

DOI:10.11992.tis.201507039  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.tp.20151110.1354.010.html>

# 生活垃圾焚烧炉燃烧过程温度的仿人智能控制

肖前军<sup>1</sup>, 许虎<sup>2</sup>

(1. 重庆工业职业技术学院 自动化学院, 重庆 401120; 2. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

**摘 要:**针对城市垃圾焚烧排放污染物含量高,探讨了一种焚烧系统温度控制的仿人智能算法。剖析了垃圾不完全燃烧、烟气排放污染与导致二次污染等产生的原由,讨论了焚烧稳定性控制的条件,总结了焚烧过程的控制论特性,研究了焚烧过程的智能控制策略,构建了一种基于仿人智能的控制算法。以二阶滞后模型为例,仿真实验验证了仿人智能控制算法的强抗干扰能力与过程控制的良好品质。仿真研究结果表明,提出的控制算法对焚烧炉过程温度控制是可行与有效的。

**关键词:**垃圾焚烧; 温度控制; 燃烧稳定性; 不确定性; 污染物排放; 二次污染; 控制策略; 仿人智能控制

**中图分类号:** TP273   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1673-4785(2015)06-0881-05

中文引用格式:肖前军,许虎. 生活垃圾焚烧炉燃烧过程温度的仿人智能控制[J]. 智能系统学报, 2015, 10(6): 881-885.  
英文引用格式:XIAO Qianjun, XU Hu. Algorithm for human-simulated intelligent temperature control of incinerator combustion process of urban household garbage[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2015, 10(6): 881-885.

## Algorithm for human-simulated intelligent temperature control of incinerator combustion process of urban household garbage

XIAO Qianjun<sup>1</sup>, XU Hu<sup>2</sup>

(1. School of Automation, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China; 2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** To address the problem of the high pollutant content discharged from city garbage incineration, this paper explores a human-simulated intelligent algorithm for controlling the temperature of the incineration process. We determine the reasons for incomplete garbage combustion, flue gas emission pollution, and secondary pollution. We then discuss the conditions necessary for incineration stability, summarize the cybernetic characteristics of the incineration process, develop an intelligent control strategy for the incineration process, and construct a control algorithm based on human-simulated intelligence. Using a two-order lag model as an example, the simulation experiment demonstrates that it would have good anti-jamming ability and process control quality. The results of the simulation research show that the proposed control algorithm is feasible and effective for controlling the temperature of the incineration process.

**Keywords:** garbage incineration; temperature control; combustion stability; uncertainty; pollutant discharge; secondary pollution; control strategy; human simulated intelligent control

随着经济的高速发展,焚烧已经成为城市生活垃圾减量化、资源化、无害化处理的重要手段,特别

是将垃圾焚烧发电越来越受到人们的重视<sup>[1-3]</sup>。无论链条、辊轴炉排、往复式炉排还是循环流化床垃圾焚烧炉系统,由于垃圾成分与焚烧过程异常复杂,要达到垃圾处理的资源化、减量化、无害化的目标并非

收稿日期:2015-07-23. 网络出版日期:2015-11-10.  
基金项目:重庆市教委科学技术研究资助项目(KJ102102).  
通信作者:肖前军. E-mail: xiaoqianjun2003@126.com.

易事,还有许多问题需要研究解决。首先,以垃圾作燃烧原料其热值是极其不稳定的,垃圾组成成分极其复杂,与垃圾分布地区、时间区间等众多因素相关,几乎没有一个固定不变的规律可寻。其次,焚烧炉系统的热力特性是变化的,它随运行时间、设备大修与技术改造而偏离原设计特性,可能出现燃烧不稳定、着火困难、炉膛结渣、燃烧不完全、产生腐蚀以及加剧二次污染等,使系统变得更加难以达到预期的控制目标。再次,燃烧是很难采用数学手段进行描述的复杂物理化学过程,因其是一个多输入多输出并具有强耦合的非线性系统,基于传统的 PID 控制不具备适应焚烧系统热力学特性变化的控制能力。针对上述问题,以下从控制论角度对生活垃圾焚烧炉系统温度控制作某些探讨。

