



1994

Chinese Control Conference

中国控制会议 论文集

秦化雄 主编

中国科学技术出版社



1994

Chinese Control Conference

中国控制会议 论文集

秦化淑 主编

中国科学技术出版社

内容提要

本书共收入 189 篇论文。这些论文是经中国自动化学会控制理论专业委员会组织评审,作为年会正式发表的论文。论文内容包括线性系统、 H_∞ 控制、鲁棒控制、非线性系统、分布参数系统、最优估计与预测控制、系统辨识、适应控制、离散事件动态系统、智能控制、模糊控制、专家系统、神经网络、系统理论、可靠性与容错控制等理论研究成果,以及控制理论在机器人、航空航天、工业生产、过程控制和社会经济系统等领域的应用研究成果。

本书可供从事自动控制理论及其应用研究的高等院校教师和研究生、科研单位的研究人员以及工业部门的工程技术人员参考。

主办单位: 中国自动化学会控制理论专业委员会

主 编: 秦化淑

副 主 编: 郑大钟 郑应平 郭 雷 张纪峰

特邀编委: 杨桂通 雷 霆 谢克明 张忠怀

(京)新登字 175 号

中国控制会议论文集

秦化淑 主编

*

中国科学技术出版社出版 (北京海淀区白石路 32 号)

河北利民印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

*

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 68 字数: 1551 千字

1994 年 7 月第一版 1994 年 7 月第一次印刷

印数: 1--1000 定价: 100.00 元

ISBN 7-5046-1765-2/Z·134

目 录

邀请报告

1. 钢铁工业自动化技术面临的机遇与挑战 余达太 1
2. 铁路运输自动化—现状、问题与挑战 贾利民 张锡第 蔡秀生 张一军 杨悌惠 9
3. 并行计算对控制理论与方法发展的机遇和挑战 胡保生 葛新科 22

一、线性系统

1. 混合摄动下计算结构奇异值的新方法 田玉平 30
2. 广义系统的极点配置方法 葛照强 35
3. 中储式制粉系统解耦控制系统 谢克明 李国勇 39
4. 动态输出反馈下的广义互联分散控制系统固定模 高志伟 郑丕谔 李光泉 44
5. 并行的极点配置算法及其新构想 王轶 席裕庚 48
6. 频域设计方法中预期开环传递函数的选择 张霖 吴麒 高黛陵 54
7. 抽取对象输出响应特征设计控制器的新方法 高黛陵 李卫东 吴麒 60
8. 确定有零点二阶系统最大振荡响应时 K 取值的一种方法 巴达拉 67
9. 关于线性时变系统的一致渐近稳定性的研究 房辉 72
10. 电加热反应器温度的多变量广义开环解耦控制 李平 王树青 王骥程 庄兴稼 77
11. 控制系统部分变元镇定与部分变元稳定性实用判据 黄力民 82
12. 一类随机滞后大系统的分散镇定 邓飞其 赵玉鹏 冯昭枢 86
13. 控制系统的可靠镇定 陈祥杰 王诗宓 方崇智 90
14. 四个对象的同时镇定与超越方程有解的等价性 贾英民 96
15. 控制器的有理函数矩阵拟合 黄西士 吴麒 张霖 100
16. 变积分作用的 PID 算法 王志宇 徐立鸿 104
17. 应用反馈系统的无源性分析一般动态系统的稳定性 冯纯伯 111
18. 一种基于滑动扇区的变结构控制设计方法 刘春梅 吴宏鑫 117
19. Riccati 代数方程中矩阵 P 与 R 、 Q 关系的研究 王庆林 126

二、 H^∞ 控制

1. 不确定系统的鲁棒 H^∞ 输出控制器 陈文华 129
2. 由降阶模型设计全阶模型的 H^∞ 鲁棒控制器 王炎生 陈宗基 134
3. 同时具有无穷远零点和有限虚轴零点的 H^∞ 控制问题的研究 忻欣 冯纯伯 139
4. 状态空间中标准 H_∞ 问题的直接求解公式 王正志 周宗潭 146
5. 线性时变系统的 H_∞ 鲁棒稳定性 吴旭东 解学书 151

6. 飞行控制系统 H_∞ 综合优化设计	王艳东 程鹏	156
7. H_∞ 降阶控制器设计	程鹏 王艳东	161
8. 离散系统鲁棒 H_∞ 模型匹配自适应控制	张汉全 叶建军	166
9. H_∞ 控制问题的摄动方法及收敛性	陈亚陵	170

三、鲁棒控制

1. 多线性参数化区间系统的严格正实问题	王龙	178
2. Gap 度量在多非线性系统输入、输出鲁棒稳定性的波波夫判别法中的应用	陈辉	190
3. 非参数不确定性的鲁棒辨识及应用	刘西河	200
4. 区间多项式的 Routh-Hurwitz 定理及其应用	年晓红	206
5. 一类多变量系统的最大鲁棒性分析	于伟	211
6. 不确定线性离散系统的鲁棒镇定	温香彩 刘永清	213
7. 互质因子摄动系统 BIBO 稳定鲁棒的充要条件	方华京	218
8. 区间矩阵渐近稳定的两个充分条件	年晓红	222
9. 一类不确定线性离散系统的鲁棒稳定性	施鼎汉	226
10. 区间对象族四顶点镇定结果	耿志勇 王恩平 黄琳	231
11. 一类不确定系统的鲁棒控制: 离散时间情形	孙翔 王子栋 杨保民	241
12. 一种鲁棒时间最优控制器	朱纪洪 胡维礼 郭治 袁爱萍	247
13. 大系统分散控制与鲁棒控制的几个结果	徐道义 钟守铭	251
14. 模型降阶的加权集结法	陈陆平 席裕庚 张钟俊	256
15. 分散线性反馈稳定化一类不确定线性组合大系统	王向东 高立群 张嗣瀛	260
16. 带有结构性不确定广义系统的鲁棒动态补偿器	王朝珠 贺云峰	264
17. 渐近稳定的一充分条件在系统鲁棒性分析中的应用	朱泽文 胡顺菊	269
18. 含参数不确定性系统的鲁棒镇定及跟踪性能设计	黄一 田玉平 冯纯伯	273

