

分类号_____ 密级_____

UDC _____

学 位 论 文

钢铁企业氧气系统决策分析与优化模型研究

作 者 姓 名： 杨见博

指 导 教 师： 杜涛 教授

东北大学热能与环境工程研究所

申请学位级别： 硕士 学 科 类 别： 工科

学科专业名称： 热能工程

论文提交日期： 2012 年 6 月 论文答辩日期： 2012 年 6 月

学位授予日期： 2012 年 6 月 答辩委员会主席： 于庆波 .

评 阅 人： 韩宗伟 . 刘云义

东 北 大 学

2012 年 6 月

A Thesis in Thermal Engineering



A Research on the Decision Analysis and Optimization Model of Oxygen System of Iron and Steel Enterprises

by Yang Jian Bo

Supervisor: Professor Du Tao

Northeastern University

June 2012

独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：杨见博
日期：2012.7.1

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 ☐ 一年 ☐ 一年半 ☐ 两年 ☐

学位论文作者签名：杨见博
导师签名：李博
签字日期：2012.7.1
签字日期：2012.7.1

钢铁企业氧气系统决策分析与优化模型研究

摘 要

氧气作为钢铁企业生产必须的能源介质，是除煤气、蒸汽、电力外，占据第四位的重要能源介质，其地位不容忽视。钢铁企业氧气生产的经济性和氧气放散问题是当前面临的两个突出问题。根据对部分大中型钢铁企业的统计，制氧电耗约占钢铁企业电耗的 1/7 左右，氧气放散问题也比较突出，所以，对氧气系统经济性决策分析和优化将对钢铁企业的整体节能发挥重要作用。以此为研究背景，本文从氧气的生产、输送和使用方面对氧气系统的特性进行了分析，并对氧气放散进行分析；针对 1000 万吨级别钢铁企业，建立了氧气系统决策指标并分析，并以首钢京唐为例进行了验证分析；基于首钢京唐公司氧气系统，进行了氧气优化管理模型的研究，建立了氧气预测模型和优化分配模型，并对模型进行了求解和实例分析，取得了很好的优化和节能效果。本文主要研究内容如下：

1. 介绍了课题的研究背景和意义，以及钢铁企业氧气系统的研究现状，分析了目前研究取得的成就以及研究缺口。
 2. 从氧气的发生、储存及输送、用户以及放散方面，对钢铁企业氧气系统的特性进行了分析，并建立了氧气动态平衡方程。通过分析可见氧气系统的时变性可导致氧气的供需不平衡，从而导致氧气的放散。所以为解决节能、氧气放散问题应该从其发生、输送、用户三方面综合进行。
 3. 针对 1000 万吨级钢铁企业，对氧气发生端和用户端分别建立了氧气系统新的决策指标。并用新指标分别对大型化机组、制氧流程的选择以及制氧纯度的选择等进行了经济性决策分析，及对转炉用氧方案进行了评价分析。最后以首钢京唐为例，对所有指标进行了应用及分析。
 4. 针对首钢京唐公司，进行了氧气优化管理模型研究。优化管理模型包括建立氧气用量预测模型及氧气优化分配模型。氧气用量预测模型依据人工神经网络（BP 网络）原理建立，优化分配模型是针对正常生产状态、高炉休风以及空分停机三种情况分别建立。最后，借助 MATLAB 工具对模型进行了求解和实例分析。结果表明，模型具有很好的优化效果和节能效果，可用于对氧气的生产安排及管理。
- 关键词：钢铁企业；氧气系统；决策；优化；节能；经济性

A Research on the Decision Analysis and Optimization Model of Oxygen System of Iron and Steel Enterprises

Abstract

As the necessary energy media of iron and steel enterprises, oxygen occupies the fourth important energy media in addition to gas, steam and electricity, and its status can not be ignored. The oxygen producing economy and oxygen diffue problem of iron and steel enterprises' are the two outstanding problem we facing. According to the statistics of some large and medium-sized enterprises, the oxygen energy consumption accounts for about 1/7 of the power consumption of iron and steel enterprises, therefore, the overall energy of its energy-saving analysis and optimize of the iron and steel enterprises will play an important role. As this be the research background, the article analyze the oxygen system's characteristics from the production, transmission and use; for 10 million tons level of iron and steel enterprises, has given the policy indicator and analysis of the oxygen system and has taken the example validation analysis of Shougang Jingtang; based on the Shougang Jingtang's oxygen system, has build the oxygen forecasting model and optimal allocation model, and given the solve of the model and example analysis, and has achieved good optimization results and good energy saving effect. The main contents of this article are as follows:

1. Gived the research background and significance of the issue, and the status research of iron and steel enterprises' oxygen system, and analyzed the current research achievements and research gaps.
2. Analyzed the characteristics of the oxygen system of iron and steel enterprises from the occurrence of oxygen, storage and transportation, then builded the oxygen dynamic equilibrium equation. By analyzing the visible oxygen system degeneration can lead to oxygen supply and demand imbalance, thus led to the elution of oxygen.
3. For 10 million tons level of iron and steel enterprises, respectively builded the new decisions from oxygen system's occurrencing side and using side. Using the new decisions to given decision analysis of large-scale units, the choice of oxygen producing flow and oxygen

producing purity, and maked analysis of the converter's oxygen using program. Finally, for the example of Shougang Jingtang, gived the application and analysis of all indicators,

4. For Shougang Jingtang, maked research of optimization management model of oxygen. The optimization management model include establishing the oxygen using prediction model and the oxygen optimization model. The prediction model is using the artificial neural network (BP network) principle, and the optimization model buided respectively to the normal production state, the blast furnace off-wind and the oxygen generator downtime. Finally, solving and case analysis of the model using the MATLAB tools. The results show that the models have good optimization and energy-saving effect, can be used for the management of oxygen.

Keywords: iron and steel enterprises; oxygen system; decision; optimization; energy saving

目 录

独创性声明..... I

摘 要..... III

Abstract..... IV

目 录..... VII

第 1 章 绪论 1

1.1 引言..... 1

1.2 课题研究的背景及意义..... 1

 1.2.1 课题研究的背景..... 1

 1.2.2 课题研究的意义..... 4

1.3 钢铁企业氧气系统的研究现状..... 4

 1.3.1 氧气系统决策研究现状..... 4

 1.3.2 氧气的预测和调度研究现状..... 5

1.4 本文主要研究内容..... 8

第 2 章 钢铁企业氧气系统特性分析 11

2.1 氧气系统的组成..... 11

2.2 氧气系统特性分析..... 11

 2.2.1 氧气发生系统特性..... 12

 2.2.2 氧气存储与输送系统特性..... 14

 2.2.3 氧气用户用氧特性..... 15

2.3 氧气放散特性分析..... 18

第 3 章 氧气系统决策分析 21

3.1 氧气生产端决策指标..... 21

 3.1.1 氧气相对综合电耗..... 21

 3.1.2 产品综合经济效益..... 22

3.1.3 制氧相对电耗..... 24

3.2 氧气用户端决策指标..... 27

3.2.1 用氧均衡程度分析..... 28

3.2.2 用氧均衡度指标..... 29

3.3 首钢京唐公司氧气系统决策分析..... 30

3.3.1 首钢京唐概况..... 30

3.3.2 首钢京唐氧气系统概况..... 31

3.3.3 决策指标的应用及分析..... 32

第 4 章 首钢京唐公司氧气优化管理模型研究..... 37

4.1 钢铁企业用氧量预测模型..... 37

4.1.1 神经网络（BP 网络）的原理及结构..... 37

4.1.2 MATLAB 简介..... 41

4.1.3 预测模型的建立..... 41

4.1.4 预测结果分析..... 47

4.2 氧气优化分配模型..... 49

4.2.1 正常生产氧气分配模型..... 49

4.2.2 高炉休风用氧模型..... 53

4.2.3 空分停机用氧模型..... 55

4.3 模型的算法与求解..... 57

4.3.1 模型的算法..... 57

4.3.2 模型的求解..... 60

4.4 实例分析..... 61

4.4.1 实例分析一..... 61

4.4.2 实例分析二..... 63

第 5 章 结论与展望..... 67

5.1 结论..... 67

5.2 研究展望..... 68

参考文献..... 69

致 谢.....	73
----------	----

第 1 章 绪论

本章首先介绍了课题的引入及研究背景，并阐明了课题的研究意义，然后分析了国内外的研究现状，引出了本课题的主要研究内容，最后简要说明了本文的主要研究工作。

1.1 引言

钢铁工业是高能耗行业，其能耗在我国国民经济总能耗中约占 10%，而钢铁企业能源费用约占生产成本的 $1/3$ ^[1]。高能源消耗不仅导致钢铁产品成本的增加，而且也意味着更多的污染和排放。因此在钢铁企业搞好能源管理工作，对企业生产所需的能源系统进行静态决策分析和动态优化以达到能源平衡和优化利用，节约能源，提高能源利用率，提高钢铁企业竞争力具有重要的意义。

氧氮氩系统是钢铁企业生产不可或缺的组成部分，氧气是钢铁企业重要的自产能源，同时氧气消耗也是钢铁企业能源介质消耗的主要内容之一。

进入 21 世纪以来，随着我国国民经济的高速发展，我国制氧行业已有长足的进步，与国外的先进制氧技术的差距也越来越小。伴随着国民经济的快速发展，钢铁冶金行业也迅猛发展，伴随而来的也是制氧机向大型化、超大型化的方向发展，目前，国内的超大型制氧机已达到 $90000\text{m}^3/\text{h}$ 等级，与此同时，新的制氧技术和工艺也层出不穷，低温法制氧流程也已达到了第六代新流程全面普及的程度。^[2]可见，先进技术的发展促使在氧气系统的生产端，即制氧机组的配置有很大的节能空间。

1.2 课题研究的背景及意义

1.2.1 课题研究的背景

钢铁工业是我国国民经济最重要的基础产业之一，是“国家的经济命脉”，也是全面建设小康社会必不可少的物质基础。

1.2.1.1 我国钢铁工业的发展及能源消耗

20 世纪 80 年代开始，随着我国经济的繁荣，钢铁工业迅速发展，形成了完整的工业体系。90 年代以后，在国家宏观经济政策的正确引导和经济全球化的大环境中，在 market 需求的驱动下，我国钢铁工业得到了高速的发展，取得了举世瞩目的成就，自 1996 年我国粗钢产量突破 1 亿吨后，已连续 15 年保持世界第一，2010 年我国粗钢产量已达到 6.27 亿吨，占世界粗钢总产量的 44.3%，我国钢铁工业已在全球占有重要位置。图

