自然科学奖公示内容

|  |  |
| --- | --- |
| 项目名称： | 预测控制的原理研究与系统设计 |
| 推荐单位意见： | 席裕庚教授领导的预测控制原理与系统设计项目组是我国最早从事预测控制理论研究的研究团队。在近30年的研究中，项目组形成了系统性的研究成果，培养了大批专业研究和应用人员，带动了预测控制这一学科分支在我国的发展。主要创新包括：  1) 开创性地对预测控制方法机理进行研究，提出了预测控制三项基本原理，并进一步推广到规划、调度等广义控制领域。  2) 系统地提出了非线性与不确定系统的预测控制稳定性分析与综合方法，推动了复杂非线性不确定系统预测控制理论的深入研究，发展了预测控制系统设计理论。  3) 提出和发展了基于邻域优化的分布式系统预测控制设计方法，系统地给出了基于不同协调度的约束分布式预测控制的通用的综合设计方法，形成了系统的基于协调度的分布式系统预测控制综合理论。  项目组以独特的学术思想为指导，从控制论和信息论的视角，提出并发展预测控制的原理，研究成果具有较高的原创性和先进性，并多次获得各类奖项和国内外专家学者的关注。鉴于该项目在预测控制的基础理论方面取得的系统性创新成果，特此推荐申报2017年度国家自然科学奖。 |
| 项目简介： | 本项目属于自动化技术领域的应用基础研究。复杂系统控制是控制界长期以来关注的热点，预测控制在国际上是产生于1970’s的一种启发式优化控制理论方法，从一开始就受到学术界与工业界的广泛关注与研究。项目组成员自1981年开始就在预测控制这一控制学科的分支领域开展了持续、系统的研究，形成了系统性的研究成果，带动了预测控制这一学科分支在我国的发展，培养与形成了持续的研究人员梯队，不断对预测控制的理论、原理和方法做出了具有特色的发展。  **1) 开创性地对预测控制方法机理进行研究，提出了预测控制三项基本原理，并进一步推广到规划、调度等广义控制领域。**根据工业系统所存在的信息不充分和计算实时性要求，揭示了预测控制针对复杂不确定性工业系统控制在方法论上的优越性，给出了其控制论、信息论解释，对于预测控制原理及算法的研究提供了方法论思想，从而开辟了综合利用各种新技术发展预测控制算法的广阔发展空间；基于原理性研究基础，发展了多模型、多级、多层分解、分散和集结等一系列预测控制新方法，推动了预测控制在工业领域的广泛应用，并将这一方法论思想进一步推广到不确定环境下以优化为目标的广义预测控制问题，发展了滚动调度和滚动规划等新的工程优化技术。  **2) 系统地提出了非线性与不确定系统的预测控制稳定性分析与综合方法，**首先提出并证明了参数依赖开环预测控制在控制性能、吸引域和计算量方面优于反馈控制，探讨了在原点附近足够小的邻域内，相应的鲁棒预测控制的解接近理论最优值的实现条件，给出了采用标称性能指标的离线鲁棒预测控制设计方法，发展了闭环预测控制理论框架，并针对LPV系统的特点，提出高效预测控制器设计方法，推动了复杂非线性不确定系统预测控制理论的深入研究，发展了预测控制系统设计理论。  **3) 提出了基于邻域优化的分布式系统预测控制设计方法，设计了基于输入状态相关模型的在不同性能指标协调策略下的非迭代分布式预测控制算法，并给出了解析解、闭环系统稳定性条件，以及定性分析了该策略提高系统全局性能的原因。**系统地给出了基于不同协调度的约束分布式预测控制的通用的综合设计方法，通过该设计方法，可以保证全局系统的递归可行性和渐进稳定性。形成了系统的基于协调度的分布式系统预测控制综合理论。  本项成果以自主的学术思想为指导，从预测控制算法所蕴含的控制论和信息论思想出发，提出并发展预测控制的原理，由此取得的研究成果，大部分为国内外首次提出，具有较高的原创性和先进性。相关成果先后获得2003年上海市自然科学一等奖、2006年上海市自然科学一等奖，2016年中国自动化学会自然科学一等奖等，专著《预测控制》开创与引领了国内对于预测控制的理论研究与应用开发。所取得的成果形成系统性的研究成果，出版学术专著6部，发表论文200余篇，其中高水平SCI 国际期刊论文69篇，IEEE、IFAC会刊论文18篇，论著的总SCI他引数422次，其中8篇代表作的SCI他引数160次。引用作者包括UCLA著名教授，Christofides教授（IEEE Fellow，IFAC Fellow，AAAS Fellow，American Automatic Control Council Director），中国工程院柴天佑、孙优贤、桂卫华院士等。 |
| 客观评价： | 项目组相关成果先后获得2003年上海市自然科学一等奖、2006年上海市自然科学一等奖、2016年中国自动化学会自然科学一等奖等。所取得的成果形成系统性的研究成果，出版学术专著6部，发表论文200余篇，其中高水平SCI 国际期刊论文69篇，IEEE、IFAC会刊论文18篇，论著的总SCI他引数422次，其中8篇代表作的SCI他引数160次。  **对于重要发现1的评价：**  专著《预测控制》开创与引领了国内对于预测控制的理论研究与应用开发，在国内杂志及学位论文中引用超过1700次（CNKI检索）。该书获第七届全国优秀科技图书二等奖（1995），其第2版于2013年出版，次年获第五届中华优秀出版物（图书）提名奖（2014）。该书从出版以来对于国内学术界和工业界研究和应用预测控制技术起到了重要的推动作用，起到了领路人的作用。正如国内著名自动化专家、中国工程院院士、IEEE Fellow/IFAC Fellow、浙江大学孙优贤教授在再版推荐书中所说的：可以说，国内很多学者和工程人员就是通过席裕庚教授和他的《预测控制》才第一次认识并逐渐熟悉预测控制技术的。  作为中文著作，代表性著作1不但受到国内外学术界的广泛引用，也受到工业界的重视。