

因果关系与因果控制初探

郭雷^{1†}, 王成红², 王岩¹

(1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191; 2. 国家自然科学基金委员会, 北京 100085)

摘要: 控制理论中系统的输入输出与事件的因果关系具有对应关系, 以事物的因果性为出发点探索控制的方法论问题, 提出基于“因果”(Cause-plant-effect, CPE)关系的因果控制方法. 从模型角度看, 因果控制方法可用于描述事件演化、时间关联和空间量化的混合动态模式, 因果的驱动方式兼具时间演化、事件关联和规则关系, 因此可涵盖更一般的、更具社会性、智能性的控制和优化问题. 从分析角度看, 提出多因果的广义可控、广义可观性、相关的干扰(或故障)可补偿性、可估计性、可抑制性概念, 以扩展控制理论原有的“内部性”范畴. 从时序机制看, 因果的驱动方向可兼具正向和倒向, 具有时间的不一致性和非因果性/逆时序性. 控制的目的是使得通过改变“可控的因(内因)”, 在“不可控制的因(外因)”的共同影响下, 使得“不可预测的果(恶果)”可能性减少、“可预测的果(善果)”可能性增大.

关键词: 因果控制; 混合驱动; 逆时序性; 广义可控可观性; 可补偿性/可估计性; 可抑制性/可抑制度; 非因果性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Preliminary study on causality and cause-effect control

GUO Lei^{1†}, WANG Cheng-hong², WANG Yan¹

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China)

Abstract: The input-output relation in control theory corresponds to the cause-effect relation among events. Based on causality between matters, this paper investigates the methodology problem in control theory, and proposes a cause-plant-effect(CPE) relationship based cause-effect control method. From the modeling perspective, the cause-plant-effect control method can be applied to describe the propagation of events, links between matters and rules, and can thus encompass a class of more generalized, more social and more intelligent control and optimization problems. From the analysis perspective, we propose the concepts of generalized controllability, generalized observability, generalized disturbance estimatability, compensatability and attenuatability for multi-cause-multi-effect systems to extend the domain of internality in traditional control theory. From the perspective of time sequence mechanism, the driving direction of causes and effects can be either forward or backward, presenting time inconsistency and non-causality/time inversion. The objective of control is to reduce the probability of unpredictable(adverse) effects and increase the probability of predictable(good) effects, under the influence of the uncontrollable(external) causes, via alternating the controllable(internal) causes.

Keywords: cause-effect control; mixed driven; time inversion; generalized controllability and observability; compensatability/estimatability; attenuatability; non-causality

0 引言

因果律和因果论是一个重要的哲学概念, 其思想涉及到事物之间所具有的因果联系^[1]. 自然科学的任务是发现自然界中事物之间的联系, 进而描述联系、理解联系、分析联系, 最终运用联系. 其中, 控制科学的研究范畴是发现被控对象、环境因素和任务目标

的数量描述和表征方法, 建立其关联关系、影响机理和评价指标, 进而确定并施加控制的作用, 以使被控对象在所处环境下完成任务目标^[2-4]. 从哲学意义上看, 控制科学是一种典型的认识世界、改造世界的科学, 如何认识和表达“因”、“体”和“果”, 如何通过向“体”施加“因”, 从而改变“果”, 是控制科学的基

收稿日期: 2017-11-04; 修回日期: 2017-12-17.

作者简介: 郭雷(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事鲁棒控制及抗干扰控制等研究; 王成红(1955—), 男, 研究员, 博士, 从事控制理论和系统可靠性理论等研究.

†通讯作者. E-mail: lguo@buaa.edu.cn

本任务.其中,控制理论中强调的系统“输入”与“输出”的关系实质上就是一种事物的因果关系,输入对输出的控制作用相当于“执因致果”的过程.本文的出发点是利用因果关联的思想诠释和拓展现有的控制理论.