1.1 为 90 年以后，我国粗钢产量以及占世界粗钢产量的比重。

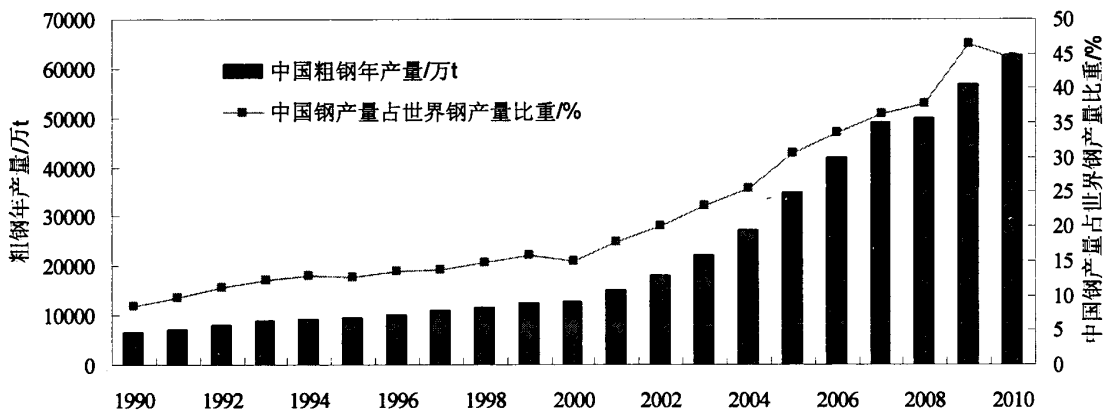


图 1.1 1990~2010 年中国粗钢产量及占世界粗钢产量比重
Fig. 1.1 Output of crude steel of China steel industry and ratio in world steel from 1990 to 2010

在产量快速增长的同时，我国钢铁工业总体素质也有了较大的提高，宝钢、首钢、武钢、鞍钢、攀钢等大型企业的主要技术装备水平已接近或达到世界先进水平，同时，我国钢铁工业对工艺流程和钢材产品结构进行调整，取得重大进展，一些高端、高附加值产品的产量和比重大幅增加，提高了企业在国内外市场激烈竞争中的适应能力，在世界上占有了一席之地。

钢铁工业也是能源、资源消耗大户，我国钢铁工业的能耗约占全国总能耗的 10%^[3]。钢铁工业在促进经济快速发展，满足不断增长的物质需要的同时，也造成了能源、资源的大量消耗。吨钢综合能耗和吨钢可比能耗是反应钢铁企业能源利用水平的重要标志。近十几年来，我国钢铁工业在技术进步、科技创新和技术装备水平等方面，都取得了长足进步。由于结构性指标（如：铁钢比、喷煤比、连铸比等）和主要生产工序技术经济指标明显改善，以及强化了能源管理、大范围地采用了余热、余压、余能利用等多方位的综合措施，大中型企业工序能耗稳步降低，特别是特大型企业炼铁、炼钢、轧钢等主要生产工序，部分技术经济指标接近或者达到国际先进水平，大大缩短了我国钢铁工业与世界主要产钢国家的能源消耗差距，企业吨钢能源消耗水平明显降低，大中型钢铁企业的吨钢综合能耗从 1980 年的 1.646tce/t 下降到 2010 年的 0.605tce/t，下降率为 63.2%，吨钢可比能耗从 1980 年的 1.285tce/t 下降到 2010 年的 0.581tce/t，下降率为 54.8%，节能效果显著。虽然我国钢铁工业节能进步显著，但与世界主要产钢国相比，仍有一定潜力。尽管企业吨钢能源消耗水平大幅降低，但我国钢产量的迅速增长必然造成钢铁工业能源消耗总量的不断增大，能源问题已成为制约钢铁工业发展的一个重要因素，因此，

面对能源问题的挑战,我国钢铁工业应不遗余力地节能降耗,采取技术上可行、经济上合理以及环境和社会可以接受的措施,有效地降低能源消耗。

1.2.1.2 钢铁企业对氧气的需求

众所周知,因钢铁冶炼及燃烧过程通常都是氧化反应,所以冶金离不开氧气。

在现代钢铁冶炼中,除了需要鼓风机输入空气之外,还需要提供大量的纯氧,这样可以显著地节能并提高钢铁产量。随着钢铁工业的发展,对氧气的需求量迅速增加。据统计,目前我国钢铁企业每年需氧量达 175~210 亿 m^3 。^[3]

对于转炉炼钢而言,是“有氧才有钢,氧多钢也多”。转炉炼钢法(LD法)从20世纪60年代初开始推广使用。此法是在转炉中吹入高纯氧,氧与碳、磷、硫、硅等元素发生氧化反应。这不仅降低了钢的含碳量,清除了磷、硫、硅等杂质,而且可以用反应热来维持冶炼过程所需的温度。可见,转炉冶炼是炼钢工艺的一大变革,使炼钢工艺更加依赖氧的供应。转炉炼钢,熔炼时间短,产量高。吨钢耗氧通常为 50~60 m^3 氧气纯度要求大于 99.2%。

高炉富氧鼓风能够显著地降低焦比,提高产量。一般富氧浓度为 24%~25% (体积分数)。据统计,富氧浓度提高 1%,其铁产量可以提高 4%~6%,焦比降低 5%~6%。尤其是煤基炼铁工艺的发展,需要供应大量的氧气。当每吨铁水喷煤率达到 300kg 时,相应的氧气量为 300 m^3/t ,氧气浓度为 90%。

近年来,国内外,炼铁工艺正在变革,采用还原法(COREX)炼铁新工艺取代高炉炼铁。与高炉炼铁相比,单位投资可降低 20%,生产成本可下降 20%~25%,这种冶炼方法不需要焦炭,就彻底解决了炼铁缺乏焦炭的困惑,而且废水废气的排放量大为减少,有利于环境保护。以还原法炼铁吨铁耗氧 550~650 m^3 。

此外,我国钢铁企业氧气放散率较高。目前,多数企业的氧气放散率在 2~8%,个别企业的高达 20%,这就造成了很大能源浪费。如某企业年钢产量为 1000 万吨,氧气放散率为 15%,因放散而引起的能源损失约为 2.5 万吨标煤,直接经济损失可达 3000 万元人民币。因此,确立合理的方法以减少氧气放散,降低能源成本,是我国钢铁企业重要的节能内容之一。^[4]

我国的钢铁企业现在新建立的钢铁厂层出不穷,在这些企业的氧气站的设计、建立初期就要求我们对其节能进行分析,确立最优指标,而对于已经建成正在运行的企业,这就要求我们对其均衡用氧等方面进行研究。

1.2.2 课题研究的意义

由上面的背景分析可以看出,钢铁企业用氧量巨大,且制氧站是能源消耗大户,这就需要对钢铁企业的氧气系统进行研究,以最大能力的降低制氧能耗,及减少氧气放散,提高氧气系统的经济性。

对钢铁企业氧气系统的研究,可以为钢铁企业从气体的生产、运输到使用提供明确的指导准则,从氧气生产的静态决策分析再到生产使用过程中的预测与使用调度确立参考依据,从而达到节能、环保、经济性最佳的综合目的。

1.3 钢铁企业氧气系统的研究现状

氧气系统作为钢铁企业的耗能大户,近年来越来越受到人们的重视。早在上世纪 90 年代,我国就有学者对钢铁企业的氧气系统进行了研究。多数的研究都是针对氧气系统的决策支持系统及动态仿真研究,这其中又包括了氧气预测模型和优化调度模型的研究。

1.3.1 氧气系统决策研究现状

目前,国内外对钢铁企业氧气系统的大部分研究都是基于在建立氧气系统决策支持系统的研究上,例如北京科技大学的王立、张延平等就对这方面做了很大的工作和贡献。

如文献[5]对钢铁企业氧气的利用合理与支持系统的开发和研究,是结合某钢铁企业的实际生产和设备情况,建立了供氧系统优化运行模型,及通过运用多库协同机制以实现数据分析、知识推理、模型运算和决策支持。实践证明了该系统可通过生产计划和实际运行参数数据,对用户氧、氮、氩的需求进行预测,从而可对氧气的生产、储存及使用等环节进行安排,并给出安全、合理的专家决策,以实现氧气的合理利用。

实践证明,此氧气合理利用决策支持系统可解决实际生产中氧气调度出现的各种问题,并能够给出合理运行对策,具有全面的定性和定量的调度生产能力。该系统的投入使用也使得该企业的氧气放散率下降了 5%~7%,有效地降低了能源的消耗和浪费。当然此系统还需进一步的完善和提高,以适应更多特殊工况和特殊目标的优化。

文献[6]是从氧气的发生、储存和使用方面分析了氧气的放散原因;文献[7]是研究氧气成本与各个经济指标之间的关系,探讨了制氧系统经济运行方案的选择;文献[8]采用了大规模的混合整数规划数学模型,利用拉格朗日松弛法进行了求解,在满足用户的条件下,优化生产任务分配,使得总电耗最小。这些研究为减少氧气放散提供了十分

有益的方法。然而,上述研究没有涉及到氧气的动态变化过程,也没有考虑到控制决策和均衡用氧决策问题,文献[9]便是从针对氧气的动态变化过程,建立了氧气系统动态数学模型,并运用 Matlab 软件中的 simulink 组件进行了氧气系统的动态仿真,最后建立了氧气系统的决策模型。作为 MATLAB 的重要组成部分, simulink 具有相对独立的功能和使用方法。确切地说,它是对动态系统进行建模、仿真和分析的一个软件包。它支持线性和非线性系统、连续时间系统、离散时间系统、连续和离散混合系统,而且系统可以是多进程的。

从上面的研究现状分析可以看到,目前对氧气系统的决策大都是动态的,缺少对氧气生产能耗的经济性决策分析,即很少有对氧气与电耗之间构架经济性决策指标。这部分将作为节能的重点将会被越来越受重视。

1.3.2 氧气的预测和调度研究现状

对氧气系统的动态研究主要包括预测和调度两个方面。完善对氧气系统的预测和调度,可使企业减少氧气的放散,提高经济效益,达到“节能、环保、经济性”的综合目的。

1.3.2.1 氧气预测常用方法

预测是一门研究未来的科学。预测是根据一定事物的运动和变化规律,用科学的方法和手段对该事物的发展趋势和未来状态进行估量,作出定性或定量的评价。

各种预测理论已经广泛应用于经济、气候、工业等领域,但是运用各种预测理论对钢铁企业氧气用户的用量进行预测的研究却很少。不同的预测方法使用的场合不同,选择合适的预测方法是十分重要的。钢铁企业常用的能源介质的预测方法主要有:时间序列法、回归方程法、神经网络法等。

