

预焙铝电解槽智能模糊控制系统^①

李 劼 王前普 肖 劲 张泰山 游 旺

(中南工业大学冶金系, 长沙 410083)

刘 钢 丁凤琪 边友康 吴智明

(青海铝厂, 西宁 810108)

摘 要 综合运用模糊控制、神经网络和专家系统等智能控制技术, 以及铝电解槽“三场”在线仿真技术, 开发出了预焙铝电解槽智能模糊控制系统。系统采用两级分布式控制方式, 并主要由实时控制(专家模糊控制器)、电解质温度与槽膛内形在线仿真、槽况诊断、以及组织与监视4个子系统构成。运行结果表明, 该系统鲁棒性好, 控制精度高, 具有显著的增产节能效果和广泛的推广应用价值。

关键词 铝 电解槽 智能控制 模糊控制 专家系统

中图法分类号 TF335.2 TF821

预焙铝电解槽是一种复杂的非线性时变系统, 具有模型的不确定性, 能在线检测的信号只有槽电压和系列电流, 而浓度、极距和温度等参数目前尚不能在线检测。因此, 对于这种被控对象, 采用智能控制方法比采用常规控制方法更容易达到预期的控制效果。80年代以来, 国外在其设计的高效能预焙铝电解槽上开发应用了点式下料和自适应控制技术^[1, 2], 加拿大等国开展过应用常规的产生式专家系统原理的铝电解专家控制系统的研制^[3, 4]。我国自80年代后期以来借鉴国外技术对铝电解自控系统进行了一系列的技术改造, 并开展了新型控制模型与控制技术的研究^[5-9]。由于我国目前大量使用的预焙铝电解槽的结构设计属70年代的水平, 与国际上设计优良的高效能电解槽相比, 存在稳定性较差、自平衡能力较差等很多难以弥补的先天不足, 且在供电稳定性、原料理化性能、配套设施的性能以及人工操作水平等方面存在一时难以解决的问题, 因此已有的技术未能实现使我国预焙铝电解槽的技术经济指标显著突破原设计值并达到或接近国际

先进水平目标。本文作者通过运用更为先进的智能控制方法, 建立起功能更强、控制精度更高、可靠性更好的智能模糊控制系统, 并进行必要的相关配套技术改造而达到了这一目标。

1 系统总体设计

铝电解生产常采用数十至数百台电解槽串联成一个系列进行。根据预焙铝电解槽生产工艺过程的特点, 采用如下的设计方案:

(1) 为确保实现高度分布式控制, 系统采用“DDC(直接数字控制)—SCC(过程监控)”的两级分布式控制方案。

(2) 每一台电解槽配备一台槽控机作为DDC级, 它必须具备独立进行槽电压和系列电流采样的能力。其控制任务是, 通过以调节下料速率(即下料时间间隔)和移动阳极(即调节极距)为手段, 对铝电解槽的物料平衡和热平衡的快速变化过程实时地进行控制。因为可在线实时获取的能反映槽况变化的信息只有由

① 国家重点技术开发项目(国经贸技[1995]108号) 收稿日期: 1997-09-24; 修回日期: 1997-12-31

李 劼, 男, 34岁, 副教授, 博士

系列电流和槽电压的采样信号计算得到的表观槽电阻(简称槽电阻),而槽电阻与反映物料平衡变化的主要参数——氧化铝浓度,以及反映热平衡变化的主要参数——电解质温度之间没有确定的对应关系,所以本设计采用能很好地应用专家操作与控制经验的专家模糊控制方法来建立用于 DDC 级的实时控制子系统——专家模糊控制器。

(3) 每一个区域(数十台电解槽)配备两台互连的 486 或 586 工控微机作为 SCC 级。该级的任务是,对 DDC 级(专家模糊控制器)的运行过程进行监视,并力图从整体上“把握”和控制铝电解槽工况(即槽况)的变化趋势。为此,SCC 级应该尽可能多地收集各种能反映槽况变化的信息,并通过对信息的加工和处理,实现槽况诊断,进而实现对 DDC 级的设定值的优化计算和为人工操作与维护提供决策支持。为达到这种目的,在 SCC 级中设计了一个基于物理场(泛称“三场”)的计算机动态仿真原理的在线仿真子系统,用于对反映电解槽热平衡的重要特征参数——电解质温度和槽膛内形(槽帮厚度、伸腿长度、伸腿高度)等进行在线动态仿真计算;设计了一个基于神经网络专家系统技术的槽况诊断子系统,用于对槽况进行诊断和作出槽况维护与处理决策;并设计了一个组织与监视子系统,用于实现组织协调、数据交换、人机交互、过程监视以及报表处理等功能。由于在线仿真子系统的运算量大,故独立使用一台工控微机,它与另一台包含槽况诊断子系统和组织与监视子系统的工控微机之间通过 RS232C 通讯口互联。