## 1 控制论特性与稳定性燃烧

### 1.1 燃烧过程的控制论特性

燃烧过程中产生的控制问题,如燃烧不完全、产生二次污染等,多由于采用的控制策略与垃圾焚烧过程的控制论特性不匹配导致的,因此有必要讨论垃圾焚烧过程的控制论特性:1) 不确定性。焚烧过程最突出的特性是具有不确定性,包括燃料组分、热力学特性、动态控制模型与环境干扰等的不确定性,传统控制总是采用固定的范示控制策略进行控制,因此必然导致控制策略与控制论特性失配,比如焚烧过程中空气燃料比严重偏离理想空气燃料比,因空气不足引起燃烧不完全,并且在 300~750℃ 温度段极易生成剧毒二噁英而导致高污染物二噁英排放至大气,因此不能采取控制确定性过程的控制策略去控制具有不确定性的燃烧过程,因为控制不当就会产生二次污染。2) 控制参数的时变性。焚烧过程是一个动态的燃烧过程,其控制参数与过程所处状态和静态工作点有关,因此控制参数应不断地被修正,而不是固定不变的。3) 多变量之间的强关联特性。影响燃烧的因素众多,它们之间是相互关联的,难以进行解耦处理。4) 大滞后大惯性特性。焚烧过程的热惯性是显然的,因为燃料成分极其复杂,基本上都是热的不良导体,时滞特性明显,而且是随着时间变化的。5) 外部环境干扰的不确定与多变性以及非结构化特征,它们很难用数学手段进行描述。面对焚烧过程的上述控制论特性,必须寻找新的控制策略才能对其进行优化控制<sup>[4-6]</sup>。

### 1.2 稳定性燃烧

稳定燃烧是指在垃圾成分极其复杂、热值多变模糊并且热值低的条件下,为确保垃圾充分燃尽而维持

的必要燃烧温度,以减低设备运行成本与有效利用热能,并使一次与二次污染最小。稳定燃烧的影响因素包括:垃圾自身特性、空气过剩系数、烟气在炉内的停留时间与湍流度等,其中最重要的指标是燃烧温度、停留时间和湍流度,常被称为垃圾焚烧炉控制的“3T”要素。炉温高有利于垃圾充分干燥、过程热解充分、挥发成份析出与促进残碳燃尽,满足垃圾焚烧处理的热灼减量要求;炉温高也有利于减少有害污染物排放,当温度到 850℃ 时烟气在炉内停留 2 s 以后,二噁英排放量会急剧减少,因为大约 99.9% 的二噁英将被分解,因此焚烧温度是最为重要的影响因素;较高的稳定炉温有利于提高蒸汽的参数、产量与改善蒸汽品质,提高垃圾资源化利用率。但燃烧应考虑垃圾的含水率、燃点与热值等因素对温度的影响,因为燃烧温度是由燃料性质确定的,一般温度越高,烟气在炉内的停留时间越短。当火焰温度足够高时,应当采取强制技术措施对燃烧速度作必要的限制,否则可能加重炉体及耐火材料的负担并带来高温结渣与腐蚀。燃烧温度直接关系到生产运行的经济性,也涉及到多项技术指标能否达到规定的预期要求,比如燃烧稳定性、高温结渣、低温腐蚀、二次污染物排放、燃尽率等,只有采取正确的控制策略才能实现对垃圾稳定性燃烧的优化控制<sup>[7-9]</sup>。

## 2 控制策略与控制算法

### 2.1 控制策略

针对生活垃圾焚烧过程的控制论特性,如具有不确定性、非线性和时变性等,采用智能控制策略可解决常规传统控制方法难以优化控制焚烧过程的难题,它为垃圾焚烧过程控制提供了广阔的策略选择空间,因此可针对具体的焚烧系统过程选取与其控制论特性匹配的控制策略。在智能控制策略中,值得注意的是仿人智能控制(human simulated intelligent controller, HSIC)策略,其基本思想就是仿人与仿智,即在控制与结构方面模拟控制专家的思想与行为,并操作机器以模仿人类行为的方式实现其控制,比如一个优秀的车辆驾驶员可在道路状况极其复杂而气象条件又非常恶劣的环境下,可顺利地达成驱车目标。实际上车辆驾驶员头脑中有一个智能的控制机构,驱车过程本身就是控制机构对驱车控制问题的“认知→判断”与“判断→操作”的一个求解过程。驱车驾驶靠的是人类的智能与智慧,该过程经历了 2 个复杂的信息处理过程,首先执行的是“认知→判断”定性推理的信息处理过程,然后执行