南非科学院院士、南非工程院院士、南非比勒陀利亚大学夏小华教授团队在论文（引文1）中引用论著1，推广其中关于DMC的结论到跟踪控制中。“根据文献[17]，如果DMC控制器的模型是正确的，即可以反映系统的静态和动态特点，则DMC的跟踪收敛性可以得到保证”（原文：(Xi Yugeng [17]) If the DMC controller model A is right, which means the open-loop step response model can capture sufficient static and dynamic aspects of the process, then the asymptotic tracking property of the DMC controller can be guaranteed（[17]为代表性论著1））。国内著名自动化专家褚健及其团队在他们的工作中引用论著1所得到的预测控制原理（引文2）：根据预测控制策略（Xi 1993）， 首先需要预测模型，然后应用反馈矫正和滚动优化，我们就可以得到理想的控制律（原文：According to predictive control strategy (Xi 1993), prediction model is required firstly, then by applying feedback correction and receding horizon optimization, desired control law can be obtained）。  中国工程院院士、IEEE Fellow、IFAC Fellow、东北大学柴天佑院士团队应用论著1关于GPC的准则函数，设计钢铁连铸系统中结晶器液位的鲁棒预测控制（郭戈，王伟，柴天佑。一种鲁棒预测控制方法及其在连铸中的应用，钢铁研究学报，1998，10(3): 21-25）。浙江大学孙优贤院士将论著1中的DMC方法应用于造纸系统的控制（陈金水,王慧,孙优贤,吴亦锋,许巧玲,郑新彬. 黑液蒸发出浓液浓度的控制实践──基于前馈+反馈的预测控制算法. 中国造纸. 1998(03)：37-39）。中国工程院院士、中南大学桂卫华院士推广论著1的设计提出模糊预测控制并应用于机车制动控制（刘剑锋,刘友梅,桂卫华,刘豫湘,黄志武. 基于模糊预测控制的机车制动控制方法. 中南大学学报(自然科学版). 2009，40(5)：1329-1335）。  基于论著1，代表性论文2发展了动态不确定环境的调度和规划框架。这开辟了调度和规划的新思路和新方法。IEEE Fellow、美国中佛罗里达大学教授瞿志华团队基于代表性论文2所提出的框架，设计机器人在多运动障碍物环境中对于方向可变目标的跟踪规划算法（樊晓平, 李双艳, 瞿志华。机器人对多运动障碍物环境中方向可变运动目标的跟踪，控制理论与应用，2006，23（3）：347-350）。国内调度专家、清华大学教授王凌和国内著名化工专家、清华大学教授黄德先根据代表性论文2所提出的思路和框架，发展了动态流水线调度的滚动策略和优化方法（钱斌,王凌,黄德先,江永亨,王雄。动态零等待流水线调度问题的滚动策略及优化算法，控制与决策，2009，24（4）：481-487）。  **对于重要发现2的评价：**  代表性论文3，4，5的成果被多位IEEE fellow在包括Automatica、IEEE TAC在内的自动化顶级学术刊物上引用。  1） 对于代表性论文4，Shi, Su & Chu (2013, JOURNAL OF THE FRA（NKLIN INSTITUTE-ENGINEERING AND APPLIED MATHEMATICS)和Zhang, Cai, Zhang & Han (2015, JOURNAL OF THE FRANKLIN INSTITUTE-ENGINEERING AND APPLIED MATHEMATICS)等均指出：该论文针对多胞描述模型的在线鲁棒预测控制，在状态反馈控制律前引入N>1 个自由控制作用。Capron, Uchiyama & Odloak (引文3)指出采用“有限时域内一组自由控制作用+一个线性状态反馈控制律”，增加了控制器的自由度，将以往的设计扩展到更一般的情形（原文：“An LMI-based robust MPC first appeared in [3] …The method was also extended to become more general by increasing the degrees of freedom of the controller through the consideration of a set of free control inputs along a finite horizon and a linear state feedback control law along the remaining infinite control horizon [13, 14].”）