四、非线性系统

1. 非线性控制器使用观测状态可分离设计条件	苗原	277
2. 仿射非线性奇异系统的分析及应用	刘晓平	284
3. 一类非线性大系统的分散干扰解耦	姜斌 刘晓平 张嗣瀛	289
4. 非线性不确定系统的鲁棒最优控制	鲁守银 刘晓平	294
5. 一类非线性系统的鲁棒控制	秦化淑 洪奕光	297
6. 力学系统的鲁棒控制	洪奕光 秦化淑	302
7. 关于非线性系统非正则反馈线性化的一些初步结果	孙振东 夏小华 高为炳	308
8. 系统的时间尺度和非线性 PID 控制器	韩京清 王学军	314
9. 非线性跟踪 — 微分器在生育模式预测中的应用	姚翠珍 韩京清	322
10. 非线性 PID 电力系统控制器	高龙 郭国晓 李德源	327

11. 一类非线性系统动态输出反馈镇定	陈彭年 韩正之 张钟俊	334
12. 不确定性多输入多输出非线性系统的变结构控制	肖继烈 顾树生	339
13. Exactly linearized PI control of a strong acid-based system	张少华	343
14. 不确定非线性系统的变结构控制器设计	王少鹏 高为炳	350
15. 非线性随机微分效用过程与效用函数	杨峰	354
16. 一类输入非线性控制方法及其应用研究	钟秋海 徐勇	357
17. 采用扩展线性化的最优设计方法	张平 陈宗基	361
18. 带仿射均衡尺度的梯度投影法	高作汉 黄崇超 戴建设	368
19. 关于宏观经济问题的一个动态模型及其控制	黄国石	373
20. 三维临界解析动态方程的局部渐近稳定	辛云冰 费树岷	378
21. 具有扰动的脉冲微分系统解的稳定性	王晋茹	383
22. 临界非线性系统的局部渐近镇定	费树岷 高为炳	386

五、分布参数系统

1. 关于热加工的变结构控制	侯学章 赵文荣 朱广田	390
2. 关于双线性分布参数系统的一类最优控制	赵文荣 侯学章 朱广田	395
3. 波动方程的反演及其在地球物理参数辨识中的应用	邱忠坊	400
4. 无限维 LQ 最优调节器的近似求解理论	潘炳甫 潘立平	405
5. 一类椭圆型方程的辨识问题	欧阳亮	410
6. 无穷维线性动力系统的弱 L^p 稳定性	张宏伟 张显文 丁天彪 朱广田	412
7. 应用块脉冲函数辨识时变分布参数系统	檀国节	415
8. Quadratic stability of uncertain distributed parameter systems	陈万义 涂肇生	420
9. 半线性抛物型边界控制系统最优控制的存在性	刘纪芹 周鸿兴	427

六、最优估计与预测控制

1. Kalman 滤波算法的改进与 Luenberger 状态观测器理论的推广	刘丹阳	431
2. 一类鲁棒约束方差估计	郭治 王子栋 孙翔	439
3. 基于状态空间模型广义预测控制的迭代算法及并行实现	慕德俊 戴冠中	443
4. 一类非线性模型的预测控制	崔小第 卢准炜 徐荣良	448
5. 基于偏差补偿滤波器的 DMC 算法	刘晓华 闫庆旭 李少文	453
6. 自适应 Kalman 滤波在河流洪峰流量预报中的应用	胡致强	457
7. 干涉因子理论及其应用	李植华 朱岩	462

七、系统辨识与适应控制

1. 混合煤气热值模糊自适应控制器	曾干文	472
2. 随机连续信号的时间序列分析与建模	赵明旺	480
3. 广义预测多变量隐式自校正控制算法的研究	李国勇 谢克明	485

