

## 模型预测控制——现状与挑战

席裕庚<sup>1,2</sup> 李德伟<sup>1,2</sup> 林姝<sup>1,2</sup>

**摘要** 30 多年来, 模型预测控制 (Model predictive control, MPC) 的理论和技術得到了长足的发展, 但面对经济社会迅速发展对约束优化控制提出的不断增长的要求, 现有的模型预测控制理论和技術仍面临着巨大挑战. 本文简要回顾了预测控制理论和工业应用的发展, 分析了现有理论和技術所存在的局限性, 提出需要加强预测控制的科学性、有效性、易用性和非线性研究. 文中简要综述了近年来预测控制研究和应用领域发展的新动向, 并指出了研究大系统、快速系统、低成本系统和非线性系统的预测控制对进一步发展预测控制理论和拓宽其应用范围的意义.

**关键词** 模型预测控制, 约束控制, 大系统, 非线性系统

**引用格式** 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战. 自动化学报, 2013, 39(3): 222–236

**DOI** 10.3724/SP.J.1004.2013.00222

## Model Predictive Control — Status and Challenges

XI Yu-Geng<sup>1,2</sup> LI De-Wei<sup>1,2</sup> LIN Shu<sup>1,2</sup>

**Abstract** Since last 30 years the theory and technology of model predictive control (MPC) have been developed rapidly. However, facing to the increasing requirements on the constrained optimization control arising from the rapid development of economy and society, the current MPC theory and technology are still faced with great challenges. In this paper, the development of MPC theory and industrial applications is briefly reviewed and the limitations of current MPC theory and technology are analyzed. The necessity to strengthen the MPC research around scientificity, effectiveness, applicability and nonlinearity is pointed out. We briefly summarize recent developments and new trends in the area of MPC theoretical study and applications, and point out that to study the MPC for large scale systems, fast systems, low cost systems and nonlinear systems, will be significant for further development of MPC theory and broadening MPC application fields.

**Key words** Model predictive control (MPC), constrained control, large scale system, nonlinear systems

**Citation** Yu-Geng Xi, De-Wei Li, Shu Lin. Model predictive control — status and challenges. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(3): 222–236

模型预测控制 (Model predictive control, MPC) 从上世纪 70 年代问世以来, 已经从最初在工业过程中应用的启发式控制算法发展成为一个具有丰富理论和实践内容的新的学科分支<sup>[1–3]</sup>. 预测控制针对的是有优化需求的控制问题, 30 多年来预测控制在复杂工业过程中所取得的成功, 已充分显现出其处理复杂约束优化控制问题的巨大潜力.

进入本世纪以来, 随着科学技术的进步和人类社会的发展, 人们对控制提出了越来越高的要求, 不

再满足于传统的镇定设计, 而希望控制系统能通过优化获得更好的性能. 但在同时, 优化受到了更多因素的制约, 除了传统执行机构等物理条件的约束外, 还要考虑各种工艺性、安全性、经济性 (质量、能耗等) 和社会性 (环保、城市治理等) 指标的约束, 这两方面的因素对复杂系统的约束优化控制提出了新的挑战.

近年来, 在先进制造、能源、环境、航天航空、医疗等许多领域中, 都出现了不少用预测控制解决约束优化控制问题的报道, 如半导体生产的供应链管理<sup>[4]</sup>、材料制造中的高压复合加工<sup>[5]</sup>、建筑物节能控制<sup>[6]</sup>、城市污水处理<sup>[7]</sup>、飞行控制<sup>[8]</sup>、卫星姿态控制<sup>[9]</sup>、糖尿病人血糖控制<sup>[10]</sup> 等, 这与上世纪预测控制主要应用于工业过程领域形成了鲜明对照, 反映了人们对预测控制这种先进控制技术的期望. 本文将在分析现有成熟的模型预测控制理论和工业预测控制技术的基础上, 指出存在的问题, 综述当前针对这些问题的研究动向, 并对模型预测控制未来可能的研究提出若干看法.

收稿日期 2012-06-25 录用日期 2012-09-29  
Manuscript received June 25, 2012; accepted September 29, 2012

本文为黄琳院士约稿  
Recommended by Academician HUANG Lin  
国家自然科学基金 (60934007, 61074060, 61104078) 资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (60934007, 61074060, 61104078)

1. 上海交通大学自动化系 上海 200240 2. 系统控制与信息处理教育部重点实验室 (上海交通大学) 上海 200240

1. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240 2. Key Laboratory of System Control and Information Processing of Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240

该文的英文版同时发表在 *Acta Automatica Sinica*, vol. 39, no. 3, pp. 222–236, 2013.

## 1 现有预测控制理论和应用技术存在的问题

上世纪 70 年代从工业过程领域发展起来的预测控制, 是在优化控制框架下处理约束系统控制问题的, 反映了约束控制的研究从反馈镇定向系统优化的发展. 大量的预测控制权威性文献都无一例外地指出, 预测控制最大的吸引力在于它具有显式处理约束的能力<sup>[1-3, 11-12]</sup>, 这种能力来自其基于模型对系统未来动态行为的预测, 通过把约束加到未来的输入、输出或状态变量上, 可以把约束显式表示在一个在线求解的二次规划或非线性规划问题中. 随着预测控制工业应用的普及和软件产品的成熟, 标准二次规划算法和序贯二次规划算法被引入预测控制的优化求解. 在全球数千个大型工业设施上的成功应用, 表明预测控制作为一种实际可用的约束控制算法, 已受到了工业过程控制领域的广泛认同<sup>[1]</sup>.

Qin 等在 2003 年发表的著名论文 [1] 中对工业预测控制的发展历程和应用现状做了完整的综述, 根据到 1999 年对于国际上 5 家主要预测控制软件厂商产品应用的不完全统计, 预测控制技术已在全球 4600 多个装置和过程中得到应用, 涉及炼油、石化、化工、聚合、制汽、制浆与造纸等工业领域, 预测控制软件产品也已经历了四个发展升级阶段. 在我国, 预测控制软件开发及典型工程应用被纳入国家“九五”科技攻关, 浙江大学、清华大学、上海交通大学等单位都开发了具有自主知识产权的多变量预测控制软件并在一些工业过程中得到成功应用. 浙大中控技术有限公司等还实现了预测控制软件的商品化并在国内推广, 有力地推动了预测控制在我国的工业应用.

尽管预测控制在国内外工业过程中都得到了成功应用, 但作为要解决当前经济社会面临的约束优化控制问题的有效技术, 仍有以下局限性:

1) 从现有算法来看, 主要还只适用于慢动态过程和具有高性能计算机的环境, 从而大大限制了其在更广阔应用领域和应用场合的推广

现有的工业预测控制算法需要在线求解把模型和约束嵌入在内的优化问题, 每一步都需采用标准规划算法进行迭代, 涉及很大的计算量和计算时间, 使其只能用于可取较大采样周期的动态变化慢的过程, 并且不能应用在计算设备配置较低的应用场合(如 DCS 的底层控制). Qin 在文献 [1] 中对已投运的线性预测控制产品的应用领域进行了分类, 在所统计的 2942 个案例中, 炼油、石化、化工领域占了绝大部分, 分别为 1985、550、144 例. 虽然这只是到 1999 年为止的数据, 而且统计的只是国际上主要预测控制商用软件产品的应用状况, 但还是趋势性地

反映出预测控制的规模应用主要局限在过程工业领域, 特别是炼油、石化工业. 对于制造、机电、航空等领域内的大量快速动态系统, 如果不采用性能较高的计算设备, 这类标准优化算法就很难满足小采样周期下的实时计算要求, 所以至今未能在这些领域内形成规模应用.

2) 从应用对象来看, 主要还限于线性或准线性过程

现有工业预测控制技术的主流是针对线性系统的, 成熟的商用软件及成功案例的报道以线性系统为多, 虽然软件厂商也推出了一些非线性预测控制产品, 但据文献 [1] 统计, 其投运案例数大致只及线性预测控制产品的 2%, 远未形成规模. 即使在过程工业中, 预测控制技术的应用也只局限在某些过程非线性不严重的行业, 如精炼、石化等, 而在非线性较强的聚合、制气、制浆与造纸等领域应用不多. 造成这一现象主要是由于在工业过程中非线性机理建模要耗费很大代价, 而且很难得到准确的模型, 此外非线性约束优化问题的在线求解尚缺乏实时性高的有效数值算法. 面对着经济社会发展各行各业对预测控制技术的需求, 对象或问题的非线性将更为突出. 控制界和工业界都认识到发展非线性预测控制的重要性, 例如以非线性模型预测控制为主题的两次国际研讨会 NMPC05、NMPC08, 就汇聚了国际知名学者和工业界专家认真评价和讨论非线性模型预测控制的现状、未来方向和未解决的问题<sup>[13-14]</sup>. 但到目前为止, 虽然非线性模型预测控制已成为学术界研究的热点, 但在工业实践中仍然处于刚起步的状态<sup>[15]</sup>.

3) 从应用技巧来看, 主要还需依靠经验和基于专用技巧 (Ad-hoc) 的设计

现有的预测控制算法多数采用工业界易于获得的阶跃响应或脉冲响应这类非参数模型, 并通过在线求解约束优化问题实现优化控制, 对于约束系统无法得到解的解析表达式, 这给用传统定量分析方法探求设计参数与系统性能的关系带来了本质的困难, 使得这些算法中的大量设计参数仍需人为设定并通过大量仿真进行后验, 因此除了需要花费较大的前期成本外, 现场技术人员的工作经验对应用的成败也起着关键的作用, 实施和维护预测控制技术所需要的高水平专门知识成为进一步应用预测控制的障碍. 30 多年来, 工业预测控制的技术和产品仍保持着其原有的模式, 并没有从预测控制丰富的理论成果中获取有效的支持. 最近, 应用界已认识到长期以来在过程工业中成功应用但其基本模式保持不变的工业预测控制算法的局限性, 研发预测控制技术的著名软件公司 Aspen Technology 正在考虑摆脱传

统的模式,通过吸取理论研究的成果研发预测控制的新产品<sup>[16]</sup>.

综上所述,预测控制技术的应用虽然取得了很大的成功,特别在过程控制界已被认为是唯一能以系统和直观的方式处理多变量约束系统在线优化控制的先进技术,但它的应用领域和对象仍因现有算法存在的瓶颈而受到局限,对于更广泛的应用领域和更复杂的应用对象,只能从原理推广的意义上研究开发相应的预测控制技术,远没有形成系统的方法和技术.此外,现有的工业预测控制算法与近年来迅速发展的预测控制理论几乎没有联系,也没有从中汲取相关的成果来指导算法的改进.因此在解决由于科学技术和经济社会发展所带来的各类新问题时,还面临着一系列新的挑战.

