



现代铝电解

Modern Aluminum Electrolysis

刘业翔 李 劼 等编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmip.com.cn>

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
国家“十一五”重点图书

现代铝电解

刘业翔 李 劼 等编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2008

内 容 提 要

本书分为铝电解理论基础、铝电解生产工程技术、铝电解计算机控制及铝厂信息化、铝冶炼辅助工程与新技术四篇,共33章,对现代铝电解基础理论与工艺技术进行了系统化的归纳与总结。在介绍经典的理论和工艺的同时,还强调了现代铝电解的成就和我国的技术创新及特色,并从实际出发就节能降耗、计算机控制、管理现代化、新工艺进展、循环再生等问题进行了专门阐述,其中炭阳极的高温电催化,铝电解槽设计计算、模拟与仿真,计算机控制及铝厂信息化等都是目前国内外有关著作中没有或是没有专门阐述过的全新内容。

本书可作为冶金专业大学生、研究生的教学用书,也适合从事铝工业业务的相关人士和工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

现代铝电解/刘业翔,李劼等编著. —北京:冶金工业出版社,2008.8

ISBN 978-7-5024-4576-8

I. 现… II. ①刘… ②李… III. 氧化铝电解
IV. TF821.032.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第122622号

出版人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

策 划 曹胜利 责任编辑 李 梅 张熙莹 谭学余 美术编辑 李 心

版式设计 张 青 责任校对 王永欣 责任印制 丁小晶

ISBN 978-7-5024-4576-8

北京盛通印刷股份有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2008年8月第1版,2008年8月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;40印张;4彩页;1074千字;616页;1-3000册

108.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

进入 21 世纪以来，我国铝工业在科学发展观的指引下，获得了突飞猛进的发展。2007 年全国电解铝产量超过 1250 万 t，连续 7 年雄踞世界首位，并且大型预焙槽炼铝技术整体上达到了国际先进水平。我国铝工业欣欣向荣的发展，对具有现代知识的铝电解专著产生了迫切的需求。

本书力图在吸收国内外已有铝电解方面专著的精华的基础上，优选、扩大和深化铝电解的基础理论和现代工程技术知识。与本领域已有的专著相比，本书的特点之一是覆盖面较广，既较全面地涵盖了铝电解的基础理论知识，又较广泛地涉及现代铝冶炼的工程技术知识；特点之二是实用性强，所介绍的工程技术知识以现代大型预焙槽炼铝为背景，并充分考虑了其先进性与成熟性。

在第一篇“铝电解理论基础”中，作者力图深入浅出地阐述重要的铝电解基础理论知识，包括铝电解质及其物理化学性质、氧化铝在电解质中的溶解及其行为、冰晶石-氧化铝 ($\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$) 系熔盐结构、铝电解的电极过程、阳极效应、铝电解中炭阳极上的电催化作用、铝在电解质中的溶解及二次反应损失、铝电解的电流效率以及铝电解的理论最低能耗与节能等。

在第二篇“铝电解生产工程技术”中，作者针对现代大型预焙槽炼铝的特点，叙述了大型预焙槽的结构、焙烧启动、操作、测量、管理、槽破损与维护、供电整流、物料输送、动态平衡以及物理场等内容。

在第三篇“铝电解计算机控制及铝厂信息化”中，作者基于自己多年的研发成果，系统阐述了铝电解计算机控制系统的结构与功能、主要控制原理（包括槽电阻解析与控制、氧化铝浓度控制、电解质摩尔比控制、生产报表、槽况综合解析等）以及铝厂信息化等现代铝工业日新月异的新知识。

在第四篇“铝冶炼辅助工程与新技术”中，首先从现代环保要求出发，介绍了铝厂烟气净化与环境保护的知识；然后介绍了铝用炭素材料及技术、原铝精炼以及铝的循环与再生；最后在“铝冶炼新工艺进展”即炼铝新方法中，

