

粗糙集理论 及其数据挖掘应用

Rough Set Theory and Data Mining Applications

董 威 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

粗糙集理论及其数据挖掘应用

董 威 著

东 北 大 学 出 版 社

• 沈 阳 •

© 董 威 2014

图书在版编目 (CIP) 数据

粗糙集理论及其数据挖掘应用 / 董威著. —沈阳: 东北大学出版社, 2014.9

ISBN 978-7-5517-0800-5

I. ①粗… II. ①董… III. ①集论—研究②数据采集—研究 IV. ①O144
②TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 215406 号

内容简介

本专著主要研究了粗糙集理论的改进算法及其在球团生产过程中质量数据挖掘和图像处理数据挖掘中的应用问题, 包括结合粒子群优化的粗糙集属性约简算法、条件粗糙熵的层次树模型构造方法、加权 TOPSIS 偏序关系全序化方法等内容。全书共八章, 主要内容有粗糙集约简及改进算法、粒子群算法优化变精度粗糙集规则获取、层次树模型在粗糙集约简中的应用、加权 TOPSIS 的粗糙集偏序关系全序化等。为增加本书的实用性, 简要介绍了改进后的粗糙集理论在球团质量和图像数据挖掘中的应用。

本书适合于从事粗糙集理论和应用研究的科技工作者阅读, 也可以作为计算机应用或控制理论等专业相关研究方向的硕士研究生、博士研究生的参考书。

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印 刷 者: 三河市天润建兴印务有限公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 228mm

印 张: 11

字 数: 152 千字

出版时间: 2014 年 10 月第 1 版

印刷时间: 2014 年 10 月第 1 次印刷

责任编辑: 任彦斌 王延霞

封面设计: 唯 美

责任校对: 王延霞

责任出版: 唐敏志



ISBN 978-7-5517-0800-5

定 价: 33.00 元

前 言

随着科学技术的迅猛发展,复杂系统、不确定信息的数据挖掘日益成为人们生产和经济等活动的迫切需要,成为新的研究和应用热点。数据挖掘出现于20世纪80年代末,90年代得到了迅猛发展。数据挖掘是一个涉及多学科的研究领域,它涉及数据库技术、人工智能、模式识别等领域。粗糙集理论是在1982年提出的,经典Z Pawlak粗糙集模型在等价关系的基础上,引入上、下近似的概念,建立了粗糙集理论。粗糙集理论是一种建立在熵集上的理论。它为归纳机器学习建立了理论基础;从该理论中提出的独立约简与正区域的概念出发,可以演变为对实际应用有重要意义的一系列理论。由于粗糙集理论不需要任何先验知识,善于从海量强干扰数据中挖掘潜在的有价值信息,无需提供问题所需处理数据集以外的任何先验信息,从而得到了众多科研工作者的青睐。粗糙集理论作为数据挖掘中的一个重要方法,在很多领域都起到了重要的作用。但由于粗糙集理论需要应用者具有较艰深的数学基础,从而严重影响了其广泛应用。

本书应用粗糙集理论进行数据挖掘,力求理论研究来源于工程难题,并以工程实际说明理论价值。近几年来,本书作者董威博士(后)在中国科学院沈阳自动化研究所唐延东研究员,东北大学顾树生教授、王建辉教授的指导下,和课题组的合作者们一道,在粗糙集基础理论以及数据挖掘应用方面进行了一系列深入的研究,并取得了良好的研究成果。这些成果分别发表在《系统仿真学报》《模式识别与人工智能》《Theory International Journal of Information》等刊物上,并申请了国家自然科学基金(批准号50876110)。全书共分为8章。第1章首先介绍了粗糙集理论在钢铁行业和图像处理领

域的研究综述；第2章概述了粗糙集和粒子群基本理论；第3章介绍了粗糙集理论和熵理论的关系，利用条件熵与粗糙集进行了层次树的构造；第4章阐述了变精度粗糙集理论和信息熵的概念和基于离散粒子群的变精度粗糙集约简算法；第5章介绍了优势粗糙集的理论 and TOPSIS 决策理论；第6章介绍了粗糙集理论在链篦机质量判断中的应用；第7章阐述了粗糙集理论在图像数据挖掘中的应用；第8章介绍了粗糙集理论在预混火焰数据挖掘中的应用。

