

基于 ACP 的平行发电控制系统

侯国莲¹, 弓林娟¹, 苏烨², 唐耀华³

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014;

3. 润电能源科学技术有限公司, 河南 郑州 450018)

摘要: 发电侧控制是整个电网稳定运行的基础, 而现有的控制方法已不能满足能源、环境以及人类社会等对发电侧日益增长的需求。为保证发电过程的安全性、高效性和环境友好性, 提出了基于 ACP 方法的平行发电控制系统理论。首先, 构建与实际物理发电控制系统等价的人工发电控制系统; 接下来通过人工发电控制系统的计算实验, 选择最优被控对象模型及其对应的控制策略来对物理控制系统的运行进行引导, 并对其行为进行评估, 使其逐渐趋近人工控制系统; 然后, 通过发电过程中物理控制系统和人工控制系统的平行执行, 确保发电侧的运行稳定性, 并实现其效率最大化, 同时, 最大限度地降低能耗; 最后, 以联合循环电厂的燃机控制系统的平行控制为例, 验证了基于 ACP 的平行发电控制的可行性及其显著优势。

关键词: 发电过程; ACP 方法; 平行发电控制; 人工控制系统; 燃机控制系统

中图分类号: TM611.3

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.201927

ACP based parallel power generation control system

HOU Guolian¹, GONG Linjuan¹, SU Ye², TANG Yaohua³

1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China

3. Rundian Energy Science and Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450018, China

Abstract: The power generation side control is the foundation of stable operation of power grid. However, the existing control methods cannot meet the growing demands of energy, environment, and human society to the power generation process. Therefore, the theory of ACP based parallel power generation control system was presented for the safety, high efficiency as well as environmental friendliness of power generation process. At first, the artificial power generation control system which is equivalent to the physical power generation control system was constructed. Secondly, the optimal model of power plant and its corresponding control strategy were chosen through the computational experiments of artificial control system to guide the operation of physical control system. Meanwhile, the behaviors of physical system were assessed for the approaching of artificial system. Then, the stable operation, maximum efficiency, and minimum energy consumption were achieved with the parallel execution of artificial control system and physical control system. Finally, the parallel control of gas turbine system in combined cycle power plant was taken as an example to demonstrate the feasibility and remarkable advantages of the adopted method.

Key words: power generation process, ACP theory, parallel power generation control, artificial control system, gas turbine system

收稿日期: 2019-06-02; 修回日期: 2019-08-15

通信作者: 弓林娟, gljnecpu@163.com

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. 2019JG004); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61603136)

Foundation Items: Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2019JG004), The National Natural Science Foundation of China (No.61603136)

1 引言

随着科技的蓬勃发展与人们生活水平的不断提高,电力已经成为人们生活中不可或缺的组成部分。从 2003 年 8 月的美国、加拿大停电,到 2012 年 7 月的印度大停电,再到 2019 年 3 月的委内瑞拉大规模停电,此类突如其来的停电事件给人类社会带来的不只是交通瘫痪、人员被困、航班延误等一系列影响人类正常生活的问题^[1],还有巨大的经济损失。而究其根源,不仅仅是输电侧电力供应和调度存在问题,发电侧同样也承担着不可推卸的责任。因此,作为电力的根本来源,发电侧的安全、稳定、高效运行在人类社会占据着举足轻重的地位。发电机组是一个由许多子系统组成的动态特性复杂的大型系统,往往具有非线性、强耦合、大迟延等特征^[2],其稳定运行必然依赖完备且效果显著的控制系统。然而,随着发电机组结构的日益复杂、电网需求的逐渐提升以及对控制器控制性能要求的不断强化,传统意义上的发电过程控制面临着巨大的挑战。

目前,以火力发电为主的发电过程^[3]多采用传统的比例(proportion)、积分(integral)、微分(differential)控制器,即 PID 控制器。PID 控制器作为最早实用化的控制器,以其结构简单、调节方便^[4]一举成为工业控制界的“宠儿”。但最初的 PID 对发电机组类复杂系统的控制依然存在很多难以克服的困难,因此,随着智能化的提出与推广应用,早在 2002 年,刘志远等人^[5]就在原有 PID 的基础上总结性地分析了智能 PID 在电厂热工控制中的应用前景,这也为之后智能 PID 在发电领域的发展奠定了坚实的理论基础。随后,研究人员也尝试将与菌群-粒子群算法相结合的 PID 控制器和模糊单神经元 PID 控制器分别用于水轮发电机组^[6]和变速风力发电机组^[7],并取得了较为理想的控制效果。然而,由于 PID 控制器基于被控对象精确的数学模型,一般的 PID 设计过程往往难以应对模型阶次的增加,并且在一定程度上忽略了模型失配的问题。同样是在 2002 年,韩京清^[8]将几乎可以同 PID 技术媲美的自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)技术推上了工业控制界的历史舞台,又一次填补了控制理论和工程实际脱离的鸿沟。该方法不仅对被控对象的线性和非线性不作要求,还可以在不进行模型辨识,即对象模型

未知的情况下实现控制,与此同时,还具有强大的处理不确定性和抑制外扰的能力^[9]。因此,自诞生之日起, PID 技术在电力^[10-12]、交通^[13-14]、机器人控制^[15]等领域都取得了广泛的应用,表现出了很大的实际应用价值和前景。但是, PID 控制器在设计过程中,很少将一些社会及外部因素考虑在内,欠缺对控制过程突发状况的处理能力。随着控制理论不断发展,模糊控制^[16]、神经网络^[17]、预测控制^[18]等先进控制算法应运而生,其中,作为起源和发展于工业实践过程的控制算法,预测控制以其显著优势脱颖而出。预测控制主要由预测模型、滚动优化和反馈校正三部分组成,可通过系统过去的输入输出以及未来的输入对其未来输出进行预测,并且在这个过程中能有效处理约束,表现出良好的控制性能。预测控制不仅能应用于具有不确定性和耦合概率约束的线性系统^[19]中,同样也适用于输煤系统^[20]及超临界机组协调控制系统^[21]等复杂非线性系统。除此之外,预测控制还可以和其他先进算法(如模糊控制^[22]等)结合,以达到性能的进一步提升。然而,在发电过程的控制中,预测控制依然难以实时准确判断机组的运行工况,并为其匹配该工况下的最优控制参数,这将导致控制器性能的下降,进一步影响发电过程的安全、高效、稳定运行。因此,构建一个实时、快速、准确引导实际发电过程的控制系统成为亟待解决的问题之一。