(1) 时间序列法

时间序列分析(Time series analysis)是概率统计学中的一个重要分支。它用概率统计方法,分析、研究随时间变化的随机数据序列,随机数据序列是随时间变化而彼此间又存在有某种统计关联的一组数列,通常称它们是动态数据或时间序列。时间序列分析所提供的动态数据处理内容包括:如何建立模型,怎样进行参数估计,进而作出最佳预测和控制等^[10]。

近 10 多年来,时间序列分析的理论与实际应用都在迅速发展。尤其是随着计算机的广泛使用,它已深入到国民经济及工业生产的各个领域,而且显示出巨大的生命力。目前,国内应用动态数据模型分析、处理数据正在兴起。

AR(p)模型是 ARMA(p, q)模型在 q=0 时的特例，是时域分析中的一种简单动态模型。在数理统计中，线性统计回归模型为：

$$y_t = \beta_1 X_{1t} + \beta_2 X_{2t} + \beta_3 X_{3t} + \cdots + \beta_n X_{nt} + \varepsilon_t \tag{1.1}$$
$$t = 1, 2, 3, \dots, N; \varepsilon_t \sim N(0, \sigma_t^2)$$

该式表示观测值 y_t 对于另一组观测值 $(X_{1t}, X_{2t}, \dots, X_{nt})$ 的相关性。

(2) 回归方程法

回归分析(Regression analysis)是一种应用广泛、理论性较强的定量预测方法。它的基本思路是分析预测对象与有关因素的相互联系，用适当的回归方程表达出来，然后再根据数学模型预测其未来状态，有较严密的理论基础和较成熟的计算分析方法^[11]。

按照自变量和因变量之间的关系类型，可分为线性回归分析和非线性回归分析。如果在回归分析中，只包括一个自变量和一个因变量，且二者的关系可用一条直线近似表示，这种回归分析称为一元线性回归分析。如果回归分析中包括两个或两个以上的自变量，且因变量和自变量之间是线性关系，则称为多元线性回归分析。

一元线性回归模型分析预测法是最常用的一种回归分析预测法。它是描述两个变量间相关关系的最简单的统计模型。由于它计算简便、数学模型简单、使用直观方便，在许多情况下，首先使用线性关系来描述两变量之间的相关关系。

(3) 神经网络法

神经网络(Neural network, NN)模仿了人类学习和对事物的预测能力，是一种并行处理模型。这种模型根据网络拓扑结构、节点特征和训练或学习规则的不同而变化。NN 用于神经网络调度主要有三类方式^[12]：

- ①.利用其并行计算能力，求解优化调度，以克服调度的 NP 难问题；
- ②.利用其学习能力，从优化轨迹中提取调度知识；
- ③.用NN来描述调度约束或调度策略，以实现对生产过程的可行或次优调度。

1.3.2.2 氧气预测的研究现状

上世纪七十年代随着各种预测理论的成熟，人们曾尝试着把它们应用到了氧气预测方面，后来由于能源紧张造成对能源科学管理的迫切要求，以及对准确和适应性强能源产消模型的需求，使得对氧气预测的重视程度越来越高。各种预测技术在国内外的应用有如下：

王立等人根据宝钢的氧气现状，建立了宝钢氧气决策支持系统，其中的氧氮氩预测模块便是利用时间序列 AR(p)自回归模型来预测用户的用量。结果表明 AR(p)自回归模

型简单实用，预测精度较高。

陈光等人根据氧气的生产、储存与使用的特点，通过建立氧气动态平衡模型，并运用 MATLAB 的 simulink 工具箱实现了对氧气的小时预测，预测效果显著，并通过了宝钢专家组的验收。

国内还有学者根据氧气用户使用的特点，采用基于时间序列（非影响因素）的人工神经网络方法，对氧气使用量进行了预测，对正常生产状态的预测效果较好，但对于生产波动较大时的预测误差较大。所以此氧气的预测方法还有待完善。

1.3.2.3 氧气优化调度常用方法

调度是指在一定的约束条件下，为特定的优化对象设计流程，并指定各任务在流程中的顺序和时间的安排过程。早在 20 世纪 50 年代，为了满足生产制造行业的生产计划和调度的需求，调度理论就已在应用数学中出现。

按调度方法的发展历程，可分为两大类：传统调度方法和基于人工智能技术的智能调度方法。传统调度方法主要包括：数学规划方法，启发式方法；智能调度方法是一种通过模仿人类解决问题的方法，主要方法有：专家系统、遗传算法、神经网络方法等。

（1） 数学规划方法

数学规划法（mathematical programming）在调度中被广泛应用，调度问题可以用整数规划法、混合整数规划法和动态规划法来描述^[13]。由于调度问题计算的复杂性使得这些方法的运用受到限制。随着新的技术、更强有力的启发式规则和现代计算机所提供的计算能力的发展，使得这些方法又焕发了活力。

（2） 启发式方法

启发式方法是指人在解决问题时所采取的一种根据经验规则进行发现的方法。其特点是在解决问题时，利用过去的经验，选择已经行之有效的办法，而不是系统地、以确定的步骤去寻求答案。针对优化调度问题，启发式方法基于调度规则对问题进行分解^[14-15]，通过在调度效果与计算时间之间做出折中，以较小的计算量获得近似最优解，效率高，实时性好。其缺点是算法的近似程度难以确定，不能保证调度方案的最优或近似最优。

（3） 专家系统

专家系统是一个智能计算机程序系统，其内部含有大量的某领域专家水平的知识与经验，能够利用人类专家的只是解决问题的方法来处理该领域的问题。调度知识的获取是专家系统方法发展的重要基础，而调度问题的复杂性则决定了调度知识难以获取，因此，需要研究高效的机器学习方法，来获取调度知识。在该方法中，概率论、模糊数学方法得到大量应用。

（4）神经网络方法

神经网络调度方法是根据神经网络的学习能力，对调度只是进行获取，其具有的并行处理能力可以提高算法的运行速度，满足实时调度的需求，目前对其的研究越来越多。

（5）遗传算法

遗传算法（Genetic Algorithm）是模拟达尔文生物进化轮的自然选择和遗传机理的生物进化过程的计算模型，是一种通过模拟自然进化过程的搜索最优解的方法。由于其对最优解的求解精度高，不易陷入局部解，所以遗传算法被用于调度的研究也越来越受重视。

1.3.2.4 氧气优化调度研究现状

目前，对调度算法的研究虽然很多，各种各样的调度算法不断被提出和改进，但這些方法大都被应用在煤气、电和水等能源介质调度的研究中。由于氧气系统生产与使用的独立性，不如其他能源介质系统那么复杂，所以很少有对氧气调度的深入研究。

东北大学的杨自厚教授早在上世纪 80 年代就建立了某钢铁厂氧气系统的日最优调度模型。由于当时计算机技术的欠缺，模型采用了两阶段算法和自建的一种新的拉格朗日松弛方法，并成功地解决了在计算机上对模型的求解，仿真计算结果表明了所给算法和模型的有效性。^[16]

北京科技大学的刘姿、王立等人，根据宝钢的氧气系统特性，利用数学规划方法建立了空分产品经济性模型，模型是对氧氮氩三种空分产品介质的综合调度处理，取得了很好的调度效果。^[17]

国外对氧气调度的研究甚少，Akimoto 等人曾提出 MILP 方法对液氧储罐的液位控制来保证用氧平衡^[18]；Jeong Hwan 等人建立了钢铁企业能源介质的神经网络调度方法，该方法同样可用于氧气的调度。^[19]

1.4 本文主要研究内容

从上文的研究现状分析来看，目前对氧气系统的研究大都是对系统的动态研究，确立合适的预测模型和优化模型，但是对氧气生产端等的静态配置的研究甚少，所以本文先是通过钢铁企业的氧气系统的特性进行分析；进而主要从氧气发生端对氧气系统进行静态决策，及对用户端的转炉用氧进行了动态决策分析；接着从动态优化模型出发，建立了氧气的预测模型和优化分配模型，并对模型进行了求解和实例分析。

本文各章节主要内容为：

第一章，介绍了课题的研究背景和意义，以及钢铁企业氧气系统的研究现状，分析

了目前研究取得的成就以及研究缺口。

第二章，从氧气的发生、储存及输送、用户以及放散方面，对钢铁企业氧气系统的特性进行了分析。同时，对氧气系统特性的分析也为第三章和第四章的内容奠定了基础。

第三章，主要是针对 1000 万吨级企业，通过对氧气发生端的静态分析和用户端的动态分析，分别建立了氧气系统新的决策指标。并用新指标分别对制氧机组是否大型化、制氧流程的选择以及制氧纯度的选择等进行了经济性决策分析，及对用氧方案进行了评价分析。最后以首钢京唐为例，对指标进行了应用及分析。

第四章，针对首钢京唐公司，进行了氧气优化管理模型的研究，这包括建立氧气用量预测模型及优化分配模型。氧气用量预测模型采用了人工神经网络（BP 网络）原理建立，优化分配模型是针对正常生产状态、高炉休风以及空分停机三种情况分别建立。最后，借助 MATLAB 工具对模型进行了求解和实例分析。结果表明，模型具有很好的优化效果和节能效果。此章为动态建模分析。