与预测控制的实际应用相比较,预测控制的理论研究从一开始就落后于其实践.纵观预测控制理论研究的进程,不难发现它经历了两个阶段<sup>[17]</sup>:上世纪 80 年代到 90 年代以分析工业预测控制算法性能为特征的预测控制定量分析理论,以及上世纪 90 年代以来从保证系统性能出发设计预测控制器的预测控制定性综合理论.由于后者能够处理包括线性或非线性的对象,包括输入、输出和状态约束在内的相当一般的约束,包括稳定性、优化性能和鲁棒稳定等不同要求的问题,因此引起了学术界极大的兴趣.十多年来,在国际主流学术刊物上已涌现了大量相关论文,呈现出学术的深刻性和方法的创新性,也为约束系统优化控制的研究带来了新的亮点.

经过十多年的发展后,预测控制的定性综合理论虽然已取得了丰硕的成果,发表了数以百计的具有很高理论价值的论文,但就目前的研究成果来看,还未能被应用领域所接受.除了这些理论所综合出的算法具有工业界不常采用的模型外,其从综合出发的研究思路也存在着本质的不足.

#### 1) 物理意义不明确,难以与应用实践相联系

预测控制的定性综合理论与定量分析理论不同,在每一时刻的滚动优化中,不是面对一个已有的、根据实际优化要求和约束条件确定的在线优化问题,而需要把在线优化的内容结合控制律一并综合设计.为了得到系统性能的理论保证,往往需要在具有物理意义的原始优化问题中修改性能指标(加入终端惩罚项),加入诸如终端状态约束、终端集约束等人为约束<sup>[18]</sup>,这不但增加了设计的保守性,而且因为这些人为约束与系统受到的实际物理约束一并表达为同一优化问题中的约束条件,使得优化问题中具有物理意义的原始约束湮没在一系列复杂数学公式所表达的整体条件中,这些条件需要通过计算后验,缺乏对实际应用中关注的带有物理意义的分析结论.

最典型的如在实际应用中的可行解指的是系统满足所有硬约束的解,而在预测控制定性综合理论中,可行性是指除了满足对系统状态和输入的硬约束外,还要满足包括不变集、Lyapunov 函数递减、性能指标上限等在内的由系统设计所引起的一系列附加约束,甚至后者还成为约束的主体,因此很难与应用实践紧密联系.此外,约束下系统状态的可行域有多大,线性矩阵不等式是否有解,如果无解,约束放松到何种程度可以求解等,都无法从现有的研究结果中得到.

#### 2) 在线计算量大,无法为应用领域所接受

预测控制定性综合理论研究的出发点是如何在理论上保证闭环系统在算法滚动实施时的稳定性、最优性和鲁棒性,通常要把原优化问题转化为由新的性能指标和一系列线性矩阵不等式 (Linear matrix inequality, LMI) 约束描述的优化算法,所以几乎每一篇论文都会根据所研究的问题提出一个甚至多个预测控制综合算法.但是这些研究的重点几乎都放在算法条件如何保证性能的理论证明上,至于算法的具体实施,则认为已有相应的求解软件包即可,并不关注其在线实现的代价.大量人为约束的加入,虽然对系统性能保证是必要的,但同时也极大地增加了优化求解的计算量.特别对鲁棒预测控制问题,由于所附加的 LMI 条件不但与优化时域相关,而且与系统不确定性随时域延伸的各种可能性有关, LMI 的数目将会急剧增长,对在线计算量的影响更为突出.虽然近年来这一问题已开始得到重视,但总体上因其在线计算量大的不足,很难受到应用领域的关注,也很少有在实际中成功应用的案例报道.

在预测控制形成的初期,人们曾多次指出其理论研究落后于实际应用,两者之间存在着较大的差距.经过十多年来学术界的努力,虽然形成了成果丰富的预测控制定性综合理论,但由于两者的出发点不同,其理论意义明显高于实用价值,实际上并没有缩小预测控制理论和应用间的差距,远未成为可支持实际应用的约束优化控制的系统理论.

综合以上对预测控制应用状况和理论发展的分析可以看出,虽然预测控制的工业应用十分成功,预测控制的理论研究体系也相当完善,但现有的预测控制理论和应用之间存在着严重的脱节,不能满足当前经济社会发展对约束优化控制的要求.我们可以把现有预测控制理论和应用技术存在的问题主要归结为:

1) 有效性问题.无论是工业预测控制算法还是由预测控制定性综合理论所设计的控制算法,均面临着在线求解约束优化问题计算量大这一瓶颈,极

大地限制了其应用范围和应用场合。

2) 科学性问题. 预测控制理论研究和实际应用仍有较大距离, 商品化应用软件很少吸收理论研究的新成果, 理论研究的进展也不注意为实际应用提供指导, 缺少既有性能保证又兼顾计算量和物理直观性的综合设计理论和算法。

3) 易用性问题. 目前的预测控制算法都建立在约束优化控制问题一般描述和求解的基础上, 对计算环境的要求和培训维护成本都比较高, 缺少像 PID 控制器那样形式简洁、可应用于低配置计算环境、易于理解和掌握的“低成本”约束预测控制器。

4) 非线性问题. 目前预测控制理论和算法的主要成果是针对线性系统的, 由于实际应用领域中存在大量非线性控制问题, 这方面的研究特别是应用还很成熟。

## 2 当前研究动态

随着本世纪科技、经济和社会的发展, 各应用领域对约束优化控制的需求日益增长, 人们对上面提到的工业预测控制算法和现有预测控制理论的不足有了越来越清晰的认识, 促使预测控制理论和应用的研究向着更深的层次发展。当前, 模型预测控制已成为控制界高度关注的热点, 在各类学术刊物和会议上发表的与预测控制相关的论文居高不下。仅在 2007 年~2011 年的五年中, 通过对 Elsevier 出版物及 IEEE 数据库的不完全检索, 已查到预测控制相关论文 1 319 篇, 其中在 *Automatica*、*Control Engineering Practice*、*Journal of Process Control*、*IEEE Transactions on Automatic Control* 等刊物上发表的相关论文数分别为 74 篇、75 篇、164 篇、35 篇。2008 年和 2011 年两次 IFAC 世界大会上, 与预测控制有关的论文分别为 131 篇和 138 篇。对预测控制工业应用技术做出全面综述的论文“A survey of industrial model predictive control technology”<sup>[1]</sup> 在 2008 年 IFAC 世界大会上获得 CEP 最佳论文奖, 全面综述预测控制稳定性理论的论文“Constrained model predictive control: stability and optimality”<sup>[2]</sup> 在 2011 年 IFAC 世界大会上获得了最有影响力奖 (High Impact Award)。在国内, 除了与国际同步开展的对预测控制理论的研究外<sup>[19-26]</sup>, 预测控制的应用已从传统的炼油、石化、化工行业延伸到电力<sup>[27]</sup>、钢铁<sup>[28]</sup>、船舶<sup>[29]</sup>、空天<sup>[30]</sup>、机电<sup>[31]</sup>、城市交通<sup>[32]</sup>、渠道<sup>[33]</sup>、农业温室<sup>[34]</sup> 等领域, 各种新的改进算法和策略也屡见报道。

通过对近年来国内外预测控制研究工作的分析, 可以清楚地看到, 一方面, 人们对预测控制解决在线

约束优化控制寄予很高的期望, 试图利用它解决各自领域中更多更复杂的问题; 另一方面, 工业预测控制算法的不足和现有预测控制理论的局限, 又使人们在解决这些问题时不能简单地应用已有的理论或算法, 必须研究克服其不足的新思路和新方法。这种需求和现状的矛盾, 构成了近年来预测控制理论和算法发展的强大动力, 同时也是预测控制理论和算法尽管似乎已很成熟, 但人们仍然还在不断研究的主要原因。针对上述预测控制理论和算法的不足, 现阶段国内外开展的研究可大致归结为以下几个方面:

1) 研究降低预测控制在线优化计算量的结构、策略和算法

预测控制在线求解约束优化问题计算量大这一瓶颈, 极大地限制了其应用范围和应用场合。针对这一问题, 人们从结构、策略、算法层面开展了广泛的研究。

a) 结构层面: 递阶和分布式控制结构

随着制造、能源、环境、交通、城市建设等领域的迅猛发展, 企业集成优化系统、交通控制系统、排水系统、污水处理系统、灌溉系统等大规模系统的预测控制受到了格外的关注<sup>[7, 35-38]</sup>, 这类大系统的特点是组成单元多、模型复杂、变量数目巨大, 整体求解其大规模约束优化问题在实际中几乎不可行。因此, 针对实际系统的应用需求, 人们普遍借鉴传统大系统理论提供的递阶控制结构把整体优化求解的复杂性进行分解。虽然基于同一模型分解协调的多级递阶控制方法在理论上已发展得较为成熟, 但考虑到模型和实际环境的复杂性, 在研究中通常更倾向于应用在不同层次采用不同模型的多层递阶结构<sup>[39]</sup>, 其研究的重点在于确定各层次的模型和优化控制目标以及协调各层次之间的关系, 由此发展有效可行的控制框架和算法, 所提出的控制方案和算法常通过仿真或实际运行数据加以验证。

在大规模系统预测控制的研究中, 近年来更受到重视的是采用分布式结构降低计算复杂性<sup>[40-41]</sup>, 分布式预测控制基于用局部信息进行局部控制的思想把大规模约束优化控制问题分解为多个小规模问题, 不仅可以大大降低计算负担, 而且提高了整体系统的鲁棒性。分布式预测控制的研究重点包括各子系统之间耦合关联的处理、子系统的优化决策及相互间的信息交换机制、全局稳定性的保证及最优性的评估等<sup>[42]</sup>。近年来通信技术的发展和分布式控制软硬件的完善, 使分布式预测控制从理论走向实践, 应用已遍及到多个领域, 包括过程控制<sup>[43]</sup>、电力系统<sup>[44]</sup>、交通系统<sup>[45]</sup> 及近年来十分活跃的多智能体协作控制等<sup>[46]</sup>。

b) 策略层面: 离线设计/在线综合与输入参数

## 化策略

在预测控制定性综合理论研究中,虽然系统性能可得到严格的理论保证,但设计所带来的额外计算负担十分庞大,导致本来已成为应用瓶颈的在线计算复杂性更为突出,这也是应用界对这些理论研究成果可用性的主要质疑.针对这一问题,在预测控制的定性综合中提出了“离线设计、在线综合”的策略,通过把所综合控制律的部分在线计算转换为离线计算,达到降低在线计算量的目的.文献[47]应用该思路给出了文献[18]提出的约束鲁棒预测控制器的简化设计方法;文献[48]利用名义系统指标离线设计不变集序列,在线时通过核算当前状态所在的最优不变集来确定控制律;类似的设计还包括文献[49];文献[50]通过离线求解有限时域优化控制序列,并采用 Set membership 来得到近似最优解,以提高求解效率.