(4) 各个区域的 SCC 级均可联接到一个以 alpha 小型机为核心的局域网中,即在该系统的 SCC 级之上可以扩展一个 MIS(管理信息系统)级,并实现与全厂计算机网络的联网。此局域网投入运行后,可将各区域 SCC 中在线仿真子系统统一移至在线仿真工作站,从而使系统的整体结构与联结方式更为合理。

基于以上方案设计的智能模糊控制系统的基本构成如图 1 所示。

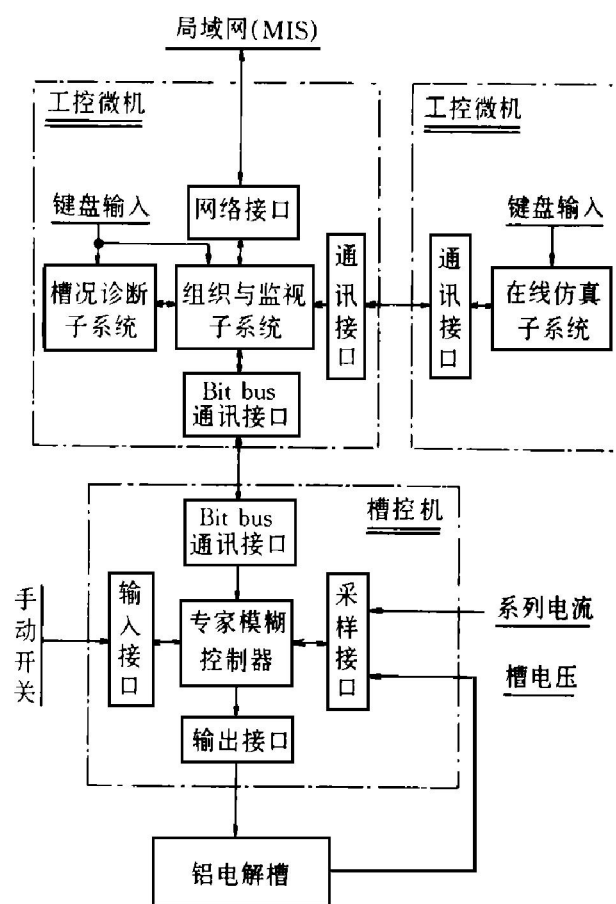


图 1 智能模糊控制系统的基本构成

Fig. 1 General structure of intelligent fuzzy control system

2 专家模糊控制器(实时控制子系统)

DDC 级的专家模糊控制器是本系统的核心。为了能有效地表达和应用专家的知识 and 经验,获得好的控制效果,采用模糊集成控制的原理,把专家控制器与模糊控制器结合起来,开发用于 DDC 级的专家模糊控制器。其整体结构如图 2 所示。其设计采用了如下方案:

(1) 推理决策与控制由推理机和模糊控制这两大部分共同完成。其中推理机主要实现槽况分析、过程控制的设定值修正、控制模式选择、模糊变量论域调整以及模糊控制规则修正等功能,而模糊控制模块则具体完成下料速率调节(物料平衡控制)和极距调节(热平衡与极距控制)。

的结构形式，由推理机根据推理结果选择合适的控制模式。

(4) 专家模糊控制器的推理机根据电解槽所处的操作条件和槽况分析的结果，综合运用 4 种方式来调整模糊控制规则和改进控制效果。一是选择不同的控制模式，二是调整控制规则表达式的修正因子，三是调整模糊变量的论域，四是调整模糊控制模块的设定值。

(5) 借助于上、下位机之间的通讯接口，可利用上位机(SSC 级)中的人机接口对专家模糊控制器的知识库和事实库进行调整，为 DDC 级的知识获取与应用提供很强的灵活性。

3 电解质温度与槽膛内形在线仿真子系统

该子系统工作原理如图 3 所示。基本的求解原理是，将影响槽膛内形和电解质温度的因素分为“静态影响因素”和“动态影响因素”；采集和量化“动态影响因素”以获得在线仿真解析所需的信息；充分利用铝电解槽各参数间具有相互关联和耦合的特点以及部分参数具有相对稳定性的特点，联立“三场”解析模型并采用移动边界迭代算法求解一般的 Stefan 问题能量平衡，估算出电解槽的热平衡和温度变化的增量(ΔQ 和 ΔT)，并配合槽膛内形的非稳态导热微分方程进行数值解析，得出各时间段的电解质温度和槽膛内形，并直观显示。