进一步认识因果论、理清因果论与控制论之间的关系对控制科学领域的研究有重要的指导作用.首先,现代控制理论是一门基于数量关系表征的理论方法.如何有效表达事件、知识、现象这些客观存在的“因”,不仅是利用数量关系而是基于逻辑、规则甚至是心理、情感等因素描述因果的丰富关联和演化,是一个亟需更深入思考的控制理论问题.在现有控制理论中,输入输出关系往往只考虑可以控制并量化的因果关系,难以表达客观世界多因多果的丰富层次和影响模式.另外一个值得深入思考的问题是,控制理论中的可控可观性理论仅仅是对于“可控制的因”和“可预知的果”的能力描述,无法解释当干扰、故障等不确定因素的出现使得系统出现的复杂现象.此外,现代控制理论中的因果律和佛教中的“果由因生”一样,都是强调时间的序列性或者正向性,指下一时刻的输出不会改变当前时刻的输入,因此属于时间序列的“因果”控制.这个时间序列的基本假定无法描述一些客观存在的时间非因果性或逆时序性的控制现象和行为.

本文根据目前控制科学与工程以及人工智能等学科的发展新需求,结合哲学范畴的因果关系和计算机科学、智能科学理论领域的一些思考,针对目前基于数量关系和时间因果性的控制理论的若干局限性,探索和研究时空、事件和规则等混合驱动的“因体果”控制理论.主要围绕现有控制理论在建模和系统描述、多因多果的可控和可观性分析、以及时间非因果性控制等3个方面的不足,试图更广泛和深刻地描述客观世界的混合驱动和关联现象、多因控制能力和逆时序性智能行为,拓展原有的时间驱动且基于数量关联的传统控制理论的研究范畴.此外,通过加入“体”的概念,也可有效地克服传统的因果关联观点的不足之处.

1 “因体果”控制的概念与表征

1.1 “因体果”内涵与广义可控可观性

“因、体、果”的概念可有效地表征控制领域的一些新问题:“体”(Plant)包括被控对象、被控过程或者被控系统,以及其所处的固化的自然和人文环境;“因”(Cause)是被控对象本体受到的输入和环境的变

化因素,又可分为可以施加的控制输入(可控的变量)和不可预知的变化(不可控的变量、未知干扰和不确定因素);从形式上分,“因”不仅仅是数量表达,还可包括规则、命令、条件、约束以及心理和情感等,从而可以表达社会性因素;“果”(Effect)是“体”在“因”的影响下产生的行为要素,包括系统输出以及对输出的评价指标.

在“因体果”(Cause-plant-effect, CPE)控制理论中,“因”与“果”之间的对象即“体”元素,是“因”的承受者与“果”的承载者,是因果控制关系实现的载体;“体”承受“因”施加的信息作用,并驱动“果”的产生;由于“因”的不断影响,“体”本身也不是一成不变.“果由因生”只是相当于一个开环过程,同时“果”又将用来确定下一个控制循环中的“因”元素,这相当于一个反馈过程.因此,“因体果”三者相互作用,紧密关联.

这里与佛教因果论不同之处是:通过“体”概念的加入,使得认识和描述世界的过程更加客观,可以解释为什么“同因不同果”的问题,把认识过程加入了唯物论的思想;“反馈”概念的加入,不仅反映了认识世界,而且反映了改变世界的过程.

传统控制论的核心包括建模、分析和反馈控制,侧重基于时间序列驱动模型的量化输入输出关系的建立、影响机理的量化分析和控制输入的数量确定.随着信息科学的迅猛发展,系统的复杂程度和控制的智能程度日益提高,人类与客观世界的交互程度日益增大.对于某“体”而言,命令的发布、事件的发生、数据的变化、景象的出现、心理的波动以及规则触发都可能产生不同的“果”.因此,在“因体果”控制理论中,从模型的角度看,“因”和“果”的表达不仅是数量表达,更可能是事件表达、规则表达、情感表达、知识表达(如图像或视频的发生)或行为表达,其表达工具可能是文字、图像、视频和其他知识.