在研究过程中,王飞跃教授提出的基于平行系统思想的 ACP 方法提供了解决上述发电控制问题的新思路^[23-24]。ACP 方法将人工社会、计算实验和平行执行三者进行有机整合,对于诸如发电系统这类难以控制的复杂工业过程,首先构造一个与其特性等价的人工系统,然后对发电过程中可能出现的状况和结果进行模拟、分析和评估,最后通过人工系统与实际物理的平行互动,使物理系统的行为趋向理想状态,即人工系统的行为^[25-26]。这样不仅可以使得复杂问题简单化,而且可以达到期望的控制效果。目前, ACP 方法已经在生物医学^[27]、企业管理^[28]、物理测量^[29]、智慧农业^[30]以及犯罪行为建模^[31]中取得了成功的应用。因此,本文尝试结合平行系统理论,将 ACP 方法引入发电过程,构建一种新型的发电过程控制系统,即平行发电控制系统。首先利用人工系统进行发电机组建模,控制策略选择和控制器初始参数设定,然后通过计算实验进行

分析评估,选择不同工况模型下的最优控制参数,最后通过人工系统和物理系统的虚实互动实现平行执行。

本文结构如下:首先对发电过程控制问题进行描述,并提供相应的解决思路;然后对提出的平行发电控制系统进行介绍与分析;再将平行发电控制方法应用于联合循环电厂的燃机系统中,并进行仿真实验,以验证该方法的可行性与良好的控制效果;最后对本文的主要工作进行总结。

2 问题描述与解决思路

2.1 发电控制的复杂性及其挑战

作为发电控制系统的被控对象,发电机组具有非线性、不确定性、强耦合以及大迟延等复杂特性。随着用户用电需求的攀升以及社会各界对能源环境保护意识的日益增强,发电机组的这些特性呈现出日益复杂的趋势,随之而来的是对控制器性能要求的不断提升。

实际发电过程应用最多且最传统的就是常见的 PID 控制器。PID 控制器以其结构简单、易于实现、便于调节等优势,多年来在工业控制界立于不败之地。作为一种基于误差的控制器,它可以通过计算期望目标与实际行为之间的偏差得到相应的控制策略,最大限度地消除偏差。然而,应用广泛并不代表适用于所有被控对象,当被控对象特性过于复杂时,PID 控制器的缺陷就日渐凸显。首先是误差 e 的取法,如何选取能真正反映控制性能并得到合适控制律的误差量是一个不可避免的问题,而且即便选取得到误差 e ,如何求得 de/dt 也是必须要面对的难题。除此之外,PID 控制过程中存在的积分反馈会给系统带来难以消除的副作用。此时,PID 控制器往往难以达到高性能的要求^[8]。

自抗扰控制(ADRC)在保留 PID 控制器的优点并力求克服其缺点的目标下被提出,从安排合适的“过渡过程”、合理提取跟踪微分器、探讨合适的非线性组合以及增加扩张状态观测器等几个方面对 PID 控制存在的缺陷进行修补,可以很好地协调控制过程响应快速性和超调量之间的关系,达到一种“双赢”的状态,但是这也同样成了二者共同的制约,使双方都很难达到自身最优。

在国内外专家学者不懈的努力下,诸如模糊控制、预测控制、神经网络等先进控制算法不断被提出,虽然这些控制策略都表现出了各自的优势,但

是对于诸如发电过程这类不确定性极强的复杂系统,却难以达到实时精准控制。发电过程是一个复杂的动态过程,其运行工况并不是恒久不变的,而且在运行过程中会存在各种内外扰动,甚至出现局部故障等突发情况,上述问题使其控制系统的设计面临着极大的挑战。

2.2 发电控制系统与 ACP 方法的融合

ACP 方法不仅是人工社会、计算实验和平行执行的有机结合,更是心理、信息、智能、模拟、决策和执行的一体化。基于将复杂系统中“虚”和“软”的部分转化成可分解、计算、执行的过程这一核心思想^[32],首先通过人工组织对实际物理系统进行建模,然后通过计算实验实现系统的分析和评估,最后用平行执行对物理系统进行控制和管理,使其成为一个主控过程,逐渐趋近人工系统,从而达到一个较为理想的状态。因此,为解决上述发电过程的控制问题,本文基于平行理论,将 ACP 方法引入发电控制系统形成平行发电控制系统,该平行发电控制系统的主要框架如图 1 所示。

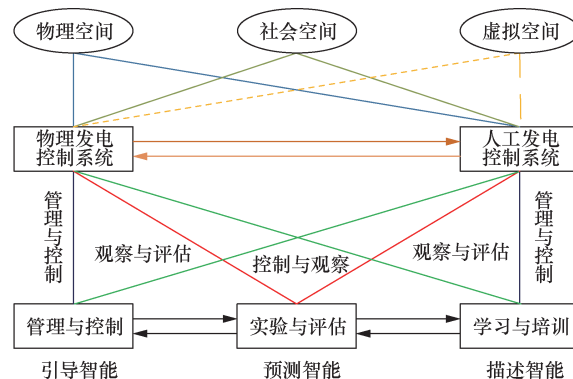


图1 平行发电控制系统的理论框架

图1中平行发电控制系统的 ACP 方法主要由人工发电控制系统的构建、计算实验的设计与结果分析评估以及人工发电控制系统和物理发电控制系统的平行执行 3 个部分组成。这三者的有机结合实现了平行发电控制过程的描述智能、预测智能和引导智能,从而在很大程度上提升了控制系统的性能,保证了发电过程的安全、稳定、高效。

3 平行发电控制系统

基于 ACP 方法构建的平行发电控制系统可以在计算实验的辅助下完成物理发电控制系统与人工发电控制系统间的虚实互动和平行执行。人工发电控制系统基于数据驱动,对物理发电控制系统的

数据资源和虚拟人工系统的内部信息数据和模型进行集成,不仅能对人工系统自身的运行做出指示,还能实时引导物理发电控制系统的优化运行,使其逐渐趋近人工发电控制系统的运行状态,达到较为理想的控制效果,进而实现人工发电控制系统和物理发电控制系统的相互借鉴和协同发展。基于上述思想,平行发电控制系统的结构如图2所示。

平行发电控制系统主要由以下3个部分组成。

(1) 人工发电控制系统的构建

一个实际的发电控制系统包括被控机组、控制器、传感装置、执行机构等硬件和软件设备及操作员,本文仅列举图2中对控制性能影响较为重要的几个部分。人工发电控制系统作为物理发电控制系统在虚拟空间的一种等价,其设计过程主要包括发电机组模型的建立、控制策略的选取和控制器参数的设置。