“判断→操作”定量控制的信息处理过程,整个执行过程既有定性决策又有定量控制。事实上,这里的优秀驾驶员就是一个人体控制器,焚烧过程是瞬息万变的,其优化控制也必须在线实时完成,就如驾驶员根据行驶轨迹及其变化趋势实时驱驶车辆行驶一样。因此,仿人智能的控制系统只不过是人体控制系统的另外一种“同态”变换形式。从人体控制器结构和功能方面分析可知,基于仿人智能的控制系统具备以下基本特征:如启发式和直觉推理逻辑;在线的特征辨识和特征记忆;分层的信息处理与决策机构;定性决策与定量控制以及开、闭环控制相结合的多模态控制等。在仿人智能控制中,直觉的逻辑推理借助产生式规则予以表达(即用 IF-THEN 语句实现),其在线的特征辨识由系统动态特征模型予以数学描述,基于经典控制理论,HSIC 充分利用了交叉技术的优势,比如 HSIC 将控制理论、人工智能和计算机科学有机融合,因此可将定性决策与定量控制相结合从而实施多模态的控制;基于经典反馈控制,HSIC 可将开环控制与闭环控制相结合,以计算机软硬件系统为载体,从而构造出独具特色的控制算法。智能控制中的其他控制策略如模糊逻辑、专家系统和神经网络等策略与仿人智能控制相比,其控制手段显得单一,因此仿人智能控制在协调焚烧过程的动、静态技术指标与强鲁棒性方面有更加突出的优势,对垃圾焚烧过程控制应当是一种优化的控制策略<sup>[10-11]</sup>。

2.2 控制算法

焚烧过程控制模型如图 1 所示,其过程的输入与误差,智能控制器输出以及焚烧过程的输出分别用  $r(t)$ 、 $e(t)$ 、 $u(t)$  与  $y(t)$  表示。值得注意的是:过程误差  $e$  与过程误差变化率  $\dot{e}$  等都是完全可检测的,图 2 的误差相平面指出了过程误差  $e$  与过程误差变化率  $\dot{e}$  的关系。分析误差特征可知:如  $e$  位于图 2 平面的第 II 和第 IV 象限,则过程误差呈现出减少趋势,即  $e \cdot \dot{e} < 0$  或者  $\dot{e} = 0$  时,则误差逐渐趋近于为零;如其位于第 I 和第 III 象限,则  $e$  表现出有增大趋势,即  $e \cdot \dot{e} > 0$  或者  $e = 0$  且  $\dot{e} \neq 0$  时,那么  $e$  是增加的。基于上述分析,可以总结出 2 种不同的误差特征模式:1) 当  $e \cdot \dot{e} < 0$  或者  $\dot{e} = 0$  时,可选取半开环“保持”控制模式,因其误差会自动地逐渐趋近为零,该控制模式的优势之一是可直接消除积分饱和和与相位滞后而不用增加积分环节;2) 当  $e \cdot \dot{e} > 0$  或者  $e = 0$  且  $\dot{e} \neq 0$  时,可选取比例控制模式,因该控

制模式的负反馈可减少误差<sup>[12-13]</sup>。将上述半开环“保持”与比例控制模式合并,其原型算法可用数学形式总结为

$$u = \begin{cases} K_p e + kK_p \sum_{i=1}^{n-1} e_{m,i}, & (e \cdot \dot{e} > 0 \cup e = 0 \cap \dot{e} \neq 0) \\ kK_p \sum_{i=1}^n e_{m,i}, & (e \cdot \dot{e} < 0 \cup \dot{e} = 0) \end{cases}$$