“因体果”控制与传统控制理论的输入和输出理论的另一个不同之处在于对于系统能力的分析,特别是关于可控和可观性的描述.对于多因多果系统而言,从因的可控能力和果的可观能力上看,“因”和“果”不仅是指传统意义上的系统输入和输出,“因”可分为“可控制的因”或者“可以干预的因”(内因)与“不可控制的因”或者“不可干预的因”(外因),而“果”可分为“可预期的果”(善果)与“不可预期的果”(恶果).控制的目的是使得通过改变“可干预、可控制的因”,在“不可控制、无法干预的因”的影响下,使得“可预期、期望的果”发生而“不可预期、不期望的

果”不发生.传统控制理论的可控和可观性都是相对于可施加的因(内因)和可预期的果(内果)而言的,因而是一种基于内部关系、较为理想化的描述.事实上,即使是对于一个理论上完全可控的系统,在具有外部干扰的情况下,系统也可能崩溃.因此,超越原有的仅涉及内因、内果的狭义可控可观性,研究外因、外果的广义可控可观性是一个重要的理论问题,涉及系统的抗干扰性、容错性、鲁棒性能力.

从抗干扰控制的角度举例,干扰即是一类不可控制、无法干预的因,但可通过改变可施加的因使得干扰对于预期的果的影响最小^[5-6].除了传统的可控和可观性外,还需要研究多源干扰的可补偿性、可抑制性和可抑制度,以及相应于“由果溯因”逻辑的干扰可估计性或可观测性,这些都是传统控制理论中未能深刻揭示的问题.文献[5]提出的多源干扰系统控制理论实际上涉及了“多因致果”的控制问题,因而也是因果控制的一个应用领域.

1.2 “因果”关系的表征与建立

在诸多关联和逻辑关系(如并列关系,条件关系等)中,因果关系只是自然界现象之间普遍的和基本的联系,因果分析是为了确定引起某一现象变化原因的分析方法,目的是循因导果、执果索因.为此密尔等哲学家提出了求因果五法,系统科学家提出了因果分析的鱼骨图法和基于数量的回归分析等方法.

因果关系的维度是一个重要概念,原因导致结果的情况可分为“因必致果”和“因或致果”.从维度上认识因果关系,可分为一因一果、一因多果、多因一果和多因多果.同时,某种原因往往在一定条件下产生结果,这时的条件也是原因的一部分.

与因果维度相同,关联程度也是描述因果逻辑和因果关系的重要特征.在某些情况下,原因是以一定概率造成结果的出现,因此从因果双方关联程度上,又可进行更细的刻画,这也是可靠性等理论的研究思路.为表示“因”与“果”的作用机制,可尝试采用映射算子的表示方法: C 为因, E 为果,二者之间相互作用机制用 f 表示,有 $E = f(C)$,将两者逻辑关系表示出来的同时,亦可涉及两者因果作用原理.例如,对于不同相关程度的因果关系,可辅以概率表达为: $P\{E_i = f(C_j)\} = p, 0 \leq p \leq 1$.为此,控制理论中马尔科夫跳变模型和模糊逻辑模型都可以作为参考.但是,与控制理论模型不同的是,因果控制理论中的 f 不仅可以表达数学空间的映射算子,还可以是规则、逻辑和事件集合的关联.

与传统因果分析理论相比,因果控制有如下不同之处:因果控制具有反馈的回路,该回路从事件序列上看是一个从果到因的过程.因此,因果控制不仅是一个时间/事件混合驱动的过程,而且是一个互为因果的过程.对于这样一个过程的描述和表征具有很强的挑战性,需要从时间序列、事件序列到时空/事件混合序列的角度进行讨论.此时除了传统基于时间序列的传统控制模型外,事件驱动、知识驱动、数据驱动以及逻辑、规则的表征方法尤为重要.特别地,建立可干预的因与不可干预的因、可预期的果与不可预期的果的强关联特性是一个重要任务.

与传统控制理论的不同之处体现在,除了数量关联外,因果控制理论还可以包括事件关联、逻辑关联和规则关联.传统控制理论的输入和输出一般都用来表达不同物理含义的数学空间的变量,虽然因果分析和Petri网等理论涉及了事件的表达和关联,但是传统控制理论一般通过建立在时间序列的数量关系来描述因果的关系.因果控制理论则可以通过事件关联、数据关联、规则关系、因果逻辑、因果激励来确定事物之间的联系,是一个时间/事件混合驱动的过程.不同类型的因果之间又有着复杂的作用与关系,掌握相互之间的关系与作用机理可以使控制更具智能性和社会性,更好地反映事物的具有社会性、智能性的普遍联系.