本书涵盖了作者近几年的研究成果。将粗糙集理论与钢铁工业工程应用和数字图像处理等进行了较好的结合，并在钢铁行业中球团质量数据挖掘、图像处理数据挖掘、预混火焰数据挖掘等前沿热点研究领域中提供了实例，是将粗糙集与数据挖掘有机结合的一本书。

由于作者水平有限，加之时间紧迫，难免有不妥和疏漏之处，恳请同行、专家指正。

作 者

2014年4月

目 录

第 1 章 导 言	1
1.1 问题的提出	1
1.2 粗糙集理论及其研究现状	2
1.3 球团生产系统数据挖掘	7
1.3.1 球团生产系统概述	7
1.3.2 链篦机-回转窑-环冷机工艺流程	8
1.3.3 粗糙集理论在质量数据挖掘中的应用现状	9
1.4 粗糙集理论在图像数据挖掘中的应用现状	11
1.5 主要研究思路及内容安排	12
1.5.1 主要研究思路	12
1.5.2 内容安排	14
第 2 章 粗糙集约简及改进算法	16
2.1 引 言	16
2.2 粗糙集属性约简	16
2.2.1 粗糙近似	16
2.2.2 约简与核	18
2.2.3 基于依赖度的相对属性约简	19
2.3 粗糙集理论不确定性分析	22
2.3.1 粗糙集理论对不确定性的处理能力	22
2.3.2 粗糙集不确定性量度	23
2.4 粗糙集最小属性集选择	24
2.4.1 粗糙集最小属性集	24
2.4.2 属性集选择	25
2.4.3 属性集选择的贪心算法	27

2.4.4 算例分析	28
2.5 基于遗传算法的属性相对约简	29
2.6 基于离散粒子群算法的属性约简	33
2.6.1 粒子群优化算法	33
2.6.2 离散粒子群算法的属性约简算法实施	39
2.7 算例分析	45
2.8 小 结	47
第3章 粒子群算法优化变精度粗糙集规则获取	48
3.1 引 言	48
3.2 可变精度粗糙集	48
3.2.1 变精度粗糙集中的近似集合	48
3.2.2 变精度粗糙集中近似集合的性质	50
3.3 决策规则测度分析	52
3.3.1 决策规则测度基本概念	52
3.3.2 阈值 β 对变精度粗糙规则集的影响	53
3.4 离散粒子群(DPSO)的变精度粗糙集规则获取	55
3.4.1 离散粒子群(DPSO)的变精度粗糙集规则获取	55
3.4.2 实例分析	58
3.5 对比分析	59
3.6 小 结	60
第4章 层次树模型在粗糙集约简中的应用	61
4.1 引 言	61
4.2 基于熵的粗糙集不确定性度量分析	62
4.2.1 信息熵	62
4.2.2 粗糙熵	63
4.2.3 知识粒度	63
4.2.4 引入粗糙度的粗糙熵	64
4.2.5 改进的粗糙熵	65
4.3 基于粗糙熵的属性约简	66
4.4 基于粗糙集的分层次挖掘算法	71

4.5 基于粗糙集的层次树模型	74
4.5.1 构建层次树模型	74
4.5.2 基于粗糙熵的层次树约简算法	76
4.5.3 实例分析	77
4.6 小 结	80
第 5 章 加权 TOPSIS 的粗糙集偏序关系全序化	81
5.1 引 言	81
5.2 偏序关系全序化	81
5.2.1 偏序关系	81
5.2.2 基于优势度的偏序关系全序化	84
5.2.3 辨识矩阵方法求取偏序集的局限性	87
5.3 基于粗糙集和加权 TOPSIS 的偏序关系全序化	89
5.3.1 序数评估分值模型的权重确定简化算法	89
5.3.2 加权 TOPSIS 多指标评价原理	93
5.3.3 应用实例	97
5.4 小 结	99
第 6 章 改进的粗糙集在球团质量数据挖掘中的应用	101
6.1 引 言	101
6.2 链篦机-回转窑工艺与球团成球质量分析	102
6.2.1 链篦机-回转窑工艺介绍	102
6.2.2 球团成球质量参数分析	105
6.3 基于粗糙集理论的球团成球质量规则提取	107
6.3.1 条件属性集合与决策属性集合的确定	109
6.3.2 粗糙集决策表的建立	109
6.3.3 噪声数据的处理	112
6.3.4 工艺参数时序分析	113
6.3.5 球团质量属性约简	114
6.3.6 规则查询和操作指导	115
6.4 基于众数的粗糙集的球团质量和参数相关性分析	117
6.4.1 基于众数的粗糙集模型产生的必要性	117