第五章，本章为结论，对本文所做工作进行了总结及研究展望。

第 2 章 钢铁企业氧气系统特性分析

2.1 氧气系统的组成

氧气系统的组成包括氧气发生系统、储存系统和使用系统（用户），见下图：

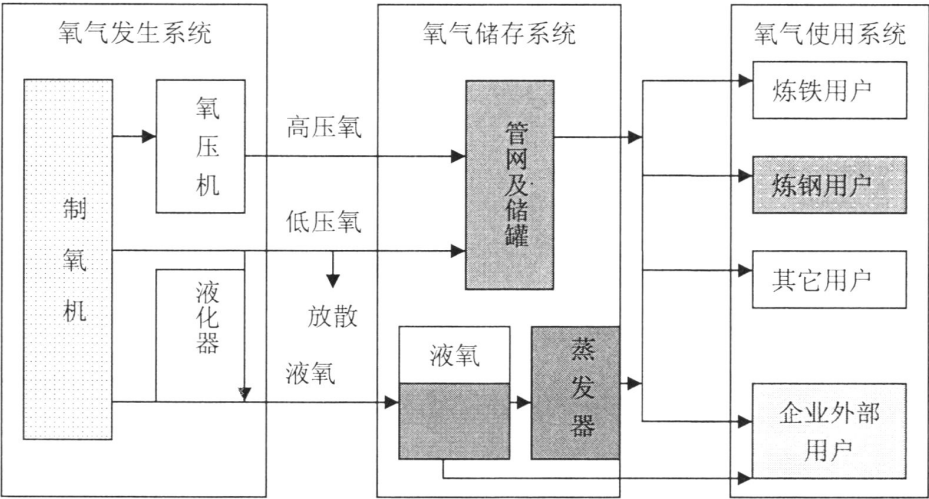


图 2.1 氧气系统结构简图

Fig. 2.1 The production flows graph of oxygen system

氧气发生系统主要设备有：制氧机、氧压机、押送设备，氧气储存系统主要设备有储气罐、管网以及一些液氧储罐和液化装置等。在钢铁企业中氧气的主要用户是炼铁厂和炼钢厂，其中，炼铁厂用于高炉富氧，炼钢厂用于炼钢吹炼，此外还存在一些用量较小的小用户。多余的液氧通常以外卖的方式为企业带来利润。

2.2 氧气系统特性分析

钢铁企业的氧气系统具有如下的工作特点^[20]：

- （1） 集合性——氧气系统由氧气发生系统、储存系统和使用系统集合而成。每个系统又有许多独立的工作单元，这些单元按一定的方式组合起来完成各系统的功能。
- （2） 相关性——三个系统相互关联、相互作用、相互影响，三者的有效协调和密切配合实现氧气系统高效率运转。
- （3） 目的性——满足各工序对氧气的需求。

2.2.1 氧气发生系统特性

2.2.1.1 空气分离技术

氧气的制取过程实质上是空气的分离过程，即空分，它是利用空气中各组分物理性质（体积比、沸点、临界温度、临界压力等）的不同，采用深度冷冻、吸附、膜分离等方法从空气中分离氧气、氮气，或同时提取氩气、氦气等稀有气体的过程。

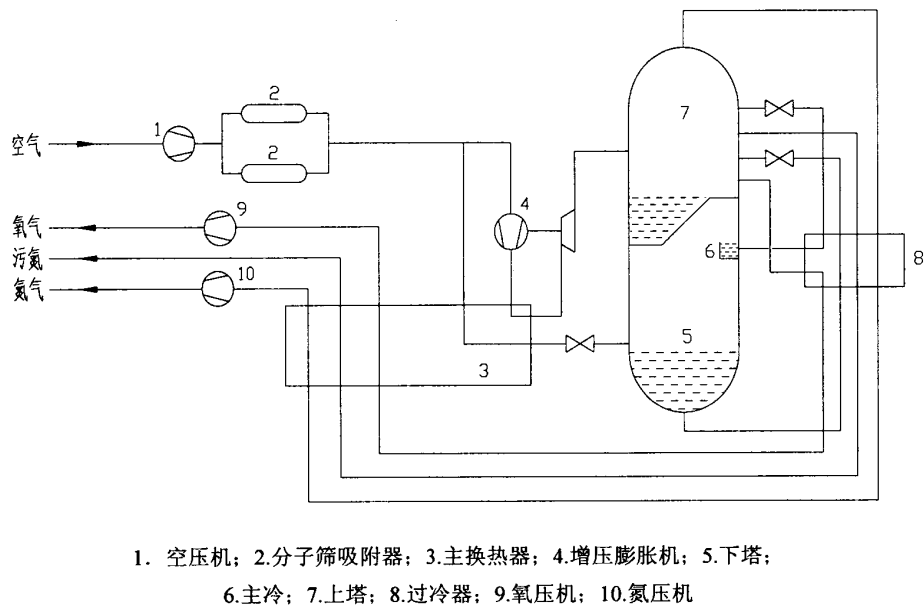


图 2.2 深冷法空分流程图
Fig. 2.2 The cryogenic air separation flow chart

空气分离最常用的方法是深度冷冻法，即深冷法。图 2.2 为外压缩深冷法空分流程。整个流程由空气压缩及净化、空气分离、液氮气化组成^[21~23]。

(1) 空气压缩及净化

空气经过空气过滤器清除灰尘和机械杂质后进入空气压缩机，压缩至所需压力，然后送入空气冷却器，降低空气温度，再进入空气干燥净化器，除去空气中的水分、二氧化碳、乙炔及其它碳氢化合物。

(2) 空气分离

净化后的空气进入空气分离塔中的主换热器，被反流气体（产品氮气、废气）冷却至饱和温度，送入精馏塔地步，在塔顶得到氮气，液空经节流后送入冷凝蒸发器蒸发，同时冷凝由精馏塔送来的部分氮气，冷凝后的液氮一部分作为精馏塔的回流液，另一部分作为液氮产品出空分塔。^[24]由冷凝蒸发器出来的废气经主换热器复热到约 130K 进膨

胀机膨胀制冷为空分塔提供冷量，膨胀后的气体一部分作为分子筛的再生和吹冷用，然后经消音器排入大气。

(3) 液氮汽化

由空分塔出来的液氮进液氮储槽储存，当空分设备检修时，储槽内的液氮进入汽化器被加热后，送入产品氮气管道。

此方法可以值得氧、氮与稀有气体，所得气体产品的纯度可达 98%~99%。此外，还采用分子筛吸附法分离空气，后者用于制取含氧 70%~80%的富氧空气。近年来，有些国家还开发了固体膜分离空气的技术。

2.2.1.2 制氧机氧气发生量

制氧厂是钢铁企业氧气的生产单位，制氧机组及其附件组成了氧气的发生系统，而在氧气生产系统中，各制氧机的生产能力、状态和性能均有一定的差别，这也就是的发生系统具有不同的特性，即使得氧气的发生量不同。

氧气的发生量等于各制氧机制氧量的总和。

t 时刻各制氧机氧气的发生量为：

$$G_{out}(t) = \sum_{i=1}^k Out_i(t) \quad (2.1)$$

T 时间段内，氧气发生累计量为：

$$TG_{out}(t) = \int_0^t G_{out}(t) dt \quad (2.2)$$

式中， $Out_i(t)$ ——单台制氧机 t 时刻的氧气发生量， m^3/h ；

k —— t 时刻正常工作的制氧机台数。

在实际生产中，氧气的发生量常采用 PID（proportional-integral-derivative;比例—积分—微分）调节器来进行调节。^[22]通过 PID 调节器和执行器对氧气发生量进行反馈控制，即 $Out_i(t)$ 值在不断变化。理想的 PID 控制如下式^[23]：

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (2.3)$$

式中， K_p ——比例系数；

T_i ——积分时间常数；

T_d ——微分时间常数。

氧气发生量控制系统为线性系统^[24]，则用式 2.3 的 PID 调节规律来模拟 $Out_i(t)$ 的变化规律如下：

$$Out_i(t) = Out_i(t_0) + K_s K_c (e + \frac{1}{T_I} \int e dt + T_D \frac{de}{dt}) \quad (2.4)$$

式中, t_0 ——初始时间

K_s ——系统特性系数;

K_c ——调节器放大系数;

e ——测量值与实际值的偏差;

T_I ——微分时间常数;

T_D ——积分时间常数。

可见, 根据上面的分析, 可以很好的确定氧气发生系统的实时氧气发生量。

2.2.2 氧气存储与输送系统特性

氧气系统的存储与输送主要是由氧气罐、液氧罐及管网组成的。

氧气是不易保存的气体, 由于系统的供需不平衡, 多生产的一部分氧气常以常温中压的形式被储存在液氧罐中, 以备在用氧负荷增大时削峰填谷, 从而维持管网的压力, 以保证钢铁的正常冶炼, 不至于断氧而使得铁水和钢液在炉子中冷却, 造成炉子报废。如果在极限压力下, 所有的球罐、液体灌都已充满, 还存在富余的氧气只能放散, 造成损失。

(1) 管网系统存储量

管网系统主要包括管网和氧气罐, 在整个系统中起到输送和缓冲氧气的功能, 其缓冲能力取决于管网系统的储存量。 t 时刻管网系统的氧气储存量可以由气体状态方程计算得, 即:

$$Store(t) = p(t)V(t) \times 22.4 / (R_m T(t)) \quad (2.5)$$

式中, $Store(t)$ ——标准状态下氧气的储存量, m^3 ;

$p(t)$ —— t 时刻官网的压力, Pa;

$V(t)$ —— t 时刻管网和球罐储存的氧气体积, m^3 ;

R_m ——通用气体常数, $8314.3J/kmol \cdot K$;

$T(t)$ —— t 时刻氧气的绝对温度, K。

根据上式可以计算任意时刻管网系统的氧气储存量, 可为氧气系统的实时调控作参考。

(2) 液氧罐及液氧蒸发量

液氧罐储存的液氧主要用于紧急情况的氧气供应, 例如, 当制氧机出现故障时, 可

以启动液氧蒸发装置来确保氧气的供应。通常，液氧罐储存的氧气可供炼铁厂连续使用 2~3 天^[25]。液氧储量可通过对液氧罐液位监视得到。

液氧蒸发装置是通过加热将液氧蒸发为气氧，然后送入中压常温管网。在这个过程中，停车及启动的 20 分钟内不能向管网送气；正常时横向生产。

$$LG_{O_2}(t) = \begin{cases} L_1 & t \in T_N \\ 0 & t \in T_{ss} \end{cases} \quad (2.6)$$

式中， $LG_{O_2}(t)$ —— t 时刻液氧的蒸发量， m^3/h ；

L_1 ——液氧蒸发器正常工作时段液氧蒸发量， m^3/h ；

T_N ——蒸发器正常蒸发时段；

T_{ss} ——蒸发器停车及启动时段。

通常，在氧气储存系统中，管网、储气罐及液氧罐的储存能力都会影响氧气的放散。储存能力越大以及液氧蒸发器的蒸发速度越快，则对氧气的瞬时不平衡的缓冲效果就越好，从而使放散率降低。因此，做好氧气储存系统的实时监控变得尤为重要。

2.2.3 氧气用户用氧特性

现代国际钢铁工业常采用长流程工艺，即铁矿石→高炉→铁水预处理→转炉→炉后精炼→连铸→连轧，国内的大型钢厂也都采用这个流程，如包钢、首钢等。在长流程中，炼铁高炉和炼钢转炉是氧气的主要用户，其用氧量大概分别占总氧量的 45%、50%^[26]。