发电机组往往运行在一个较大的工况范围内,在不同的工况下其特性会有一些的区别,因此,针对机组的不同工况,可以用其实际运行数据辨识该工况下机组的模型,这也是大数据建模的独特优势所在,相比于分析过程复杂、所建模型单一的传统机理建模方法,这种建模方法具有更大的灵活性,可以根据机组的实际运行状况进行模型的实时更新。在系统被控对象的模型确立之后,控制器的选择与参数设定也是一个尤为重要的环节,将直接影响整个控制系统的性能,因此在人工系统的构造

中,也需要对控制器进行选定,并对其参数进行初始设定。被控机组模型和控制需求根据变化选择控制策略,然后设置相应算法参数构建控制器。

(2) 计算实验的设计与结果分析评估

出于系统运行安全以及经济成本的考虑,一般的测试性试验无法直接在实际发电机组上进行,因此,可以充分发挥人工发电控制系统中计算实验的可设计性和可重复性优势,在同一条件下先在人工发电控制系统中进行仿真实验,然后对实验结果进行分析和评估,以选定最优控制器参数。

控制系统性能评估一般从跟踪性能和抗扰动能力出发,因此在本节计算实验的设计中充分考虑了这两个方面。在所述建模过程中已经根据不同的运行工况为发电机组建立了相应的模型,而被控对象模型的差异往往会造成对应控制器参数的差别,从这一点出发,可以在不同的运行工况下用不同的参数优化方法求取控制器参数,然后将所得各参数组分别写入控制器,并对系统进行跟踪测试和抗扰动测试,最后通过对所得结果的分析 and 评估选定该工况下的最优控制器参数。除此之外,在机组运行过程中可能会发生设定值改变导致运行工况改变的情况,此时需要系统自动对控制器参数进行匹配选择。通过大量的计算实验,不仅可以选取适用于不同工况模型的最优控制器参数,还能对系统在不同控制器参数下设定值发生改变时或出现外扰时的动态特性进行分析和预测,为应对发生在物理发

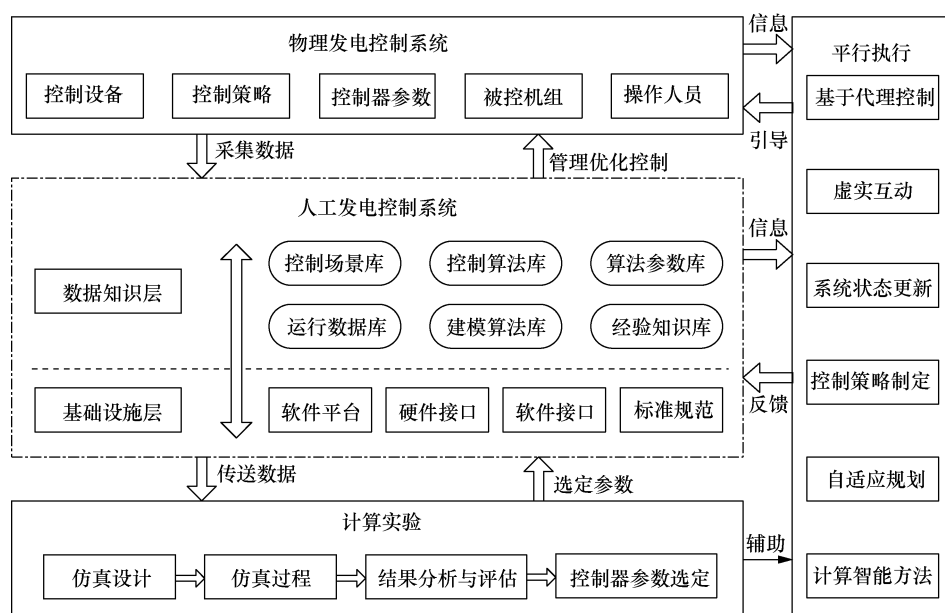


图2 平行发电控制系统的结构

电控制系统中的此类现象提供参考。

(3) 人工发电控制系统和物理发电控制系统的平行执行

在保证物理发电控制系统和人工发电控制系统采用同一控制策略的前提下, 基于代理控制^[9]实现实际发电控制和虚拟发电控制的同时执行。在平行执行过程中, 首先采集实际系统中的硬件磨损程度、运行工况、控制策略选择以及操作员经验水平等信息, 对人工系统进行信息更新, 使其建立合适的机组模型并选取相应控制器参数, 以尽可能近似地模拟实际系统的运行状态。在运行过程中对二者的控制效果进行实时对比, 产生反馈信号对人工系统的模型或者控制器参数进行调整或修正, 以减小二者的差别, 然后通过新一轮的计算实验进行分析和预测, 达到人工系统和实际系统的高度接近, 使得物理发电控制系统的运行状态成为人工发电控制系统的设定信息, 根据情况实时优化控制方案。通过此类虚实互动和相互借鉴使人工发电控制系统预测的结果指导物理发电控制过程, 实现物理发电控制系统向人工发电控制系统的逼近。与此同时, 物理发电控制系统的结果可对人工发电控制系统中选定的控制方案进行实时修正。

4 联合循环电厂燃机系统的平行发电控制

4.1 燃机系统介绍

联合循环机组主要由燃气轮机、余热锅炉、蒸汽轮机及其配套附属设备组成, 其以天然气为原料, 通过燃气-蒸汽联合循环将燃机的勃朗登 (Brayton) 循环和汽机的朗肯 (Rankine) 循环组合成一个整体热力循环系统, 实现对能量的最大利用。燃气首先在燃气轮机燃烧室中燃烧, 其产生的高温高压烟气推动叶片做功后进入余热锅炉, 对炉水进行加热产生蒸汽, 接着蒸汽在蒸汽轮机中做功。在这个过程中, 燃气轮机和蒸汽轮机均可带动其对应的发电机进行发电。

作为联合循环机组的重要组成部分, 燃机系统的安全、稳定运行在整个联合循环过程中发挥着至关重要的作用。燃机系统主要包括压气机、燃烧室和透平 3 个部分, 其结构如图 3 所示。

如图 3 所示, 在燃机的运行中, 压气机首先接收来自进气室的外界空气, 并对其进行压缩, 压气机中得到的高压空气接下来被送到燃烧室中与燃气混合燃烧, 燃烧过程产生的高温烟气进入透平并