式中: $e$ 、 $\dot{e}$ 、 $e_{m,j}$ 、 $u$ 、 $K_p$ 、 $k$  分别是过程误差及其变化率,控制过程中第  $j$  次过程的误差极值,仿人智能控制器的输出,比例系数和抑制系数。在实施控制的过程中,实质上采用的是双模态控制模式,下个周期的控制模式与算法是由当前控制周期的误差特征模式决定的,借助交替地实施 2 种控制模式就可达到对焚烧过程的优化控制目的。

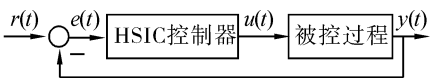


图 1 焚烧过程控制模型

Fig.1 Incineration process control model

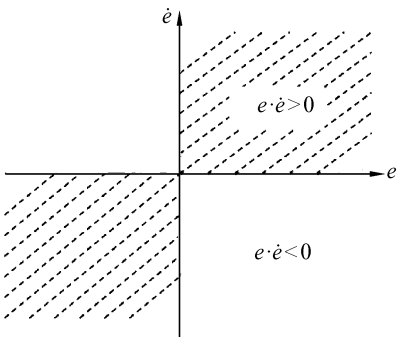


图 2 误差相平面

Fig.2 Error phase plane

3 仿真实验及结果分析

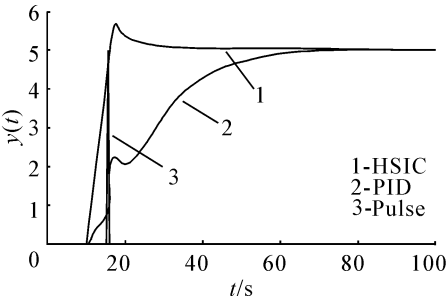
假定焚烧系统为二阶的大滞后过程,为便于比较控制品质,仿真实验中选取 PID 控制算法为参照,以便与原型 HSIC 控制的过程响应进行多个方面的比较。设其数学模型为:  $G(s) = Ke^{-\tau s} / (T_1 s + 1)(T_2 s + 1)$ , 其中,  $K$  为比例系数,  $\tau$  为过程时滞时间,  $T_1$ 、 $T_2$  分别为过程的时间常数。在模型 BMCR 锅炉负荷下,试验中选取  $K = 4.134$ ,  $T_1 = 1$ ,  $T_2 = 2$ , 垃圾焚烧炉负荷变化仿真包括:1) 主汽压力与空气量不变,燃料量增加 5% 扰动;2) 主汽压力与空气量不变,燃料量减少 5% 扰动;3) 燃料水份增加 10% 扰动,主汽压力不变;4) 空气量减少 5% 扰动,燃料量不变;5) 燃料水份减少 10% 扰动,主汽压力不变;6) 空气量增加 5% 扰动,燃料量不变。为保证仿真时有稳定初始值,模型实施仿真中在第 15 s 时开始加入外部脉



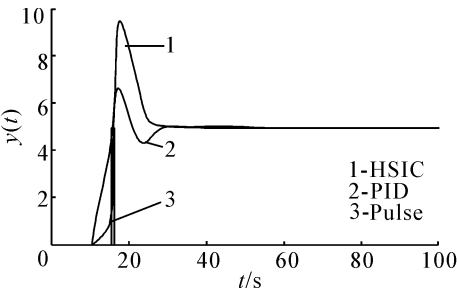
冲扰动,其仿真试验结果如图 3~5 所示,图中的纵坐标  $y(t)$  表示焚烧过程的响应输出。

仿真中,当过程时滞时间  $\tau = 10\text{ s}$  时,加入外部扰动时的输出响应如图 3(a) 和图 3(b) 所示,图中给出了 HSIC 与 PID 2 种控制算法是对比结果,外部扰动脉冲振幅为 5,宽度分别为 0.2 s 和 3 s。仿真结果显示,在外部脉冲扰动下,HSIC 与 PID2 种控制算法对比,HSIC 控制策略过渡过程时间短、最大偏差小,显示出 HSIC 控制策略具有很强的抗干扰能力。其原因在于 HSIC 控制算法在每个控制周期都会根据偏差信号的符号与大小对控制量进行调整,强制其在控制过程中对外部扰动做出反应。由于 HSIC 是非线性控制器,HSIC 的规则可避免过程振荡使过程快速稳定,因此 HSIC 在解决大滞后不确定性过程控制问题时可以获得较好的控制效果。

