

文章编号: 1000-8152(2001)04-0529-05

中厚钢板加速冷却过程混合式优化控制模型的研究

关守平

柴天佑

(东北大学信息科学与工程学院·沈阳, 110006) (东北大学自动化研究中心·沈阳, 110006)

高 军

(国家电站燃烧工程技术研究中心·沈阳, 110034)

摘要: 针对中厚钢板加速冷却工艺过程, 建立了基于集散控制系统的混合式优化控制模型, 实现了整个过程闭环优化控制. 以鞍钢厚板厂钢板加速冷却工艺过程为对象, 开发了仿真与控制一体化软件包, 进行了详细的仿真研究.

关键词: 钢板加速冷却; 混合控制; 集散控制系统

文献标识码: A

The Optimal Model of Hybrid Control for the Laminar Cooling Process of Hot Rolled Slab

GUAN Shouping

(Institute of Information Science and Engineering, Northeastern University · Shenyang, 110006, P. R. China)

CHAI Tianyou

(The Research Center of Automation, Northeastern University · Shenyang, 110006, P. R. China)

GAO Jun

(The State Engineering and Technology Research Center for Power Station · Shenyang, 110034, P. R. China)

Abstract: This paper set up the hybrid control optimal model of the laminar cooling process of hot rolled slab based on the distributed control system (DCS), then realized the closed-loop control in the supervisory control level. The software package, which includes functions of simulation and control, has also been built based on a real laminar cooling process in ANSHAN Steel Corporation. The detailed simulation results are presented to justify the correctness of the new control strategy.

Key words: laminar cooling process; hybrid control; distributed control system

1 前言(Introduction)

钢板的加速冷却是提高钢板质量的重要工艺过程, 一般采用层流冷却方式. 从 60 年代开始的带钢层流冷却到 80 年代的板钢层流冷却, 各国的科技工作者在此做了大量的工作^[1-3], 但是大都将注意力集中在工艺技术的改进上, 对于控制模型的建立, 基本上是采用工艺模型的方法, 目前尚未发现完全从控制角度出发, 用以建立控制模型的实例.

本文应用混合控制的思想^[4,5], 以鞍钢厚板厂钢板加速冷却过程为对象, 建立了混合式优化控制模型及其仿真软件包, 对钢板的加速冷却过程进行了闭环优化控制和仿真研究. 该系统具有很强的自学习和自适应能力, 可靠性高, 易于实现, 有效地克

服了工业生产中所面临的生产条件差、边界条件变化剧烈所带来一系列问题.

2 基于 DCS 系统的钢板加速冷却过程 (DCS controlled laminar cooling process)

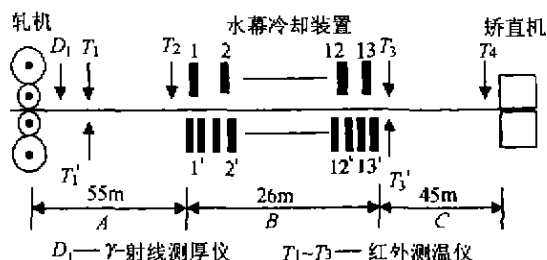


图 1 水幕冷却装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the laminar cooling system

钢板加速冷却装置如图 1 所示,位于往复式轧机与矫直机之间,采用连续式冷却方法.上喷嘴采用水幕冷却,下喷嘴采用集管喷射.

采用集散控制系统后,控冷系统可以用图 2 描述,其中 P, P' 为过程动态模型, ΔT_{in} 为钢板入口温度的波动, Δd 为钢板入口厚度的波动, Ω_s 代表控冷过程中不可测量的所有其它干扰, T_{cm} 为终冷温度, ΔT_{du} 为终冷钢板下 / 上板温差, ΔT_{he} 为终冷钢板头 / 尾板温差, V_r 为冷却平均速度.