在这里特别要提到的是由 Bemporad 等提出的显式 (Explicit) 模型预测控制器<sup>[51-52]</sup>,它通过对预测控制在线约束优化问题的分析,离线求解多参数规划问题,对约束状态空间分区并设计各区间的显式反馈控制律;在线控制时,只需依据系统的当前状态,选择实施相应的状态反馈控制律.这种方法把大量计算转移到离线进行,在线控制律的计算十分简易,而且有坚实的理论基础,因此受到了广泛的关注,进一步研究算法简化和对非线性系统的推广、以及算法在微处理器中的应用等也已见报道,如文献[53-54].但该方法离线需求解一个 NP-hard 的多参数规划问题,离线计算量随着问题规模增大而急剧增加,同时由于分区数的指数增长而导致巨大的内存需求,只能应用于小规模的问题<sup>[55]</sup>.为此,近年来国内外学者进行了进一步的探索.文献[56]采用分段连续网格函数 (Lattice PWA function) 表示显式预测控制的解,以降低其对于存储空间和在线计算的要求;文献[57]通过分析二次规划问题求解方法在存储和计算方面的复杂度,提出一种半在线的显式预测控制算法,在存储量和在线计算时间之间进行平衡;文献[58]将动态规划和显式预测控制方法相结合,把预测控制的优化问题分解为小规模问题;而文献[59]针对非线性系统预测控制问题提出了近似的显式预测控制方法.

离线设计、在线综合的方法能有效地解决预测控制在线优化计算量大的瓶颈问题,但要求原有的预测控制器设计方法可以进行分解,并且需要为在线综合保留一定的自由度,因此不能适用于所有的预测控制定性综合算法.

在工业预测控制算法中,为了降低在线优化的计算量,很早就采用了启发式的“输入参数化”策

略<sup>[1]</sup>,包括输入“分块化 (Blocking)”技术<sup>[60]</sup>和预测函数控制算法<sup>[61]</sup>,前者把一定时间段内的控制量设置为不变,以减少控制自由度的代价来降低在线优化问题的规模,后者则把控制量表达为一组基函数的组合,使在线优化变量转化为数目较少的基函数的系数.这些策略虽然有很强的实用性并已大量应用于实际过程,但缺乏对系统稳定性等的理论保证.现有的预测控制稳定性综合方法在用于这类系统时,又因输入参数化造成递归可行性难以保证而不能奏效.近年来国内外学者对此进行了进一步的研究.对于 Blocking 技术,文献[62]采用时变的集结矩阵保证集结预测控制器的闭环稳定性,文献[63-64]就集结预测控制器的可行性问题进行了研究,并提出改善其可行性的方法.文献[65]提出了预测控制优化变量的广义集结策略,这一框架不但可以涵盖以上两种方法,而且由于把原有输入参数化的物理映射扩展为集结变换的数学映射,提供了更大的设计自由度,也为系统分析建立了必要的基础.在此基础上,文献[66]进一步设计了等效/拟等效集结策略以改善集结预测控制的控制性能.

### c) 算法层面: 各种改进或近似优化算法

针对约束预测控制在线优化的问题形式,对标准优化算法进行改进或做适当近似,也是近年来降低预测控制在线计算量的一类尝试.文献[3]列举了在线求解大型二次规划 (Quadratic programming, QP) 和非线性规划问题时对算法的若干改进工作.文献[55]提出用扩展的 Newton-Raphson 算法取代现有算法中常用的二次规划和半定规划 (Semidefinite programming, SDP) 算法,可使计算量降低 10 倍以上.文献[67]提出了三种针对预测控制在线求解 QP 问题的快速算法.文献[68]打破了求解优化问题中“优化直至收敛”的概念,提出了实时迭代的概念,它在每一采样时刻只需计算一次迭代,其结果通过特定的移位与下一时刻的优化问题联系起来,在此基础上,文献[69]又提出了基于伴随导数和非精确雅可比阵的优化算法.文献[70]提出了采用部分列表的快速、大规模模型预测控制方法.此外,采用神经网络求解二次规划等问题又有了新的发展,与以往的工作相比,新的神经网络方法在保证收敛到全局最优解及降低神经网络结构复杂度方面都取得了较好的结果<sup>[71]</sup>.

### 2) 鲁棒预测控制理论的研究更加注重实际可用性

鲁棒预测控制理论在上世纪 90 年代中期已初步形成,从本世纪以来更成为预测控制理论研究的重点,在已有大量成果基础上,近年的研究更注意向实际靠拢和解决相关的难点问题.

#### a) 输出反馈鲁棒预测控制器的设计

早期的鲁棒预测控制研究大多基于状态可测的假设, 这一假设不符合大量实际系统的现状, 因此近年来人们采用输出反馈而非状态反馈对鲁棒预测控制开展了大量研究. 相比于状态反馈设计, 输出反馈设计中重构状态的误差对保证系统可行性和稳定性带来了新的问题, 因此设计具有较高的难度. 针对具有外加扰动的定常系统, 文献 [72] 利用时变状态估计器和 Tube 技术设计输出反馈预测控制器, 在理论上保证了所设计输出反馈预测控制器的递归可行性和稳定性; 文献 [73] 针对具有非结构化的模型不确定系统, 在较小的可行范围内将原系统转化为定常加扰动系统, 进而采用双模控制方法设计输出反馈预测控制器; 针对同时具有模型不确定性和外界扰动的系统, 文献 [74–75] 分别采用固定的状态观测器和动态输出反馈方法进行输出反馈预测控制器设计, 其中文献 [75] 将动态输出反馈的参数也作为预测控制的在线优化变量, 降低了设计的保守性. 与文献 [75] 类似, 文献 [76] 研究了系统参数可测的模型不确定系统的输出反馈预测控制器设计.

#### b) 协调可行域、在线计算量和控制性能的矛盾

在鲁棒预测控制中, 对初始可行域、在线计算量和控制性能的要求往往会发生冲突<sup>[17]</sup>. 因此, 如何有效地在这三者之间进行平衡, 是鲁棒预测控制理论近期研究的重点内容. 通常人们首先考虑如何扩大初始可行域和改善控制性能, 然后探索是否可通过离线设计、在线综合降低在线优化的计算复杂度.

预测控制在线优化的传统做法是把控制时域内的控制变量直接作为优化变量, 在线求解开环最优控制问题. 但 Mayne 在文献 [2] 中提出, 如果把这些控制变量全部或部分地表达为系统状态的反馈, 构成闭环预测控制, 则可增大预测控制器的可控范围, 提高控制性能. 对闭环预测控制的研究包括采用固定反馈控制器和附加自由扰动量的有效鲁棒预测控制器<sup>[77]</sup> 及其一系列改进和发展<sup>[78–79]</sup>, 以及基于周期不变集设计反馈预测控制器的方法<sup>[80]</sup>. 最近, 文献 [81–82] 提出了多步控制集的概念, 通过采用时变的多步反馈控制律替代以往的单一反馈律, 增加设计的自由度, 从而降低保守性. 这一设计方法还被应用到参数变化有界的 LPV 系统中<sup>[83]</sup>.

此外, 文献 [84] 针对结构不确定系统, 提出引入松弛矩阵来设计预测控制器, 从而扩大了设计方法所适应对象的范围; 文献 [85–86] 考虑到实际系统中的约束通常具有线性、非对称的形式, 用多面体不变集要比传统的椭圆不变集更切合实际和更少保守性, 提出了基于多面体不变集的鲁棒预测控制器设计方法, 其中多面体不变集可通过几何方法来

得到<sup>[87]</sup>, 这一过程可转变为求解一组二次规划问题; 对于输入饱和系统, 文献 [88] 借鉴约束控制理论中饱和控制律的解析形式, 对实际控制律和辅助控制律设置不同权值, 改善了控制器性能; 文献 [89] 针对模型不确定的扰动系统设计  $H_\infty$  预测控制器, 同时解决了镇定和扰动抑制的问题.

#### 3) 非线性和随机系统预测控制理论受到高度关注

非线性及随机性都是工业过程中常见的系统动态特性, 其预测控制理论的研究成果一直存在假设前提多、设计难度大、结论保守等缺陷. 近年来, 为了推进预测控制的实际应用, 非线性系统及随机系统的预测控制理论有了新的发展.

##### a) 非线性预测控制器设计

从上世纪 90 年代以来发展起来的预测控制定性综合理论已在原理上解决了非线性预测控制的稳定综合问题<sup>[2]</sup>, 鲁棒非线性预测控制器的综合也取得了丰富的成果<sup>[90]</sup>. 近年来, 非线性预测控制除了稳定性和鲁棒性研究外, 还进一步扩展到状态估计与输出反馈、复杂系统、随机系统、跟踪问题、显式算法、数值算法等方面<sup>[13–14]</sup>, 并结合实际应用的需要, 对一些特定非线性系统的预测控制进行了深入研究.

对于非线性系统来说, 采用 T-S 模型刻画其动态特性的建模方法已发展得相当成熟. 文献 [91] 针对采用 T-S 模型描述的非线性系统, 在稳定性条件的基础上, 基于不变集理论和 LMI 设计了输出反馈预测控制器, 在理论上保证了预测控制器的可行性和稳定性; 文献 [92] 同样采用 T-S 模型, 并结合 Off-set free 技术设计输出跟踪预测控制器, 以减小扰动对于跟踪效果的影响, 类似的研究还包括文献 [93–94] 中提出的方法.

混杂系统是另一类常见的非线性系统, 尤其适合刻画具有逻辑切换的不连续动态过程. 自 Bemporad 等于 1999 年在文献 [95] 中将具有逻辑开关特点的分段线性系统通过增加适当的逻辑变量转化为混合逻辑系统, 进而采用混合规划方法设计其最优控制和预测控制以来, 混合整数规划已成为此类研究中最常用的求解方法<sup>[96–97]</sup>. 与混杂系统原理类似的还包括多模型预测控制的研究<sup>[98–99]</sup>. 两者的最大不同在于: 基于混合逻辑系统的预测控制对于系统的刻画较为精确, 需要预测并优化系统的切换过程, 而多模型预测控制在不同工作点模型间的切换直接采用设计的规则 (如模糊规则等), 并不需要优化.