做功, 进而带动发电机运行, 除此之外, 透平中产生的排气将被送入余热锅炉, 完成其后续任务。

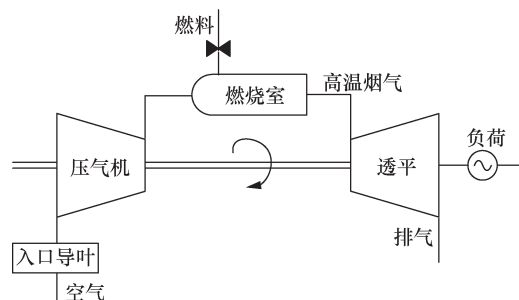


图3 燃机系统的结构

根据燃机特性及其各输入输出变量对整个系统影响程度的大小, 可以将燃机系统简化为图 4 中的 2 进 4 出系统。其输入变量分别为入口导叶 (IGV) 开度、燃料流量 G_f , 相应的输出变量为燃机功率 N_e 、转速 n , 排气温度 T_{ex} 和排气流量 G_{ex} 。

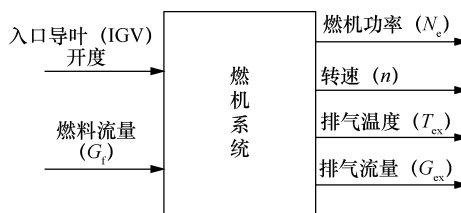


图4 燃机系统的简化模型

4.2 燃机系统的平行发电控制

燃机系统作为发电过程中的重要组成部分, 将用于构造前文所述的平行发电控制系统, 将燃机的平行发电系统中每个环节具体化, 可得到燃机平行发电控制系统的结构, 如图 5 所示。

在燃机的人工发电控制系统的建立过程中, 首先基于发电机组的现场实际运行数据, 通过合适的建模方法建立不同工况下的燃机模型。由于 T-S 模糊建模方法能有效消除系统中存在的非线性, 并且可以通过聚类对不同工况下的模型进行辨识, 所以在本文的燃机系统建模过程中, 选用参考文献[33]中提出的新型 T-S 模糊辨识方法。在 T-S 模糊辨识过程中, 除了模糊模型的构造, 还需要对其前提部分和结论部分这两个基本组成进行辨识。本文所用方法引用了 T-S 模糊模型的新结构 (即增量结构), 然后基于这一新型结构分别用熵聚类方法和指数加权最小二乘法对其前提部分和结论部分进行了模型辨识, 得到不同工况下的燃机系统子模型。而 T-S 建模过程的输出结果则是基于高斯函数、三角

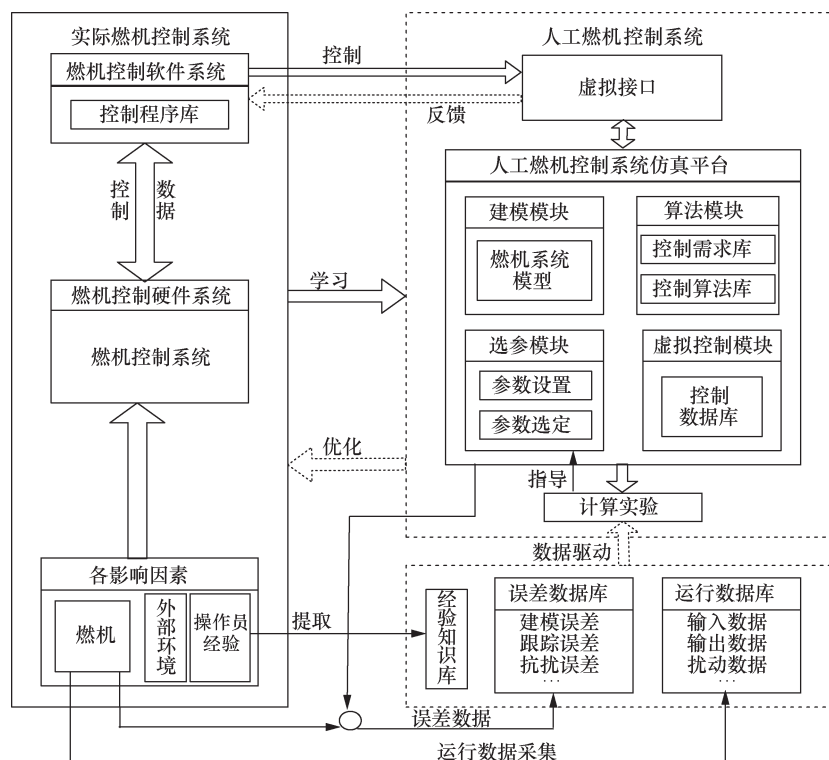


图5 具体化的燃机平行发电控制系统结构

函数等隶属度函数对不同工况下的模型输出进行加权。本文建模过程以某电厂的运行数据为例,通过图6所示的输入数据,得到图7的建模结果。

图7结果表明,所得误差占比不超过实际输出的1%,具有较高的辨识精度,可以作为人工控制系统虚拟被控对象的模型。

与此同时,得到3种不同工况下的燃机系统的状态空间模型,见表1。

在控制策略的选择过程中,鉴于预测控制算法可以有效处理变量约束且具有理想控制效果的优

势,本文以模型预测控制(model predictive control, MPC)为例进行分析。模型预测控制通过预测模型、滚动优化和反馈校正实现对输出的预测,并且在控制过程中能有效地处理变量约束,以达到更好的控制效果^[34]。该算法中需要设置的参数主要有预测时域 N 、控制时域 M 、误差加权系数矩阵 Q 、控制加权系数矩阵 R 以及控制变量 U 的幅值和速率约束。接下来在控制算法参数的初始设置中,在保证 $N>M$ 的前提下,可任意选取正的 N 、 M ,非负的 Q 、 R ,以及控制变量约束。在本文的控制器参数初始化过