4. 随机非线性系统的参数辨识及自适应控制	侯忠生 韩志刚 穆勇	490
5. Identification of linear systems with both bias and variance disturbances	魏晨 郭雷	496
6. 系统辨识理论的某些进展及问题	郭雷	510
7. 随机线性多变量系统的鲁棒辨识	张颖 冯纯伯	519
8. 应用最小二乘法辨识闭环系统	冯纯伯 张颖	526
9. 氯气与水蒸汽平衡优化控制专家系统设计	陈增强 赵恒宝 袁著祉 车海平	531
10. 宜于实时控制的广义预测自校正控制器	车海平 陈增强 袁著祉	535
11. 具有饱和输入的广义自校正控制器	余文 柴天佑	539
12. 精选 — 优化辅助变量法闭环参数估计的收敛性	陈美会 王先来	543
13. 多变量自适应 PID 调节器	李清泉	547
14. 关于单变量自校正控制系统的一个稳定性收敛性判据	张维存 李清泉	552
15. 基于参数修正的鲁棒自适应极点配置	陈卫田 施颂椒 张钟俊	556
16. 估计时变参数的新型辨识算法	李红新 吴沧浦	562
17. Box-Jenkins 模型全结构辨识	张端金	567
18. I_1 中心估计递推算算法	黄学俊 王书宁 戴建设	571
19. 一类修改随机梯度算法的强一致性及其适应控制	李瑞胜 赖小平 洪惠民	577
20. 用一种估计联合过程的自适应格形滤波器来实现动态系统的故障分离	李渭华 萧德云 方崇智	583
21. 平均法在 ARMAX 系统参数辨识中的应用	张纪峰	589
22. 线性系统的神经网络辨识	王科俊 李国斌 李殿璞	593
23. 时变参数系统稳健自适应极点配置控制	李勇 陈翰馥	599
24. 全系数自适应控制方法在卫星姿态控制中的应用	解永春 吴宏鑫 吕振铎	604
25. 一类非最小相位非线性系统的直接自适应控制	韩存武 马晓军 文传源	614
26. 空间自适应有源降噪方法的研究	钟延炯 乐恺	618
27. 连续时间随机逼近的有效性	陈翰馥	624

八、离散事件动态系统

1. Fork-Join 系统中服务率的最优控制策略	徐学雷 郑大钟	634
2. 随机加工参数的串行加工线性能估计	赵千川 郑大钟	638
3. 一类区间参数离散事件系统的控制	朱更新 郑大钟	642
4. 串行生产线的参数优化	唐乾玉 陈翰馥 韩曾晋	646
5. 两级连续传输线的单人维修策略	宋东平	652
6. 用代数方法对网络协议建模和综合	黄典伟 吴智铭	660

7. DEDS 联合观测控制的区间问题及最小可控 — 联合可观子语言算法	法京怀	665
8. 同等机器上非独立任务的调度	康一梅 郑应平	669
9. Flow Shop 的交付期确定及调度	齐向彤 涂莘生	673

九、智能控制与专家系统

1. 基于新型联想记忆系统的直接仿人操纵智能控制	殷彤 白云飞	678
2. 浅论智能控制系统	田华	685
3. 一种采用预估补偿解耦方法的智能解耦控制		
..... 刘世伟 张忠怀 杨惠卿	691	
4. 模糊控制技术及其应用	窦永丰	695
5. 非线性智能组合开关控制器及其应用		
..... 陈杰 龚至豪 张富有 陈绿深	710	
6. 智能预测温度调节器	任作新	718
7. 微分对策的智能控制研究法	姜玉宪	722
8. 自组织模糊控制系统及其算法研究	侯志林 李秋娥 金 毅	729
9. 控制规则可调的模糊控制开关磁阻电动机驱动系统	马宪民 谢桂林	736
10. 基于 PSS 的神经元学习控制	王永骥 张晓兰 徐桂英 涂建	742
11. 宇航员交会人工智能辅助系统	陈根社 张安 朱建民	747
12. 模糊控制器的量化因子研究	范凌江 毛剑琴	753
13. 一种基于过程补人量估算的新型仿人智能控制	朱国瑜	757
14. 一种基于面向对象方法的知识库系统设计	田圆 冯珊	762
15. 模糊控制电饭锅的设计	徐崇庶 李晓毅 吴晴	767
16. 模糊大系统协调模型的辨识	汤兵勇	772
17. 工业锅炉的智能燃烧控制系统	张淑玲 赵庆生	779

十、神经网络

1. 人工神经网络的一种改进 BP 算法及应用	杨惠卿 刘世伟 张忠怀	785
2. 设计一种反馈型神经网络进行模拟值联想记忆	鲍晓红 高为炳	790
3. 静态神经网络新算法及其收敛性初探	高文忠 顾树生 平力	794
4. 实数值样本模式记忆网络的直接构造	唐俊	797
5. 基于神经网络的自学习预测控制	胡泽新 鲁习文 闵华清	800
6. 神经网络自适应控制小功率天线随动系统	王起飞 姚志红	805
7. 基于神经网络的液压泵故障诊断专家系统研究	王少萍 王占林	811
8. 一种人工神经网络控制器	石中锁 孙一康	816
9. 基于机理的神经网络结构及其应用的研究	周金荣 黄道 蒋慰孙	821
10. 神经网络在 MIMO 温度过程动态建模中的应用	宋青 吴锡章	827
11. 前馈神经网络的补偿方法	梁循 杜继宏 夏绍玮 杨振斌	832
12. 非线性系统自适应控制的 Fuzzy 神经网络方法	王殿辉 柴天佑	838
13. 利用神经网络进行推理的模糊控制器	王隆杰 毛宗源	843