6.4.2 基于众数的粗糙集模型构造	117
6.4.3 基于众数粗糙集球团质量和参数相关性分析实例	118
6.5 离散粒子群变精度粗糙集在成球质量判断中的应用	122
6.5.1 基于粒子群的粗糙集约简方法在成球质量判断中的应用	122
6.5.2 基于粒子群的变精度粗糙集在成球质量判断中的应用	123
6.6 测试结果分析	125
6.7 小 结	127
第 7 章 粗糙集理论在图像数据挖掘中的应用	128
7.1 引 言	128
7.2 BP 算法的基本原理和局限性	128
7.2.1 BP 算法的基本原理	128
7.2.2 BP 算法的局限性	130
7.3 基于 PSO 的 BP 神经网络优化	132
7.3.1 用 PSO 算法优化 BP 网络学习算法	134
7.3.2 实例分析	135
7.4 粗糙集-粒子群神经网络的图像分割	137
7.4.1 粗糙集-粒子群神经网络模型	138
7.4.2 基于粗糙集-粒子群神经网络的图像分割	140
7.5 小 结	144
第 8 章 粗糙集在预混火焰实验数据挖掘中的应用	145
8.1 引 言	145
8.2 OH-PLIF 测量装置	145
8.3 预混火焰实验	146
8.3.1 预混火焰实验过程	146
8.3.2 实验结果	148
8.4 基于粗糙集理论的预混火焰实验数据挖掘	148
8.5 小 结	152
参考文献	153

第1章 导 言

1.1 问题的提出

粗糙集(rough set)理论^[1,2]是一种新的数学工具,无需数据集合之外的任何先验信息,用于处理含糊性和不确定性问题,在数据挖掘中发挥着重要的作用。其具备优越的知识简化能力,可以分析属性之间的依赖性和重要程度,最终导出简练的决策或分类规则。这是一个很有前途的研究方向,也是粗糙集在工业领域应用的研究热点。通过粗糙集理论可以从大量不完全的、有噪声的、模糊的或者随机的数据中提取人们事先未知但又有用的知识。随着粗糙集理论方法本身的发展,随着它和其他智能控制技术的进一步融合,随着其应用范围的进一步扩大,可以预见,粗糙集理论将在控制领域发挥十分重要的作用。

球团生产主要有竖炉、带式焙烧、链篦机-回转窑-环冷机三种方法^[3]。在世界工业不断发展的今天,只有使用先进的冶金技术和基于计算机的自动化生产线,钢铁企业才能在不断创新的市场中立足,才能逐步地降低成本,提高质量和产量,从竞争日益激烈的市场中赢得更多的利润。为适应钢铁工业不断发展的需要,国内近年来十分重视现代球团工业建设,坚持技术上的高起点,瞄准世界先进水平,在当前的球团厂建设中,采用了先进的生产工艺和高效、大型球团设备。其中在链篦机-回转窑-环冷机中的应用越来越多,已占世界球团总生产能力的33%以上。

通过对鞍山弓长岭球团矿厂的调查了解,在球团矿行业,整体

的自动化程度偏低,而由此必然导致工艺的优化不足和生产过程成本的偏高。从总的生产情况来看,球团矿产量有了很大的提高,对高炉炉料结构的改善及炼铁技术经济指标的提高起到了明显作用;但在质量方面却存在着不少问题,与北美等一些国家生产的优质球团相比差距甚大,尚有很大潜力可挖^[4]。

为了更好地发挥球团生产工艺的优越性,进一步挖掘提高球团矿产质量的潜力,本书面向适应性较强的链篦机-回转窑-环冷机工艺,通过分析球团矿产品质量和温度参数的信息,挖掘出质量指标和温度参数的内在联系。由于该工艺的产品质量指标无法立即在线获得,一次检测化验通常为数小时甚至一天,才能得到实际数据。所以,这样的时间滞后非常不利于系统的优化控制。于是,可以通过较为常见的先预测、后控制的办法,使系统在面向产品质量方面的自动化程度获得提升,并由此对产品质量加以控制,实现生产线的优化运行。

