligent predictive control, is proposed to characterize the further development of predictive control in higher level, which will increase the ability of predictive control to handle the complexity in real industrial systems.

双线性系统的能观性研究

方肇锋 韩建勋

天津大学

内 容 摘 要

本文详细地讨论了双线性系统的能观性,并根据双线性系统能观性的特点,提出了绝对能观测这一新的概念。由此概念出发推导了单输出连续型双线性系统绝对能观测的充分必要条件,对于多输出连续型双线性系统和离散型双线性系统给出了系统绝对能观测的充分条件。

关 键 词

双线性系统,绝对能观性

一、引 言

双线性系统作为变结构线性系统的特殊形式,因为其应用背景广阔,结构形式简单、优美,而日益受到人们的重视。与线性系统一样,双线性系统的分析也不可避免地要遇到能观性问题。这一问题的解决对于双线性系统辨识及其状态观测器的设计具有重要的意义。

本文讨论的对象仅限于双线性定常系统,即模型形式为

$$\dot{X}(t) = AX(t) + \sum_{i=1}^r D_i X(t) u_i(t) + BU(t) \quad (1-1a)$$

$$Y(t) = CX(t) \quad (1-1b)$$

或

$$X(k+1) = AX(k) + \sum_{i=1}^r D_i X(k) u_i(k) + BU(k) \quad (1-2a)$$

$$Y(k) = CX(k) \quad (1-2b)$$

的双线性系统。

式中 $X \in R^n$; $U = [u_1, u_2, \dots, u_r]^T \in R^r$; $Y \in R^m$, $A, D_i, i=1, \dots, r, B, C$ 为适当维数的定常实矩阵。

下面给出双线性系统绝对能观测的精确定义。

定义1 双线性系统(1-1)称为绝对能观测的,如果对任意允许输入 $U(t)$ 和任意初始时刻 t_0 , 存在有限区间 $[t_0, t_f]$ 使得 $X(t_0)$ 能由 $[t_0, t_f]$ 上的 $U(t)$ 和 $Y(t)$ 唯一确定。

定义2 双线性系统(1-2)称为绝对能观测的。如果对任意输入 $U(t)$ 和任意非负整数 o , 存在有限非负整数 k_f , 使得 $X(k_0)$ 能由 $U(k_0), U(k_0+1), \dots, U(k_0+k_f)$ 和 $Y(k_0), Y(k_0+1), \dots, Y(k_0+k_f)$ 唯一确定。

二、连续型双线性系统绝对能观测性判定

我们先就连续型情形作些讨论。

定理1 单输入—单输出双线性系统

$$\dot{X}(t) = FX(t) + EX(t)U(t) + GU(t) \quad (2-1a)$$

$$Y(t) = HX(t) \quad (2-1b)$$

式中 $X \in R^n; U \in R; Y \in R; F, E, G, H$ 为适当维数的定常实矩阵, 绝对能观测的充分必要条件是: 存在一定常非奇异矩阵 P , 使得

$$PFP^{-1} = A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_{n-1} & a_n \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

$$PEP^{-1} = D = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ d_{22} & d_{22} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{nn} & d_{nn} & d_{nn} & \cdots & d_{nn} & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

$$PG = B = [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_n]^T \quad (2-4)$$

$$HP^{-1} = C = [1 \ 0 \ \cdots \ 0] \quad (2-5)$$

证明

1. 充分条件

把(2-1a)写成如下形式

$$\dot{X}(t) = [F + EU(t)]X(t) + GU(t)$$

视其为线性时变系统, 则其绝对能观测即为相应的线性时变系统完全能观测, 即满足^[5]下式即可。

$$\text{rank } Q = \text{rank} \begin{bmatrix} \Gamma_0 \\ \Gamma_1 \\ \vdots \\ \Gamma_{n-1} \end{bmatrix} = n \quad (2-6)$$