##### b) 随机预测控制理论

随机系统是一类不确定系统, 但其不确定性满



足特定的统计概率, 如果将这些概率信息合理地包含到预测控制器的设计中, 就可得到保守性较低的设计. 此类研究根据对象特点大致可分为针对随机不确定模型和随机扰动系统两类.

针对具有正态分布的随机不确定模型, 以往鲁棒预测控制的设计方法不再适用. 文献 [100] 提出了概率不变集的概念, 以给定概率满足系统约束, 设计期望稳定的预测控制器. 尽管该文中存在一些小的技术错误<sup>[101]</sup>, 但其提出的约束概率满足的概念有别于以往的鲁棒预测控制, 为随机系统的软约束设计提供了新的思路. 基于这一思路, 人们对扰动系统及具有随机模型不确定性和扰动的系统采用 Tube 技术等开展了进一步研究<sup>[102-104]</sup>. 此外, 具有 Markov 跳变特点的随机系统预测控制也引起了国内外研究者的关注<sup>[105-106]</sup>, 此类研究经适当转换, 可以归结为常规鲁棒预测控制器的设计.

对于随机扰动系统的预测控制问题, 可以借鉴仿射扰动反馈的设计方法<sup>[107-108]</sup>, 该方法基于参数化的设计思路, 利用以前的扰动信息结合反馈律和附加控制量进行控制, 既可用于随机扰动系统, 也可用于一般的有界扰动系统, 但该方法要求系统状态可测, 以便通过模型计算扰动输入. 文献 [109] 进一步增加了该控制策略的自由度, 获得了更好的控制性能, 文献 [110] 则把该设计方法应用到无界扰动系统, 得到其输出反馈预测控制器.

#### 4) 预测控制应用向更多领域扩展

在近年的预测控制文献中, 相当一部分报道了预测控制在应用中的发展, 除了在工业过程中直接应用已有技术外, 还反映出向新的层次和工业过程以外众多领域的扩展.

##### a) 在工业生产过程中的应用扩展

在工业过程中, 长期以来预测控制主要用在动态控制级保证系统工作在给定的工况, 而优化级的任务则是根据当前工况和生产经济指标设定各子过程的工作点. 近年来, 预测控制的应用进一步加强了与经济性指标的结合. 一方面, 直接把经济性指标加入到动态控制级的经济预测控制 (Economic MPC) 开始得到研究<sup>[111]</sup>; 另一方面, 由于生产环境的不确定性和多变性, 实时优化 (Real-time optimization, RTO) 技术得到了高度重视并正在取代传统的稳态优化, 而预测控制也开始在 RTO 中扮演重要角色, 把 RTO 和预测控制相结合, 采用动态 RTO 替代以往的静态优化, 可以提高对于不确定参数等的适应性<sup>[112]</sup>. 文献 [113] 研究了实时优化的并行 Dantzig-Wolfe 分解方法和分散式结构. 实时优化作为工业界高度关注的技术, 如何充分利用预测控制动态优化的特色, 针对大规模复杂系统降低优化的复杂度,

并有效地适应市场、原料等不确定因素的影响, 仍是工业生产过程全局优化的重要课题.

扰动是工业过程中影响控制系统性能的主要因素之一, 预测控制在跟踪控制、无静差控制等方面的理论研究结果为工业过程降低扰动的影响提供了有效借鉴. 文献 [114] 应用无静差控制方法, 研究了工业过程中目标工作点的在线计算问题, 文献 [115] 将无静差策略用于抑制外界扰动的影响, 并应用于 PTA 的精馏塔控制中, 取得了良好的效果; 文献 [116] 把文献 [117] 对具有扰动系统的鲁棒预测控制设计理论应用到实际过程的控制中.

近年来预测控制的工业应用还体现出工业界对预测控制理论成果的关注和结合, 如随机预测控制应用于工业油冷过程的温度控制<sup>[118]</sup>, 显式随机预测控制在燃烧控制中的应用<sup>[119]</sup>, 基于神经网络的预测控制方法在非线性的工业系统中的应用<sup>[120]</sup>, 针对具有周期重复特点的过程或设定 (扰动) 信号, 把自学习控制 (或重复控制) 机理融入预测控制框架的自学习 (或重复) 预测控制方法<sup>[121-123]</sup> 等, 这些研究在一定程度上推进了预测控制理论与应用的结合.

##### b) 向大规模系统和网络系统的扩展

近十几年来, 随着网络技术的迅速发展, 一方面, 针对大规模被控对象的递阶控制、分布式控制系统大量出现. 2008 年 9 月, 欧盟第七框架启动了由 10 个单位参与、为时 3 年的专题创新项目“大系统递阶和分布式预测控制”, 其主要目标就是针对这类由众多子系统和大量嵌入式传感器和执行器组成的大型复杂网络系统, 研发递阶和分布式预测控制新的有效方法和算法, 重点解决计算复杂性、不确定性和各层次内部和相互之间的协调, 使系统安全、高效、鲁棒运行<sup>[124]</sup>. 预测控制在这些系统中的应用已屡见报道, 如巴塞罗那供水系统的递阶和分散预测控制<sup>[125]</sup>, 递阶预测控制方法应用于城市污水处理系统<sup>[126]</sup>, 基于递阶预测控制方法研究电厂的组合控制设计<sup>[127]</sup>, 分布式预测控制在轧钢企业钢板加速冷却系统中的应用<sup>[128]</sup>, 预测控制在交通控制领域中的应用<sup>[129-130]</sup> 等. 另一方面, 与通信过程密切相关的网络化预测控制也受到了广泛的关注. 与分布式预测控制的研究不同, 网络化预测控制的研究更关注网络传输对控制系统产生的影响, 如网络时延、数据包丢失等. 文献 [131] 研究了在网络环境中的分布式预测控制优化算法; 文献 [132] 利用预测控制对于约束的解析处理能力, 针对具有传输丢包的非线性对象设计基于 Lyapunov 函数的预测控制器; 文献 [133] 针对前向和反向通道中具有定常/时变时延及丢包的系统进行了预测控制的研究.

##### c) 向新的应用领域扩展

以风电、太阳能等为代表的新能源系统所提供的能源输出具有不确定性且受到很多外界条件的约束, 预测控制处理约束优化的能力使之在优化这些系统的运行和维护中受到青睐, 如把预测控制方法应用于燃料电池的氧气过量比的控制中, 取得了较好的控制效果<sup>[134]</sup>; 针对太阳能空调系统具有时滞和非最小相位特点, 采用滑模预测控制方法进行控制, 提高系统的鲁棒性和抗扰动性能<sup>[135]</sup>; 采用约束鲁棒预测控制结合反馈线性化方法设计太阳能脱盐装置的控制系統<sup>[136]</sup>; 应用预测控制方法研究风电系统中风机和风场的优化控制<sup>[137-138]</sup>等。此外, 利用预测控制方法进行能源调度和管理也受到关注<sup>[139]</sup>。

汽车电子和船舶系统也是预测控制近年来大量应用的领域, 如约束预测控制方法应用于船舶减摇鳍的控制<sup>[140]</sup>, 采用扰动补偿的预测控制方法解决船头航向控制中的约束保证问题<sup>[141]</sup>, 针对汽车自动驾驶问题, 研究相关的信息利用、节能以及多目标优化问题, 并应用于小型汽车 (SMART) 中<sup>[142-144]</sup>, 用预测控制方法研究无人驾驶汽车的驱动/避障和怠速控制问题<sup>[145-146]</sup>等。

以往的预测控制通常应用于动态较为缓慢的系统。近年来, 越来越多的快速系统开始应用预测控制方法来提高其约束处理和性能。在电力电子领域内, 文献 [147] 针对交流电机直接转矩控制提出采用预测控制方法来降低电子元件的切换频率且保持输出转矩, 类似的研究还有文献 [148] 中提出的方法。由于此类系统一般维数较低, 面临的存储等问题容易解决, 通常可用显式预测控制方法作为其实施的控制算法<sup>[149-151]</sup>。

除了上述领域外, 预测控制的应用还包括空调优化控制<sup>[152]</sup>、飞行器控制<sup>[153-154]</sup>、机器人路径动态规划<sup>[155]</sup>、医疗<sup>[156]</sup>和高能物理<sup>[157]</sup>等, 预测控制的应用领域正在不断扩展。

#### 5) 研究预测控制算法在底层控制设备中的实现

预测控制算法的实施通常需要采用高性能的计算设备, 但随着现场控制设备和嵌入式系统的发展和应用领域的扩展, 预测控制算法也开始向底层控制渗透, 如何在计算能力有限的底层设备上实现预测控制算法近年来已成为研究热点。

可编程逻辑控制器 (PLC) 是一类常用的现场控制设备, 文献 [158] 研究了在 PLC 上实施预测控制算法的方法, 从显式预测控制的思路出发, 采用固定数目的顶点而不是面来表示多面体, 进而提出求解预测控制优化问题次优解的快速方法, 并将算法在 PLC 上成功实施。

在当前常用的嵌入式系统中, FPGA 由于具有良好的计算性能、并行处理能力以及开发架构受到

研究者的关注。文献 [159] 采用牛顿法作为求解算法, 在仔细分析预测控制在线求解二次规划问题的计算过程的基础上, 采用一个矩阵协处理器和一个能力有限的主处理器协同工作, 实现了在嵌入式系统中的预测控制算法; 针对预测控制在线优化中的二次规划问题, 文献 [160] 比较了内点法和有效集法在嵌入式实现方面的优缺点, 指出有效集法在规模较小问题上的优势; 文献 [161] 针对只有输入约束的系统, 基于标准有效集法, 利用 FPGA 的并行处理能力设计二次规划求解模块, 进而设计预测控制器; 文献 [162] 给出了标准有效集法的嵌入式完整实现, 并应用到跟踪系统的控制以及反渗透膜海水脱盐系统的控制中<sup>[163]</sup>。

以上对近阶段预测控制理论和算法发展动态的分析表明, 在科技、经济和社会发展对控制不断提出新的挑战的今天, 约束预测控制已成为控制理论界和应用界共同关注的热点, 人们正从多方面做出努力, 发展对实际应用更有针对性和指导性的约束预测控制理论和算法。