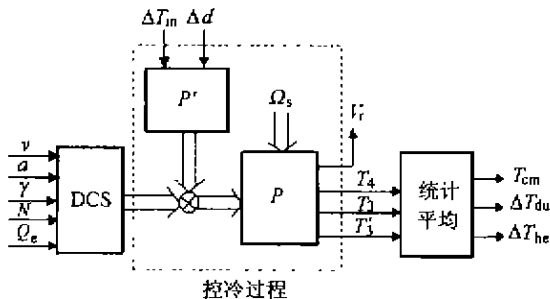


图 2 控冷过程 DCS 控制示意图

Fig. 2 System configuration of DCS based cooling process

DCS 系统具有 4 个控制回路: 1) 流量控制回路 Q_e ; 2) 流量比控制回路 γ ; 3) 辊道速度 / 加速度控制回路 v/a ; 4) 开卷数控制回路 N . 由于 DCS 系统所能控制的是 v, a, γ, N 和 Q_e , 而过程要求的工艺目标是 $T_{cm}, \Delta T_{du}, \Delta T_{he}$ 和 V_r , 因此, 控制问题是根据钢板的入口参数 (主要是可测量 ΔT_{in} 和 Δd) 和工艺目标值, 通过对各个控制回路控制量的合理设定, 最终使钢板的工艺参数达到设定的工艺指标的要求. 上述控制问题也称为以生产任务为目标的复杂工业过程“设定值优化”的控制问题.

3 混合式优化控制模型 (Optimal model of hybrid control)

混合控制的策略是, 综合运用主从控制器结构、知识模型与数据模型、常规控制与智能控制技术, 建立混合式优化控制模型. “主”控制器决定 DCS 各个控制回路设定值的主体, 进而决定系统的主要性能; “从”控制器起辅助作用, 修正主控制器输出的控制量, 即 DCS 回路设定值. 这种混合式控制结构可以极大地改善过程控制的可靠性和系统控制的性能. 控冷过程混合控制结构如图 3 所示.

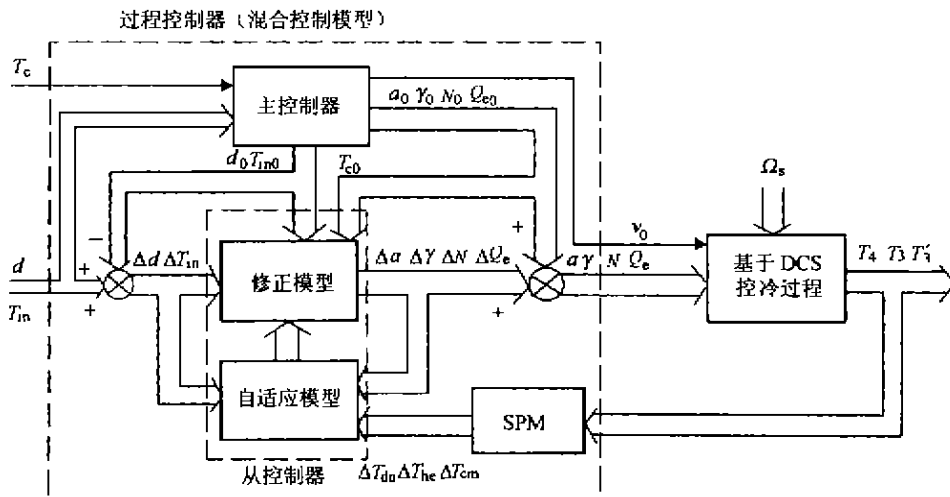


图 3 控冷过程的主 / 从式混合控制模型结构

Fig. 3 Structure of dominant/auxiliary hybrid control model

图中 T_c 为终冷温度的设定值, 具有下标“0”的变量为某一工况下工作点上的变量, 其值由主控制器确定. 由于平均冷却速度 V_r 由工艺过程预先确定, 因此在某一工况下的辊道速度 v 也可以离线确定, 不必在线调整. $T_{cm}, \Delta T_{du}, \Delta T_{he}$ 为统计平均量, 其值由统计模型 SPM 确定.

3.1 主控制器模型 (Dominant controller model)

主控制器输出的是某一控冷工况工作点上控制量的值, 如图 4 所示. 主控制器由一个干扰补偿器和

一个模糊控制器组成, 如果某一工况下工作点存在, 则直接输出工作点上控制量值; 否则启动干扰补偿器和模糊控制器来确定该工况上的工作点. 干扰补偿器主要用来抑制边界条件的波动, 使多变量模糊控制器变成增量调节的方式.