14. 从专家系统、模糊理论及人工神经网络看智能工程发展的新趋势	余启刚	850
15. 基于自适应人工神经网络的非线性智能控制研究	王耀南 童调生	859
十一、系统理论		
1. 一种决策人分组的决策模型及全局优化算法	夏洪胜 蔡建立 李更明	864
2. 复合信息空间上可控性问题的概念研究	郭仲伟 崔德光 李征	869
3. An Exploring of Complexity	谢惠民	874
4. 自组织控制系统分析方法: 分叉—混沌信号与 n 级分频 ($f/z(n)$) 谱变换	李宗诚	879
5. 因果联系及归纳确认方法	张南纶	884
十二、可靠性与容错控制		
1. 针对执行器故障的系统二次稳定性可容错条件	袁立嵩 蒋慰孙	894
2. 控制系统可靠性研究的回顾与展望	疏松桂	901
3. 从容错控制选择工业过程控制系统变量的方法	李慷 席裕庚	911
4. 有约束多目标多自由度优化控制的可行性分析	李慷 席裕庚	915
5. 单机随机调度中机器的失效分析	谭民 李伟	921
十三、机器人		
1. 机器人的神经网络补偿控制	徐建闽	925
2. 多指机器人手的一种自适应力/位控制方法	徐振中	932
3. 视觉引导的机器人轨迹跟踪路径规划的一种新方法	雷鸣 王月娟 蒋平	936
4. 基于螺旋理论的机械臂混合控制方法	巩敦卫 霍伟	941
5. 笛卡尔柔性机器人臂振动控制	宋谦 冯德兴 郭宝珠	945
十四、应用		
1. 微分几何控制理论在发电机励磁控制系统中的应用	周雪松 马幼捷	949
2. 催化重整的在线优化控制	刘明宇 韩曾晋 吴秋峰	966
3. 一种工业异步电机的在线故障检测与诊断新方法	周东华	971
4. 流化床反应器的建模	陈宗海 鲍远律 沈廉	977
5. 非线性跟踪—微分器的工程应用	徐勇 钟秋海	985
6. 带有预测的工业过程模糊控制器的研究	李永伟 李友善 钟国民	989
7. 核反应堆截面最佳设计的存在性	宋德功 朱广田	994
8. 65t/h 电站锅炉辨识模型及计算机优化控制	秦斌	998
9. 飞机对地攻击飞行的轨迹跟踪控制	白丽洁 文传源	1004
10. 自寻优控制在锅炉燃烧系统中的应用及改进	张淑玲 赵庆生	1014
11. 计算机控制系统软件执行周期的选择要领及其工程应用	韩忠旭	1019

12. 洁霉素生产过程分布式计算机控制系统的设计	李绍滋 阎保定 张自强 尹尔为 方庆黎	1023
13. 冷轧机平直度自动控制系统的研究	徐悦 柴天佑 毛志忠	1027
14. 电网大系统的最优化研究	邱忠坊	1032
15. 感应电机无转速传感器转差变频调速系统	凌呼君	1037
16. 一种利用位式执行机构实现微量控制算法的方法	刘业良 赵安兴 陈方彩	1043
17. 工业企业优化运营决策支持系统的设计与实现	韩朝 徐辉	1049
18. 信息时代的企业管理革命 — CIM 与国际化战略联盟公司	张艺全	1053
19. 机动目标跟踪双滤波器模型及自适应算法	潘 泉	1059
作者索引		1064

钢铁工业自动化技术面临的机遇与挑战

余达太 北京科技大学 100083

摘要：本文结合三次钢铁工业革命，综述了自动化技术在钢铁工业中的过去与现状，并介绍了古典控制理论、现代控制理论、人工智能与计算机技术对钢铁工业科技进步的作用，最后展望了自动化技术在钢铁工业中所面临的机遇与挑战。

关键词：钢铁工业革命、自动化技术、机遇与挑战。

一、引言

从一般工业、建筑用钢到能源、核电、石油等行业用钢，超深冲汽车用冷轧薄板，高强度、高韧性装甲钢，吸波隐身材料加之超微晶电子材料、功能材料、复合材料、结构材料、生物医学材料……，21世纪，将是多样化的材料世纪。

建国以来，特别是八十年代以来，我国钢铁工业取得了举世瞩目的成就。钢产量从1978年的3178万吨增加到1993年的8868万吨，平均年递增率在7%以上；生产结构不断合理化，能耗下降，品种、质量也有所提高。

我国钢铁工业虽然取得了很大成绩，但总体上与世界钢铁工业的差距很大，尤其是炼铁、炼钢及轧钢三个工序的主体设备达到国际水平或国内先进水平的只有25%，吨钢能耗比先进国家高30~40%，耐材消耗高出近5倍；自动化技术水平则差距更大，据92年统计资料，总体自动化率平均只占钢、铁、材生产能力的13.3%，比日、美等国落后15年以上。

根据我国公布的《2000年钢铁工业技术进步规划要点》（1992年3月），2000年，我国目标产钢1.1亿吨；解决国民经济“瓶颈”产业——铁道、电站、石油、汽车和造船等急需钢材品种的95%以上；90%以上的钢材品种和质量达到国际标准；40%的工艺，装备要达到国际八十年代水平，连铸比达70~80%，精炼比达70%以上，转炉复合吹炼比大于60%，综合成材料率达88%等；并要大力发展钢铁生产新流程，跟踪世界先进水平。

如上所述，我国钢铁工业正面临着新的机遇与挑战。工艺、设备，自动化是钢铁工业的三大支柱技术，而工艺、设备只有通过以微电子与计算机为工具的自动化技术才有可能得以实现。自动化技术的水平已成为衡量一个国家钢铁工业技术进步和现代化成度的重要标志之一，也是本世纪末我国钢铁工业能否实现总体战略目标的有力手段和重要举措。

二、钢铁工业革命与自动化技术

1865年前后，英国人贝塞麦发明的空气侧吹转炉炼钢法和西门子，马丁（法）发明的平炉炼钢法，使古老的钢铁工业走出小作坊，形成大工业生产。1900年左右，德

国融合了西门子和马丁的技术，使平炉炼钢法趋于完善化，从而实现了钢铁工业的第一次革命。四十年代，美、苏、日、欧等国把以平炉为主体的钢铁生产流程发展到更加完善的地步，其工艺流程是：焦炉→烧结机→高炉→平炉→铸锭→初轧开坯→成品轧制。第一次钢铁工业革命用了近100年时间。