4 槽况诊断子系统

由于神经网络专家系统^[11]的 NN 网络集规则库和推理机于一体，其结构简单，所需存储容量小，推理方便快捷，不存在传统的产生式专家系统易遇到的“知识爆炸”和“瓶颈”问题，且能有效地利用不精确和不完整的信息推理；因此采用神经网络技术来建立 SCC 级的槽况诊断子系统，并采用可在 $[-1, 1]$ 内连续输出的 BP 算法。该子系统定期自动启动或由

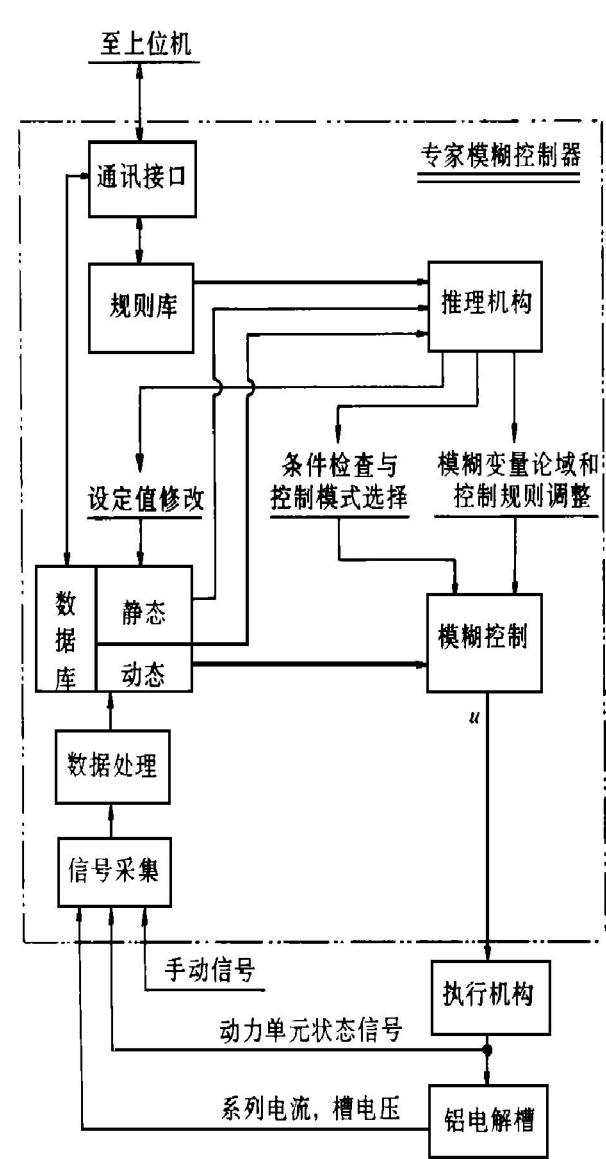


图 2 专家模糊控制器

Fig. 2 Expert fuzzy controller

(2) 推理决策与控制规则的表达综合运用了两种方式，一种是“如果〈条件〉则〈结论〉”的产生式规则形式，用于表达各种特定或异常工况下的模糊控制规则，包括推理机应用的启发性与确定型知识；另一种是采用带修正因子的控制规则自修正模糊控制的规则表达形式^[10]，用于表达常态工况下模糊控制规则，以便通过引入可自动调整的控制规则修正因子，实现对模糊控制规则的在线自调整。

(3) 由于电解槽的控制可分为极距调节与下料控制两个相对独立的部分，因此模糊控制相应地划分为两个模块，通过推理机实现这两个部分的相互协调。根据工艺要求，下料模糊控制和极距模糊控制均采用“多模模糊控制器”

操作人员在任意时刻启动,其主要功能是首先利用可获得的各种信息(包括来自仿真子系统的仿真解析结果、专家模糊控制器的运行数据、通过终端输入的离线定期检测数据和观测信息),对槽况的中、长期变化趋势作出综合解析(称此步为槽况诊断);然后,在发现“病槽”或不良变化趋势后,推理决策 DDC 级的设定值修改量并提出人工维护建议(称此步为处理决策)。为实现上述功能而设计的槽况诊断系统的基本结构如图 4 所示。它分为 2 个均为 4 层(含 2 个隐含层)的子网络,即槽况诊断网

络(NN1) 和处理决策网络(NN2)。前者的 25 个输入对应 25 种信息(数据),10 个输出量对应 10 种槽况,并作为后者的输入量;后者的 10 个输出量则对应 10 种处理决策。