图 4 中 $\Delta T_{in} = T_{in}^2 - T_{in}^1, \Delta d = d^2 - d^1$. 其中 T_{in}^1 和 d^1 指上次钢板的入口温度和厚度, T_{in}^2 和 d^2 指本次钢板的入口温度和厚度.

由文献[1,3], 结合现场的经验模型及大量的仿真研究, 干扰补偿器模型的形式为:

$$\begin{cases} \Delta N^f = \text{int}(\Delta N^r + 0.5) = \\ \quad \text{int}(\alpha_e \frac{\Delta T_{\text{in}} d^2 + \Delta d T^2 + \Delta T_{\text{in}} \Delta d}{Q_{\text{so}}} N_0 + 0.5), \\ \Delta Q^f_e = \frac{\Delta N^r - \Delta N^f}{N_0 + \Delta N^f} Q_{\text{so}}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 a_r 是一个常系数, int 为取整函数, 上角标“ f ”

表示前馈补偿量,

模糊控制器中的模糊模型由模糊规则组成。控冷过程中,终冷温度误差修正控制量的关系为: $\Delta T_{du} \rightarrow \gamma$, $\Delta T_{he} \rightarrow a$ 和 $\Delta T_{cm} \rightarrow N, Q_c$, 同时,控制量 N, Q_c, γ 和 a 与板厚 d 有着密切的关系,因此,模糊输入变量选为 $d, \Delta T_{du}, \Delta T_{he}, \Delta T_{cm}$, 模糊输出变量选为 γ, a, N 和 Q_c .

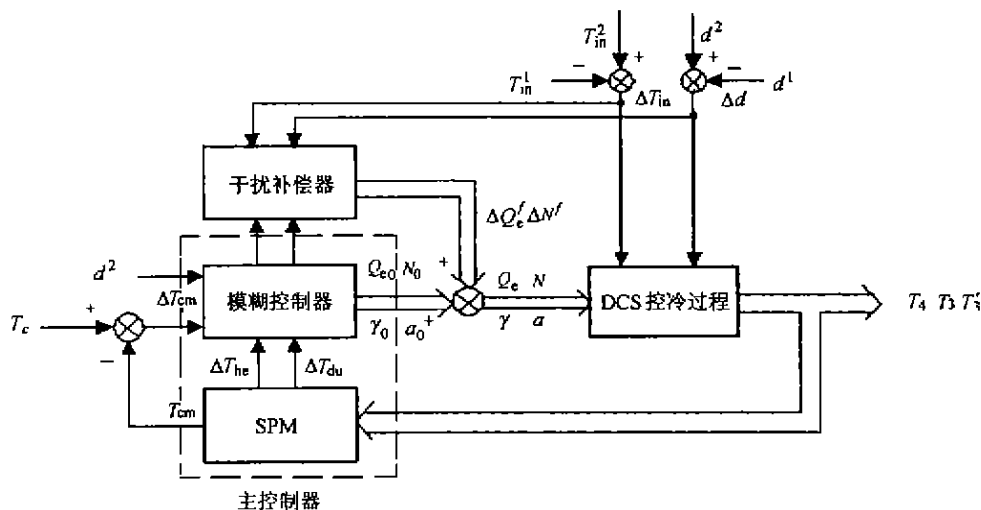


图 4 主控制器结构

Fig. 4 Structure of dominant controller

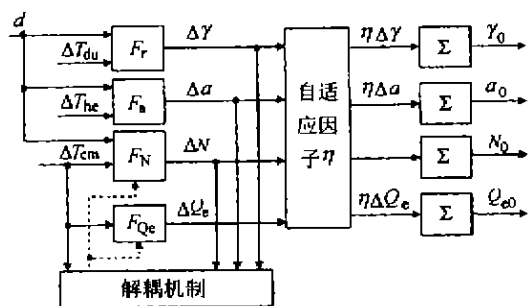


图 5 模糊控制器结构

Fig. 5 Structure of multivariable fuzzy controller

为消除多变量之间的耦合影响,模糊控制器对控制量的调整分为“粗调”和“精调”两个过程:“粗调”通过对 γ , a , 和 N 的调整来消除 ΔT_{du} , ΔT_{be} 和 ΔT_{cm} 的大的偏差;“精调”通过对 γ , a 和 Q_c 的调整来消除 ΔT_{du} , ΔT_{be} 和 ΔT_{cm} 的小的偏差. PI 形式的模糊控制器^[6]结构如图 5 所示.