图 4 是过程在时滞分别为 10 s 与 15 s 以及外部扰动脉冲宽度为 5 s 与振幅为 50 与 10 情况下的 2 种控制算法 HSIC 与 PID 控制的输出响应比较。



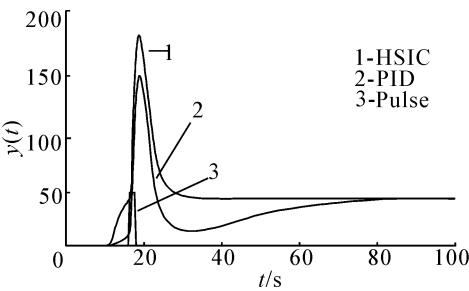
(a) 扰动脉宽 0.2 s 时的输出响应



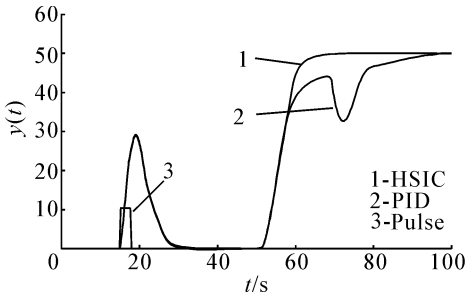
(b) 扰动脉宽 3 s 时的输出响应

图 3 不同脉宽振幅阶跃振幅为 5 时的输出响应

Fig.3 Output response in different disturbance pulse width when step amplitude is 5



(a)  $\tau = 10$ 、振幅 50 时的输出响应



(b)  $\tau = 15$ 、振幅 10 时的输出响应

图 4 不同脉宽振幅阶跃振幅为 5 时的输出响应

Fig.4 Output response in different disturbance pulse width when step amplitude is 5

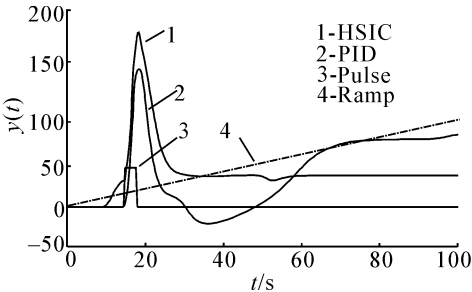


图 5 脉宽为 5 s、振幅为 50 时的输出响应比较

Fig.5 Comparison of output response when pulse width is 5 s and the amplitude is 50

图 5 是过程为斜坡输入时,时滞时间为 10 s,在外部扰动脉冲宽度为 5 s 及振幅为 50 时 2 种控制算法 HSIC 与 PID 控制的输出响应比较。

对比上述仿真结果可知,采用 HSIC 控制算法,过程控制的控制品质好,并且对外部扰动脉冲具有很强的抗干扰能力。在负载发生大扰动时,HSIC 控制器可快速地消除负载大扰动对焚烧过程运行的影响,将焚烧过程的输出响应控制在一个极小的偏差范围内,并使过程输出响应  $y(t)$  能很快的趋于平稳,因此可提高焚烧系统各个执行机构的使用寿命和燃烧过程的稳定性。将 HSIC 控制与传统 PID 控制进行比较可知,HSIC 控制更明显地表现出过渡过程时间短、过程响应速度快、过程稳态误差小与响应曲线平稳等优点。

4 结束语

垃圾焚烧炉系统温度控制是一个极其复杂的过程,由于其特殊的控制论特性,任何不确定性的变化都会给焚烧过程带来扰动,并使控制过程偏离期望的状态,产生不希望看到的后果。仿真实验研究表明,采用 HSIC 仿人智能控制,响应速度快、抗干扰能力强,控制过程的动、静态品质好,鲁棒性强,可以比较好地满足燃烧的稳定性控制要求,当出现不确定性扰动时,它抑制过大的超调,确保炉温快速地回