；Tang, Qu, Xie & Wang (2013，MATHEMATICAL PROBLEMS IN ENGINEERING )指出：将以往设计中引入一个自由控制作用的做法推广到多于一个自由控制作用从而改进最优性和可行性（原文：“Reference [4] proposes a ‘quasi-min-max’ MPC algorithm for linear parameter varying systems by adding one free control move … Reference [5] extends the results in [4] to N>1 free control moves, which further improves the optimality and feasibility）  2） 对于代表性论文4，意大利都林大学Giuseppe C. Calafiore教授课题组 (担任IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics副编辑)在Automatica发表论文(引文4)中肯定了我们的理论贡献和科学意义：“Some approaches are also able to reduce conservativeness when a bound on the rate of variation of the parameters is available, see, e.g., Casavola et al. (2002) and Li and Xi (2010).”(简译：现在也已发展出一些方法能够对于参数变化率可知的情况降低模型预测控制设计的保守性，例如参考文献Casavola et al. (2002)和Li and Xi (2010)(即代表性论文4)。  3） 对于代表性论文5，IEEE fellow西班牙著名教授EF Camacho（引文5）和IEEE fellow意大利弗罗伦萨大学教授Mosca Edoard都在他们的论文中给予肯定。其中，引文5指出：代表性论文5采用两种方式改进了以往设计，其一是采用标称性能指标替换最坏情况性能指标，从而改进可行性，其二是采用启发式的变时域方法，反馈增益阵从后往前逐个算（原文：“More recently, in [15] this strategy has been improved in two ways, first by using nominal performance cost in substitution of ‘‘worst-case’’ one, such that feasibility can be improved and, second, by using a heuristic varying-horizon formulation in which the feedback gains are obtained in a backward manner.”）。Ghaemi, Sun & Kolmanovsky (引文[6])指出：对多胞描述不确定系统，代表性论文5给出一种离线MPC（原文：“For linear systems with model uncertainties where state-space matrices lie in a polytope, [14] provides an off-line MPC approach.”）。Bumroongsri & Kheawhom (2012，Journal of Process Control)指出：代表性论文5提出一个基于椭圆集合的离线鲁棒MPC 算法，直接将以往的算法扩展，方法是通过选择标称性能指标代替最坏情况性能指标，从而改进控制性能（原文：“Ding et al. [11] proposed an ellipsoidal off-line robust MPC algorithm based on nominal performance cost. The algorithm directly extends the algorithm of Wan and Kothare [10] by choosing nominal performance cost to substitute the worst case performance cost in order to improve control performance.”）；Bumroongsri & Kheawhom (2012，System & Control Letters)和Angeli, Casavola, Franze & Mosca (2008，Automatica)给出了同样的评价。  **对于科学发现3的评价：**  论文被多位国际知名学者IEEE fellow在 IEEE汇刊、IFAC汇刊等控制领域注明期刊上引用，基于邻域优化的分布式预测控制成为分布式优化控制的一类重要方法。  1） UCLA著名教授Christofides教授（IEEE Fellow，IFAC Fellow，AAAS Fellow，American Automatic Control Council Director）在[典型引文5]DMPC经典综述文献中对[代表性论文5]中的方法单独进行了大段的描述并认为[代表论文5]提出了一种新的协调策略，该方法每个自控制器优化其邻域性能指标，并且考虑了通信延时系统、证明了无约束情况的系统的稳定性。  2） 国际知名学专家、IEEE Fellow、IEEE/ASME Trans. on Mechatronics主编，土耳其Bogazici大学教授Okyay Kaynak在其发表在（IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 2016）的文章中指出：代表性文献8对文献代表性文献4对我们的方法的思路也进行论述：在部分链接算法中，局部优化问题通过考虑邻居的影响和决策来求得，这种方法十分适合子系统间松散连接的系统[12, 13]。