图 5 中 F_r, F_c, F_N 和 F_Q 为模糊推理机, 根据

$$C = [\Delta a \quad \Delta \gamma \quad \Delta Q_e]^T,$$

$$\varphi^T = \begin{bmatrix} \Delta T_{in} & \Delta d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta T_{in} & \Delta d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta N_1 & \Delta N_2 & \frac{\Delta N_1 + \Delta N_2 - \Delta N}{N_0 + \Delta N} Q_{e0} & \Delta T_{in} & \Delta d \end{bmatrix},$$

变量 $d, \Delta T_{du}, \Delta T_{he}$ 和 ΔT_{cm} 来决定控制量设定值 γ , a, N 和 Q_e , 其结构同文献[6]. η 为自适应因子, 其表达式为:

$$\eta = k_0/k. \quad (2)$$

其中 k 为所加工的钢板的导温系数, k_0 为确定模糊规则时所依据的钢板(例如沸腾钢 0.06% C)的导温系数。

3.2 从控制器模型(Auxiliary controller model)

从控制器模型由线性控制模型和自适应模型组成,线性控制模型结构如下:

$$\Delta N = \text{int}(\Delta N_1 + \Delta N_2 + 0.5) =$$

$$\text{int}(\frac{\Delta T_{\text{in}}}{T_{\text{in}0} - T_{\text{c}0}} N_0 + \frac{\Delta d}{d_0} N_0 + 0.5), \quad (3)$$

$$C = \varphi^T \theta. \quad (4)$$

其中

$$\theta = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{21} & \beta_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} & \beta_{34} & \beta_{35} \end{bmatrix}.$$

式(3)中的系数为常数,式(4)中的系数 β_j 需要辨识.

由于控冷过程未知,因此由终冷误差 ΔY 来得到控制量的修正量 $\Delta C(K+1)$,即系统的期望控制量 $C^*(K+1)$ 是非常困难的,因此常规的最小二乘递推算法 RLS 不能应用.应用模糊推理的方法给出 $\Delta C(K+1)$,进而给出 $C^*(K+1)$,就可以较好地解决这一问题.

模糊推理机制中,模糊变量选为 $d, \Delta T_{cm}, \Delta T_{du}$ 和 ΔT_{he} ,多变量模糊推理模型结构及其策略同主控制器中的模糊控制器结构相似.因此,常规最小二乘递推算 RLS,结合模糊推理机制的一种改进型的最

小二乘递推算法 MRLS 如式(5)所示.

$$\begin{cases} C^*(K+1) = C(K+1) - \Delta C(K+1), \\ K(K+1) = P(K)\varphi[\lambda + \varphi^T P(K)\varphi]^{-1}, \\ \hat{\theta}(K+1) = \hat{\theta}(K) + K(K+1)[C^*(K+1) - \varphi^T \hat{\theta}(K)], \\ P(K+1) = \frac{1}{\lambda}[I - K(K)\varphi^T]P(K), \end{cases} \quad (5)$$

其中 $C(N+1)$ 为本次控制量; $C^*(K+1)$ 为修正后的控制量; λ 为遗忘因子,取值范围 $0 \leq \lambda \leq 1$; $\Delta C(K+1) = [\Delta \Delta a \quad \Delta \Delta \gamma \quad \Delta \Delta Q_e]^T$ 是根据终冷误差 $\Delta Y = [\Delta T_{cm} \quad \Delta T_{du} \quad \Delta T_{he}]^T$,由模糊推理机制给出的对控制量 C 的修正量.综上所述,从控制器结构如图 6 所示.