1952年，奥地利发明了纯氧顶吹转炉炼钢法（LD），同时，前苏联，瑞士发明了连续铸钢法，吹响了第二次钢铁工业革命的号角。首先抓住这一时机的是日本和德国，他们从五十年代中期开始，仅用了十多年的时间，就迅速推广了这次革命中的现代化技术，实现了大烧结机→大焦炉→大高炉→大转炉→大铸锭机→连轧机这一流程模式。在我国，目前只有一个宝钢具备第二次钢铁工业革命的全流程^[1]。

第二次钢铁工业革命的工艺流程如图1所示。

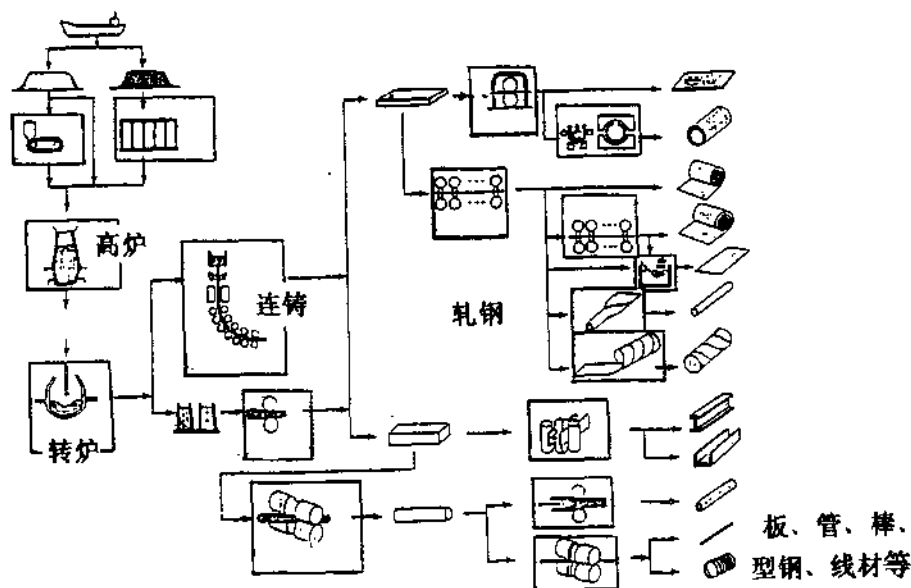


图1 钢铁企业的工艺流程

从图1可知，钢铁工业是一个典型的连续批生产过程，同时也是一个典型的多变量控制对象。在冶金生产中，大多是复杂的动态高温冶金反应过程，其参数繁多，各种因素变动频繁，机理复杂，具有显著的非线性、时变性、空间分布性和不确定性。如何建立它的数学模型和控制模型，一直是困扰我们的难题。下面我们以高炉、转炉、连铸生产过程为例，说明它们的复杂性。因以塑性加工理论为基础的轧制理论已趋于成熟，轧钢过程动态数学模型已进入稳定的应用阶段。如：以动态、多变量和非线性为特征的连轧张力理论，ROSENBROCK的张力非干涉控制，根据状态观测器或卡尔曼滤波的张力推定等；随机序列分析和递推最小二乘法等模型自适应校正理论；动态设定形变刚度厚控方法（AGC）等都获得成功的应用，所以本文不再赘述，有兴趣者可参阅文献[2]。

1、高炉：高炉是钢铁生产过程的上流工程，大型高炉约40M高，具有4500 M³的容积规模，铁矿石原料与焦炭从高炉顶部交替装入，从炉下部风口吹进1000℃以上的热风，使焦炭燃烧，它产生的热和CO使铁矿石溶化还原；含有CO的高温气体上升，原料矿石一边下降一边进行复杂的化学反应，因此，它像一个封闭的“黑箱”，精确的数学模型的建立是非常困难的，也是我们控制理论研究中最困难的对象之一。为了获得稳定高效的生产，我们要对送风温度，送风湿度，富氧流量，热风炉燃烧，重油和煤粉流量，炉顶压和布料等进行控制，例如：每富氧1%可增加喷煤12~13KG，降低焦比0.5%，增产4%；炉顶压每上升0.7KG/Cm²，约可增产17%等。因此，控制的效果是明显的。根据经验，如果我们能保持炉温一定，则可使炉内的反应稳定，并顺利出铁。因此，目前高炉多采用温度控制模型，例如：如果假定炉半径方向均一，炉内反应领域在高度方向上分为5个区域，且各个区域仅进行特定的反应，则可根据物质与热平衡原理，分别由反应速度计算，炉内物质流量计算，温度计算来构成数学模型，同时，根据送风及炉顶煤气的实测数据，修正模型，提高数学模型的预测精度。这就是目前国外较为流行的模型预测控制方法，它可用下式描述。

$$\dot{X} = Ax + Bu + Dd$$

$$y = Cx$$

其中：x：炉内温度，反应速度等变量

u：控制量（送风温度，湿度和液、粉燃吹量）

d：外部扰动

y：输出（铁水温度）

另外，在假定控制量 $u(t)$ 与外部扰动在 t 时刻的值一直维持到 L 小时以后，则可根据与 L 小时后预测目标值 y_r 的偏差，决定 $u(t)$ 。

国外高炉自动化的现状如下：

系统结构：三级CIE（计算机、仪表、电控）一体化系统，使用PLC，DCS或IE一体化设备通过网络与过程计算机相连，与焦化、烧结、原料或铁区协调机通讯，中央监视CRT操作；