对惰性阳极、惰性可润湿阴极、新型铝电解槽、 AlCl_3 熔盐电解和碳热还原工艺作了较详细的介绍。

此外，本书还在相关篇章之后附有“参考专题”的附录，为有兴趣的读者提供更广泛的专题资料。

本书适于电解铝领域的大学生、研究生、教师及工程技术人员阅读，也适于与铝工业业务相关的人士参考。

编著本书的主要人员为刘业翔（第1~10章），李劼（第11~15章、第19章、第21~25章、第27章），姚世焕（第29章），赖延清（第16章和第33章），冯德金和李培康（第17章），林文帅（第18章），刘伟（第20章），邹忠（第26章），陈湘涛（第28章），肖劲（第30章），赵恒勤（第31章和第32章）；周向阳、田忠良、吕晓军、伍上元、张红亮、李贵奇、李相鹏、秦庆伟等博士参加了资料收集和书稿整理。

刘业翔

2008年3月

目 录

1 绪论	1
1.1 铝的发现和提取	1
1.1.1 铝的发现	1
1.1.2 铝电解简史	1
1.2 铝的性质和用途	2
1.2.1 铝的性质	2
1.2.2 铝的应用	2
1.3 现代铝电解的发展	3
1.4 铝电解过程描述	4
1.5 铝电解用原料与辅助原料	5
1.5.1 氧化铝	5
1.5.2 辅助原料	8
1.5.3 炭阳极	10
参考文献	12
附录 I 铝的各种性质	13

第一篇 铝电解理论基础

2 铝电解质及其物理化学性质	17
2.1 概述	17
2.1.1 引言	17
2.1.2 铝电解质的性质要求	17
2.1.3 铝电解质的种类	18
2.2 铝电解质的相平衡图	18
2.2.1 NaF-AlF_3 二元系相图	18
2.2.2 摩尔比 CR (或质量比 BR) 与过剩 AlF_3 的换算公式	19
2.2.3 $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系熔度图	21
2.2.4 Na_3AlF_6 的其他二元系和三元系相平衡图	22
2.3 工业铝电解质的物理化学性质	23
2.3.1 熔度 (初晶温度)	23
2.3.2 电导率	24
2.3.3 密度	25

2.3.4 黏度	26
2.3.5 接触角 θ	26
2.3.6 $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$ 熔体物理化学性质的综合分析	28
2.4 低温电解质	29
2.5 铝电解质成分的改进	30
2.5.1 国外概况	30
2.5.2 国内概况	31
参考文献	31
3 氧化铝在电解质中的溶解及其行为	32
3.1 概述	32
3.2 氧化铝的物理性质	32
3.3 氧化铝溶解的实验室研究	32
3.3.1 细分散氧化铝的溶解	32
3.3.2 部分聚集状氧化铝的溶解	34
3.4 工业电解槽上氧化铝溶解研究	35
3.5 结壳、炉帮及沉淀	36
3.5.1 概述	36
3.5.2 结壳的生成	36
3.5.3 结壳的性质	37
3.5.4 Al_2O_3 及壳块的沉降与溶解	37
3.5.5 炉帮与伸腿的形成	38
参考文献	39
4 冰晶石-氧化铝 ($\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$) 系熔盐结构	40
4.1 概述	40
4.2 NaF-AlF_3 系熔体结构	40
4.2.1 基于 Na_3AlF_6 热解离提出的熔体结构模型	40
4.2.2 核磁共振谱 (NMR) 研究提出的结构模型	41
4.3 $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系熔体结构	41
4.3.1 热力学模型的结果	41
4.3.2 直接定氧法的结果	41
4.3.3 分子动力学模拟的结果	42
4.3.4 核磁共振谱 (NMR) 测定结果	42
4.4 离子实体的迁移	44
4.5 电荷迁移主体—— Na^+	44
参考文献	45
5 铝电解的电极过程	46
5.1 阴极过程	46