复到期望的理想状态,减少垃圾焚烧污染物的排放。

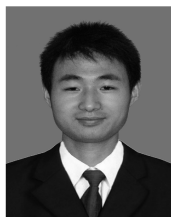
## 参考文献:

- [1] 张建涛, 朱敏. 垃圾焚烧锅炉的自动控制系统[J]. 中国仪器仪表, 2006, (12): 72-74.  
ZHANG Jiantao, ZHU Min. The automatic control system of waste incineration boiler[J]. China Instrumentation, 2006, (12): 72-74.
- [2] 邹包产, 韩秋喜, 王文凯, 等. 炉排炉垃圾焚烧控制策略[J]. 环境工程, 2013, 31(2): 80-82, 86.  
ZOU Baochan, HAN Qiuxi, WANG Wenkai, et al. Control strategy of grate furnace waste combustion[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(2): 80-82, 86.
- [3] 孙晓军, 肖正, 王志强. 生活垃圾焚烧厂自动燃烧控制系统的原理与应用[J]. 环境卫生工程, 2009, 17(4): 20-23.  
SUN Xiaojun, XIAO Zheng, WANG Zhiqiang. Principles and application of automatic combustion control system in domestic waste incineration plants[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2009, 17(4): 20-23.
- [4] 敖朝华, 邓薪莉, 郭兵. 垃圾焚烧炉燃烧过程的优化控制策略[J]. 环境工程, 2010, 28(1): 77-80, 72.  
AO Chaohua, DENG Xinli, GUO Bing. Optimizing control strategy of combustion process for rubbish incinerator[J]. Environmental Engineering, 2010, 28(1): 77-80, 72.
- [5] 任德齐, 郭兵. 复杂系统中的仿人智能控制策略[J]. 西南师范大学学报:自然科学版, 2008, 33(2): 132-135.  
REN Deqi, GUO Bing. Control strategy on human-simulated intelligence in complex system[J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2008, 33(2): 132-135.
- [6] 刘克勤, 杨志, 查智. 仿人智能控制策略在不确定性复杂控制系统中的应用[J]. 西南师范大学学报:自然科学版, 2007, 32(3): 156-161.  
LIU Keqin, YANG Zhi, ZHA Zhi. The application of control strategy on human simulated intelligence in uncertainty complex control system[J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2007, 32(3): 156-161.
- [7] 裴玉玲, 杨志, 杨小义. 城市垃圾焚烧的智能融合控制策略[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2010, 29(5): 803-806.  
PEI Yuling, YANG Zhi, YANG Xiaoyi. An intelligent-fusion based control strategy of city garbage incineration[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2010, 29(5): 803-806.
- [8] 李琪, 王亚男. 计算机控制技术在垃圾焚烧过程中的应用[J]. 重庆理工大学学报:自然科学, 2011, 25(2): 80-85.  
LI Qi, WANG Yanan. Application research on computer control technique in rubbish incinerating process[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2011, 25(2): 80-85.
- [9] 吴文海, 汪节, 高丽, 等. 基于模糊自整定 PID 的着舰引导控制器设计[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(7): 71-74.  
WU Wenhai, WANG Jie, GAO Li, et al. Career landing guidance controller design based on fuzzy self-tuning PID[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(7): 71-74.
- [10] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003: 25-34.
- [11] 敖朝华, 巫茜. 不确定性复杂硫化过程智能融合控制[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2013, 32(8): 1145-1148.  
AO Chaohua, WU Qian. Intelligence based control strategy for complex vulcanizing process with uncertainty[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2013, 32(8): 1145-1148.
- [12] 李祖枢, 涂亚庆. 仿人智能控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 70-74.
- [13] 周国清. 复杂底层过程控制中基于仿人智能的融合策略[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(8): 101-104.  
ZHOU Guoqing. Fusion strategy of complex process control in bottom layer based on human simulated intelligence[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(8): 101-104.

## 作者简介:



肖前军,男,1974年生,副教授,主要研究方向为智能控制与嵌入式系统设计。



许虎,男,1991年生,硕士研究生,主要研究方向为自动控制理论与智能控制系统设计。