本书主要针对球团生产中链篦机-回转窑-环冷机系统中,链篦机的温度参数和球团质量的对应关系,对链篦机温度系统提供参考,目的是提高产品的质量,得到更好的经济效益。并使用粗糙集方法,实现对链篦机-回转窑-环冷机生产线的产品质量判断,从而为生产线能对质量指标判断提供了一些有益的探索。

1.2 粗糙集理论及其研究现状

粗糙集理论^[5-11]是波兰数学家 Pawlak Z 在 1982 年提出的。它是一种处理含糊和不确定信息的新型数学工具,近年来引起了人工智能界的极大关注。Pawlak 针对 Frege G 的边界区域思想提出了粗糙集,把那些无法确定的个体都归属于边界区域,而这种边界区域被定义为上近似集与下近似集之差集。粗糙集理论建立在分类机制的基础上,将分类理解为在特定空间上的等价关系,而等价关系构

成了对该空间的划分。粗糙集理论将知识理解为对数据的划分, 每一个被划分的集合称为概念。粗糙集理论的主要思想是利用已知的知识库, 将不精确或不确定的知识用已知的知识库中的知识来(近似)描述。

粗糙集理论主要有以下特点。

① 粗糙集理论是不需要先验知识的。它是完全由数据驱动的, 不需要像几率统计方法要预先假定几率分布, 也不需像模糊集理论要假设模糊隶属函数的结构。“RS”分析方法仅利用数据本身提供的信息, 无需任何先验知识。

② 粗糙集理论是一种数据分析工具。它能表达和处理不完备的信息; 能在保留关键信息的前提下, 对数据进行化简并求得知识的最小表达; 能够评估数据之间的依赖关系, 揭示概念的简单模式; 能从经验数据中获取易于证实的规则知识。

③ 粗糙集理论是一种软计算方法。软计算的概念是由模糊集创始人 Zadeh^[12]提出的。传统的计算方法即硬计算, 使用精确、固定和不变的算法来表达和解决问题, 而软计算的指导原则是利用所允许的不精确性、不确定性和部分真实性以得到易于处理、鲁棒性强和成本较低的解决方案, 以便更好地与现实系统相协调。

目前, 对粗糙集理论的研究主要集中在其数学性质、粗糙集理论的扩展与其他智能方法的融合及有效算法等方面。

粗糙集数学性质方面的研究主要是对粗糙集理论中知识的不确定性问题进行理论研究^[13], 包括讨论粗糙集代数结构、拓扑结构^[14]和粗糙逻辑^[15,16]以及粗糙集的收敛性等问题^[17]。

随着粗糙集研究的不断深入, 它与其他数学分支的联系也更加紧密。从算子的观点看粗糙集, 与之关系比较紧密的有拓扑空间、数理逻辑、模态逻辑、格与布尔代数、算子代数等; 从构造性和集合的观点看, 它与几率论、模糊数学、证据理论、图论、信息理论等联系较为密切。粗糙集的理论研究需要以这些理论为基础, 同时

也相应地带动了这些理论的发展^[18,19]。纯数学理论与粗糙集结合的研究导致了新的数学概念的出现,例如“粗糙逻辑”和“粗糙半群”等^[15,20]。随着粗糙结构与代数结构、拓扑结构、序结构等各种结构的不断整合,必将推动粗糙集快速发展^[21]。

粗糙集理论的扩展主要有两种方法^[22]:构造性方法和代数(公理化)方法。

(1) 构造性方法

构造性方法是对粗糙集模型的一般推广,其主要思路是从给定的近似空间出发去研究粗糙集和近似算子。它将论域上的二元关系或布尔代数作为基本要素,然后导出粗糙集代数系统。这种方法所研究的问题往往来源于实际,所建立的模型具有很强的应用价值,其主要缺点是不易深刻了解近似算子的代数结构。

在粗糙集理论中有三个最基本的要素:论域 U , U 上的二元等价关系 R 构成的近似空间和被近似描述的集合。这样,推广的形式主要也有三个方向,即论域方向、关系方向(包括近似空间)和集合方向。

从论域方向推广,目前只有一种,就是双论域^[23-26]的情况,当然这时的二元关系就变成两个论域笛卡儿乘积的一个子集。

从关系方向的推广,一种是将论域上的二元等价关系推广成为任意的二元关系得到一般关系下的粗糙集模型^[27];也有将由关系导出的划分推广成为一般的布尔代数,并以此出发去定义粗糙集和近似算子^[28];更一般的是将普通关系推广成模糊关系或模糊划分,而获得模糊粗糙集模型^[29-32]。