总体而言,因果控制的表征方法具有3个特点:1) 尺度层次的多元性——包括时间尺度、事件尺度和空间尺度;2) 因果维度和强度的多元性——结合因果关联的维度和强度,可将因果关系特别是内外因果关系进行细化分析;3) 驱动方向和时序的多元性——包括正向、倒向以及串联、并联的混合回路,特别是可以表示客观存在的时间非因果性或逆时序性,因此可以解决传统建模理论中的若干难题.同时,正向和倒向序列中又有层次问题,存在多层混合决策与控制问题、非结构化问题与非平凡问题.这些都是原有的事件驱动理论有待解决的理论问题^[7-8].

2 关键问题与研究展望

2.1 时间尺度的非因果控制问题

传统因果关系的特点之一是具有时间序列性,即在有序时间尺度上,因前果后的特性.传统的控制方法注重基于量化模型的输入输出关系的控制,也是一种严格意义上的“正向”时间序列上的因果控制.由此特性可知,未来将要发生的事件不会对现在的结果造成影响.控制论的因果律指时间序列的正向一致性,无法表达客观现实中的时间非因果或逆时序现

象^[9].

现实世界中存在逆时序性,即未来的事件常常用来作为当前决策的理由.将来可预期的“果”,可以用来改变目前可干预的“因”,这也是一个最优决策的过程.在“草船借箭”这一典故中,为了实现有箭这个果,不是用传统的思维盲目地去造箭,而是考虑到了未来3天夜间会有大雾的天气因素,又结合曹操生性多疑的特点,采取了用草船去借箭的决策.在这里,“3天后有大雾”这是一个未来的事件,是一个利用未来的事件确定当前决策的过程.在期货、股票行业,这也是一种基本的决策方式.这种非因果、逆时序性决策用一个简单的数学形式可表达为 $y_k = cx_k + \omega_{k+1}$,此公式含有未来时刻事件参量,在传统控制框架下难以实现.预见控制是一个很好的解决方法,但是依赖于对于未来状态的预测,这种预测又是基于目前状态和动态数学表征形式的估计^[10].

可以表达时间尺度的非因果性或逆时序性是因果控制的一个重点.从时间角度而言,这是目前控制理论的一个难点;但是从事件驱动的角度,这是一种以未来事件作为驱动方式、并顾及当前时刻状态的决策控制方法.因此,在这个过程中,因果控制包括时间的正向(由因生果)和倒向(由果致因),只是此处的果又分为可预期的果和不可预期的果,因又分为可干预的因和不可干预的因.

在对时间尺度非因果智能决定的研究过程中,倒向随机分析是一种可以借鉴的工具^[11].但是,倒向随机分析虽然颠覆了时间尺度的正向性,却具有时间尺度上方向的一致性.因果的控制可包含正向和倒向两个过程,具有时间尺度的不一致性.此外,倒向随机分析方法根本上还是一种基于微分方程的定量分析方法,而且主要考虑执果索因的过程.因果控制可以描述一种时空和事件混合驱动、同时包括了正向和倒向行为的过程.

因果控制既可研究循因导果、执果索因,又可研究控因导果的方法和过程,可通过综合考虑当前状态与未来事件,设计最优化决策,以达到特定的目的.在非因果决策系统中,打破了时间尺度的限制,此系统可以利用未来状态决策当前行为与控制,是一种以未来事件作为驱动方式、颠覆传统控制理论的时间尺度上非因果控制和决策方法,其优越性体现在对未来信息的预测与应用.

2.2 事件尺度的非因果控制问题

由前文可知,因果控制方法可以描述时间尺度上的因果决策与非因果决策,二者的主要区别是未来

因素对目前决策的影响.但从事件尺度考虑,上述两种决策机制均可归于事件尺度的因果控制:不管是哪个时刻发生的(已经发生或将要发生)、影响决策的元素,都可看作是引发“果”产生的“因”事件,可以脱离时间维度,单纯从事件角度考虑控制与决策.因此,事件尺度的因果控制机制更具灵活性和智能性,是一种涵盖传统时间尺度上因果控制方法与非因果控制决策方法的理论.