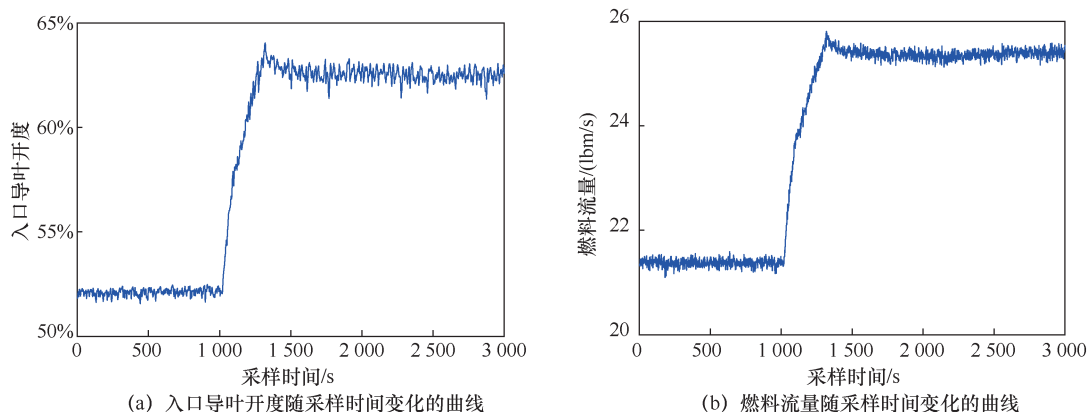


图6 燃机建模过程输入数据

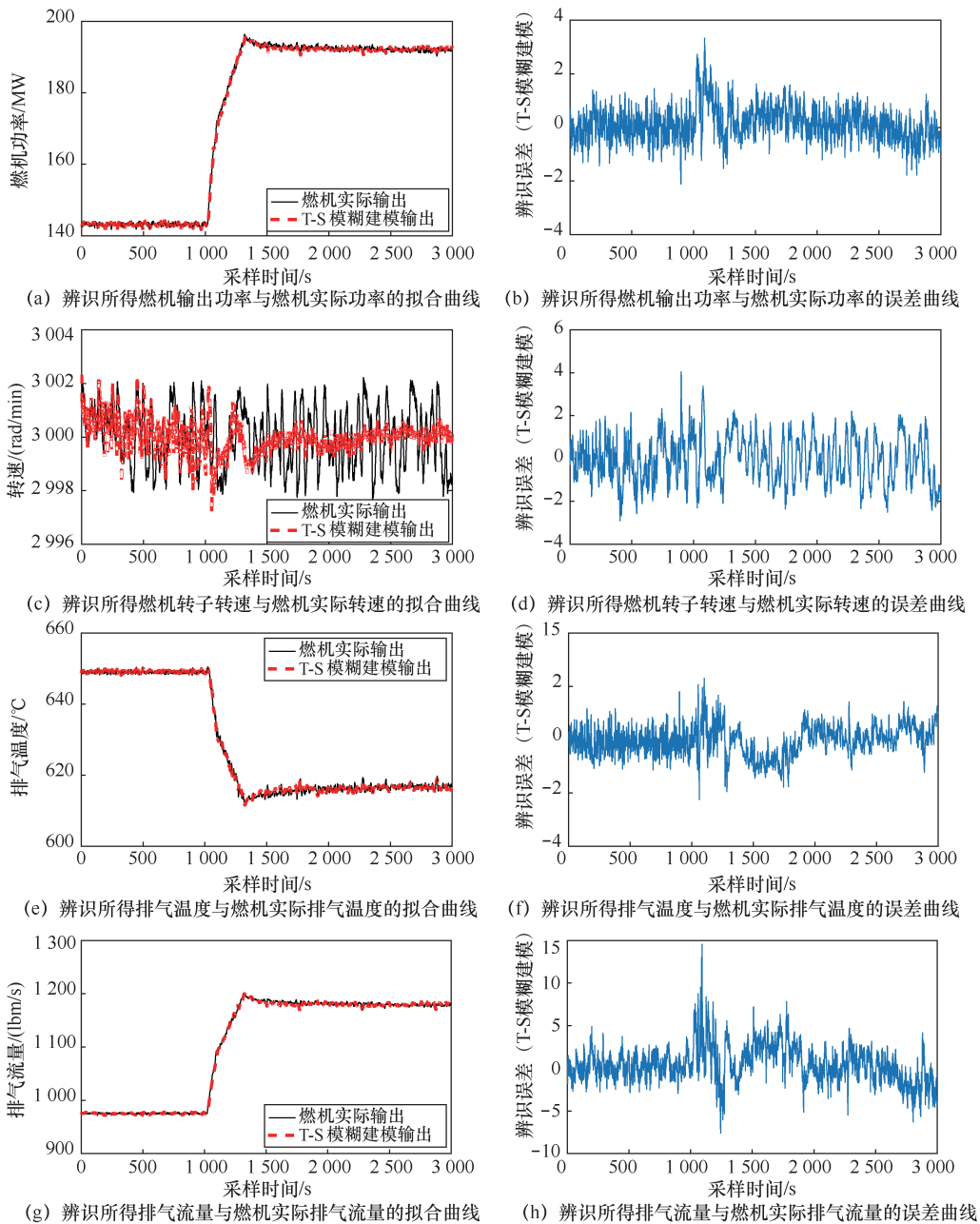


图7 T-S 模糊辨识所得燃机模型输出与燃机实际输出的拟合效果

程中, 令 $N=10$, $M=5$, $\mathbf{Q}=\text{diag}(1,1,1,1)$, $\mathbf{R}=\text{diag}(1,1)$, 控制变量幅值和速率约束分别为: $-5 \leq U \leq 5$, $-1 \leq \Delta U \leq 1$ 。

接下来在计算实验中, 要先选定控制器参数。随着智能优化算法的发展, 遗传算法、粒子群算法、灰狼算法^[35]等多种方法在参数优化领域取得了显著成效。但由于预测控制算法中参数的多样化与无规律性, 经验法依然是预测控制算法参数选择中最为常用的方法。因此本文也将以计算实验为辅助,

采用经验法对其参数进行设置。经过一系列的尝试与分析, 3 种不同工况下的 MPC 参数的最终选定结果见表 2。

表1 辨识所得燃机系统的 3 种不同工况

工况	N_e/MW	$n/(\text{rad/min})$	$T_{ex}/^\circ\text{C}$	$G_{ex}/(\text{lbm/s})$
工况 1	192.37	2 999.90	616.10	1 181.00
工况 2	176.66	2 999.10	628.35	1 109.60
工况 3	143.90	3 000.20	648.78	977.92

表2 3种不同工况下的MPC参数设定

参数	工况1	工况2	工况3
N	20	20	20
M	10	10	10
Q	diag(1,1,1,1)	diag(1,1,1,1)	diag(1,1,1,1)
R	diag(1,1)	diag(1,1)	diag(1,1)
U	$-10 \leq U \leq 10$	$-10 \leq U \leq 10$	$-10 \leq U \leq 10$
ΔU	$-1 \leq \Delta U \leq 1$	$-0.5 \leq \Delta U \leq 0.5$	$-1.25 \leq \Delta U \leq 1.25$

基于表2所示参数选择,为证明平行发电控制的显著优势,将传统的MPC与文中提出的基于ACP的MPC进行对比实验。首先对系统进行设定值跟踪测试。由于包括MPC在内的绝大多数控制算法一般基于固定不变的系统模型,因此,在本文的设定值跟踪对比实验中,考虑到所得结果的直观性,将工况3对应的燃机系统模型作为传统MPC算法所用模型。与此同时,在基于ACP的MPC中,在平行执行的作用下,系统可以根据工况点的变化选择合适的对象模型,并为其匹配相应的控制器参数。