5 实际应用效果

智能模糊控制的试验系统于 1995 年 6 月起投入运行调试和指标考核。1997 年 3 月至 7 月在 30 台槽上的考核结果是:

(1) 实现了表 1 所示的工艺技术条件与技

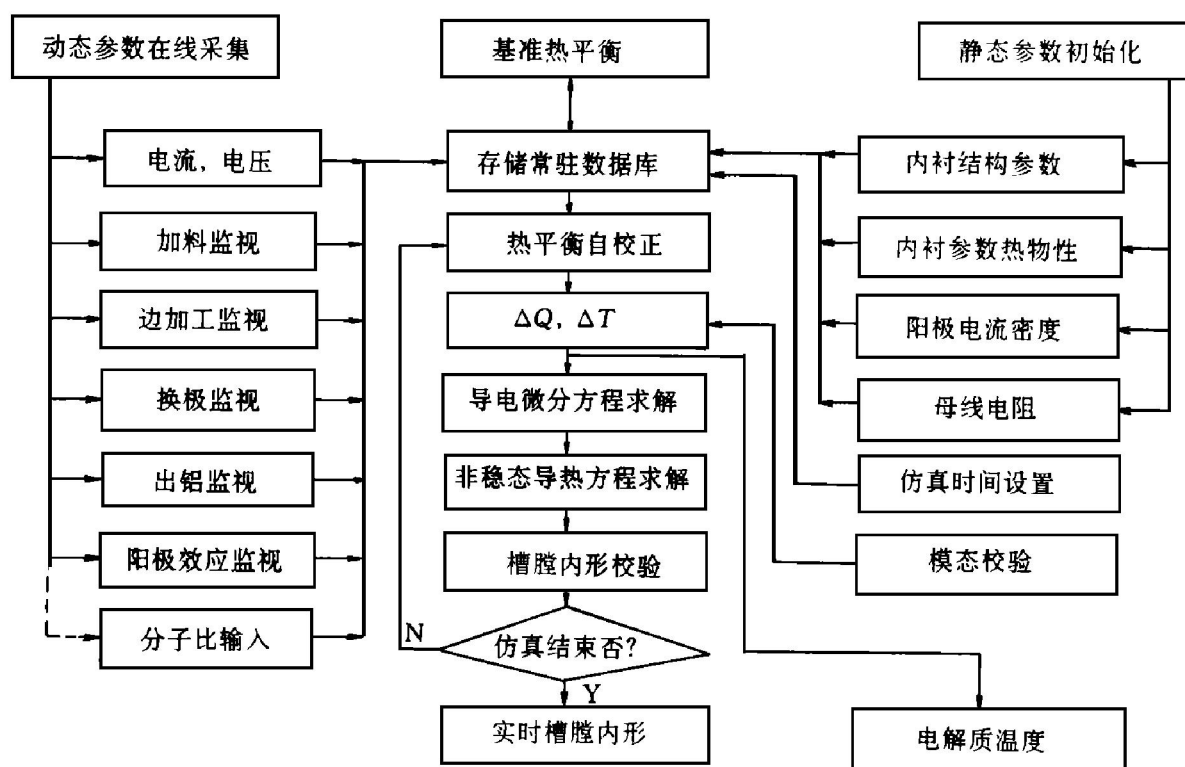


图 3 电解质温度与炉膛内形在线仿真子系统

Fig. 3 Bath temperature dynamic prediction and freeze profile on-line simulation sub-system

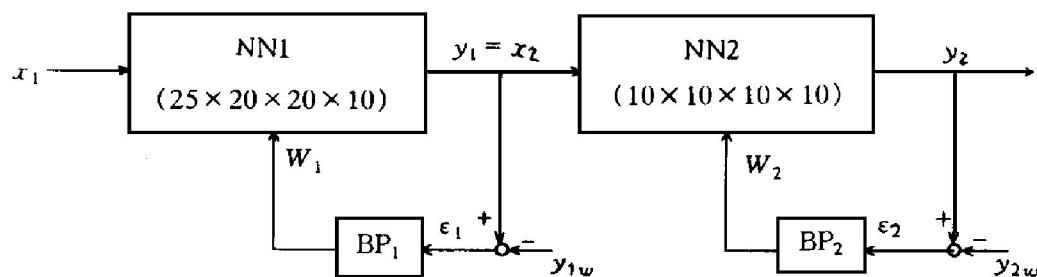


图 4 槽况诊断子系统

Fig. 4 Cell state diagnosis sub-system

术经济指标。

(2) 实现了下列控制精度：

- ①氧化铝浓度波动偏差 2%；
- ②正常槽温波动范围 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ；
- ③阳极效应预报成功率 90%；
- ④故障停机检修率不大于 0.5 次/年。