由于时间和事件的尺度相异性,静态的和动态的混合特性可以在因果控制理论中得到更好的描述,可以更广泛和深入地研究故障预测和容错控制问题^[12].以往的研究将静态的可靠性分析方法与动态的实时故障检测、诊断和容错控制分离开来,但是从因果控制的角度,故障即是一个“不可控的因”,某些故障检测和容错控制的行为即是一个执果索因的过程,因此未来故障诊断的研究重点应该是将顶层的静态分析和底层动态检测、可靠性分析和实时故障诊断有机结合起来.

因果的智能性还体现在对未来事件的预测和应用上,同时未来事件与任务目标之间的关联及对决策的影响同样是对因果控制智能性的体现.预测控制是确定目前的控制来决定未来的输出,与预测控制不同的是,因果控制可以表达更广泛的控制与决策过程.另一方面,由于预测机制是基于现时空中的状态作出的概率性判断,这在一定程度上增加了系统的复杂度和不确定性,因此时间尺度非因果性是因果控制的多元性突出表现之一.

相较于时间驱动、以对象为中心的传统控制方法,因果控制是事件时空混合驱动型,往往以任务目标和性能为中心.因、果的关联关系是现实世界的更客观反映,事件和时空的混合表达可以描述和解释以往仅仅数量关系(如微分方程)和逻辑关系(如鱼骨图)的不足.

被控对象或过程、自然环境和社会人文环境三者之间存在着相互作用和相互影响的关系.传统控制理论不对自然环境建模(移动机器人虽对环境进行建模和分析,但属于环境感知范畴,并未纳入一般控制理论研究领域),更不对社会人文环境建模,仅将自然环境变化对被控对象或过程影响的未知因素作为随机噪声(随机控制)或范数有界干扰(鲁棒控制)加入到控制系统的模型中,这种做法显然是粗糙的,且不可避免地带有某种局限性.

“因果”的控制事实上包含了“任务目标与环境、对象的一体化”的思想.从“因”的角度,需要综合

考虑环境因素,同时考虑多源干扰、故障等未知因素,作出包括执行机构配置、传感器配置等最优决策。以鸟的飞行为例,在行动之前要综合考虑自己的任务目标是什么,是捕捉、觅食还是归巢,要考虑目前身处的环境以及将要出现的环境,以决定其导航方式和飞行路线。面对各种因素综合考虑,实现各项机能的优化统筹配置,因此,因果控制机制可以更好地体现内外因统一的思想、大系统的思想^[13]和一体化设计思想。其中一体化设计包括:目标环境和对象一体化设计、决策与控制一体化设计以及感知与控制一体化设计。因此,因果控制有助于更好地利用智能决策、规则学习、事件驱动控制等实现手段。

2.3 执行与计算能力受限情形下的非因果控制

在实际系统中,传统控制方法往往因为执行机构和计算能力限制而无法实现。执行机构和计算机的实时性是导致传统控制方法中因果性难以实现的一个原因。例如,往往在上一个控制指令没有完成之前,由于计算或者执行器能力所限,下一个控制指令已经到达^[14]。从因果控制的角度,执行机构和计算机都是“因”,完成因果控制必须考虑执行器和计算机的影响。事实上,传感器、执行器和计算机都是“因”,如果外部输入可称之为“外因”,则传感器、执行器和计算机的影响可称为“内因”。目前的控制理论对于这类“内因”的研究不足,也影响了理论的可实现性。

执行能力限制问题主要发生在高动态系统中,可产生有序时间尺度上的控制不可行的情况。执行机构能力的限制在很大程度上会对整个控制过程产生影响^[15]。例如航天器姿态控制系统中,飞轮的饱和、摩擦、死区时滞或喷气的阀门开闭延时、卡死等都会使执行机构无法及时完成新的指令。计算能力限制是指由于程序算法的复杂度过高或数据量大以及计算机硬件的计算速度约束等因素,导致数据处理速度不及任务分配速度,无法对执行机构有效发出相应指令。这表明由于执行器和计算机的“因”的限制,使得“果”并不是完全可控、可实现的。该问题也是当前一些先进控制理论难以应用的一个瓶颈,是目前控制理论难以解决的一个难题。