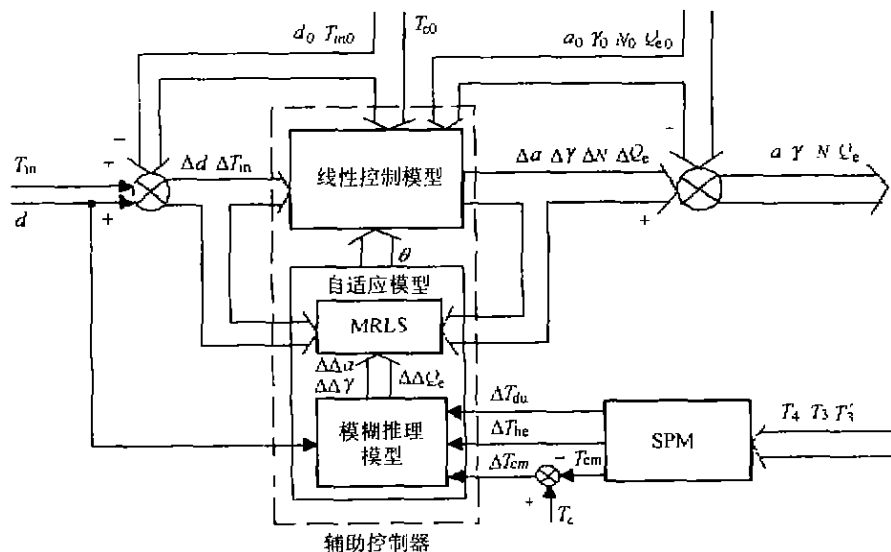


图 6 辅助控制器结构

Fig. 6 Structure of auxiliary controller

4 仿真研究(Simulation results)

利用仿真软件包,对本文的混合式优化控制模型进行了仿真研究.表 1 给出了仿真的边界条件范围.表中前

2 项为可测的边界条件,3~6 项为不可测干扰,其中 ΔT_{du} 和 ΔT_{he} 为钢板进水幕前的下/上板温差和头尾板温差, T_w 水温, T_c 为环境温度.表中后 3 项为控冷目标量.

表 1 仿真边界条件变化范围

Table 1 The varying scope of simulation boundary conditions

$T_m/^\circ\text{C}$	d/mm	$\Delta T_{du}/^\circ\text{C}$	$\Delta T_{he}/^\circ\text{C}$	$T_w/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$T_e/^\circ\text{C}$	$\Delta T_{du}/^\circ\text{C}$	$\Delta T_{he}/^\circ\text{C}$
800~850	20±1	20±3	0	30±5	30±5	600±5	±3	±3

图 7~图 10 给出了仿真结果,图中纵坐标为钢板终冷温度 T_{cm} ,横坐标为冷却的钢板数 N .图 7 为低碳钢(0.23%C)的控冷过程,当换热系数为 α 时,经过 4 块钢板,主控制器找到工作点,然后主从控制

器协同工作,将终冷温度控制在 $600 \pm 5^\circ\text{C}$.图 8、图 9 为控冷系统性能发生变化,即换热系数变化 $\pm 10\%$ 时,控制模型的控冷性能.图 8 中,经过 4 块钢板找到工作点,然后终冷温度控制在 $600 \pm 6^\circ\text{C}$.图 9 中,经

过 8 块钢板确定工作点, 终冷温度控制在 $600 \pm 6^\circ\text{C}$. 当钢种发生变化时, 控制模型具有同样优良的控制性

能. 图 10 表示当钢种为锰钢 (1.5% Mn) 时, 经过 12 块钢板确定工作点, 终冷温度控制在 $600 \pm 6^\circ\text{C}$.

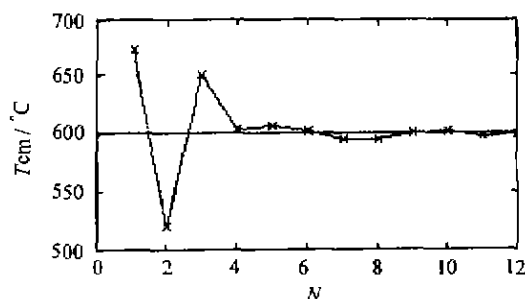


图 7 换热系数为 α 的低碳钢控冷过程

Fig. 7 Simulation for low-carbon steel with the transfer coefficient α

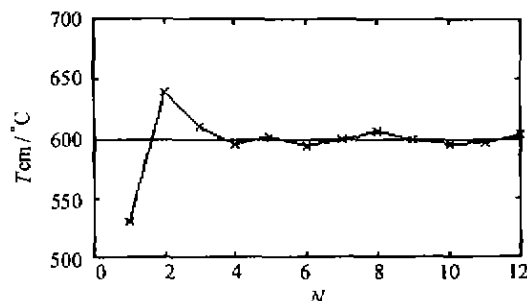


图 8 换热系统为 90% α 的低碳钢控冷过程

Fig. 8 Simulation for low-carbon steel with the transfer coefficient $\alpha_2=90\%$