“In partially connected algorithms, local optimization problems are solved by taking into account the neighboring (not the whole system) interaction and solution, which is suitable for loosely connected subsystems[12, 13].”  3） IEEE fellow CDC-ECC’05 general chair, 西班牙著名教授Eduardo F. Camacho 在Optimal Control Applications & Methods, 2011, 32(2):153-176.中指出:[代表性文献6]中，给出了一类分布式预测控制器保证稳定性的充分条件.“In [9], sufficient conditions that guarantee stability of a class of distributed controllers are given.”  4） 荷兰代尔夫特理工大学Bart De Schutter教授（《Automatica》的Associate Editor, 欧洲第七框架计划《Hierarchical and Distributed Model Predictive Control of Large-Scale Complex Systems》的Coordinator）中指出[代表论文6、7、8]给出无约束情况下DMPC的模式分析。Unconstrained methods for modal analysis of distributed MPC have been developed previously (Li etal.,2005; Vaccarini etal., 2009; Zhang andLi,2007; Zheng etal.,2013).”  5） 预测控制领域著名学者、意大利米兰理工大学Riccardo Scattolin教授（Associate Editor of Automatica）（典型引文）中对申请人在提高系统全局性能和分布式预测控制稳定性方面的工作给予了正面的评价:在众多DMPC研究文章中主要有2个目标，第一个是如何提高系统全局性能，既基于协调的方法，这可以通过显示优化性能指标来实现，在这方面采用线性模型，[代表论文5]给出了优化环境下的收敛性和稳定性条件。并把本本项目提出的方法单独归为一类。  6） 葡萄牙里斯本大学JOÃO M. LEMOS教授在2012年发表在《IEEE Control Systems Magazine》的中，对 [代表论文8]进行了多次评述，肯定了我们方法的优化性能：“在[代表论文8]中，每个智能体与其它子系统进行博弈，在假设其它子系统输入动作不变的前提下，通过迭代决策过程尽量优化其自身的性能，… …，尽管无法确保使得控制器稳定的收敛性条件满足所有系统，但对于我们考虑的这类系统该方法可以获得稳定性和接近全局最优的解”；“［代表论文8］为了避免不稳定性，提高系统全局系能，控制器与其邻域系统通信，尽量使得操纵变量在每个采样开始时刻达到一致性”。并将我们提出的方法用到了供水渠的控制中：“该装置可以看为通过输入相互关联的串级系统，采用[代表论文8]中的协调算法作为我们DMPC算法  7） 加拿大NSERC/UNENE工业研究主席、西安大略大学（UWO）Jin Jiang教授在其2014年发表在《IEEE Trans. Instrumentation & Measurement》上的论文提到：文献[zheng et al 2011中]给出了NCS系统的稳定性分析，以及稳定化的NCS控制器设计方法。新南威尔士大学（UNSW）Jie Bao教授在《Computers and Chemical Engineering》（2014,71,158–170）也指出：“一种降低通信负担的办法是考虑‘neighbor-to-neighbor’的通信方式，Zheng et al.(2011) 提出了一种子系统与其邻居交换缩小的信息集的方法，每个局部控制器优化其自身性能和其下游子系统的性能”。德克萨斯A&M大学工业评估中心主任Bryan P. Rasmmussen教授在2015年 发表论文指出：“可以看出在处理DMPC方面主要有两类方法，一类是基于协调的方法，见［代表论文7］，其中每个控制器通过告诉其它控制器其要获得集中式MPC性能时所做的动作来提高其全系统范围的解的性能。加拿大滑铁卢大学Hector Budman和Ali Elkamel教授在（Journal of Process Control 的一篇文章中指出“[代表论文8]分析了迭代DMPC的最优性，推出了无约束情况性的闭环形式解”。  此外，中国工程院院士，IEEE Fellow IFAC Fellow 柴天佑院士，IEEE Life Fellow, IFAC 前主席吕勇哉、中国工程院王国栋院士所在课题组发表论文中曾多次评论申请者发表的相关论文。IFAC LSS主席，伯明翰大学大系统方向著名教授Mietek Brdys、匈牙利科学院SZTAKI主任、IFAC CMLS主席László Monostori教授，IFAC MMMC 前主席、《Int. J. Prod. Res. 》主编Alexandre Dolgui 教授，IFAC EIN主席Hervé Panetto在分别其2015年发表在《Annual Review in Control》的2篇论文[典型引文3] 中多次引用申请者关于分布式预测控制协调策略的多篇论文。 |