### 3 展望和可能的研究方向

根据对预测控制理论及应用中存在的问题和近期研究动态的分析可以看出, 研究和发展约束模型预测控制的理论和高效算法已成为当务之急, 其重点应解决现有工业预测控制算法在线计算量大、实施要求高、应用范围局限的不足, 缩小现有预测控制理论与实际应用的差距。从这一目标出发, 可以重点针对几类具有不同学术特征的系统, 如大系统、快速系统、低成本系统和非线性系统, 围绕现有预测控制技术应用到这些系统时面临的难点问题开展预测控制理论和算法的研究, 并结合典型案例进行应用试点, 从而提高预测控制算法的实时性、科学性和易用性, 增强预测控制理论的实际针对性和可用性。这些特征系统与应用领域和约束预测控制存在问题的关系如图 1 所示。

#### 1) 大规模系统

对于城市交通网、排水网、大型生产过程、多运动体协作系统等信息和控制具有分布式特征的大系统, 因维数高和信息不完全, 现有的针对对象或装置的集中式工业预测控制算法无法直接应用, 实时约束优化控制的全局目标需要通过递阶结构或分布式结构实现。除了需要研究不同控制结构下预测控制算法在线信息交互迭代的收敛性、控制的全局稳定性及鲁棒性、性能的次优性等理论问题外, 面向这类大系统应用需求, 发展实用有效的预测控制策略和算法也存在着不少难点问题, 例如:

##### a) 城市交通、排水等网络大系统的模型具有高



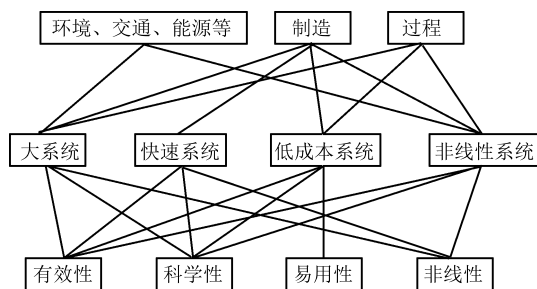


图 1 四类特征系统与应用领域和存在问题的关系

Fig.1 The relationship between four typical systems and application fields/existing problems

度复杂性(分布参数或混杂、非线性等),已有的具有黑箱性质的商品软件包可有效地用于预测,但不能用于需要解析知识的优化,需要研究基于系统仿真的高效寻优算法。

b) 这类网络大系统的分层递阶控制结构中,不同层次应采用不同的模型,需要研究全局、区域和实施层面分别基于复杂网络理论、解析集结方法和数据驱动技术的建模、预测和优化方法,以及各层次优化控制的关系及层次间的信息协调。

c) 大型生产过程的优化面临着数学模型混杂、产品质量只能在最终检测的困难,预测控制的应用必须考虑系统的混杂特性及反馈的非实时性,其分布式实现需要研究全局目标与子系统目标的关系以及协调各子系统提高全局性能的机制。

d) 在多运动体协作中,运动体间信息交换受到严格限制,系统拓扑结构随状态时变,现有的未考虑优化的分布式反馈控制律和面对固定信息结构的分布式约束预测控制算法都不能简单搬用。需要针对物理约束、拓扑约束及拓扑时变发展有效的分布式预测控制算法,并评估算法在受到约束时的性能退化。

## 2) 快速动态系统

具有快速动态的机电系统,广泛存在于制造、航空、航天等领域,这类系统的约束控制正在从原来的反馈镇定向优化控制发展,但目前的工业预测控制算法在求解实时约束优化问题时需进行反复迭代,已被公认为不适于快速动态系统的控制,需要发展既能保持约束优化特征、又具有良好实时性的预测控制高效算法。对此可考虑从以下两方面开展研究:

a) 在近年来约束预测控制研究中提出的一系列减少预测控制在线计算量的理论和策略基础上,加强算法的实用化研究,如研究在线优化计算复杂度可适应快速系统实时控制要求的离线设计在线综合方法,在优化变量广义集结策略中通过优化算法的改进提高实时性,解决显式预测控制方法控制性能

与内存要求的矛盾等。

b) 约束反馈控制的理论成果具有物理意义明晰、在线计算量小、问题描述和求解具有解析形式的优点,很适合于快速动态系统,但不能处理具有优化要求的问题,因此需要在现有约束反馈控制理论基础上做进一步的扩展,把优化嵌入到现有反馈控制律的设计过程中,研究具有简单处理约束优化能力的显式约束反馈控制律,并在理论上研究其性能保证问题。

## 3) 低成本预测控制器

现有的工业预测控制算法通常定位在工业过程递阶结构中的动态优化层,其昂贵的价格、复杂的实施和调试过程以及专业化的维护要求阻碍了其在大量简单对象和底层装置中的应用。随着分布式控制装置、现场总线系统和嵌入式系统在各领域的广泛应用,迫切需要研究适合于底层约束优化控制和易于芯片化实现的约束预测控制器,它在成本、调试和实施方面应具有 PID 控制的优点,但在处理约束和实现优化方面应能超越 PID 控制,因而有望为广大用户接受,成为一种与 PID 控制器同样普及的新型通用控制器。这一工作的难点在于底层控制装置的运算速度和内存容量都受到制约,对此可以从下面几方面作进一步研究:

a) 从算法角度考虑,研究具有简单结构的约束预测控制算法,特别当底层控制主要是回路控制时,可在已有的预测 PID 控制器、基于定量分析理论的内模控制器等无约束预测控制器的基础上,研究约束处理机制的加入,形成适用于低配置装置的约束预测控制算法。

b) 针对预测控制在线优化问题,在现有的用神经网络实现二次规划等研究工作的基础上,进一步研究预测控制通过电路或算法的简单、快速实现。

c) 针对不同的嵌入式控制平台,通过对在线约束优化算法进行细致分析,合理地组织和分配任务,以软、硬件联合的方式高效实现约束优化算法。在这里特别要注意计算时间不仅与分配的计算任务有关,而且与数据通信的频度有关,如何合理地平衡这两者的关系,必须在设计嵌入式高效约束预测控制算法时加以考虑。

## 4) 非线性系统

非线性约束预测控制无论是理论还是应用都远未成熟,这主要是因为非线性系统及其约束优化问题都不能用参数化的形式统一表达。目前,工业应用非线性预测控制算法仍保持着采用标准非线性规划方法求解在线约束优化问题的传统模式,近年来预测控制定性综合理论的发展虽然为非线性约束预测控制带来了不少新的思路,但与实际应用尚有距离。

非线性系统约束预测控制的关键问题在于如何处理非线性和降低在线计算量, 无论是理论研究还是应用都有着很大的空间. 从目前应用领域对其的需要来看, 应该加强以下方面的研究:

a) 非线性预测控制的理论研究已得到了相当多的具有性能保证的算法, 但这些算法的实用性与应用领域可接受的程度尚有较大差距, 需要进一步加强这些成果的实用化研究, 特别是提高算法的实时性和降低设计的复杂性.

b) 非线性预测控制的应用实践表明, 多模型方法和多参数规划方法是比较成功的两种实用方法, 但它们还需要进一步的理论支持. 目前线性多模型预测控制的很多理论结果都是针对无约束情况得出的, 在加入约束后, 无论是算法实施或稳定性保证方面都需要做进一步的研究. 而多参数规划方法对于线性系统来说其离线计算已经是 NP-hard 的, 如果系统成为非线性, 其离线分区计算更为复杂, 而且显式控制律也是近似的, 如何得到理论严密的显式控制律并实现离线设计、如何保证近似后控制系统的性能等, 都需要进一步研究.

预测控制理论和算法的核心是由预测控制方法特征产生的在线约束优化, 无论是理论上的性能保证还是算法的实时实现, 其难点均围绕着约束引入后的在线优化问题. 当前经济、社会的发展使各应用领域对解决约束优化问题提出了越来越高的要求, 预测控制作为一种具有处理约束优化能力的优秀控制算法, 被寄予很高的期望. 面临着新的挑战, 预测控制的研究应该努力克服理论与应用的脱节, 针对各应用领域的需求, 发展既有理论保证、又能满足应用环境和实时性要求的高效算法, 为各行各业解决约束优化问题提供理论依据充分、实用性强、兼顾优化与稳定等性能要求的系统理论和算法, 并以此推动预测控制理论的进一步发展, 这是预测控制研究始终追求的目标, 也是预测控制未来发展的方向.

## References

- Qin S J, Badgwell T A. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 2003, **11**(7): 733–764
- Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V, Sokaert P O M. Constrained model predictive control: stability and optimality. *Automatica*, 2000, **36**(6): 789–814
- Morari M, Barić M. Recent developments in the control of constrained hybrid systems. *Computers and Chemical Engineering*, 2006, **30**(10–12): 1619–1631
- Wang W L, Rivera D E, Kempf K G. Model predictive control strategies for supply chain management in semiconductor manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 2007, **107**(1): 56–77
- Dufour P, Michaud D J, Touré Y, Dhurjati P S. A partial differential equation model predictive control strategy: application to autoclave composite processing. *Computers and Chemical Engineering*, 2004, **28**(4): 545–556
- Salsbury T, Mhaskar P, Qin S J. Predictive control methods to improve energy efficiency and reduce demand in buildings. *Computers and Chemical Engineering*, 2013, **51**: 77–85
- Bryds M A, Grochowski M, Gminski T, Konarczak K, Drewa M. Hierarchical predictive control of integrated wastewater treatment systems. *Control Engineering Practice*, 2008, **16**(6): 751–767
- Keviczky T, Balas G J. Receding horizon control of an F-16 aircraft: a comparative study. *Control Engineering Practice*, 2006, **14**(9): 1023–1033
- Silani E, Lovera M. Magnetic spacecraft attitude control: a survey and some new results. *Control Engineering Practice*, 2005, **13**(3): 357–371
- Hovorka R, Canonico V, Chassin L J, Haueter U, Massi-Benedetti M, Federici M O, Pieber T R, Schaller H C, Schaupp L, Vering T, Wilinska M E. Nonlinear model predictive control of glucose concentration in subjects with type 1 diabetes. *Physiological Measurement*, 2004, **25**(4): 905–920
- Morari M, Lee J H. Model predictive control: past, present and future. *Computers and Chemical Engineering*, 1999, **23**(4–5): 667–682
- Henson M A. Nonlinear model predictive control: current status and future directions. *Computers and Chemical Engineering*, 1998, **23**(2): 187–202
- Findeisen R, Allgöwer F, Biegler L T. *Assessment and Future Directions of Nonlinear Model Predictive Control*. Berlin: Springer, 2007
- Magni L, Raimondo D M, Allgöwer F. *Nonlinear Model Predictive Control: Towards New Challenging Applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2009
- Klatt K U, Marquadt W. Perspectives for process systems engineering — personal views from academia and industry. *Computers and Chemical Engineering*, 2009, **33**(3): 536–550
- Froisy J B. Model predictive control — building a bridge between theory and practice. *Computers and Chemical Engineering*, 2006, **30**(10–12): 1426–1435
- Xi Yu-Geng, Li De-Wei. Fundamental philosophy and status of qualitative synthesis model predictive control. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(10): 1225–1234  
(席裕庚, 李德伟. 预测控制定性综合理论的基本思路和研究现状. 自动化学报, 2008, **34**(10): 1225–1234)
- Kothare M V, Balakrishnan V, Morari M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities. *Automatica*, 1996, **32**(10): 1361–1379
- Li Zhi-Jun, Liu Ji-Zhen, Tan Wen. Robust model predictive control for saturated systems. *Control and Decision*, 2006, **21**(6): 641–645  
(李志军, 刘吉臻, 谭文. 饱和约束系统的鲁棒模型预测控制. 控制与决策, 2006, **21**(6): 641–645)
- Chen Qiu-Xia, Yu Li. Robust model predictive control for uncertain discrete time-delay systems via dynamic output feedback. *Control Theory and Applications*, 2007, **24**(3): 401–406  
(陈秋霞, 俞立. 不确定离散时滞系统的输出反馈鲁棒预测控制. 控制理论与应用, 2007, **24**(3): 401–406)