设工况1为燃机系统的初始工况,即设定输出为[192.37, 2 999.90, 616.10, 1 181.00],然后在第20 s时将系统工况变为工况3,即设定输出为[143.90,

3 000.20, 648.78, 977.92],最后在第200 s时从工况3变为工况2,此时设定输出为[176.66, 2 999.10, 628.35, 1 109.60],得到如图8所示测试结果。

由8图可知,在20 s内。由于系统处于稳态,所以两者输出曲线均保持稳定。在第20 s时,系统工况发生突变,由于此时两种控制算法均基于工况3下的模型,所以表现出相同的控制特性,两者响应曲线重合。而在第200 s时,系统工况再次发生改变(变为工况2),此时在平行执行的影响下,基于ACP的MPC系统自主地将对象模型变为该工况对应的模型,并为其匹配控制器参数;然而,在传统MPC下的系统依然基于工况3下被控对象的模型。这一区别使得二者的控制效果也产生了显著差异,从200 s以后的响应曲线中不难看出,本文所提出的控制算法具有较小的超调量与更快的调节时间,并且能做到无差跟踪或者极小偏差下的跟踪。相反,传统MPC系统模型的失配与控制器参数的失调直接导致了较大的控制偏差,影响控制器的控制性能。

为进一步证明本文提出的平行控制理论的可行性,对系统进行抗扰动能力测试。本次实验以燃机输出负荷扰动为例,令工况1为初始工况,同时

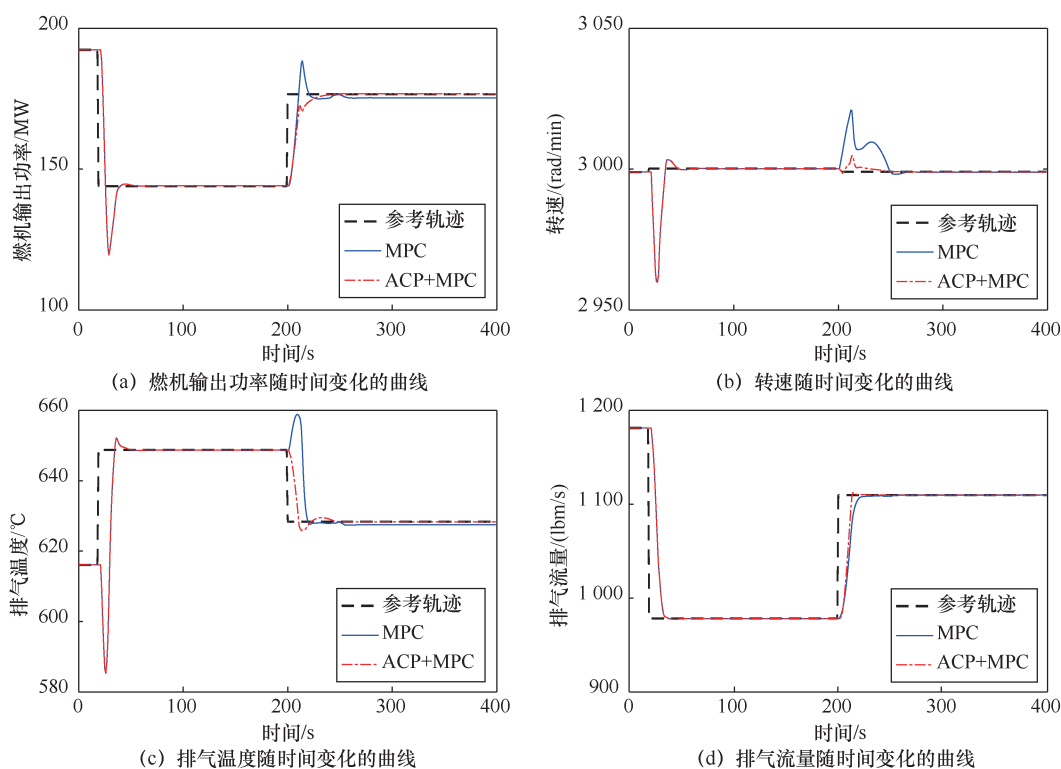


图8 设定值发生变化时系统的输出响应曲线

也是传统 MPC 在整个控制过程的运行工况。首先在第 20 s 时对燃机输出功率通道施加幅值为 10、持续时间 20 s 的负阶跃扰动信号; 待系统稳定后, 在第 200 s 时将工况变为工况 2, 并对其施加同样的阶跃扰动信号; 待系统再次稳定后, 在第 400 s 时, 又将系统工况变为工况 3, 对其施加相同扰动信号, 直至达到稳态。上述抗扰动能力测试的仿真结果如图 9 所示。

图 9 中各线型代表的含义与图 8 中相同。从图 9 可知, 相同的扰动信号在不同的工况下表现出相异的动态特性。与基于 ACP 理论的传统 MPC 相比, 基于固定工况的传统 MPC 算法不能根据系统实际运行情况实时改变工况, 并为系统匹配最佳控制器参数, 因此具有较差的抗扰动能力, 同时, 这种对比也凸显了本文提出的平行 MPC 方法的显著优势。

5 结束语

本文分析了发电过程控制对于电力、能源、环境乃至人类社会的重要性。聚焦发电过程的安全

性、高效性和环境友好性, 提出了基于 ACP 方法的平行发电控制系统理论, 并将其应用于联合循环电厂的燃机系统, 以验证其可行性与高效性。主要工作如下。

- 在 ACP 理论的基础上构建与物理发电控制系统等价的人工发电控制系统, 并对其发电机组建模和控制策略选择两个主要组成部分进行分析。
- 通过计算实验, 选择被控系统的最优模型及其对应的控制策略来对物理发电控制系统的运行进行引导和评估, 使其逐渐趋近人工发电控制系统。
- 实现发电过程中物理发电控制系统和人工发电控制系统的平行执行, 对人工发电控制系统和物理发电控制系统进行实时修正, 确保发电侧的稳定运行, 并使其效率最大化、能耗最小化。
- 对于上述基于 ACP 的平行发电控制理论, 以联合循环电厂的燃机系统的平行控制为例进行仿真实验。实验结果表明, 本文提出的平行控制方法在控制过程中具有更小的超调量和更少的调节时间, 且不易出现模型失配问题。控制性能优势显著, 具有极大的可行性。