另一方面,环境的变化也可能导致不可干预的因,使得预期的“果”无法实现。例如飞行器在不确定、拒止甚至对抗环境下,针对非合作目标的任务往往需要适应性地改变既定的目标、改变原有的控制策略和方法,根据现有能力最大限度完成主要目标。

3 挑战性与展望

控制理论中系统的输入输出与事件的因果关系具有对应关系,本文以事物的因果性为出发点探索控制的方法论问题。为此,本文讨论了“因果”(Cause-plant-effect, CPE)控制方法。因果控制论可用于描述事件演化、时间关联和空间量化的混合动态模式,既包括传统的量化关系,又包括事件序列基于规则、逻辑的关联和演化关系,因此可涵盖更一般的控制和优化问题。因果的驱动方式兼具时间演化、事件关联和规则关系,事件和规则等关系的引入可以更好地将传统控制模型和人工智能联系起来。因果的驱动方向兼具正向和倒向,具有时间的不一致性和非因果性/逆时性。控制的目的是使得通过改变“可控制的因”,在“不可控制的因”的共同影响下,使得“不可预测的果”可能性减少、“可预测的果”可能性增大。

本文考虑传统控制理论的如下局限性:基于时空量化关系表达,难以解释和表征时空量化关系与事件关联关系共存的复杂系统;仅仅考虑基于“内因”的可控可观性;基于时间因果性,难以表达某些更具智能能力的、根据未来因素确定当前控制的非时间因果行为。为此,结合因果关系提出的“因果”控制的方法论具有以下特点:控制模型由事件关联、时间演化和空间量化的混合模式描述,用于描述更一般的控制问题;驱动形式兼具时间序列、事件序列、逻辑和规则,可以更好地将传统控制模型和人工智能联系起来,更加深入地理解目标环境和对象一体化设计、决策与控制一体化设计以及感知与控制一体化设计的方法论;通过考虑多因多果的广义可控可观性,可以拓展原有的基于系统内部信息的可控可观性概念。驱动方向具有正向和倒向,具有时间的不一致性和非次序性,可以更加深入地表达人脑的智能思维方式。通过加入“体”和“反馈”的概念,也可以有效地将某些因果报应的唯心论观点融入以“体”为主体的唯物论观点,更加客观地解释和理解世界。

展望未来因果控制理论的研究方向,还可从以下几个方面进行重点思考。

1) “由果溯因”。首先要对“因”与“果”之间的逻辑关系有充分认识,对两者的作用机制有深刻了解,从多因中发现致果之因,把握其因果规则。现代控制理论的模型局限于抽象化的数量关系,往往挂一漏万,不能描述因果的完整关系。而在航空航天等实际工程中,一个微不足道的“因”就可以导致一个“恶果”。因果控制思想可以更好地将控制论与系统论思想有机结合,给可靠性和故障检测等研究领域提供

有力工具.

2) “控因致果”. 发现所有“因”后,还要分析多因对果的影响机理,预测对某“因”的改变将会导致怎样的“果”. 这里与传统控制理论的不同之处在于,控制输入要么是由反馈确定的,要么是客观存在但是不能改变的. 在因果控制中,控制输入作为一种“因”,除了受反馈影响外,还可以被重新设计和改变. 例如航天器的执行器和计算机,在无法满足执行实时性的时候,还可以重新选型和设计使得这个“因”满足要求. 最终充分利用某些“因”的可控性,根据要实现“果”,对“因”进行目的性的再设计和再控制,用“防患于未然”的方法来抑制“恶果”的产生.