- 21 Yu Shu-You, Chen Hong, Zhang Peng, Li Xue-Jun. An LMI optimization approach for enlarging the terminal region of MPC for nonlinear systems. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(7): 798–804  
(于树友, 陈虹, 张鹏, 李学军. 一种基于 LMI 的非线性模型预测控制终端域优化方法. 自动化学报, 2008, **34**(7): 798–804)
- 22 Wang Juan, Liu Zhi-Yuan, Chen Hong, Yu Shu-You, Pei Run.  $H_\infty$  output feedback control of constrained systems via moving horizon strategy. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(11): 1176–1181  
(王娟, 刘志远, 陈虹, 于树友, 裴润. 输入约束系统的滚动时域输出反馈控制方法研究. 自动化学报, 2007, **33**(11): 1176–1181)
- 23 He De-Feng, Ji Hai-Bo, Zheng Tao. Nonlinear  $H_\infty$  robust predictive control with bounded persistent disturbances. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(2): 215–219  
(何德峰, 季海波, 郑涛. 持续有界扰动下的非线性  $H_\infty$  鲁棒预测控制. 自动化学报, 2008, **34**(2): 215–219)
- 24 Liu Fei, Cai Yin. Constrained predictive control of Markov jump linear systems based on terminal invariant sets. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(4): 496–499  
(刘飞, 蔡胤. 基于终端不变集的 Markov 跳变系统约束预测控制. 自动化学报, 2008, **34**(4): 496–499)
- 25 Liu Xiao-Hua, Li Jing-Hui, Gao Rong, Wei Xin-Jiang. Based  $H_\infty$  performance robust predictive control for uncertainty multirate system. *Control and Decision*, 2010, **25**(9): 1287–1291, 1296  
(刘晓华, 李景会, 高荣, 魏新江. 基于  $H_\infty$  性能的不确定多速率系统鲁棒预测控制. 控制与决策, 2010, **25**(9): 1287–1291, 1296)
- 26 He De-Feng, Xue Mei-Sheng, Ji Hai-Bo. Constructive model predictive control for constrained nonlinear systems. *Control and Decision*, 2008, **23**(11): 1301–1304, 1310  
(何德峰, 薛美盛, 季海波. 约束非线性系统构造性模型预测控制. 控制与决策, 2008, **23**(11): 1301–1304, 1310)
- 27 Liu Xiang-Jie, Liu Ji-Zhen. Constrained power plant coordinated predictive control using neurofuzzy model. *Acta Automatica Sinica*, 2006, **32**(5): 785–790  
(刘向杰, 刘吉臻. 基于模糊神经模型的电厂协调预测控制. 自动化学报, 2006, **32**(5): 785–790)
- 28 Zheng Yi, Li Shao-Yuan, Wang Xiao-Bo. Model-predictive-control for an accelerated cooling process. *Control Theory and Applications*, 2009, **26**(7): 777–780  
(郑毅, 李少远, 王笑波. 加速冷却过程的模型预测控制. 控制理论与应用, 2009, **26**(7): 777–780)
- 29 Chen Hong-Li, Lan Hai, Shen Yi. Study on generalized predictive control for  $\pi$  type rudder pitching stabilization. *Journal of System Simulation*, 2006, **18**(12): 3508–3511  
(陈虹丽, 兰海, 沈毅. 基于  $\pi$  型舵船舶减摇广义预测控制研究. 系统仿真学报, 2006, **18**(12): 3508–3511)
- 30 Sun Guang, Huo Wei. Direct-adaptive fuzzy predictive control of satellite attitude. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(8): 1151–1159  
(孙光, 霍伟. 卫星姿态直接自适应模糊预测控制. 自动化学报, 2010, **36**(8): 1151–1159)
- 31 Zhang Jin-Zhao, Liu Guo-Hai, Pan Tian-Hong. Multi-model predictive control for multi-motor variable frequency speed-regulating synchronous system. *Control and Decision*, 2009, **24**(10): 1489–1494  
(张今朝, 刘国海, 潘天红. 多电机变频调速同步系统的多模型预测控制. 控制与决策, 2009, **24**(10): 1489–1494)
- 32 Fu Hui, Hu Gang, Xu Jian-Min, Xu Lun-Hui. Traffic flow predictive control method of urban correlation intersection based on neural network. *China Journal of Highway and Transport*, 2008, **21**(5): 91–95  
(傅惠, 胡刚, 徐建闽, 许伦辉. 基于神经网络的城市关联交叉口交通流预测控制方法. 中国公路学报, 2008, **21**(5): 91–95)
- 33 Cui Wei, Wang Chang-De, Guan Guang-Hua, Fan Jie. Model predictive control for automatic operation of canals. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, **36**(8): 1000–1006  
(崔巍, 王长德, 管光华, 范杰. 渠道运行管理自动化的多渠段模型预测控制. 水利学报, 2005, **36**(8): 1000–1006)
- 34 Wang Zi-Yang, Qin Lin-Lin, Wu Gang, Lv Xu-Tao. Modeling of greenhouse temperature-humid system and model predictive control based on switching system control. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, **24**(7): 188–192  
(王子洋, 秦琳琳, 吴刚, 吕旭涛. 基于切换控制的温室温湿度控制系统建模与预测控制. 农业工程学报, 2008, **24**(7): 188–192)
- 35 Lu J Z. Challenging control problems and emerging technologies in enterprise optimization. *Control Engineering Practice*, 2003, **11**(8): 847–858
- 36 Bellemans T, De Schutter B, De Moor B. Model predictive control for ramp metering of motorway traffic: A case study. *Control Engineering Practice*, 2006, **14**(7): 757–767
- 37 van Overloop P J, Weijs S, Dijkstra S. Multiple model predictive control on a drainage canal system. *Control Engineering Practice*, 2008, **16**(5): 531–540
- 38 Gómez M, Rodellar J, Mantecón J A. Predictive control method for decentralized operation of irrigation canals. *Applied Mathematical Modelling*, 2002, **26**(11): 1039–1056
- 39 Scattolini, R. Architectures for distributed and hierarchical model predictive control — a review. *Journal of Process Control*, 2009, **19**(5): 723–731
- 40 Du X N, Xi Y G, Li S Y. Distributed model predictive control for large-scale systems. In: Proceedings of the 2001 American Control Conference. Arlington, VA: IEEE, 2001. 3142–3143
- 41 Camponogara E, Jia D, Krogh B H, Talukdar S. Distributed model predictive control. *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, **22**(1): 44–52
- 42 Stewart B T, Venkat A N, Rawlings J B, Wright S J, Panocchia G. Cooperative distributed model predictive control. *System and Control Letters*, 2010, **59**(8): 460–469
- 43 Zheng Y, Li S Y, Wang X B. Distributed model predictive control for plant-wide hot-rolled strip laminar cooling process. *Journal of Process Control*, 2009, **19**(9): 1427–1437
- 44 Venkat A N, Hiskens I A, Rawlings J B, Wright S J. Distributed MPC strategies with application to power system automatic generation control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, **16**(6): 1192–1206
- 45 Negenborn R R, De Schutter B, Hellendoorn H. Multi-agent model predictive control of transportation networks. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Ft. Lauderdale, FL: IEEE, 2006. 296–301
- 46 Dunbar W B, Murray R M. Distributed receding horizon control for multi-vehicle formation stabilization. *Automatica*, 2006, **42**(4): 549–558