过程控制与数据采集：高炉、热风炉控制与数据采集（炉顶压控制，洒水控制，温度控制，喷吹控制，热风炉煤气压力控制，燃烧控制，风温控制，富氧率控制等）以及煤气清洗，水处理，水渣，喷煤粉，制粉等顺序控制；

过程计算机：数据采集，整理，显示，故障报警，打印报表，技术计算，技术通讯，数学模型设定或操作指导等等。

我国除宝钢引进的#1，#2高炉的过程机具有数学模型外，其它所谓的过程级控制仅是作为数据采集和打印报表，功能很弱^[4]。

2、炼钢：炼钢过程是以铁水和废钢为主要原料并配以其它添加辅料，将其冶炼成所需成分的钢水。整个生产是一个氧化反应的过程，我们控制的目标是出钢温度和钢水成分。以LD转炉为例：原料注入转炉后，通过氧枪以2~3倍的音速喷射98.5%~99.5%的氧气，铁水液面在氧气的冲突点开始反应，其中心温度可达2500~3000℃；由于氧化反应，铁水中的C、P、Mn、Si、S等成份因燃烧而被脱去。在喷氧的同时，将石灰石造渣辅料投入，可增加其氧化反应速度；铁水中的C被氧化成CO，CO使钢水沸腾

并在钢水中循环运动，也促进反应的过程， FeO 、 MnO 、 SiO_2 、 P_2O_5 等氧化生产物则被渣化……。这种复杂的高温冶金反应，是很难用精确的数学模型来描述的。转炉炼钢的主要特点是氧气消耗的精确性，因此目前多采用静态终点控制和部分动态终点控制方案。静态终点控制模型可归纳为理论模型、统计模型和经验模型三类。

(1)、**理论模型**：理论模型是基于热平衡原理和物质平衡原理建立的。基于热平衡原理，可以建立关于C、Mn的氧化热，Si、P的氧化热和渣化热， FeO 生成热，渣热，铁水等15个热平衡方程式；基于物质平衡原理，可以建立关于C、Si、Mn、P、 FeO 、 CaO 的7个平衡方程式；在上述22个平衡方程式中，有很多无法测定的未知变量，为了建立终点控制模型，必须给出假定条件或通过实验进行辨识。如：假定与反应有关的元素只有C、Si、P、Fe、O、 CaO ；添加剂中的C、Si、P分别以 Fe_3C 、 Fe_3Si 、 Fe_3P 的形式存在……，通过实验可以推定Mn、P的终点成份平均值，渣中氧化铁的推定值及C的浓度函数等。如果我们再能辨识所有的热损耗项的话，则可以建立目标氧的控制方程。在这种模型中，由于假定条件和通过实验的推定参数太多，基本无法实用化。

(2)、**统计模型**：所谓统计模型是根据转炉的生产数据，采用统计回归的方法，决定热化学系数。由于统计模型无法递推终点喷氧量和添加剂量，加之系统数据的微小变动就会加大系数推定的误差等问题，因此也难以适用。

(3)、**经验模型**：经验模型是基于上一次吹炼的结果，按照本次吹炼的作业条件进行修正，计算出添加辅料和喷氧量。因此，这种模型非常简洁，但是，可以计算的热损失或其它可以检测的参数都无法对模型进行修正，是十分遗憾的。

静态控制模型由于上述原因和现场操作条件与检测条件的变动，致使碳与温度的终点控制命中率均很低，在50%以下，而一个优秀炉长曾连续几年达到过99.5%的命中率。随着微电子技术及计算机技术的发展，根据吹炼过程中的实时检测信息在线动态修正吹炼条件已成为可能，终点动态控制得到迅速发展，例如：

(1)**利用废气信息进行吹炼控制**：转炉吹炼控制不仅要提高终点温度和碳的命中率，而且要准确控制P、Mn等含量。其基本原理是：在吹炼中利用废气信息根据氧平衡连续计算炉内残氧量，通过改变气体流量来跟踪目标残氧量的变化对吹炼过程进行控制；或者利用废气信息连续计算炉内氧化度或脱碳量，用这个反应参数建立吹炼末期的钢水温度、 (T, Fe) 和钢水中 (O) 的估计模型，在副枪中间测试后用这些模型连续估计这三个参数控制停吹。这两种方法均大幅度提高了钢水终点的控制精度，并缩短了冶炼时间。后者的无倒炉出钢率几乎达到了100%。

(2)、**利用炉渣信息进行吹炼控制**：利用炉渣信息抑制喷溅控制的多种策略中，氧枪振动法发展较快。氧枪振动法是将两个晶体振荡式加速度传感器互成直角地按装在氧枪上部同一高度上，测出两个方向的加速度，经合成后来反映渣面高度，并建立与氧流量、氧枪振动加速度和枪高之间的数学模型，通过改变枪高和氧流量来实现化渣控制。