3) “据因控果”. “因”是不可干预之因时,某些“果”是无法实现之“果”. 当原来的预期目标无法实现时,如何利用现有条件,提出可实现的“果”,并利用这个“果”进行重新控制和设计,也是因果控制的一个重要任务,即此方法是一种时间尺度非因果智能自主决策方法,通过预测机制等多类方式,从非有序时间尺度上对“果”半可控性、半可实现性带来的问题进行提前控制.

作为一个新的方法论观点,本文仅对因果控制和因果控制作出一个初步探索和思考,很多问题值得进一步深入讨论和研究.

参考文献(References)

- [1] 张志林. 因果观念与休谟问题[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 1998.
(Zhang Z L. Causality and hume problem[M]. Changsha: Hunan Education Publishing House, 1998.)
- [2] 郭雷. 关于控制理论发展的某些思考[J]. 系统科学与数学, 2011, 31(9): 1014-1018.
(Guo L. Some thoughts on the development of control theory[J]. J of Systems Science and Mathematical Sciences, 2011, 31(9): 1014-1018.)
- [3] 冯纯伯. 复杂系统的控制问题——试谈控制科学的发展[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 855-857.
(Feng C B. Control of complex systems—Talk about the development of control science[J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(6): 855-857.)
- [4] 柴天佑, 丁进良, 王宏, 等. 复杂工业过程运行的混合智能优化控制方法[J]. 自动化学报, 2008, 34(5): 505-515.
(Chai T Y, Ding J L, Wang H, et al. Hybrid intelligent optimal control method for operation of complex industrial process[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(5): 505-515.)
- [5] Guo L, Cao S Y. Anti-disturbance control for systems with multiple disturbances[M]. CRC Press, 2013.
- [6] 郭雷. 多源干扰系统复合分层抗干扰控制理论: 综述与展望[C]. 中国控制会议. 烟台, 2011: 6193-6198.
(Guo L. Composite hierarchical anti-disturbance control (CHADC) for systems with multiple disturbances: Survey and overview[C]. The 30th Chinese Control Conf. Yantai, 2011: 6193-6198.)
- [7] 朱其新, 胡寿松. 网络控制系统的能控性和能观性[J]. 控制与决策, 2004, 19(2): 157-161.
(Zhu Q X, Hu S S. Controllability and observability of networked control systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(2): 157-161.)
- [8] 朱冰, 梅宏, 杨芙清. 基于事件驱动的主动对象模型[J]. 软件学报, 1996, 7(3): 145-149.
(Zhu B, Mei H, Yang F Q. Event-triggered based active object model[J]. J of Software, 1996, 7(3): 145-149.)
- [9] 钱学森. 工程控制论[M]. 北京: 科学出版社, 1954.
(Tsien H S. Engineering cybernetics[J]. Beijing: Science Press, 1954.)
- [10] 甄子洋. 预见控制理论及应用研究进展[J]. 自动化学报, 2016, 42(2): 172-188.
(Zhen Z Y. Research development in preview control theory and applications[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(2): 172-188.)
- [11] 彭实戈. 倒向随机微分方程及其应用[J]. 数学进展, 1997, 26(2): 97-112.
(Peng S G. Backward stochastic differential equations and applications[J]. Advances in Mathematics(China), 1997, 26(2): 97-112.)
- [12] 周东华, 孙优贤. 控制系统的故障检测与诊断技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
(Zhou D H, Sun Y X. Fault detection and diagnosis technology of control systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.)
- [13] 郭雷, 张纪峰, 杨晓光. 系统科学进展[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
(Guo L, Zhang J F, Yang X G. System science progress[M]. Beijing: Science Press, 2017.)
- [14] 王飞跃, 王成红. 基于网络控制的若干基本问题的思考和分析[J]. 自动化学报, 2002, 28(Z1): 171-176.
(Wang F Y, Wang C H. On some basic issues in network-based direct control systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(Z1): 171-176.)
- [15] 姜晓明, 陈兴林. 不确定性系统的非因果鲁棒学习控制[J]. 控制与决策, 2014, 29(12): 2277-2281.
(Jiang X M, Chen X L. Non-causal robust learning control for uncertain systems[J]. Control and Decision, 2014, 29(12): 2277-2281.)

(责任编辑: 郑晓蕾)