从表 1 可见，与系列生产槽相比，指标考核槽的的电流效率提高 4.52 个百分点，直流电耗降低 418 kWh。可见本技术具有显著的增产节能效果。

表 1 主要工艺技术条件与技术经济指标

Table 1 Main specifications and index

Items	30 test cells	Potline
Bath temperature/ $^{\circ}\text{C}$	948	955
Cryolite ratio	2.40	2.58
Alumina concentration/ %	2.84	5.00
Anode effect frequency	0.28	1.20
Average current/ kA	155.6	155.6
Average cell voltage/ V	4.198	4.120
Current efficiency/ %	93.57	89.05
DC energy consumption / (kWh $\cdot\text{t}^{-1}$)	13 372	13 790

6 结论

针对铝电解过程的特点开发出集成式智能模糊控制系统。在 DDC 级采用了专家模糊控制算法，在 SCC 级引入了基于物理场的计算机动态仿真技术的电解质温度与槽膛内形在线仿真子系统和基于神经网络专家子系统技术的槽况诊断子系统。在 160 kA 预焙铝电解槽上的运行考核表明，该控制系统鲁棒性好，控制精度高，槽况解析功能强，运行可靠，操作与维护简便，具有显著的增产节能效果，可广泛应用于各类预焙铝电解槽生产系列中。

致 谢

本课题的研究是在中南工业大学博士生导师、中国工程院院士刘业翔教授，博士生导师梅

炽教授，青海铝厂的刘洪祥高工和吴伟成高工的精心指导下完成的；中国有色金属工业总公司科技部的方瑛等领导为组织和协调本课题的实施付出了很大的心血；青海铝厂、中南工业大学及其他协作单位前后共有数十人参加了本项课题的开发与考核工作。在此，作者一并致以真诚的谢意！

REFERENCES

1 Bonny P, Gerphagnon J L, Laboure G *et al.* US 4431491. 1984- 2- 14.

2 Aalbu J, Moen T, Aalbu S *et al.* US 4766552. 1988 - 8- 23.

3 Tikasz L. In: Bohner H O ed. Light Metals 1985. Warrendale, Pennsylvania, USA: TMS, 1985. 459 - 469.

4 Rolland W K, Steinsnes A, Paulsen K A *et al.* In: Rooy L ed. Light Metals 1991. Warrendale, Pennsylvania, USA: TMS, 1991. 437- 443.

5 Li Jie(李 吉力), Liu Yexiang(刘业翔), Huang Yongzhong(黄永忠) *et al.* J Cent South Univ Technol(中南工业大学学报), 1993, 24(3): 318- 325.

6 Li Jie(李 吉力), Liu Yexiang(刘业翔) Huang Yongzhong(黄永忠) *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1993, 3 (2): 25- 28.

7 Li Jie, Huang Yongzhong, Liu Yexiang *et al.* Trans Nonferrous Met Soc China, 1994 , 4(1): 26- 32.

8 Li Jie(李 吉力), Xiao Jin(肖 劲), Liu Yexiang(刘业翔) *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1997, 7(Suppl. 3): 10- 13.

9 Xu Chi(徐 驰), Xie Gang(谢 刚), Li Zheng(李正) *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1994, 4(1): 21- 24.

10 Zhu Jing(诸 静) *et al.* Principle of Fuzzy Control and Its Applications(模糊控制原理与应用). Beijing: Mechanical Industry Press, 1995: 356- 362.

11 Shi Hongbao(施鸿宝). Neural Network and Its Applications(神经网络及其应用). Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 1993.

AN INTELLIGENT FUZZY CONTROL SYSTEM FOR ALUMINUM REDUCTION CELLS

Li Jie, Wang Qianpu, Xiao Jin, Zhang Taishan and You Wang

Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China

Liu Gang, Ding Fengqi, Bian Youkang and Wu Zhiming

Qinghai Aluminum Plant, Xining 810108, P. R. China

ABSTRACT An intelligent fuzzy control system for the prebaked anode aluminum reduction cells was developed by comprehensively using intelligent control techniques including fuzzy control, neural networks and expert system, and the techniques of on-line simulation of "three fields" of aluminum reduction cell. Two hierarchical distributed control pattern was used, and four sub-systems called real-time control, bath-temperature and freeze-profile on-line simulation, cell state diagnosis, and organization & supervision were designed for the control system. Running on the 160 kA prebaked anode aluminum reduction cells showed that the control system possesses good robustness, high control accuracy, and good prospects of wide application for increasing production and saving energy.

Key words aluminum reduction cell intelligent control fuzzy control expert system

(编辑 袁赛前)