随着用户对钢材性能和质量的要求越来越高，钢材的应用范围越来越广，炼钢工艺流程也开始发生变化，向铁水预处理、复吹转炉、超高功率电炉、炉外精炼等方向发展。再加上连铸、新的工艺和设备将以大型化、连续化和现代化为特点，这就对自动化技术提出了更高的要求。八十年代以来，由于检测技术的长足进步，定温、定碳、定氧探头；直读光谱仪，钢水成分在线直接分析，炉外精炼中全元素在线分析；铁水、钢水液面测量等技术的发展，保证了动态控制的成功率。目前先进的炼钢工序多采用

三级计算机控制，而对转炉、电炉、炉外精炼等单体设备来说，一般采用基础控制级（PLC或DCS或PLC+DCS）和过程控制级，两级之间用局部网连接以便及时交换信息。过程控制级多采用小型机或微机，完成对基础级的监控，数学模型计算和优化。

3、连铸：连铸是我国优化钢铁工业结构的关键，这是因为它省去了铸锭、均热开坯等工序，降低吨钢能耗3~4%，提高钢的收得率8~10%，有着巨大的经济效益。因此，目前已从一般的方坯连铸开始向近终形状连铸，特别是薄板坯以及薄板带坯，管坯等生产技术方向发展，被称作是跨世纪的三大冶金新技术之一。连铸控制系统中基本控制信息有：钢种、板（坯）宽、厚，铸造速度及其它过程跟踪检测信息（如结晶器调宽等）。根据这些信息对结晶器保护渣的加入、散布控制，结晶器振动控制，结晶器液面控制，铸造速度控制，二次冷却水控制，夹辊间隙、加压控制，定尺剪切控制，拉漏检测、预报与控制等约20多项控制。由于钢水在结晶器和二次冷却区中的凝固过程，也是一个复杂的高温冶金反应，而在拉坯与定尺剪切过程中，又是一个要求极高的速度/转矩/位置/力的混合控制，所以连铸自动化显得更加复杂。下面我们仅从两例说明。

(1)、结晶器液位控制：该控制是根据测得的结晶器液位信号经控制器来调节中间罐到结晶器间的滑动水口或塞棒的开启程度，以控制注入结晶器内的钢水流量，这是连铸控制的核心。不难想象，钢水的成分、温度、氧浓度、冷却速度、振动频率、铸坯凝固速度、结晶器液面高度及调宽、夹辊间隙、压力、拉坯速度（起点、终点），随行剪切……等均是相互关连耦合的，其数学模型的建立是困难的。目前，效果较好的方案是根据结晶器宽度的变化自动补偿和利用拉坯速度的前馈补偿减小并消除因结晶器宽度和拉速变化给滑动水口开度控制的干扰。

(2)、二次冷却控制：在二次冷却区，一般由上位过程计算机按照二次冷却的数学模型或冷却水预设曲线给出有关的设定流量值计算参数（钢种，钢坯尺寸、拉速），在有雾化空气时，还给出气水比等，经DCS进行流量设定值计算，并按给定值进行水量和压缩空气量的稳定控制。

连铸的难点在于连铸物流，时间流、温度流、质量流的优化模型和各种物流的数学模型以及上述控制模型的建立。检测技术、交流调速技术等基础自动化又是当务之急。

综上所述，面对复杂的高温冶金反应过程，直到七十年代末，钢铁自动化技术基本停留在基于古典控制理论的单输入单输出模拟量反馈控制水平。八十年代以来，尽管微电子技术及计算机技术的日新月异，控制装置的全数字化及现代控制理论的应用研究不断深入，除前述的以塑性加工理论为基础的轧制理论和轧制过程动态控制外上述高温冶炼过程，由于其建模的困难，所以仍以局部推定模型加以检测修正的预测（报）控制和人工操作为主，现代控制理论未能得到很好的应用。

针对钢铁工业不断向大型化、连续化、高速化的发展以及用户对钢铁产品多样化的要求，现代控制理论的应用以及如何建立新的控制理论体系和系统技术，是我们面临的重要课题。

三、AI对钢铁工业自动化的挑战

由于控制理论面对钢铁冶炼过程的复杂性, 时变性及操作条件及环境的变化特性, 至今未能解决数学模型, 评价函数等问题。因此, 基于专家, 操作工人的经验·知识的AI系统技术自然成为钢铁自动化中最引人注目的新课题。

近十年来, 专家系统、模糊控制、神经网络和模式识别技术领先于其它行业, 在钢铁自动化中得到较快的发展。

1、专家系统: 专家系统的应用可以分为两大类, 一是诊断、解释和控制类型, 二是规划、设计型。诊断、解释型的专家系统不是简单地根据熟练操作工的经验 and 知识, 而是如何根据知识的追加与修正, 不断完善提高系统的功能, 其难点在于庞大知识库的建立; 控制型专家系统主要适合于高炉操作, 转炉吹炼, 加热炉燃烧等这种反应复杂, 过程状态无法描述的对象以及如何通过AI优化PID调节器参数, 从而提高控制质量或最佳物流控制。其难点在于如何建立象专家一样的高度判断能力和实时高速处理能力及人机界面等。例如, 在自动仓库与方钢精整车间的最佳物流控制问题中, 自动搬运专家系统如何根据在数十条搬运线上不能堵塞, 双向行走的单线上不能碰撞, 自动仓库的吊装设备必须处于最高工作效率等条件, 决定最佳搬运路线。这个问题若用一般的数理规划方法来求最优解是困难的, 而专家系统则比较适用; 规划、设计型专家系统是取代过去常规的生产经营计划中的数理规划问题。它的追求目标是如何根据环境条件的变化, 不断自动修改经验法则, 及时完成符合有关制约条件下的新的生产经营计划。