下面对钢铁企业的用氧用户的用氧特性进行分析。

2.2.3.1 高炉用氧特性分析

炼铁厂的高炉采用富氧鼓风可显著地降低焦比，提高产量。通常富氧鼓风的富氧浓度为 24%~25%，据统计，高炉古风的含氧浓度提高 1%，其铁的产量可以提高 4%~6%，焦比可降低 5%~6%。

高炉用氧一般为连续用氧用户。但在高炉休风时，高炉的用氧量会发生变化，一般呈斜坡变化^[27]，这对氧气的平衡影响较大。

高炉的用氧状态通常可以分为如下 4 种：

- 1) 正常生产状态，高炉用氧量为常数；
- 2) 从正常状态到修风状态，此时，用氧量不断减少，可用负斜坡函数表示；
- 3) 修风状态，用氧量为 0；
- 4) 从修风状态到正常状态，此时，用氧量不断增加，可用正斜坡函数表示。

由此， t 时刻高炉用氧量为：

$$Iuse(t)=\begin{cases} I & \text{正常状态} \\ I-b_1t & \text{正常到休风过程} \\ 0 & \text{休风状态} \\ b_2t & \text{休风到正常过程} \end{cases} \quad (2.7)$$

对于多台高炉的总用氧量为：

$$ITuse(t)=\sum_{i=1}^m Iuse(t)_i \quad (2.8)$$

T 时间段，高炉的累计用氧量为：

$$TITuse(t)=\int ITuse(t)dt \quad (2.9)$$

式中， $Iuse(t)$ —— t 时刻高炉用氧量， m^3/h ；

I ——正常状态高炉用氧量， m^3/h ；

b_1 、 b_2 ——斜坡函数斜率；

m ——高炉个数。

实际上，在生产过程中，除计划检修外，高炉的临时修风情况很少，高炉通常都处在正常工作状态。

2.2.3.2 转炉用氧特性分析

转炉炼钢是钢铁企业的用氧最大用户，其耗氧量一般超过企业总耗氧量的 50%，其次，它的用氧规律也会对氧气平衡和氧气放散产生很大影响。

氧气顶吹转炉炼钢是当今效率最高的炼钢方法之一，转炉吹氧的过程是：正常生产时，氧枪由等待点开始下降，先后经过变速点、开关氧点，再到吹炼点停止，进行吹炼。吹炼一段时间后，氧枪提到等待点，并根据倒炉取样的化验结果来决定是否需要补吹。至此，直至吹炼结束，完成一个冶炼周期。大型氧气顶吹转炉的平均冶炼周期通常为 24~28min，^[28]为达到这样的效率，要求氧气系统必须提供充足的氧气、氮气、氩气。

表 2.1 是转炉炼钢每吨钢耗氧量及冶炼周期的设计值与实际值的比较。

表 2.1 转炉吨钢耗氧量和冶炼周期

Table 2.1 Converter oxygen consumption of per ton of steel and smelting cycle

项 目		设计值	实际值
25~80t 小、中型转炉	每 1t 钢耗氧/ m^3	61~65	70~80
	冶炼周期/min	30~40	23~25
100t 以上大型转炉	每 1t 钢耗氧/ m^3	≤ 55	60~65
	冶炼周期/min	≥ 40	24~28

如上分析，转炉炼钢用氧是周期性的。如图 2.3 所示，是根据首钢京唐公司某 300t 转炉实际生产中的用氧数据绘制的用氧量随时间的变化曲线图。

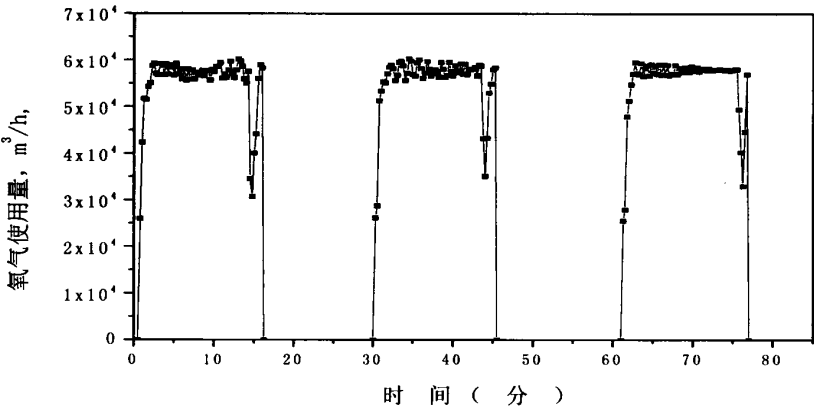


图 2.3 300t 转炉的用氧量随时间变化规律图

Fig. 2.3 The oxygen flow flux with time of the 300 ton convertor

由图 2.3 可以看出，在吹炼期内用氧量在很小的范围内波动，转炉吹炼用氧随时间的变化可近似看为矩形波。以吹炼期用氧量的均值作为矩形波的振幅（常数），则通过用实际数据与该振幅相比较，^[29]进行统计计算，结果表明实际值与近似值的差距很小，不超过 2%，每个吹炼的时间波动也很小，不超过 2.1%。可见，将吹炼过程近似成矩形波是可行的。

通常，转炉的一个生产周期可分为吹炼、非吹炼和等候三个阶段。生产有时候会受随机事件的影响而使等候时间不定，导致周期的相位出现分段延时的现象。这也就是说，相邻两次吹炼的时间间隔不一定相同。由此， t 时刻转炉炼钢用氧量可表示成分段延时的矩形波函数：

$$Suse(t) = \begin{cases} S & (t_k + (n-1)\alpha) \leq t \leq (t_k + (n-1)\alpha + \alpha\eta) \text{ 且 } (t \notin [t_s, t_l]) \\ 0 & (t_k + (n-1)\alpha + \eta\alpha) \leq t \leq (t_k + n\alpha) \text{ 或 } (t \in [t_s, t_l]) \end{cases} \quad (2.10)$$

式中， $Suse(t)$ —— t 时刻炼钢用氧量， m^3/h ；

S ——吹炼状态氧气流量， m^3/h ；

t_k ——延时时间， h ；

α ——一个周期时长， h ；

n ——周期序数；

η ——一个周期内，吹炼时长占周期市场的比例；

t_s 、 t_l ——分别为无等候生产的结束时间和再开始时间， h 。

对于多台转炉，炼钢总用氧量为：

$$STuse(t) = \sum_{i=1}^m Suse(t)_i \quad (2.11)$$

则 T 时段的累计用氧量为:

$$TSTuse(t) = \int_0^t STuse(t)dt \quad (2.12)$$

由于炼铁和连铸等环节的影响,导致炼钢生产节奏不稳定,炼钢生产作业计划不易确定,但我们能够确定一定时间段内(如几小时或几天)的作业计划。因此,对一定时间段的氧气分析和决策是完全可能的。

2.3 氧气放散特性分析

2.3.1 氧气放散率指标

氧气放散率是指制氧机生产的氧(气氧和液氧)产品中未被利用而被放空的比例。氧气放散率 ϕ_{fs} 表达式可按扣除利用的部分计算,如下:[30]

$$\phi_{fs} = 1 - (V'_{qo} + V'_{yo} + V'_c) / (V_{qo} + V_{yo}) \quad (2.13)$$

式中, V_{qo} 、 V_{yo} ——气氧和液氧的产量;

V'_{qo} 、 V'_{yo} ——气氧和液氧的使用量

V'_c ——氧产品的储存增量

氧气放散率可以很直观的反应钢铁企业的氧气利用情况,所以一直被当做氧气利用情况的重要指标。

2.3.2 氧气放散的原因

根据上面对氧气发生、储存与运输、使用的分析,由氧气平衡,可以建立氧气动态平衡方程:

$$Release(t) = Gout(t) + LG_{O_2}(t) - STuse(t) - ITuse(t) - C_o - \frac{d(Store(t))}{dt} \quad (2.14)$$

式中, C_o ——除高炉、转炉外的其他小用户的氧气使用量。

T 时段累积的氧气平衡方程为:

$$TRelease(t) = TGout(t) + TLG_{O_2}(t) - TSTuse(t) - TITuse(t) - T \cdot C_o - Store(t) \quad (2.15)$$

$$TRelease(t) = \int_0^t Release(t) \quad (2.16)$$

式中, $Release(t)$ 、 $TRelease(t)$ 分别为 t 时刻放散量和 T 时段累计放散量。

由式(2.14)和式(2.15)可以看出, 氧气的放散量与制氧机的生产状态、生产能力、PID 控制参数、液氧罐工作状态和供应速度、炼铁和炼钢的生产节奏和模式、以及管网的压力、体积、温度等参数有关。根据上面的分析, 可以直观的反应并计算氧气的放散量。再由式(2.13), 可得 T 时段氧气放散率:

$$T\phi_{fs} = 1 - \frac{TSTuse(t) + TITuse(t) + T \cdot C_o + Store(t)}{TGout(t) + TLG_{O_2}(t)} \quad (2.17)$$

构成氧气系统的发生、输送和储存及用户这三个子系统的设备特点、结构特点、工作特点等均会影响氧气放散率。分析如下:

(1) 氧气发生系统

氧气发生系统中, 对氧气放散率影响较大的是制氧机的生产能力、控制模式调节能力和调节速度等因素。^[31-35]通常, 单台制氧机的能力越大, 其氧气放散率越高; 制氧机的控制模式对放散率也有影响, 对控制模式的改进可以对氧气进行预控制, 减少放散; 此外, 受工艺和技术条件的限制, 也会导致制氧机的调节能力和调节速度缓慢, 从而导致放散率增大。

(2) 氧气输送和储存系统

氧气输送和储存系统中, 管网、氧气罐和液氧罐作为储存设备, 同时也是氧气的缓冲系统, 其缓冲能力会影响氧气的放散。储存能力越大, 则对氧气的缓冲能力越大, 从而对于较大的用氧波动有很好的调节能力。由于受成本和占地面积等因素的约束, 缓冲系统的缓冲效果往往不理想, 从而造成氧气放散。

(3) 氧气使用系统

氧气使用系统包含众多氧气用户。氧气的使用是动态的, 氧气放散率取决于总用氧量的均衡程度。转炉作为氧气的最大用户, 由于其用氧的周期性, 特别在转炉个数较少, 单台转炉容量较大的情况下, 氧气使用的不均衡度较大, 极易造成很大的放散。同时, 由于转炉生产中常受到设备、原料、铁水供应等因素的影响, 往往不能够按计划时间进行吹炼, 这些波动因素, 都会造成氧气的放散。