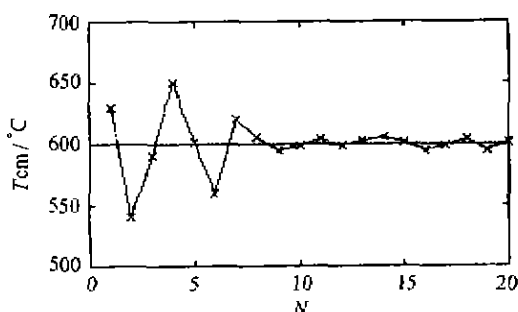


图 9 热换热系数为 110% α 的低碳钢控冷过程

Fig. 9 Simulation for low-carbon steel with the transfer coefficient $\alpha_3=110\%$

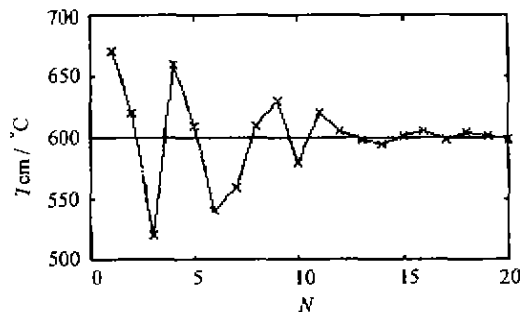


图 10 换热系统为 α 的锰钢控冷过程

Fig. 10 Simulation for manganese steel with the transfer coefficient α

5 结论 (Conclusion)

本文针对钢板加速冷却工艺过程, 利用混合式建模策略, 建立了整个控冷过程的主/从式闭环优化控制模型. 该系统具有很强的自学习和自适应能力, 可靠性高, 易于实现, 仿真结果说明, 该模型控制精度高, 可以有效地克服工业生产中所面临的生产条件差、边界条件变化剧烈所带来的一系列问题. 上述工作对于具有间歇式生产、大滞后特性一类工业过程的控制, 具有重要的推广价值.

参考文献 (References)

- [1] Van Ditzhuijzen G A J M. The controlled cooling of hot rolled strip: a combination of physical modelling, control problems and practical adaptation [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1993, 28(7): 1060 - 1065
- [2] Masahisa O, Tomoki K, Miranker D P, et al. The computer control of hot strip cooling temperature [A]. Paper for the 7th World Congress of IFAC [C], Helsinki, 1978, 159 - 166
- [3] Moffat R W, Christopher Moore M, Robinson M J, et al. Computer

control of hot strip coiling temperature with variable flow laminar spray [R]. AISE Year Book, 1985, 474 - 481

- [4] Jorgensen S B and Hango K M. Grey-box modeling for control: qualitative models as unifying framework [J]. Int. J. Adaptive Control and Signal Processing, 1995, 28(1): 60 - 70
- [5] Baxter M J, Bass J M, Browne A R, et al. Development framework approach to heterogeneous system design for control systems [J]. Control Engineering Practice, 1996, 4(2): 670 - 681
- [6] Li H X, Gatland H B. Conventional fuzzy control and its enhancement [J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 1996, 26B(5): 791 - 797

本文作者简介

关守平 1965 年生, 工学博士, 副教授. 现工作于东北大学信息科学与工程学院控制系统与智能装置研究所. 主要研究方向为综合自动化系统, 过程优化控制, 专家系统等.

柴天佑 1947 年生, 博士生导师, 教授. 现为东北大学自动化研究中心主任. 研究方向为智能解耦, 自适应控制, 专家系统, CIMS, 复杂工业过程建模, 优化控制等.

高 军 1959 年生, 高级工程师. 现为国家电站燃烧工程技术研究中心副总工程师. 主要研究方向为计算机控制系统、智能控制、网络通讯.