2、模糊控制: 由于构成模糊控制的模糊推理规则可以不用模糊语言表达, 接近于人类的自然语言和思维, 而且概括性强, 容易设计, 可以使解决同一类问题的规则数量大大减少; 表现规则结构的“逻辑”与处理中涉及模糊性的隶属函数相分开, 可增强模糊规律的适应性等特点, 所以目前在高炉炉热控制, 加热炉的燃烧控制, 轧钢过程中的形状控制等领域, 模糊控制得到初步应用, 而且多用于反馈控制系统中的某一个环或建模困难的非线性部分。由于模糊控制的设计方法尚未确立, 因此是目前研究的热点之一。

3、神经网络: 尽管专家系统已大量应用于钢铁工业, 但由于随其知识库规模的不断膨胀, 知识的获取及其构造化越来越困难, 因此具有自学习、自组织等新的信息处理能力的神经网络表现出更强的生命力。我们以日本川崎制铁(株)的高炉炉热预测神经网络为例说明^[1]。

高炉炉热可以根据铁水温度和成分间接测定, 一般操作工人根据原料的下降状况, 煤气成分的变动, 炉壁温度的变动等进行综合判断后, 对热风温度和湿度

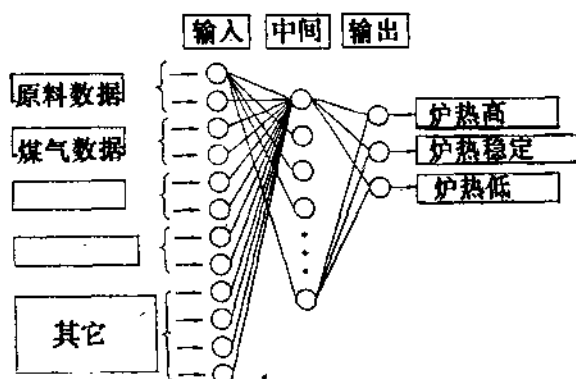


图2 高炉炉热预测神经网络

等进行调节控制。该神经网络具有复杂的输入输出关系，其目标是预测未来2~3个小时后的炉热。如图2所示，该系统具有三层，是阶层型神经网络。其中间层的单元数可变，第一层的输入从众多的状态因素中选出原料下降等12个数据，通过中间层的误差BP学习算法，向第三层输出炉热高、炉热稳定、炉热低三种状态数据（0~1范围）。该系统比较容易地建立了非确定性非线性输入输出关系，其计算时间也充分满足了实际系统的控制要求，特别是只要通过增减中间层的学习单元，即可适应过程与环境的变化。该方法明显优于目前一般高炉炉热预测专家系统。

4、模式识别：专家系统、模糊控制、神经网络等智能控制作为控制理论一个新的发展阶段，在钢铁工业中，取得不少可喜的成绩（包括我国）。但上述方法均存在一个重要的问题，即获取信息和知识的有效手段问题。近些年来，模式识别作为一种新的复杂生产过程中的实时提取和处理、合成、理解技术，成为今后有希望的方法之一。

四、第三次钢铁工业革命与自动化技术展望

八十年代后期，发达国家及第二世界停止了第二次钢铁工业革命所形成的模式建设，重点转向了电炉（炉外精炼）→连铸→连轧工艺。这种新流程比第二次工业革命诞生的高炉流程（长流程）短的多，被称之为短流程。其发展背景为：投资省（50%），成本低（40%），占地面积小，吨钢能耗低（50%）和质量容易控制。七十年代以来，日本一直悄悄地发展短流程钢厂，1992年，东京制铁公司短流程钢厂，在国内销售市场比例占到26.5%，而著名的新日铁却下降到仅占17.6%；日本所有的短流程钢厂所生产的工字钢占到60%，而新日铁等大企业只占到40%。短流程钢铁企业的发展势头令人惊叹，并继续向传统钢厂频频发起挑战^[1]。中国怎么办？目前已是冶金行业面临的一个重要决策关头。

面对未来这种短、快、连续的新生产工艺流程，自动化技术受到更为严重的挑战。现有连轧中的位置控制、速度控制、厚度控制、张力控制等控制周期已达<10 ms的水平，若和连铸坯热送相接，直接轧制，则必须解决不同钢种热送直接轧制时在温度、时间和速度上的衔接、匹配技术以及掌握其高温冶炼特性；若以现在的中厚板轧制速度，则连铸拉坯速度至少在现有基础上再提高25%以上；进而，为了保证电炉（炉外精炼）的合格出钢温度与成分，必须要解决吹Ar搅拌模型，钢水温度控制模型，真空脱气和脱C模型，造渣脱S、P、O₂模型等。这一系列数不清的技术难题，远远超出了优秀炉长，优秀操作工人的经验与能力，没有更高水平的自动化技术的发展，我国第三次钢铁工业革命只能成为梦想。从这个意义上讲，自动化技术的水平已成为决定我国钢铁工业革命能否发展的关键。实际上，日本钢铁工业的发展，早已给我们提供了经验。

展望我国钢铁工业自动化技术的发展，可大致归纳如下：

- 1、以非传统的复杂系统的建模新理论为代表的控制方法论的研究。
- 2、验证新理论、新方法以及取代庞大中试投资的实时仿真系统的研究。
- 3、FMS与CIMS（IMS）理论体系的研究。
- 4、钢铁工业中人工智能的应用研究