- 47 Wan Z Y, Kothare M V. An efficient off-line formulation of robust model predictive control using linear matrix inequalities. *Automatica*, 2003, **39**(5): 837–846
- 48 Ding B C, Xi Y G, Cychowski M T, O'Mahony T. Improving off-line approach to robust MPC based-on nominal performance cost. *Automatica*, 2007, **43**(1): 158–163
- 49 Angeli D, Casavola A, Franzé G, Mosca E. An ellipsoidal off-line MPC scheme for uncertain polytopic discrete-time systems. *Automatica*, 2008, **44**(12): 3113–3119
- 50 Canale M, Fagiano L, Milanese M. Set membership approximation theory for fast implementation of model predictive control laws. *Automatica*, 2009, **45**(1): 45–54
- 51 Bemporad A, Morari M, Dua V, Pistikopoulos E N. The explicit linear quadratic regulator for constrained systems. *Automatica*, 2002, **38**(1): 3–20
- 52 Grancharova A, Johansen T A. Survey of explicit approaches to constrained optimal control. *Switching and Learning in Feedback Systems*. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 47–97
- 53 Grancharova A, Johansen T A. Explicit approximate model predictive control of constrained nonlinear systems with quantized input. *Nonlinear Model Predictive Control*. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 371–380
- 54 Due P, Kouramas K, Dua V, Pistikopoulos E N. MPC on a chip — recent advances on the application of multi-parametric model-based control. *Computers and Chemical Engineering*, 2008, **32**(4–5): 754–765
- 55 Kouvaritakis B, Cannon M, Rossiter J A. Who needs QP for linear MPC anyway? *Automatica*, 2002, **38**(5): 879–884
- 56 Wen C T, Ma X Y, Ydstie B E. Analytical expression of explicit MPC solution via lattice piecewise-affine function. *Automatica*, 2009, **45**(4): 910–917
- 57 Borrellia F, Baotic M, Pekar J, Stewart G. On the computation of linear model predictive control laws. *Automatica*, 2010, **46**(6): 1035–1041
- 58 Kouramas K I, Faísca N P, Panos C, Pistikopoulos E N. Explicit/multi-parametric model predictive control (MPC) of linear discrete-time systems by dynamic and multi-parametric programming. *Automatica*, 2011, **47**(8): 1638–1645
- 59 Grancharova A, Johansen T A. Computation, approximation and stability of explicit feedback min-max nonlinear model predictive control. *Automatica*, 2009, **45**(5): 1134–1143
- 60 Ricker N L. Use of quadratic programming for constrained internal model control. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1985, **24**(4): 925–936
- 61 Richalet J, Abu El Ata-Doss S, Arber C, Kuntze H B, Jacobasch A, Schill W. Predictive functional control. In: Proceedings of the 10th IFAC World Congress. Munich, Germany: 1987, (4): 261–268
- 62 Cagienard R, Grieder P, Kerrigan E C, Morari M. Move blocking strategies in receding horizon control. *Journal of Process Control*, 2007, **17**(6): 563–570
- 63 Gondhalekar R, Imura J, Kashima K. Controlled invariant feasibility — a general approach to enforcing strong feasibility in MPC applied to move-blocking. *Automatica*, 2009, **45**(12): 2869–2875
- 64 Gondhalekar R, Imura J. Least-restrictive move-blocking model predictive control. *Automatica*, 2010, **46**(7): 1234–1240
- 65 Li D W, Xi Y G. The general framework of aggregation strategy in model predictive control and stability analysis. In: Proceedings of the 11th IFAC Symposium on Large Scale Systems Theory and Applications. Gdansk, Poland: IFAC, 2007. 192–197
- 66 Li D W, Xi Y G. Quality guaranteed aggregation based model predictive control and stability analysis. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2009, **52**(7): 1145–1156
- 67 Wang Y, Boyd S. Fast model predictive control using on-line optimization. In: Proceedings of the 17th IFAC World Congress. Seoul, Korea: IFAC, 2008. 6974–6979
- 68 Diehl M, Bock H G, Schlöer J P, Findeisen R, Nagy Z, Allgöer F. Real-time optimization and nonlinear model predictive control of processes governed by differential-algebraic equations. *Journal of Process Control*, 2002, **12**(4): 577–585
- 69 Wirsching L, Albersmeyer J, Kühl P, Diehl M, Bock G. An adjoint-based numerical method for fast nonlinear model predictive control. In: Proceedings of the 17th IFAC World Congress. Seoul, Korea: IFAC, 2008. 1934–1939
- 70 Pannocchia G, Rawlings J B, Wright S J. Fast, large-scale model predictive control by partial enumeration. *Automatica*, 2007, **43**(5): 852–860
- 71 Liu S B, Wang J. A simplified dual neural network for quadratic programming with its KWTA application. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2006, **17**(6): 1500–1510
- 72 Mayne D Q, Raković S V, Findeisen R, Allgöwer F. Robust output feedback model predictive control of constrained linear systems: time varying case. *Automatica*, 2009, **45**(9): 2082–2087
- 73 Lóvaas C, Seron M M, Goodwin G C. Robust output-feedback model predictive control for systems with unstructured uncertainty. *Automatica*, 2008, **44**(8): 1933–1943
- 74 Ding B C, Xi Y G, Cychowski M T, O'Mahony T. A synthesis approach for output feedback robust constrained model predictive control. *Automatica*, 2008, **44**(1): 258–264
- 75 Ding B. Constrained robust model predictive control via parameter-dependent dynamic output feedback. *Automatica*, 2010, **46**(9): 1517–1523
- 76 Park J H, Kim T H, Sugie T. Output feedback model predictive control for LPV systems based on quasi-min-max algorithm. *Automatica*, 2011, **47**(9): 2052–2058
- 77 Kouvaritakis B, Rossiter J A, Schuurmans J. Efficient robust predictive control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, **45**(8): 1545–1549
- 78 Cannon M, Kouvaritakis B, Lee Y I, Brooms A C. Efficient non-linear model based predictive control. *International Journal of Control*, 2001, **74**(4): 361–372
- 79 Imsland L, Bar N, Foss B A. More efficient predictive control. *Automatica*, 2005, **41**(8): 1395–1403
- 80 Lee Y I, Kouvaritakis B. Constrained robust model predictive control based on periodic invariance. *Automatica*, 2006, **42**(12): 2175–2181

- 81 Li D W, Xi Y G, Zheng P Y. Constrained robust feedback model predictive control for uncertain systems with polytopic description. *International Journal of Control*, 2009, **82**(7): 1267–1274
- 82 Li D W, Xi Y G. Design of robust model predictive control based on multi-step control set. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(4): 433–437
- 83 Li D W, Xi Y G. The feedback robust MPC for LPV systems with bounded rates of parameter changes. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, **55**(2): 503–507
- 84 Lee S M, Park J H, Ji D H, Won S C. Robust model predictive control for LPV systems using relaxation matrices. *IET Control Theory and Applications*, 2007, **1**(6): 1567–1573
- 85 Lee Y II, Kouvaritakis B. Robust receding horizon predictive control for systems with uncertain dynamics and input saturation. *Automatica*, 2000, **36**(10): 1497–1504
- 86 Pluymers B, Rossiter J A, Suykens J A K, De Moor B. The efficient computation of polyhedral invariant sets for linear systems with polytopic uncertainty. In: Proceedings of the 2005 American Control Conference. Portland, USA: IEEE, 2005. 804–809
- 87 Alessio A, Lazar M, Bemporad A, Heemels W P M H. Squaring the circle: an algorithm for generating polyhedral invariant sets from ellipsoidal ones. *Automatica*, 2007, **43**(12): 2096–2103
- 88 Huang H, Li D W, Lin Z L, Xi Y G. An improved robust model predictive control design in the presence of actuator saturation. *Automatica*, 2011, **47**(4): 861–864
- 89 Chen H. A feasible moving horizon  $H_\infty$  control scheme for constrained uncertain linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, **52**(2): 343–348
- 90 Allgöwer F, Findeisen R, Nagy Z K. Nonlinear model predictive control: from theory to application. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, 2004, **35**(3): 299–315
- 91 Ding B C. Dynamic output feedback predictive control for nonlinear systems represented by a Takagi-Sugeno model. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2011, **19**(5): 831–843
- 92 Zhang T J, Feng G, Zeng X J. Output tracking of constrained nonlinear processes with offset-free input-to-state stable fuzzy predictive control. *Automatica*, 2009, **45**(4): 900–909
- 93 Zhang T J, Feng G, Lu J H. Fuzzy constrained min-max model predictive control based on piecewise Lyapunov functions. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2007, **15**(4): 686–698
- 94 Xia Y Q, Yang H J, Shi P, Fu M Y. Constrained infinite-horizon model predictive control for fuzzy-discrete-time systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2010, **18**(2): 429–436
- 95 Bemporad A, Morari M. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints. *Automatica*, 1999, **35**(3): 407–427
- 96 Lazar M, Heemels W P M H. Predictive control of hybrid systems: input-to-state stability results for sub-optimal solutions. *Automatica*, 2009, **45**(1): 180–185
- 97 Bemporad A, Di Cairano S. Model-predictive control of discrete hybrid stochastic automata. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, **56**(6): 1307–1321
- 98 Falugi P, Olaru S, Dumur D. Multi-model predictive control based on LMI: from the adaptation of the state-space model to the analytic description of the control law. *International Journal of Control*, 2010, **83**(8): 1548–1563
- 99 García M R, Vilas C, Santos L O, Alonso A A. A robust multi-model predictive controller for distributed parameter systems. *Journal of Process Control*, 2012, **22**(1): 60–71
- 100 Cannon M, Kouvaritakis B, Wu X J. Model predictive control for systems with stochastic multiplicative uncertainty and probabilistic constraints. *Automatica*, 2009, **45**(1): 167–172
- 101 Su Y, Tan K K, Lee T H. Comments on “Model predictive control for systems with stochastic multiplicative uncertainty and probabilistic constraints”. *Automatica*, 2011, **47**(2): 427–428
- 102 Kouvaritakis B, Cannon M, Raković S V, Cheng Q F. Explicit use of probabilistic distributions in linear predictive control. *Automatica*, 2010, **46**(10): 1719–1724
- 103 Cannon M, Kouvaritakis B, Wu X J. Probabilistic constrained MPC for multiplicative and additive stochastic uncertainty. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, **54**(7): 1626–1632
- 104 Cannon M, Kouvaritakis B, Raković S V, Cheng Q F. Stochastic tubes in model predictive control with probabilistic constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, **56**(1): 194–200
- 105 Bernardini D, Bemporad A. Stabilizing model predictive control of stochastic constrained linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, **57**(6): 1468–1480
- 106 Wen J W, Liu F. Receding horizon control for constrained Markovian jump linear systems with bounded disturbance. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2011, **133**(1): 011005
- 107 Wang C, Ong C J, Sim M. Convergence properties of constrained linear system under MPC control law using affine disturbance feedback. *Automatica*, 2009, **45**(7): 1715–1720
- 108 Wang C, Ong C J, Sim M. Constrained linear system with disturbance: convergence under disturbance feedback. *Automatica*, 2008, **44**(10): 2583–2587
- 109 Wang C, Ong C J, Sim M. Model predictive control using segregated disturbance feedback. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, **55**(4): 831–840
- 110 Hokayem P, Cinquemani E, Chatterjee D, Ramponi F, Lygeros J. Stochastic receding horizon control with output feedback and bounded controls. *Automatica*, 2012, **48**(1): 77–88
- 111 Rawlings J B, Amrit R. Optimizing process economic performance using model predictive control. *Nonlinear Model Predictive Control*. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 119–138
- 112 Adetola V, Guay M. Integration of real-time optimization and model predictive control. *Journal of Process Control*, 2010, **20**(2): 125–133
- 113 Gunnerud V, Foss B, Torgnes E. Parallel Dantzig-Wolfe decomposition for real-time optimization-applied to a complex oil field. *Journal of Process Control*, 2010, **20**(9): 1019–1026
- 114 Shead L R E, Muske K R, Rossiter J A. Conditions for which linear MPC converges to the correct target. *Journal of Process Control*, 2010, **20**(10): 1243–1251