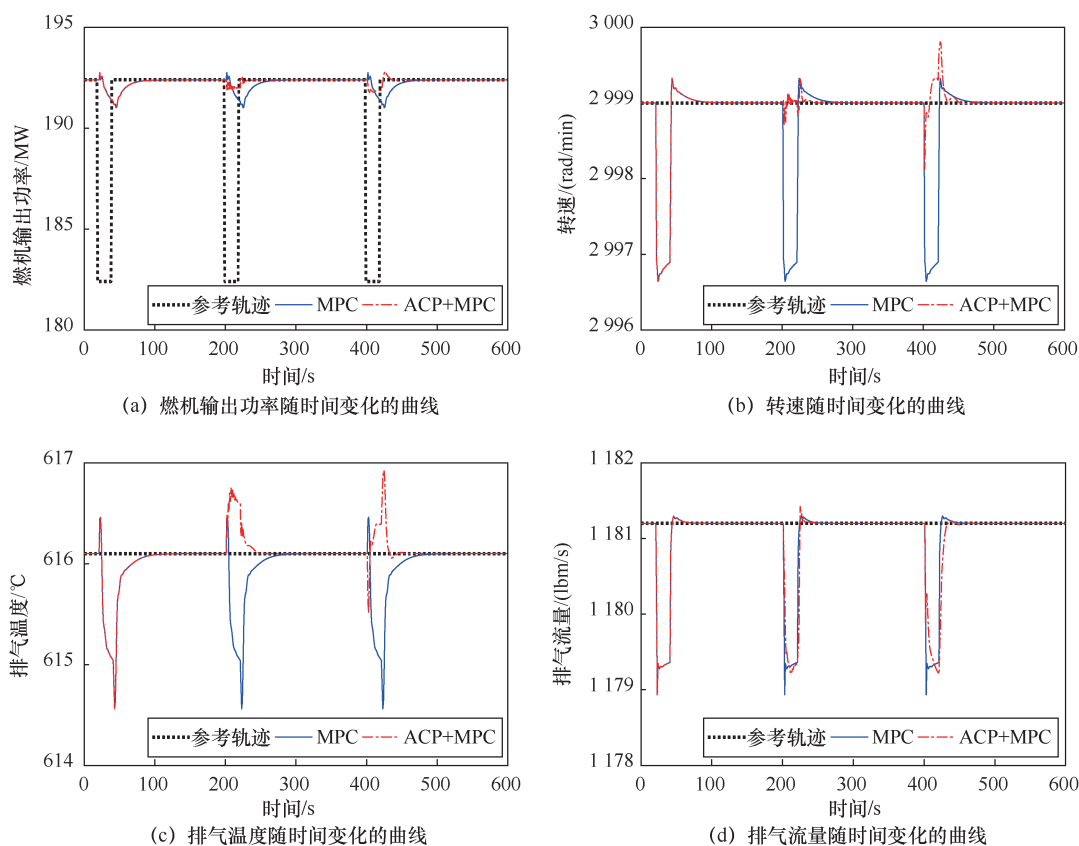


图9 输出功率扰动下系统的输出响应曲线

参考文献:

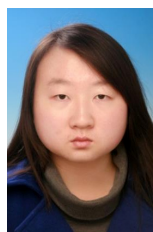
- [1] 刘自发, 张在宝, 杨滨, 等. 电网大停电社会综合损失评估[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2928-2938.
LIU Z F, ZHANG Z B, YANG B, et al. Evaluation of great blackout social comprehensive loss of power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2928-2938.
- [2] HOU G L, GONG L J, HUANG C Z, et al. Novel fuzzy modeling and energy-saving predictive control of coordinated control system in 1000 MW ultra-supercritical unit[J]. ISA Transactions, 2019, 86: 48-61.
- [3] 牛培峰, 马云鹏, 张欣欣, 等. 基于人工智能技术的火电厂燃煤锅炉智能燃烧优化研究及应用[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(2): 163-170.
NIU P F, MA Y P, ZHANG X X, et al. Research and application on combustion optimization of coal-fired boiler in thermal power plant based on artificial intelligence technology[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(2): 163-170.
- [4] 李浩亮, 杨任农, 李秋妮, 等. 基于分布式 PID 控制的任意阶线性多智能体系统的一致性[J]. 控制与决策, 2017, 32(5): 899-905.
LI H L, YANG R N, LI Q N, et al. Consensus of multi-agent systems with general linear dynamics based on distributed PID control[J]. Control and Decision, 2017, 32(5): 899-905.
- [5] 刘志远, 吕剑虹, 陈来九. 智能 PID 控制器在电厂热工过程控制中的应用前景[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 128-134.
LIU Z Y, LYU J H, CHEN L J. Prospects of application of intelligent PID controller in power plant thermal process control[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 128-134.
- [6] 寇攀高, 周建中, 何耀耀, 等. 基于菌群—粒子群算法的水轮发电机组 PID 调速器参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2009(26): 101-106.
KOU P G, ZHOU J Z, HE Y Y, et al. Optimal PID governor tuning of hydraulic turbine generators with bacterial foraging particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2009 (26): 101-106.
- [7] 陈杰, 陈冉, 陈家伟, 等. 变速风力发电机组的模糊—单神经元 PID 控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 88-94.
CHEN J, CHEN R, CHEN J W, et al. Fuzzy single-neuron PID control of variable-speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27): 88-94.
- [8] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
HAN J Q. From PID technique to active disturbances rejection control technique[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13-18.
- [9] 李向阳, 袁薇, 田森平. 惯性串联系统的自抗扰控制[J]. 自动化学报, 2018, 44(3): 562-568.
LI X Y, AI W, TIAN S P. Active disturbance rejection control of cascade inertia systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(3): 562-568.
- [10] 马燕峰, 蒋涛涛, 陈磊, 等. 光伏电站自抗扰附加阻尼控制抑制低频振荡策略研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1741-1747.
MA Y F, JIANG Y T, CHEN L, et al. An ADRC additional damping control strategy research on low frequency oscillation suppression of photovoltaic plants[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1741-1747.
- [11] 高本锋, 姚磊. 基于改进自抗扰控制的抑制光火打捆经直流送出系统的次同步振荡策略[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 533-540.
GAO B F, YAO L. Sub-synchronous oscillation suppression for photovoltaic-thermal-bundled power system based on improved active disturbance rejection control[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 533-540.
- [12] 房方, 李荣丽, 刘吉臻. 基于多变量内模结构的循环流化床锅炉床温自抗扰控制[J]. 中国电机工程学报, 2017(1): 172-181.
FANG F, LI R L, LIU J Z. Active disturbance rejection control for bed temperature of circulating fluidized bed boiler based on multivariable internal model structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2017(1): 172-181.
- [13] WU D F, REN F K, QIAO L, et al. Active disturbance rejection controller design for dynamically positioned vessels based on adaptive hybrid biogeography-based optimization and differential evolution[J]. ISA Transactions, 2018, 78: 56-65.
- [14] XIA Y Q, FU M Y, LI C M, et al. Active disturbance rejection control for active suspension system of tracked vehicles with gun[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 4051-4060.
- [15] 马书根, 赵珈靓, 任超. 基于无源性的全方位移动机器人自抗扰控制[J]. 控制与决策, 2018, 33(6): 1081-1086.
MA S G, ZHAO J L, REN C. Passivity-based active disturbance rejection control of an omni-directional mobile robot[J]. Control and Decision, 2018, 33(6): 1081-1086.
- [16] OSORIO R, ALONSO J M, VÁZQUEZ N, et al. Fuzzy logic control with an improved algorithm for integrated LED drivers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 6994-7003.
- [17] 焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 等. 神经网络七十年: 回顾与展望[J]. 计算机学报, 2016, 39(8): 1697-1716.
JIAO L C, YANG S Y, LIU F, et al. Seventy years beyond neural networks: retrospect and prospect[J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(8): 1697-1716.
- [18] 陈启宏, 罗满汝, 张立炎. 三相四桥臂并网逆变器约束模型预测控制[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 555-563.
CHEN Q H, LU X R, ZHANG L Y. Constrained model predictive control for three-phase four-leg grid-tied inverter[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 555-563.
- [19] DAI L, XIA Y Q, GAO Y L, et al. Distributed stochastic MPC of linear systems with additive uncertainty and coupled probabilistic constraints[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(7): 3474-3481.
- [20] ZHANG S R, MAO W. Optimal operation of coal conveying systems assembled with crushers using model predictive control methodology[J]. Applied Energy, 2017, 198: 65-76.
- [21] TIAN Z, YUAN J Q, ZHANG X, et al. Modeling and sliding mode predictive control of the ultra-supercritical boiler-turbine system with uncertainties and input constraints[J]. ISA Transactions, 2018, 76: 43-56.
- [22] ZHANG F, WU X, SHEN J. Extended state observer based fuzzy model predictive control for ultra-supercritical boiler-turbine unit[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 118: 90-100.
- [23] 王飞跃, 孙奇, 江国进, 等. 核能 5.0: 智能时代的核电工业新形态与体系架构[J]. 自动化学报, 2018, 44(5): 922-934.
WANG F Y, SUN Q, JIANG G J, et al. Nuclear energy 5.0: new formation and system architecture of nuclear power industry in the new IT era[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(5): 922-934.