除此之外, 氧气缓冲用户不足、计划检修、故障检修等也是影响氧气放散的因素。

2.3.3 降低氧气放散率的措施

由于造成氧气放散的原因不一, 所以企业对降低氧气放散率的问题都是根据自身情况, 采取相应的措施。降低氧气放散率的措施大概可归纳如下:

（1） 增加氧气可调用户

可以通过增加液化器的液化能力，以增加氧气、氮气的液体生产能力。液体产品储量的增加可以提高系统的调峰能力，同时还可以促进液体的外销，为企业带来利益。例如，宝钢公司 2008 年的液氧、液氮、液氩的外销达 1.6 亿元。^[36]

此外，还可以发展高炉热风炉富氧富氧燃烧等技术，利用这些技术不仅提高了热风炉的炉温，增加了热风炉对低热值煤气的利用，同时热风炉富氧也可作为氧气的缓冲调节用户，称为降低氧气放散的主要调峰用户之一。

（2） 建立氧气长距离输送管网

氧气长距离输送管网可以增加氧气的缓冲量和缓冲时间，以减少放散。例如，早在 2002 年，国内的宝钢分公司至不锈钢分公司氧气、氮气、氩气管网就以投入运行，是国内第一个实现氧气长距离输送的公司。用户的增加和系统缓冲能力的增加，对降低氧气放散起着积极的促进作用。国际上，北美氧气管网和欧洲跨国氧气供应网络均实现了氧气放散率基本为 0。^[37]

（3） 完善能源中心的信息沟通

钢铁企业基本都建立了自己的能源中心，可通过采集分析每天的氧气用户的使用计划以及制氧机的生产状况，及时对氧气的供应进行调整。

除上面的分析之外，还有许多降低氧气放散率的措施。每个企业引起氧气放散的原因都不一样，所以企业都应根据自己的具体情况安排生产，采取相应的措施。

第 3 章 氧气系统决策分析

制氧站是钢铁企业的耗能大户，其电能消耗约占整个企业电耗的 1/7，一方面，随着钢铁行业的发展，产量规模的扩大，及先进制氧技术和设备的发展，制氧机组也出现的大型化的趋势，同时，空分流程、空分产品纯度等也是影响空分系统经济性的重要因素，这就需建立氧气生产与电耗之间的决策指标；另一方面，如第二章分析，用户端转炉用氧的波动性引起有很大的放散，这也需要对用氧状况确立评价指标。对氧气系统的决策主要就是根据建立的指标进行的。

本章就针对 1000 万吨规模的钢铁企业，对其氧气发生端建立经济性决策指标，对其用户端建立用氧评价指标。并根据建立的指标，分析首钢京唐公司氧气系统的配置，提出改进方案并评价，以及对其均衡用氧度进行了计算和分析。

3.1 氧气生产端决策指标

此节分别依据氧气系统生产端存在的：1) 机组大型化电耗与放散的矛盾；2) 内外压缩流程液体产品收益与电耗的矛盾；3) 空分产品纯度与电耗的矛盾，这 3 个方面建立了相对综合电耗、产品综合经济效益、制氧相对电耗这 3 个评价与决策指标，并进行了分析。

3.1.1 氧气相对综合电耗

随着钢铁工业的发展和规模的扩大，钢铁企业对氧气的需求量也大大增加，先进的制氧技术、设备和管理手段的成熟也越来越使制氧机组趋向大型化，宝钢、首钢京唐等企业都先后建立 60000Nm³/h 以上的机组，其中首钢京唐曹妃甸建立了两套 75000Nm³/h 制氧机组。^[38]综合来说，机组的大型化可以降低氧气生产成本，但同时也会带来放散量的增大，这就是氧气的综合成本无法合理确定，所以需要对大型机组确立评价指标。

常用的制氧技术经济指标通常为氧气单位电耗、氧气放散率、氧气利用率等。上面的这些指标，只能单一独立的从氧气的发生端体现氧气系统的经济性，所以需要引入一个新指标可以整体的体现系统的经济性，此处定义新的评价指标，即氧气相对综合电耗。

$$P_{re} = \frac{P_m + P_s + P_0}{G_{O_2} - F_{re}} \quad (3.1)$$

式中， P_{re} ——为氧气相对综合电耗；

P_m ——制氧单位电耗；

P_s ——送氧电耗；

P_0 ——其它电耗；

G_{O_2} ——总制氧量；

F_{re} ——氧气放散量。

由公式可以看出，对于以往的“小机组，多台套”配置方法， P_m 、 P_s 、 P_0 较大， F_{re} 较小；对于大型机组配置， P_m 、 P_s 、 P_0 较小， F_{re} 较大。所以，可以根据相对氧气综合电耗来评价企业的制氧机的经济性。

3.1.2 产品综合经济效益

内压缩流程和外压缩流程是现在空分常用的两种流程，两种流程在电力消耗、液体产量、设备投资等方面存在很大差异。通常，内压缩流程的制氧机的空分氧气单耗要大于外压缩流程制氧机的氧气单耗，但这只是基于单独计算氧气产量，而未将液氧、液氮等其他空分副产品的效益计算在内而得出的结论（通常内压缩流程的液体产品产量大于外压缩流程）。所以，只考虑流程的单耗，而不考虑液体产品的增值等方面，是不全面的。下文将综合比较两种流程，并确立综合经济效益的比较。

内压缩的设备投资大于外压缩的设备投资：

$$E_2 = (1 + \alpha)E_1, \alpha > 0 \quad (3.2)$$

内压缩的能耗（电耗）大于外压缩的能耗：

$$H_2 = (1 + \beta)H_1, \beta > 0 \quad (3.3)$$

可见，通常内压缩流程的投资和能耗要大于外压缩流程，但是内压缩流程同样能带来多余的收入效益。

当考虑在相同的氧气产量的条件下，内压缩流程的液体产量通常大于外压缩流程的液体产量：

$$L_{O_2,2} > L_{O_2,1}, L_{N_2,2} > L_{N_2,1}, L_{Ar,2} > L_{Ar,1}$$

设液氧、液氮、液氩的外销价格分别为： K_S 、 L_S 、 M_S ，单位为元/t。

内压缩流程与外压缩流程的产品综合经济效益为：

$$E_p = (L_{O_2,2} - L_{O_2,1})K_S + (L_{N_2,2} - L_{N_2,1})L_S + (L_{Ar,2} - L_{Ar,1})M_S - (H_2 - H_1)C \quad (3.4)$$

其中， C 为电价，元/（kW·h）

取两种流程下的氧气产量相同，且均在设计工况下运行，运行参数见表 3.1。^[39]

表 3.1 75000m³ 制氧机运行参数

Table 3.1 Oprating parameters of 75000m ³ oxygen generator		
流程	内压缩流程	外压缩流程
电耗（kW·h）	52000 (增压机、液氧泵)	51000 (氧压机)
液氧产量（m ³ /h）	2.85	2.55
液氮产量（m ³ /h）	2.5	2.2
液氩产量（m ³ /h）	1.6	1.45

由上表可见，内压缩流程制氧机每小时多耗电 1000kW·h，在相同的氧气产量下，内压缩流程制氧机比外压缩流程制氧机每小时要多产 0.3m³ 的液氧、0.3m³ 的液氮和 0.2m³ 的液氩，折合多产 0.342t 液氧、0.243t 液氮和 0.28t 液氩。取该厂的内部电价为 0.5 元/kW·h，液氧、液氮、液氩的外卖价格分别为 740 元/t、650 元/t、2400 元/t。以每年 8520 小时计算，则其全年的产品综合经济效益增加为：

$$E = ((0.342 \times 740 + 0.243 \times 650 + 0.28 \times 2400) - 1000 \times 0.5) \times 8520 \text{ 元}$$
$$= 496.74 \text{ 万元}$$

与之相对，若不考虑液体产品含量的增加，将 1000kW·h 的电耗分摊到 75000m³ 的氧气产量上，则制氧机的氧气单耗要增加 0.013kW·h/m³，约高 1.5%。

对于设备投资和收益的关系，可以引入净现值^[40]公式进行计算。净现值是把各年的收入与支出，按投资收益率折现后与初始投资现值相减的差值，公式如下：

$$NPV = C \cdot T \cdot \frac{1+P}{1+R} \cdot \frac{1 - (\frac{1+P}{1+R})^N}{1 - \frac{1+P}{1+R}} \tag{3.5}$$

式中， NPV —净现值；

C —电费，主要评估参数，元/kW·h；

T —装置的运转时间，h/年；

P —年通货膨胀率，（小数）；

R —年收益率，（小数）；

N —可使用年限，年。

针对上面的例子，进行下面的计算，这里设定：电费 $C=0.5$ 元/kW·h；装置运转时间 $T=8520$ h/年；年收益率 $R=10\%$ ；年通货膨胀率 $P=3\%$ （由于我国不公开，这里是假定值）；可使用时间 $N=20$ 年，代入式(3.9)可得：

$$NPV = 0.5 \times 8520 \times \frac{1+0.03}{1+0.1} \times \frac{1 - (\frac{1+0.3}{1+0.1})^{10}}{1 - \frac{1+0.3}{1+0.1}} = 30204 \text{元}$$

(3.6)

这就是说，为了每小时节省 1 kW 的电，一次投资增加额在 30204 元以下是合理的。也可这样来考虑这个问题：1 kW·h 的电 0.5 元，一年 8520h 的电费为 0.5×8520=4260 元，按设备使用 10 年，这增加的 1kW·h 的电 10 年的电费为 4260×10=42600 元，42600-30204=12396 元是因投资而相应得到的净收入。

对于这个公式，不同的地方可以根据自己的具体情况进行计算判断。有公式可以看出，电费、年运转时间、年通货膨胀率、使用年限的增加，都会使 NPV 值增加，而年收益率期望值越高，NPV 值越低。其实，做一个 10 年收益率期望值与一次投资和电费差值的逐年计算表或贷款之与电费差值的还款付息表，也可得到大致相同的结论，但是没有上述公式直观。

从以上的经济性分析可以看到，不同的流程有不同的特点、不同的投资和不同的运行费用。由于不同流程对液体产品的产量影响很大，因此，液体产量也应作为投入产出分析的一个重要变量参与分析。^[41]面对不同的流程，不存在某种流程是先进的，某种流程是落后的这种说法，凡是满足本企业需要、投资省、运行费用低、投入产出比好的流程就是最适合选择的先进流程。