5.1.1	铝在阴极优先析出	46
5.1.2	非正常条件下钠的析出	47
5.1.3	阴极过电压	48
5.1.4	钠析出后的行为	49
5.1.5	阴极的其他副过程	50
5.2	阳极过程	51
5.2.1	概述	51
5.2.2	阳极的原生产物	51
5.2.3	阳极过电压	52
5.3	阳极气体	54
	参考文献	54
6	阳极效应	56
6.1	概述	56
6.2	临界电流密度	57
6.2.1	临界电流密度的概念	57
6.2.2	临界电流密度和氧化铝含量的关系	58
6.2.3	影响临界电流密度的其他因素	58
6.2.4	临界电流密度与接触角的关系	59
6.3	阳极效应时的气体分析	59
6.4	阳极效应机理	60
6.5	工业电解槽上的阳极效应	60
6.5.1	特点	60
6.5.2	起因	61
6.5.3	熄灭	61
6.5.4	预报	61
	参考文献	62
7	铝电解中炭阳极上的电催化作用	63
7.1	概述	63
7.1.1	电催化基本概念及电催化活性的表征	63
7.1.2	铝电解惰性阳极电催化研究	63
7.1.3	铝电解掺杂炭阳极的电催化研究和应用	64
7.2	掺杂炭阳极的电催化功能	65
7.2.1	阳极电催化活性的判据	65
7.2.2	掺杂炭阳极的制备	65
7.2.3	试验测定	66
7.2.4	若干重要结果	66
7.3	掺杂炭阳极在铝电解中的其他行为	70

参考文献	71
8 铝在电解质中的溶解及二次反应损失	72
8.1 概述	72
8.2 铝在冰晶石-氧化铝熔盐中的溶解	72
8.2.1 溶解铝后电解质的特性	72
8.2.2 溶解金属引起的电子导电性	73
8.3 铝在冰晶石熔体中的溶解度	73
8.4 早期研究工作的若干资料	74
8.5 CO ₂ 在冰晶石-氧化铝熔体中的溶解度	76
8.6 工业电解槽上铝的溶解与损失	76
参考文献	78
9 铝电解的电流效率	79
9.1 概述	79
9.1.1 电流效率的定义	79
9.1.2 关于电流损失 $i_{损}$	79
9.2 工业预焙槽上的电流效率问题	81
9.2.1 提高电流效率的历史回顾	81
9.2.2 影响工业槽电流效率的因素	81
9.3 电流效率的测量	83
9.4 结语	84
参考文献	84
10 铝电解的理论最低能耗与节能	86
10.1 若干基本概念	86
10.1.1 量度和基准	86
10.1.2 理论基准、实际基准、最小基准和现行生产的基准	86
10.1.3 隐性能耗、过程能耗、原料能耗和二级能耗	87
10.1.4 产品生命周期分析	87
10.1.5 能源价值链分析	88
10.1.6 运输能耗	88
10.2 电解用原材料的理论最低能耗	88
10.2.1 生产氧化铝的理论最低能耗	88
10.2.2 生产炭阳极的理论最低能耗	89
10.3 铝电解的理论最低能耗	89
10.3.1 理论最低能耗的计算	89
10.3.2 采用炭阳极时铝电解的理论最低能耗	90
10.4 铝电解节能的方向	91

10.4.1 目前工艺状况下改进的潜力	91
10.4.2 电解槽改进革新	92
参考文献	93
附录 II 固体盐及熔盐的结构	94
II.1 固态盐结构基本概念	94
II.2 冰晶石与氧化铝的结构	95
II.2.1 冰晶石	95
II.2.2 AlF_3	95
II.2.3 Al_2O_3	95
II.3 熔盐结构	97
II.3.1 液态结构和固态结构相近似	97
II.3.2 熔盐结构理论与模型概述	98
II.4 离子成对势能	98
参考文献	98
附录 III 理论能耗数据和计算	99
附录 IV 铝热容和熔解热数据	102
第二篇 铝电解生产工程技术	
11 现代预焙铝电解槽的基本结构	105
11.1 阴极结构	105
11.1.1 槽壳结构	106
11.1.2 内衬结构	107
11.1.3 筑炉的基本规范	108
11.2 上部结构	118
11.2.1 承重桁架	118
11.2.2 阳极提升装置	119
11.2.3 打壳下料装置	120
11.2.4 阳极母线和阳极组	121
11.3 母线结构	125
11.4 电解槽电气绝缘	126
参考文献	127
12 铝电解槽的焙烧启动及启动后的管理	128
12.1 焙烧	128
12.1.1 铝液焙烧法	128
12.1.2 焦粒(石墨粉)焙烧法	129
12.1.3 燃料焙烧法	130