- [24] 吕宜生, 陈圆圆, 金峻臣, 等. 平行交通: 虚实互动的智能交通管理与控制[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 21-33.
LYU Y S, CHEN Y Y, JIN J C, et al. Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 21-33.
- [25] 王迎春, 韩双双, 胡成云, 等. 基于 ACP 方法的平行手机信令数据分析系统[J]. 自动化学报, 2019, 45(5): 866-876.
WANG Y C, HAN S S, HU C Y, et al. Mobile phone signaling data analysis system based on ACP approach[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(5): 866-876.
- [26] 刘腾, 王晓, 邢阳, 等. 基于数字四胞胎的平行驾驶系统及应用[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 40-51.
LIU T, WANG X, XING Y, et al. Research on digital quadruplets in cyber-physical-social space-based parallel driving[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 40-51.
- [27] 王飞跃, 张梅, 孟祥冰, 等. 平行手术: 基于 ACP 的智能手术计算方法[J]. 模式识别与人工智能, 2017, 30(11): 961-970.
WANG F Y, ZHANG M, MENG X B, et al. Parallel surgery: an ACP-based approach for intelligent operations[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2017, 30(11): 961-970.
- [28] 秦蕊, 曾帅, 李娟娟, 等. 基于深度强化学习的平行企业资源计划[J]. 自动化学报, 2017, 43(9): 1588-1596.
QIN R, ZENG S, LI J J, et al. Parallel enterprises resource planning by deep reinforcement learning[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(9): 1588-1596.
- [29] 尹培丽, 王建华, 陈阳泉, 等. 平行测量: 复杂测量系统的一个新型理论框架及案例研究[J]. 自动化学报, 2018, 44(3): 425-433.
YIN P L, WANG J H, CHEN Y Q, et al. Parallel measurements: a new theory and framework for complex measurement system and a case study[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(3): 425-433.
- [30] 康孟珍, 王秀娟, 华净, 等. 平行农业: 迈向智慧农业的智能技术[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(2): 107-117.
KANG M Z, WANG X J, HUA J, et al. Parallel agriculture: intelligent technology toward smart agriculture[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(2): 107-117.
- [31] 刘烁, 王帅, 孟庆振, 等. 基于 ACP 行为动力学的犯罪主体行为平行建模分析[J]. 自动化学报, 2018, 44(2): 251-261.
LIU S, WANG S, MENG Q Z, et al. Parallel modeling of criminal subjects behavior based on ACP behavioral dynamics[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(2): 251-261.
- [32] 沈大勇, 王晓, 刘胜. 平行装卸: 迈向智慧物流的智能技术[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 34-39.
SHEN D Y, WANG X, LIU S. Parallel loading and unloading: smart technology toward intelligent logistics[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 34-39.
- [33] HOU G L, YANG Y, JIANG Z, et al. A new approach of modeling an ultra-super-critical power plant for performance improvement[J]. Energies, 2016, 9(5): 310.
- [34] 姚骏, 刘瑞阔, 尹潇. 永磁同步电机三矢量低开关频率模型预测控制研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 2935-2945.
YAO J, LIU R K, YIN X. Research on 3-vector model predictive control with low switching frequency of permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 2935-2945.
- [35] LIU H, WU H P, LI Y F. Smart wind speed forecasting using EWT decomposition, GWO evolutionary optimization, RELM learning and IEWT reconstruction[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 161: 266-283.

[作者简介]



侯国莲(1966—),女,博士,华北电力大学控制与计算机工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为先进控制理论在过程控制中的应用、发电过程建模与控制。



弓林娟(1994—),女,华北电力大学控制与计算机工程学院博士生,主要研究方向为发电过程建模与控制。



苏烨(1979—),男,国网浙江省电力有限公司电力科学研究院高级工程师,主要从事发电厂热工自动化技术研究和试验工作。



唐耀华(1977—),男,博士,润电能源科学技术有限公司高级工程师,主要从事常规电源网源协调、电力数据挖掘技术研究工作。