3.1.3 制氧相对电耗

高炉炼铁和转炉炼钢作为氧气的主要用户，对于氧气纯度的需求也是不同，转炉用氧一般要求氧气纯度不低于 99.6% 的高纯度氧，而高炉富氧可以使用纯度较低的低纯氧，这时，纯度的改变，对制氧机的电耗会产生很大的影响。

3.1.3.1 制氧相对电耗的引入

为了分析纯度对制氧机电耗的影响，这里引入了制氧相对电耗。定义 99.6% 纯度氧气的相对电耗为 1，当纯度小于这个值时的相对电耗为 $\gamma (<1)$ 。对首钢京唐的 75000m³/h 制氧机所提供的生产不同纯度氧气的电耗如下表 3.2。

表 3.2 75000m³/h 制氧机生产不同纯度氧气电耗

Table 3.2 Power consumption of 75000m³/h oxygen generator producing different purity oxygen

氧气纯度	99.6%	98%	95%	90%
电耗 (kW·h)	37500	33710	32400	31575
相对电耗 (%)	100	89.9	86.4	84.2

通常，氧气纯度为 99.6%、98%、95%、90%时，相邻纯度的电耗可以认为呈线性变化的^[42]。由此，根据上表可以绘制氧气纯度与相对电耗的关系图，如下：

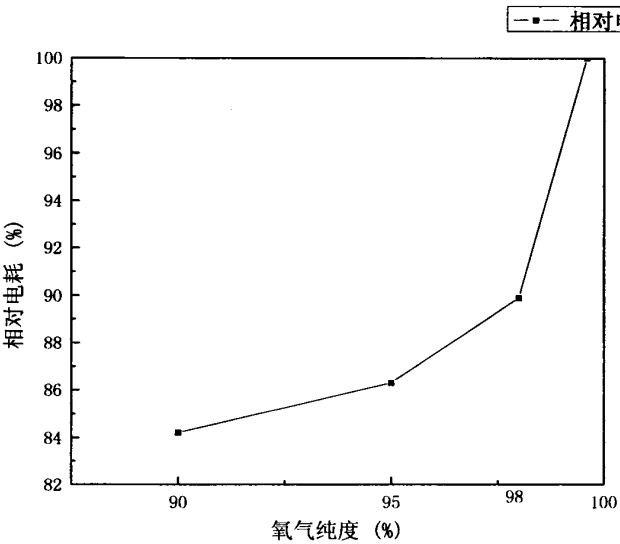


图 3.1 氧气纯度与相对电耗关系图

Fig. 3.1 The relative diagram of oxygen purity and power consumption

由上图表可以看出，氧气纯度从 99.6%下降到 98%时的能耗下降趋势明显，从 98%到 95%的下降趋势较缓，而从 95%到 90%的下降趋势则更缓。当纯度为 99.6%时的相对电耗为 1，则制取纯度为 98%的氧气相对电耗为 0.899，制取纯度为 95%、90%纯度氧气的相对电耗分别为 0.864 和 0.842。

对于高炉炼铁，氧气纯度越低，则富氧需要的气体量就越大。假定富氧需要 99.6%纯度的氧气 1m³,则需要 98%纯度氧气 1.016m³,95%纯度氧气 1.048m³，90%纯度氧气 1.107m³。无论是鼓风机机前富氧还是机后富氧，氧气都需要加压，而加压机功率跟气体量成正比，即气体量越大，能耗就越大。若加压 99.6%纯度氧气的加压功率系数为 1，则加压 98%、95%和 90%纯度氧气的加压功率系数分别为 1.016、1.048 和 1.107。

定义如下参数：氧气纯度 β ，富氧相对体积 V_m ，制氧相对电耗 γ ，加压机功率系数 ω_m ，制氧压氧综合能耗系数 α 。同样定义 99.6%纯度氧气的相对电耗、氧压机加压功率都为 1，则：

$$V_m = 0.996 / \beta \tag{3.7}$$

$$\omega_m = V_m \tag{3.8}$$

$$\alpha = \gamma \cdot \omega_m \tag{3.9}$$

对于上例，98%纯度氧气的 $\alpha = 0.899 \times 1.016 = 0.9134$

95%纯度氧气的 $\alpha = 0.864 \times 1.048 = 0.9054$;

90%纯度氧气的 $\alpha = 0.842 \times 1.107 = 0.9321$ 。

设钢厂高炉年产量为 M ，对于 99.6%纯度氧气，吨铁耗氧量为 $V_{O_2,m}$ ，全年制氧电耗 P_m ，压氧电耗 P_s ，则全年用氧量为：

$$M \cdot V_{O_2,m} \quad (3.10)$$

全年制氧压氧总电费为：

$$C \cdot (P_m + P_s) \cdot \gamma \cdot \omega_m \quad (3.11)$$

现以某假设 1000 万吨钢铁企业的大型高炉富氧系统为例计算：高炉年产 1000 万吨铁，假设每吨铁富氧耗纯度为 99.6%氧气约 33.2m^3 ，制纯氧电耗为 $0.484\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ，氧压机压纯氧电耗为 $0.12\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ，电价按 0.5 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ 进行计算：

1) 若使用 99.6%纯度氧气富氧，计算结果如下：

全年用氧： $33.2 \times 1000 \times 10^4 = 33200 \times 10^4\text{m}^3$

电耗： $33200 \times 10^4 \times (0.484 + 0.12) = 20052.8 \times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{a}$

需要电费： $20052.8 \times 10^4 \times 0.5 = 10026.4 \times 10^4\text{ 元/a}$

2) 若使用 95%纯度氧气富氧，计算结果如下：

需要电费： $10026.4 \times 10^4 \times 0.9054 = 9077.9 \times 10^4\text{ 元/a}$

3) 若使用 90%纯度氧气富氧，计算结果如下：

需要电费： $10026.4 \times 10^4 \times 0.9321 = 9345.6 \times 10^4\text{ 元/a}$

从以上计算结果可以看出：(1) 高炉若使用 95%纯度氧气代替 99.6%纯度氧气，年电费可节约 948.5 万元，折合吨铁成本降低约 0.949 元；(2) 高炉若使用 90%纯度氧气代替 99.6%纯度氧气，年电费可节约 680.8 万元，折合吨铁成本降低约 0.681 元。

如上分析，仅从制氧、压氧电耗方面来看，高炉采用低纯度氧气能降低成本，而低纯度中又以 95%纯度更具优势。

3.1.3.2 制氧机组纯度配置分析

从上面的分析可以看出，高炉富氧可以采用高纯度和低纯度两种氧气，只是采用低纯度氧气更节能，而转炉又必须采用高纯度氧气，这就给制氧机组的配置带来一系列问题，是从操作简单、互换性好而全部选用高纯度制氧机，还是从节能、投资角度出发而选择两种制氧机？由于两者都有优缺点，所以需要做多方案的分析比较。

下面以某一设定钢铁企业的制氧机组配置进行比较。设定该企业高炉需要氧气

（99.6%纯度）约 35000m³/h、转炉等用户需要氧气（99.6%纯度）约 37000 m³/h，初步分析制氧机配置方案可以有以下几种：

方案一：2×36000 m³/h 全高纯（纯度为 99.6%）制氧机组。

方案二：1×37000m³/h 低纯（纯度为 95%）+1×37000 高纯 m³/h（纯度为 99.6%）制氧机组。

方案三：1×72000m³/h 全高纯（纯度为 99.6%）制氧机组。

方案四：1×74000m³/h 双纯（纯度 95%：37000m³/h 及纯度 99.6%：37000m³/h）制氧机组。

下表是对这几个方案的简要比较：

表 3.3 制氧机组配置方案比较
Table 3.3 The comparative of different oxygen generators' deploy

比较方案	方案一	方案二	方案三	方案四
占地	大	大	小	小
投资	高	高	低	较高
能耗	高	低	高	低
操作灵活性	好	不好	不好	不好

从上表可以看出，方案二的占地、投资与方案一相当，能耗要比方案以低，但机组的操作灵活性差，一旦高纯机组出故障，低纯机组无法为转炉炼钢提供高纯氧气；方案三的占地、投资均低于方案一，能耗与方案一相当，但同样是机组操作灵活性差；方案四能耗低、占地少，但是机组系统复杂导致投资高，且同样缺乏操作灵活性。所以，综合各方面，国内钢铁企业通常还是会选择方案一。

当使用两套高纯机组时，为了降低能耗，我们可以考虑通过工艺的操作，用高纯制氧机组来制取低纯氧气。

3.2 氧气用户端决策指标

根据 2.2.3.2 节的分析，转炉因间歇工作的原因，其用氧量具有很大的波动性，是导致用氧不均衡的主要原因之一。用氧越不均衡，越容易导致氧气放散。

对于 1000 万吨级别的钢铁企业，在制定炼钢生产作业计划时，如果考虑用氧均衡情况，则会对降低氧气放散率有很好的作用。虽然影响炼钢生产受到许多因素的影响和干扰，人为去维持其用氧均衡是不可能的，但在一定范围内，对其氧气使用的均衡程度进行限制还是可行的。

本节的主要内容就是从氧气系统的用户端，对氧气的使用进行动态决策分析，建立了均衡用氧评价模型，并确立了用氧均衡度指标。

3.2.1 用氧均衡程度分析

对于氧气的使用，用氧的均衡与不均衡是相对的，所以有必要确立一个可以准确反应氧气使用均衡程度的指标。

对用户端的氧气流量计的监测，可得氧气的实时流量，如果在每一时刻用氧量都相等，则用氧最均衡。用氧流量随时间变化，若对某一时间段内的氧气流量进行积分，将得到一条曲线。对于具体的用氧方案，对其某一时段的用氧量进行积分，即如（2.12）式，则可得到总用氧量，总用氧量除以时间 t_0 即可得其平均用氧流量。此时，如果按照平均用氧流量使用氧气，则用氧最均衡。将对平均用氧流量进行积分所的斜直线称为均衡用氧线，将实际流量积分所的的曲线称为实际用氧线，他们的表达式如下：