12.1.4	三种焙烧法的优缺点比较	130
12.2	启动	132
12.2.1	干法启动	132
12.2.2	湿法启动	133
12.3	启动初期管理	134
12.4	启动后期管理	135
12.4.1	电解质高度控制	135
12.4.2	电解质组成控制	136
12.4.3	铝液高度控制	136
12.4.4	电压管理	136
12.4.5	效应系数管理	137
12.4.6	槽膛内型的建立	137
12.5	大型预焙槽焦粒焙烧——湿法启动过程简介	138
12.5.1	焙烧前的准备工作	138
12.5.2	装炉操作	139
12.5.3	安装分流器	141
12.5.4	通电焙烧	142
12.5.5	启动前的准备	143
12.5.6	湿法效应启动	143
12.5.7	湿法无效应启动	143
12.5.8	灌铝液	143
12.5.9	启动后期技术条件与操作管理（某厂200kA槽实例）	144
	参考文献	144
13	铝电解槽的主要操作	145
13.1	阳极更换	145
13.1.1	阳极更换的基本步骤	145
13.1.2	阳极更换作业的质量控制环节	148
13.1.3	安全注意事项	149
13.2	出铝	149
13.2.1	出铝的基本步骤	149
13.2.2	出铝作业的质量控制点	152
13.2.3	注意事项	152
13.3	熄灭阳极效应	152
13.3.1	熄灭阳极效应的方法	153
13.3.2	熄灭阳极效应的基本操作步骤	153
13.3.3	熄灭阳极效应作业的质量控制点	154
13.3.4	注意事项	154
13.4	抬母线	154

13.4.1	抬母线周期的估算	154
13.4.2	抬母线作业的基本步骤	155
13.4.3	作业质量控制点	156
13.4.4	注意事项	157
	参考文献	157
14	铝电解生产中的参数测量	158
14.1	铝液高度、电解质高度测定	158
14.2	电解质温度测定	159
14.3	阳极电流分布测定	160
14.4	阳极压降测定	161
14.5	阳极上覆盖料高度的测定	162
14.6	残极形状测定	163
14.7	极距测定	163
14.8	侧部炉帮形状测定	164
14.9	炉底隆起测定	167
14.10	炉底电压降测定	168
14.11	阴极钢棒电流分布测定	169
14.12	阴极钢棒、槽底钢板温度测定	170
14.13	取电解质试样、原铝试样	170
14.14	铝电解参数新型测量方法的发展概况	171
14.14.1	槽温及电解质初晶温度测量	172
14.14.2	氧化铝浓度测量	174
	参考文献	175
15	铝电解的生产管理	176
15.1	现代预焙槽管理的思想与方法	176
15.1.1	车间管理遵循标准化、同步化和均衡化的原则	176
15.1.2	保持平稳	180
15.1.3	技术条件比操作质量更重要	181
15.1.4	依靠铝电解控制系统、尽量减少人工干预、确保人机协调	182
15.1.5	重视设备管理	182
15.1.6	重视全面质量管理(含过程改善)	183
15.1.7	讲求生产计划管理的科学性,克服生产计划中的主观随意性	184
15.1.8	运用基于数据分析的决策方法	184
15.1.9	预防为主,处理为辅	184
15.1.10	要注意先天期管理	185
15.1.11	仿生分析思想	185
15.1.12	减少变数(变量)思想	186