对于不可分辨关系的经典粗糙集方法不能解决带有偏好顺序多准则决策问题, Greco 等提出了基于优势关系的粗糙集模型^[33-37],它用优势关系代替原来的不可分辨关系,在多准则决策分析中得到了广泛的应用。为加强粗糙集的性能, Slowiski R 阐述了相似关系模型的定义和性质^[38],提出用相似关系来代替不可分辨关系。梁吉

业等人证明在相似模型中,粗糙熵随着知识粒度减小而单调递减,有助于寻找针对不完备信息系统的新的知识约简算法^[39]。王国胤把相似关系模型应用于不完备信息系统的处理^[40];文献[41]进一步改进相似关系模型,提高了粗糙集对噪声数据的容错能力。

从集合和近似空间方向的推广,有学者提出了几率粗糙集模型^[42-45]。变精度粗糙集模型^[46-54]实质上也可以归入这类模型,变精度粗糙集模型具有一定的容错性;An Aijun 提出了一种变精度粗糙集模型^[55],引入了 β ($0.5 < \beta \leq 1$) 作为正确率。Katzberg 和 Ziarko 提出了不对称边界的变精度粗糙集模型^[56],即存在两个参数 l 和 u ,从而使粗糙集模型更加一般化。陈湘晖等则构造了一种新的扩展粗糙集模型,在知识表示系统和决策表中引入数据对象的权值函数和属性的特征函数,表示数据对象的重要性和属性的特性^[57],寻求具有最小风险的 Bayes 决策问题也可转化为这类模型^[57],这一类模型在数据分析的增量式机器学习中有重要应用。基于随机集的粗糙集模型^[58-60]既是对基于邻域算子的粗糙集模型的推广,又适用于双论域情形,同时也是对统计粗糙集模型的推广。

(2) 代数方法

代数方法也称公理化方法(有时也称为算子方法),这种方法不以二元关系为基本要素,它的基本要素是一对满足某些公理的一元近似算子 $L, H: 2^U \rightarrow 2^U$,即粗糙代数系统 $(2^U, U, \cup, \cap, L, H)$ 中近似算子是事先给定的。这种方法研究的明显优点是能够深刻了解近似算子的代数结构,其缺点是应用性不够强。

粗糙集对代数方法的研究还包括其代数结构、拓扑结构^[61]、收敛性^[62]、集合和分类近似的性质等问题^[63],粗糙集的逻辑性质^[64-68]是不确定性推理的基础,其研究也引起了学界的广泛兴趣。

(3) 粗糙集与其他智能方法的融合

各种智能方法取长补短,相互结合,可以实现不同的应用目的。

Dubois 和 Prade 于 1992 年把模糊集引入了粗糙集, 提出了模糊粗糙集理论^[69]。模糊粗糙集理论最重要的问题是在给定的论域和模糊相似关系下推演出概念(清晰的和模糊的)的模糊粗糙近似。根据模糊粗糙近似推演方式的不同, 主要形成了三种从不同角度研究的模糊粗糙集: 基于形式逻辑的模糊粗糙集^[69], 基于三角模的模糊粗糙集^[70,71], 基于 α -截集的模糊粗糙集^[72]。模糊粗糙集避免了粗糙集进行数据离散化过程引起的不确定性问题。

粗糙集和神经网络作为不确定性计算的两种重要算法, 它们都可以处理不确定和不精确信息, 都不依赖于数学模型, 都是基于样本(对象)学习的, 等等。粗糙集和神经网络的区别主要存在于它们对样本的利用方式和对样本输入输出之间关系的表达方式。这两种不确定性计算的特性具有较好的互补性。可以利用粗糙集构造神经网络, 减小网络规模, 提高网络训练速度^[73-75], 简化神经网络学习样本。粗糙集和神经网络之间还可以互相转换, 两种方法结合使用, 能够取得非常好的数据分类效果^[76,77]。

遗传算法作为优化算法能够结合进粗糙集的约简计算, 可以快速搜索得到决策系统的约简^[78-80]。Lingras 和 Davies 研究了粗糙集和遗传算法的结合, 提出了一种粗糙遗传算法^[81]。

此外粗糙集与概念格^[82,83]、粗糙集与证据理论^[84-86]等多种智能方法相互融合, 取长补短^[87-89]。

(4) 有效算法

粗糙集有效算法方面的研究包括如何求等价类、上近似、下近似、边界区域、核、属性约简等。由于约简是粗糙集理论的核心内容之一, 所以目前粗糙集有效算法方面的研究主要集中在属性和规则的约简。