| 代表性论文专著目录： | [1] 席裕庚. 《预测控制》, 国防工业出版社，1993  [2] 席裕庚. 动态不确定环境下广义控制问题的预测控制. 控制理论与应用, 2000, 17(5): 665-670.  [3] Ding Baocang, Xi Yugeng, Li Shaoyuan. A synthesis approach of on-line constrained robust model predictive control, Automatica, 40(1):163-167, 2004  [4] Ding Baocang, Xi Yugeng, Cychowski Marcin T., O'Mahony Thomas. Improving off-line approach to robust MPC based-on nominal performance cost, Automatica, 43(1): 158-163, 2007  [5] Li Dewei, Xi Yugeng. The Feedback Robust MPC for LPV Systems with Bounded Rates of Parameter Changes, IEEE Transactions on Automatic Control, 55(2): 503-507, 2010  [6] Li Shaoyuan, Zhang Yan, Zhu Quanmin. Nash-optimization enhanced distributed model predictive control applied to the Shell benchmark problem, Information Sciences, 170(2-4): 329-349, 2005  [7] Zheng Yi, Li Shaoyuan. Networked coordination-based distributed model predictive control for large-scale system, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(3):991-998  [8] Zhang Yan, Li Shaoyuan. Networked model predictive control based on neighbourhood optimization for serially connected large-scale processes, Journal of Process Control, 27(1): 37-50, 2007 |
| 主要完成人情况： | 1、姓名：席裕庚  排名：1  行政职务：教师  技术职称：正高级  工作单位：上海交通大学  完成单位：上海交通大学  对本项目创造性贡献：项目负责人对第一和第二发现点有创造性贡献，负责本项目的总体设计与规划、研究方向和内容的确定、关键学术难点的分析以及对全部重要科学发现的理论阐释等，是全部发现点的主要完成人，是代表性论文1，2的唯一作者，代表性论文5的通讯联系人，代表性论文3，4的合作作者。  2、姓名：李少远  排名：2  行政职务：副院长  技术职称：正高级  工作单位：上海交通大学  完成单位：上海交通大学  对本项目技术创造性贡献：作为主要参加者对发现点3做出了创造性贡献，完善和发展了分布式预测控制设计理论和方法，是代表性论文6的第一和通讯作者，代表性论文7，8的通讯联系人，是代表性论文3的合作作者。  3、姓名：丁宝苍  排名：3  行政职务：  技术职称：正高级  工作单位：西安交通大学  完成单位：上海交通大学  对本项目技术创造性贡献：作为主要参加者对发现点2做出了创造性贡献。最主要的是：提出了鲁棒预测控制综合设计和分析的新思路和方法，是代表性论文3、4的通讯联系人。  4、姓名：李德伟  排名：4  行政职务：  技术职称：副高级  工作单位：上海交通大学  完成单位：上海交通大学  对本项目技术创造性贡献：作为主要参加者对发现点2做出了创造性贡献。最主要的是：提出闭环鲁棒预测控制设计框架和方法，是代表性论文5的第一作者。  5、姓名：郑毅  排名：5  行政职务：  技术职称：副高级  工作单位：上海交通大学  完成单位：上海交通大学  对本项目技术创造性贡献：作为主要参加者对发现点3做出了创造性贡献。最主要的是：基于状态输入耦合模型的，基于邻域优化的分布式预测控制无约束情况下解析解，以及稳定性条件，并对该方法为什么能够提高系统整体优化性能进行了定性的分析，是代表性论文7的第一作者。 |
| 完成人合作关系说明： | 本项目依托国家自然科学基金重点项目、面上项目等研究课题，针对预测控制的原理、方法和系统设计展开深入研究。在此过程中，项目主要完成人的合作关系如下：  （1）1999年开始，李少远教授作为席裕庚教授的博士后，出站后留校工作，期间两人在预测控制领域合作研究，于2004年共同指导当时的博士研究生丁宝苍，在Automatica上发表论文（代表性论文3），并共同获得2006年上海市自然科学一等奖。  （2）丁宝苍教授从2001年起，在席裕庚教授指导下攻读博士学位。在席裕庚教授指导下，于2004年在Automatica上发表论文（代表性论文3）；并将博士期间工作进行整理，共同发表论文（代表性论文5）。  （3）李德伟副研究员从2006年开始，在席裕庚教授指导下攻读博士学位。在席裕庚教授指导下，于2010年在IEEE Transactions on Automatic Control 上发表论文（代表性论文5）；  （4）郑毅副教授从2006年开始，在李少远教授指导下攻读博士学位。在李少远教授指导下，于2013年在IEEE Transactions on Control Systems Technology上发表论文（代表性论文5）； |
| 知情同意证明 |  |
| 国际合作证明 |  |