15.2	电解槽工艺标准（槽基准）的制定与管理	186
15.2.1	最佳工艺技术条件的制定	186
15.2.2	槽基准的制定程序及原则	193
15.2.3	槽基准包含的主要内容	194
15.2.4	槽基准的执行与变更	194
15.2.5	记录与报告	194
15.3	电解质组成管理	194
15.3.1	电解质组成的调整方式	195
15.3.2	根据电解质组成分析值与目标值的偏差理论计算添加剂用量的方法	196
15.3.3	电解质组成调整的简单决策方法（传统方法）	196
15.3.4	电解质组成调整的综合决策方法	197
15.4	电压管理	197
15.4.1	不同电压（电阻）控制模式下的设定电压管理	197
15.4.2	根据槽况调整设定电压的基本原则	199
15.4.3	槽电压（槽电阻）异常或控制不良的检查与处理	200
15.5	下料管理	200
15.5.1	下料控制模式的管理	200
15.5.2	基准下料间隔时间的管理	201
15.5.3	下料异常或控制不良的检查与处理	202
15.6	铝液高度和出铝量管理	202
15.6.1	管理的基本原则	202
15.6.2	铝液高度测量与出铝计划制定的管理	203
15.7	电解质高度管理	205
15.8	阳极更换进度管理	205
15.8.1	阳极更换顺序的确定	205
15.8.2	阳极更换进度表的制定	206
15.8.3	非正常情况下的阳极更换管理	208
15.9	阳极上覆盖料管理	208
15.9.1	阳极覆盖料管理的基本原则	208
15.9.2	阳极覆盖料管理的内容	208
15.10	原铝质量（铝液纯度）管理	209
15.10.1	降低杂质来源相关联的管理	209
15.10.2	铝液试样分析	210
15.11	效应管理	210
15.11.1	效应管理的目标与思路	210
15.11.2	下料自动控制模式的选择对效应管理的影响	211
15.11.3	效应异常的分析与处理	212
15.12	异常槽况（病槽）及事故的防治与管理	212
15.12.1	异常槽况（病槽）及事故防治与管理的基本原则与重点	212

15.12.2	槽电压(槽电阻)异常或控制不良的检查与处理	213
15.12.3	物料平衡异常或控制不良的检查与处理	216
15.12.4	热平衡异常的检查与处理	218
15.12.5	阳极工作故障及其处理	221
15.12.6	滚铝及其处理	222
15.12.7	效应异常的分析与处理	222
15.12.8	异常情况及事故的检查与处理	226
15.13	系列通电、停电与停槽作业的管理	227
15.13.1	系列通电与停电联络作业	227
15.13.2	停槽作业	228
15.14	设备与工具管理	229
15.14.1	设备的管理	229
15.14.2	工具的管理	230
	参考文献	230
16	铝电解槽的破损与维护	231
16.1	铝电解槽破损的特征、检测与维护	231
16.1.1	电解槽阴极破损的特征	231
16.1.2	电解槽破损的检测	235
16.1.3	破损槽的维护	236
16.2	铝电解槽破损的机理	237
16.2.1	炭素内衬在组装与焙烧过程中产生裂纹	237
16.2.2	电解槽启动初期内衬的裂纹发展与层离	241
16.2.3	熔体持续渗透导致槽底拱凸与破损	248
16.2.4	槽底内衬缺陷发展形成冲蚀坑导致化棒停槽	250
16.2.5	空气氧化导致侧部破损	252
16.2.6	化学腐蚀导致侧部破损	253
16.3	延长铝电解槽寿命的途径	254
16.3.1	多物理场的优化设计	255
16.3.2	筑炉材料的合理选择与匹配	256
16.3.3	内衬砌筑质量的保证与提高	257
16.3.4	焙烧工艺的确定与完善	258
16.3.5	启动方法的合理选择	259
16.3.6	生产工艺的有效管理	259
	参考文献	260
17	铝电解的供电与整流	262
17.1	铝电解对直流电能的要求	262
17.2	整流机组的选择	262

17.2.1	整流机组一次电压的确定	262
17.2.2	整流机组台数选择及机组额定电流的确定	263
17.2.3	整流机组直流额定电压的确定	263
17.2.4	整流相数的选择	264
17.3	整流所供电主结线	264
17.3.1	总的要求	264
17.3.2	主结线方案的选择	264
17.3.3	大型整流所主结线选编举例	265
17.4	变电整流系统的整体配置	265
17.4.1	配置原则与要求	269
17.4.2	调压变及整流变的配置	270
17.4.3	整流柜及直流配电装置的配置	271
17.4.4	整流柜及直流配电装置的安装和接地	272
17.4.5	110~330kV 开关站的配置	273
17.4.6	中央控制室和电缆夹层的配置	273
17.4.7	整流所通风冷却系统配置	274
17.4.8	整流所办公室及生活室	274
17.4.9	整流所电气设备防震措施	274
17.4.10	配置方式举例	274
17.5	变电整流的自动化系统	282
17.5.1	自动化系统结构	282
17.5.2	自动化系统的构成	282
17.5.3	自动化系统配置要求	282
17.5.4	软件配置要求	286
17.5.5	组屏原则	287
17.5.6	自动化系统方案举例	287
17.6	变电整流系统的安全保障	289
17.6.1	供电安全	289
17.6.2	过电压保护	290
17.6.3	工业卫生	290
17.6.4	防火与消防	290
17.6.5	安全标志	291
	参考文献	291
18	铝电解的粉状物料(氧化铝)输送系统	292
18.1	粉状物料输送方式的分类	292
18.2	粉状物料的几种主要输送方式及特点	293
18.2.1	小车轨道式	293
18.2.2	皮带输送机	293