- 115 Xu Z H, Zhu Y C, Han K, Zhao J, Qian J X. A multi-iteration pseudo-linear regression method and an adaptive disturbance model for MPC. *Journal of Process Control*, 2010, **20**(4): 384–395
- 116 Gruber J K, Ramirez D R, Alamo T, Bordons C, Camacho E F. Control of a pilot plant using QP based min-max predictive control. *Control Engineering Practice*, 2009, **17**(11): 1358–1366
- 117 Alamo T, Ramirez D R, de la Peña, D M, Camacho E F. Min-max MPC using a tractable QP problem. *Automatica*, 2007, **43**(4): 693–700
- 118 Tsai C C, Lin S C, Wang T Y, Teng F J. Stochastic model reference predictive temperature control with integral action for an industrial oil-cooling process. *Control Engineering Practice*, 2009, **17**(2): 302–310
- 119 Grancharova A, Kocijan J, Johansen T A. Explicit stochastic predictive control of combustion plants based on gaussian process models. *Automatica*, 2008, **44**(6): 1621–1631
- 120 Peng H, Wu J, Inoussa G, Deng Q L, Nakano K. Nonlinear system modeling and predictive control using the RBF nets-based quasi-linear ARX model. *Control Engineering Practice*, 2009, **17**(1): 59–66
- 121 Cueli J R, Bordons C. Iterative nonlinear model predictive control. Stability, robustness and applications. *Control Engineering Practice*, 2008, **16**(9): 1023–1034
- 122 Wang Y Q, Zhou D H, Gao F R. Iterative learning model predictive control for multi-phase batch processes. *Journal of Process Control*, 2008, **18**(6): 543–557
- 123 Cao R Z, Low K S. A repetitive model predictive control approach for precision tracking of a linear motion system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(6): 1955–1962
- 124 STREP Project 223854: Hierarchical and Distributed Model Predictive Control of Large Scale Systems [Online], available: <ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/ict/docs/necs/20081020-12-hd-mpc-en.pdf>, February 28, 2013
- 125 Ocampo-Martinez C, Barcelli D, Puig V, Bemporad A. Hierarchical and decentralised model predictive control of drinking water networks: application to Barcelona case study. *IET Control Theory and Applications*, 2012, **6**(1): 62–71
- 126 Piotrowski R, Brdys M A, Konarczak K, Duzinkiewicz K, Chotkowski W. Hierarchical dissolved oxygen control for activated sludge processes. *Control Engineering Practice*, 2008, **16**(1): 114–131
- 127 Edlund K, Bendtsen J D, Jorgensen J B. Hierarchical model-based predictive control of a power plant portfolio. *Control Engineering Practice*, 2011, **19**(10): 1126–1136
- 128 Zheng Y, Li S Y, Li N. Distributed model predictive control over network information exchange for large-scale systems. *Control Engineering Practice*, 2011, **19**(7): 757–769
- 129 Lin S, De Schutter B, Xi Y G, Hellendoorn H. Fast model predictive control for urban road networks via MILP. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, **12**(3): 846–856
- 130 Ghods A H, Fu L P, Rahimi-Kian A. An efficient optimization approach to real-time coordinated and integrated freeway traffic control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(4): 873–884
- 131 Zhang Y, Li S Y. Networked model predictive control based on neighbourhood optimization for serially connected large-scale processes. *Journal of Process Control*, 2007, **17**(1): 37–50
- 132 Munoz De La Pena D, Christofides P D. Lyapunov-based model predictive control of nonlinear systems subject to data losses. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, **53**(9): 2076–2089
- 133 Liu G P, Xia Y Q, Chen J, Rees D, Hu W. Networked predictive control of systems with random network delays in both forward and feedback channels. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, **54**(3): 1282–1297
- 134 Gruber J K, Doll M, Bordons C. Design and experimental validation of a constrained MPC for the air feed of a fuel cell. *Control Engineering Practice*, 2009, **17**(8): 874–885
- 135 Garcia-Gabin W, Zambrano D, Camacho E F. Sliding mode predictive control of a solar air conditioning plant. *Control Engineering Practice*, 2009, **17**(6): 652–663
- 136 Roca L, Guzman J L, Normey-Rico J E, Berenguel M, Yebra L. Robust constrained predictive feedback linearization controller in a solar desalination plant collector field. *Control Engineering Practice*, 2009, **17**(9): 1076–1088
- 137 Kusiak A, Song Z, Zheng H Y. Anticipatory control of wind turbines with data-driven predictive models. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, **24**(3): 766–774
- 138 Teleke S, Baran M E, Bhattacharya S, Huang A Q. Optimal control of battery energy storage for wind farm dispatching. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, **25**(3): 787–794
- 139 Xia X H, Zhang J F, Elaiw A. An application of model predictive control to the dynamic economic dispatch of power generation. *Control Engineering Practice*, 2011, **19**(6): 638–648
- 140 Perez T, Goodwin G C. Constrained predictive control of ship fin stabilizers to prevent dynamic stall. *Control Engineering Practice*, 2008, **16**(4): 482–494
- 141 Li Z, Sun J. Disturbance compensating model predictive control with application to ship heading control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, **20**(1): 257–265
- 142 Coronaand D, De Schutter B. Adaptive cruise control for a smart car: a comparison benchmark for MPC-PWA control methods. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, **16**(2): 365–372
- 143 Asadi B, Vahidi A. Predictive cruise control: utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, **19**(3): 707–714
- 144 Li S B, Li K Q, Rajamani R, Wang J Q. Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, **19**(3): 556–566
- 145 Di Cairano S, Ynankiev D, Bemporad A, Kolmanovsky I V, Hrovat D. Model predictive idle speed control: design, analysis, and experimental evaluation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, **20**(1): 84–97
- 146 Yoon Y, Shin J, Kim H J, Park Y, Sastry S. Model-predictive active steering and obstacle avoidance for autonomous ground vehicles. *Control Engineering Practice*, 2009, **17**(7): 741–750



- 147 Geyer T, Papafotiou G, Morari M. Model predictive direct torque control — part I: concept, algorithm and analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(6): 1894–1905
- 148 Preindl M, Scholtz E, Thogersen P. Switching frequency reduction using model predictive direct current control for high-power voltage source inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, **58**(7): 2826–2835
- 149 Bolognani S, Peretti L, Zigliotto M. Design and implementation of model predictive control for electrical motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(6): 1925–1936
- 150 Beccuti A G, Mariethoz S, Cliquennois S, Wang S, Morari M. Explicit model predictive control of dc-dc switched-mode power supplies with extended Kalman filtering. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(6): 1864–1874
- 151 Cychowski M, Szabat K, Orlowska-Kowalska T. Constrained model predictive control of the drive system with mechanical elasticity. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(6): 1963–1973
- 152 Xi X C, Poo A N, Chou S K. Support vector regression model predictive control on a HVAC plant. *Control Engineering Practice*, 2007, **15**(8): 897–9080
- 153 Alexis K, Nikolakopoulos G, Tzes A. Switching model predictive attitude control for a quadrotor helicopter subject to atmospheric disturbances. *Control Engineering Practice*, 2011, **19**(10): 1195–1207
- 154 Gavilan F, Vazquez R, Camacho E F. Chance-constrained model predictive control for spacecraft rendezvous with disturbance estimation. *Control Engineering Practice*, 2012, **20**(2): 111–122
- 155 From P J, Gravdahl J T, Lillehagen T, Abbeel P. Motion planning and control of robotic manipulators on seaborne platforms. *Control Engineering Practice*, 2011, **19**(8): 809–819
- 156 Percival M W, Wang Y, Grosman B, Dassau E, Zisser H, Jovanovic L, Doyle F J III. Development of a multi-parametric model predictive control algorithm for insulin delivery in type 1 diabetes mellitus using clinical parameters. *Journal of Process Control*, 2011, **21**(3): 391–404
- 157 Blanco E, De Prada C, Cristea S, Casas J. Nonlinear predictive control in the LHC accelerator. *Control Engineering Practice*, 2009, **17**(10): 1136–1147
- 158 Valencia-Palomo G, Rossiter J A. Efficient suboptimal parametric solutions to predictive control for PLC applications. *Control Engineering Practice*, 2011, **19**(7): 732–743
- 159 Vouzis P D, Kothare M V, Bleris L G, Arnold M G. A system-on-a-chip implementation for embedded real-time model predictive control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, **17**(5): 1006–1017
- 160 Lau M S K, Yue S P, Ling K V, Maciejowski J M. A comparison of interior point and active set methods for FPGA implementation of model predictive control. In: Proceedings of the 2009 European Control Conference. Budapest, Hungary: EUCA, 2009. 156–160
- 161 Wills A G, Knagge G, Ninness B. Fast linear model predictive control via custom integrated circuit architecture. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, **20**(1): 59–71
- 162 Yang N, Li D W, Zhang J, Xi Y G. Model predictive control system based on FPGA and a case study. In: Proceedings of the 2011 IFAC World Congress. Milan, Italy: IFAC, 2011. 9266–9271
- 163 Li D W, Yang N, Niu R, Qiu H, Xi Y G. FPGA based QDMC control for reverse-osmosis water desalination system. *Desalination*, 2012, **285**: 83–90



**席裕庚** 上海交通大学自动化系教授。主要研究方向为预测控制理论与应用, 大系统理论及应用。本文通信作者。

E-mail: ygxi@sjtu.edu.cn

(**XI Yu-Geng** Professor in the Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University. His research interest covers theory and applications of predictive control, and large scale systems. Corresponding author of this paper.)



**李德伟** 上海交通大学自动化系副研究员。分别于1993年和2009年在上海交通大学自动化系获得学士学位和博士学位。主要研究方向为预测控制理论与应用。E-mail: dwli@sjtu.edu.cn

(**LI De-Wei** Associated professor in the Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University. He received his bachelor and Ph.D. degrees from the Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University in 1993 and 2009, respectively. His research interest covers theory and applications of model predictive control.)



**林姝** 上海交通大学自动化系博士后。分别于2006年和2011年在山东大学和荷兰代尔夫特理工大学获得硕士和博士学位。主要研究方向为模型预测控制及其在大规模交通网络中的应用技术。

E-mail: lisashulin@gmail.com

(**LIN Shu** Postdoctor in the Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University. She received her master degree from Shandong University, China in 2006, and her Ph.D. degree at Delft University of Technology, Netherlands in 2011, respectively. Her research interest covers model predictive control and its application in large-scale traffic networks.)