Wong S K 和 Ziarko W 等已经从计算复杂性的角度证明了寻找最小约简是 NP-hard 问题^[90]。不少学者研究了不同信息系统下的属性约简理论和方法^[90-96], 解决这类问题的方法一般采用启发式搜索

通过在算法中加入启发式信息,缩小问题的搜索空间,进而获得最优解或近似最优解。最初提出启发式算法思想的是 Hu X^[97],使用核作为约简计算的基础^[98],以属性重要性作为启发信息,按属性重要性的大小逐个将属性加入约简集合,直到该集合是一个约简为止。按照加入属性的不同,可以计算出多个属性约简集,最终得到一个较好的或满意的约简。Skowron 在文献 [96] 中引进了辨识矩阵的概念,使之成为信息系统中寻求约简的主要工具。Tsang G 等将粗糙集理论与模糊数学相结合探讨属性的约简问题^[99];从变精度方面扩充粗糙集理论及其计算公式,用于优化属性约简结果^[100],将覆盖属性代替属性分类(分区),给出新的上近似、下近似计算公式,改进属性约简中属性的知识量^[101]。

1.3 球团生产系统数据挖掘

1.3.1 球团生产系统概述

球团是 20 世纪早期开发出的一种细粒精矿的造块方法,是将细磨精矿或粉状物料制成能满足冶炼要求的原料的一个加工过程。其基本生产流程,是将准备好的原料(细磨精矿或其他细磨粉状物料、添加剂等),按一定比例经过配料、混匀,制成一定尺寸的小球,然后采用干燥焙烧或其他方法使其发生一些系列的物理化学变化而硬化固结的全部过程,产品即为球团矿^[102]。

球团生产大致分三步:

- ① 将细磨精矿粉熔剂燃料和黏结剂等原料进行配料与混合;
- ② 在造球机上加适当的水,滚成生球;
- ③ 生球在链篦机-回转窑进行高温焙烧,焙烧好的球团经冷却,破碎、筛分成品球团矿。

链篦机-回转窑是一种联合机组,包括链篦机、回转窑、环冷

机及其附属设备。这种球团工艺的特点是干燥预热、焙烧和冷却过程分别在三台不同的设备上进行。生球首先于链篦机上干燥、脱水、预热，而后进入回转窑内焙烧，最后在环冷机内完成冷却成球过程^[103-109]。

1.3.2 链篦机-回转窑-环冷机工艺流程

链篦机-回转窑-环冷机工艺生产过程中，球团的产量和质量主要由以下因素影响：原料质量，配料的正确性和混合的均匀性，造球机的性能，不合格的生球和保证链篦机上生球铺布平整，链篦机-回转窑的热工制度，链篦机、回转窑的操作工艺^[110,111]。

其中如何选取合理的热工(或热风)制度^[112,113]尤为关键，并且将合理的热工(或热风)制度通过计算机控制系统得以完全正确实现。

链篦机^[114,115]是对生球进行干燥和预热的设备，合格生球经摆动皮带机、宽皮带布料机和辊式布料机均匀地布到链篦机篦床上，随篦板前进，经抽风Ⅰ段干燥和抽风Ⅱ干燥及预热，使生球达到一定强度，完成焙烧前的准备，在链篦机的排料端通过铲料板给入回转窑。

回转窑的功能主要是焙烧球团，使球团矿的冷态抗压强度 $\geq 2000 \sim 2500 \text{ N/球}$ 。球团焙烧在回转窑内进行，生球经干燥和预热后，由链篦机尾部的铲料板铲下，通过溜槽进入回转窑，物料随回转窑沿周边翻滚的同时，沿轴向移动。窑头设有燃烧器(烧嘴)，由它燃烧燃料供给热量，以保持窑内所需要的焙烧温度。烟气由窑尾排出导入链篦机。球团在翻滚过程中，经 $1250 \sim 1350^\circ\text{C}$ 的高温焙烧后，从窑头排料口卸入环冷机。

基于链篦机-回转窑工艺的球团矿生产，对产品质量加以预测，力图从整体上为整条生产线和整个企业的质量工程，实现面向质量的控制，从而实现优化工艺、降低成本、提高质量、增加利润的目