18.2.3	斗式提升机	293
18.2.4	空气提升机	293
18.2.5	稀相输送	294
18.2.6	浓相输送	294
18.2.7	超浓相输送	294
18.3	浓相输送技术	295
18.3.1	输送管中物料运动状态	295
18.3.2	浓相输送原理	296
18.4	超浓相输送技术	297
18.5	现代大型电解铝厂氧化铝输送方式的选择	299
	参考文献	300
19	铝电解槽的动态平衡	301
19.1	物料平衡	301
19.1.1	物料平衡的基本概念	301
19.1.2	根据物料平衡关系计算氧化铝消耗速率	301
19.1.3	根据计算的消耗速率确定基准下料间隔时间 (基准下料速率)	302
19.1.4	按物料平衡计算值 (基准下料速率) 控制下料所存在的问题	302
19.1.5	正常下料、欠量下料与过量下料	303
19.1.6	下料量 (或下料速率) 变化对氧化铝浓度影响	303
19.2	电压平衡	304
19.2.1	电压平衡的相关概念与计算方法	304
19.2.2	铝电解槽电压平衡测试实例	307
19.3	能量平衡 (热平衡)	310
19.3.1	能量平衡的相关概念与基本计算方法	310
19.3.2	生产过程中影响能量平衡 (热平衡) 的常见因素	311
19.3.3	能量平衡测试实例	312
	参考文献	317
20	铝电解槽的物理场	318
20.1	物理场的基本概念	318
20.2	物理场技术的发展历史	318
20.3	物理场计算机仿真的数学模型与方法	319
20.3.1	电场计算模型	319
20.3.2	磁场计算模型	321
20.3.3	铝液流场计算模型	324
20.3.4	热场计算模型	326
20.3.5	热应力场计算模型	329
20.3.6	物理场综合仿真方法	330

20.3.7 物理场动态综合仿真方法	331
20.4 电场	333
20.4.1 电解槽的导电结构	333
20.4.2 母线电流分布	333
20.4.3 阳极电流分布	334
20.4.4 熔体中的电流分布	334
20.4.5 阴极结构中的电流分布	334
20.4.6 电场分布的计算机仿真研究	334
20.5 磁场	335
20.5.1 磁场对电解过程的影响	335
20.5.2 磁场设计的目标以及磁场补偿技术	335
20.5.3 磁场的计算机仿真解析	336
20.6 熔体流动场	338
20.6.1 熔体的运动对电解过程的影响	338
20.6.2 铝液的运动形式与速度	338
20.6.3 铝液流场的计算机仿真解析与实测	338
20.7 热场(温度场)	341
20.7.1 热场的计算机仿真解析	341
20.7.2 电解槽保温设计(热场设计)的基本原则	342
20.7.3 热场分析计算的作用	342
20.8 应力场	343
20.9 物理场与电解槽运行特性的关系	344
参考文献	345
附录 V 工厂常用工作记录表格	346

第三篇 铝电解计算机控制及铝厂信息化

21 铝电解计算机控制系统的基本结构与功能	357
21.1 系统结构与功能的发展概况	357
21.1.1 单机群控系统(20世纪60~70年代)	357
21.1.2 集中式控制系统(20世纪70~80年代)	357
21.1.3 集散式(分布式)控制系统(20世纪80~90年代)	358
21.1.4 先进的集散式控制系统——网络型控制系统(20世纪90年代至今) ...	359
21.2 系统配置实例	360
21.2.1 一种简单的两级集散式(分布式)控制系统的基本配置	360
21.2.2 一种两级网络型控制系统的基本配置	361
21.3 系统功能设计实例	361
21.3.1 现代铝电解工艺对控制功能的基本要求	361