均衡用氧线：

$$f_1(t) = \int_0^t ((\int_0^{t_0} Use(t)dt) / t_0) dt \quad (3.12)$$

实际用氧线：

$$f_2(t) = \int_0^t Use(t)dt \quad (3.13)$$

式中， $Use(t)$ ——用氧方案的用氧流量， m^3/h 。

由式(3.12)和式(3.13)可得到图 3.2 的用氧均衡状态图：

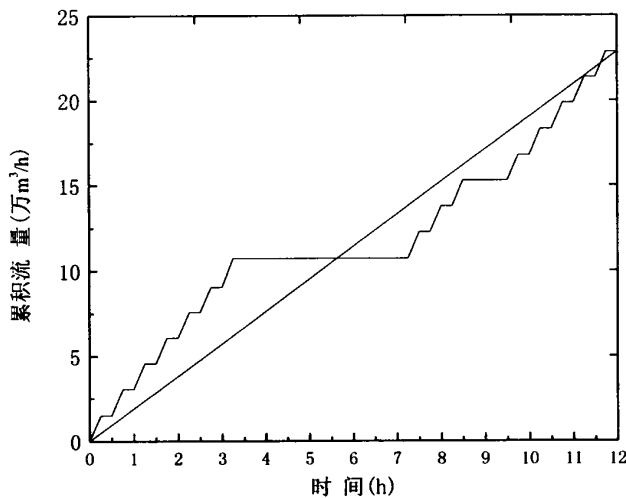


图 3.2 用氧均衡状态图

Fig. 3.2 The graph of uniformity for consumption of oxygen

由上图可以看出,实际用氧线与均衡用氧线有一定的偏离,偏离程度越大,则表明用氧波动越大,用氧越不均衡,即可通过实际用氧线与均衡用氧线所围的面积判断用氧均衡度。

3.2.2 用氧均衡度指标

根据上面的分析,用氧均衡度可定义如下:

$$\lambda = 1 - \frac{S_1}{S_2} \quad (3.14)$$

式中, λ ——用氧均衡度;

S_1 ——实际累计流量与均衡累积流量之差的绝对值对时间的积分,即图 3.2 中实际用氧线与均衡用氧线所围图形的面积;

S_2 ——均衡累计流量对时间的积分,即图 3.2 中均衡用氧线与横坐标轴所围面积。

由上式可见, $0 \leq \lambda \leq 1$, 当 $\lambda = 0$ 时,表示用氧最不均衡;当 $\lambda = 1$ 时,两条线重合,用氧最均衡。

由图 3.2 可得:

$$S_1 = \int_0^{t_0} (\int_0^t |Use(t) - E| dt) dt \quad (3.15)$$

$$S_2 = \frac{1}{2} t_0 \int_0^{t_0} E dt \quad (3.16)$$

$$E = (\int_0^{t_0} Use(t) dt) / t_0 \quad (3.17)$$

式中, E —— t_0 时间段内的氧气平均流量, m^3/h 。

将(3.15)、(3.16)、(3.17)代入(3.14)中可得:

$$\lambda = 1 - (\int_0^{t_0} (\int_0^t |Use(t) - (\int_0^{t_0} Use(t) dt) / t_0| dt) dt) / (\frac{1}{2} \int_0^{t_0} (\int_0^t Use(t) dt) dt) \quad (3.18)$$

由上式可以看出,每一时刻的用氧方案的氧气流量值都影响着用氧均衡度。式(3.12)、(3.13)和(3.18)共同构成了转炉用氧的均衡用氧评价模型。

对于 1000 万吨级别的钢铁企业,一般其转炉个数较多、转炉容量较大、转炉冶炼周期及间歇的不确定性,所以对其每个转炉的用氧方案的确定都会影响整个氧气系统的平衡,而引入用氧均衡度的概念则可以作为决策者评判用氧是否均衡的指标。下一节,将针对首钢京唐公司氧气系统,对用氧均衡度进行举例计算。

3.3 首钢京唐公司氧气系统决策分析

上面的分析均是针对目前钢铁企业生产规模扩大,对于 1000 万吨级别的钢铁企业,确立了决策指标。首钢京唐钢铁联合公司作为新建的钢铁企业,具有国际先进水平的大型制氧机组,同时也配备了先进、节能、可调性强的气体输送系统,是氧气的设施和配置达到了世界先进水平。对于此新建的新型现代化的钢铁企业,其经济性是决策者们最关心的问题,对其经济性进行决策分析是不可或缺的。

3.3.1 首钢京唐概况

首钢京唐钢铁公司是被纳入国家“十一五”规划纲要的重点工程项目,由首钢和唐钢共同投资兴建,是结合首钢搬迁和唐山地区钢铁工业调整,在曹妃甸建设的一个具有国际先进水平的钢铁联合企业。项目计划总投资 677 亿元,一期工程计划于 2008 年 10 月和 2010 年底分两个阶段建成投产,形成建设规模为生铁 898.15 万吨/年、钢坯 970 万吨/年、钢材 912.82 万吨/年的现代化钢铁联合企业。[43]

图 3.2 为京唐公司主要生产流程及设备。

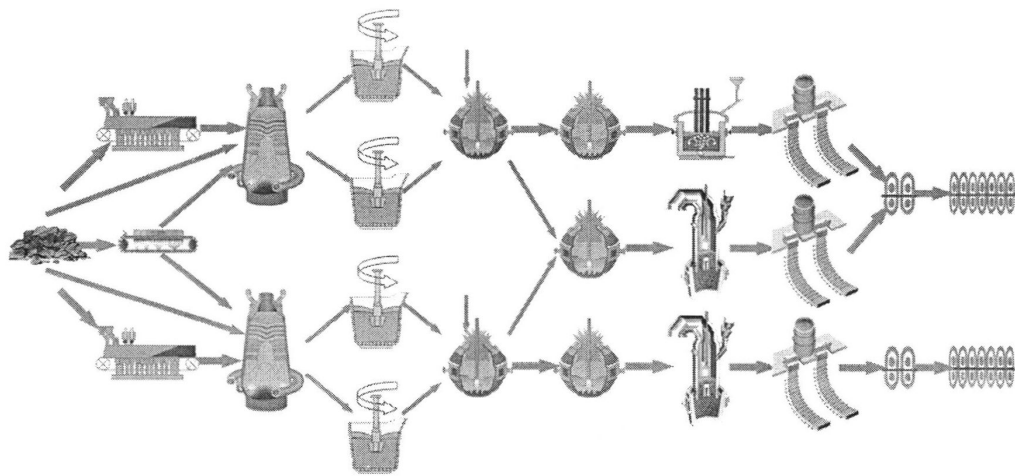


图 3.3 首钢京唐主要生产流程和设备

Fig. 3.3 The Main production process and devices of Shougang Jingtang

首钢京唐公司项目建设内容包括主体工程和辅助工程两大部分。主体工程包括四座 70 孔 7.63m 大型焦炉,两台 500m² 烧结机、一条 504m² 带式焙烧机球团生产线、两座 5500m³ 高炉,两座 300 吨脱磷转炉、三座 300 吨脱碳转炉、一座双工位 LF 精炼炉、两套 RH 钢水真空精炼装置、两台 2150mm 和一台 1650mm 双流板坯连铸机,2250mm、1580mm 热连轧机组各一套,2230mm、1700mm、1550mm 冷连轧机组各一套;辅助工

程包括一个大型综合料场，2 台 7.5 万 m³/h 制氧机，2 座 300MW 燃煤—燃气混烧供热发电机组，5 万 m³(淡水)/日的海水淡化设施，两个 30 万吨级矿石专用泊位、一个 10 万吨级和 15 万吨级散货泊位、11 个 1~5 万吨级成品码头泊位和相应的辅助配套设施。

3.3.2 首钢京唐氧气系统概况

首钢京唐现阶段的制氧设备主要是两套 7.5 万 Nm³/h 的全内压缩制氧机组，表 3.4 是其制氧站的设备技术参数表。表中液体产量为转化为气体后的值。对于该大容量机组，首钢京唐公司通水为其配备了大容量的液体储存罐，其液氧罐和液氮罐的容量均为 4000m³，液氩罐容量为 1000m³。

在机组设计期，首钢京唐有关设计部门根据具体情况最终选择了 2 台 75000m³ 大容量机组，并采用了当前国际最先进的空分工艺流程和安全、节能技术。此机组的规模也是国内钢铁企业的初次尝试，对以往习惯于“小机组多台套”配置的设计方案提出了不同的设计理念。可利用相对综合电耗指标对其经济性分析。

表 3.4 制氧机的设备技术参数表
Table 3.4 Main equipment parameters of oxygen generation station

产品名称	产量/m ³ /h	纯度/%	压力/MPa
氧气	75000	≥99.6 O ₂	3.1
氮气	25500	含氧≤5×10 ⁻⁶	3.1
氮气	74500	含氧≤5×10 ⁻⁶	1.1
液氧	2000	≥99.6 O ₂	
液氮	2000	含氧≤5×10 ⁻⁶	
氩气	1000	≥99.999 Ar	3.1
液氩	1400	含氧≤1×10 ⁻⁶ ，含氮≤2×10 ⁻⁶	
氦气		氦≥99.999	
氖气		氖≥99.999	
氟气		氟≥99.999	
氙气		氙≥99.999	

2011 年 3 月京唐钢铁氧气发生量是 8583.17 万 m³，其产品的主要用户是炼铁部、炼钢部、热轧部、供应部，消耗量为 8020.32 万 m³，损失率为 6.56%。氮气的总发生量是 9527.32 万 m³，其中压力为 3.1MPa 的氮气产量是 3388.28 万 m³，主要供应用户为炼铁部和炼钢部，消耗量为 8800.18 万 m³，损失率为 2.6%；1.1MPa 的氮气产生量为 6139.04 万 m³，主要供应用户是煤气柜区、焦化部、炼铁部、炼钢部、热轧部和冷轧部，消耗量为 5756.58 万 m³，损失率为 6.23%。氩气的发生量为 296.82 万 m³，主要供应用户为炼铁部、炼钢部、热轧部、供应部，消耗量为 296.82 万 m³。

与该大型机组相配套的是大型液体储槽及快速启动气化装置，以确保在特殊情况下安全生产的用气。在突发情况下，采用的工期原则是先保证钢轧的生产的安全运行，以此为前提对氧氮氩的输配进行调整。当一台 75000m³ 制氧机组非正常检修时，4000m³ 的液氧储槽的液氧储量可维持约 9 天的生产用氧。

此外，机组的保冷箱精馏上塔及氩塔等采用了规整填料塔，具有操作简单、效率高、负荷调节范围宽等优点；采用的快速变负荷的工艺流程，可使产品的产量追踪供气管网的压力变化，快速调节空分设备的生产负荷，减少了氧气的放散。

首钢京唐公司目前的内压缩流程生产的氧气压力为 3.0MPa，输送方案如下：（1）转炉炼钢用氧采用 3.0MP_a 的氧气直接供气，到了炼钢区域再设压力调节设施；（2）供高炉炼铁生产用的氧气在制氧厂内从 3.0MP_a 调压到 1.6MP_a 后再输送，到了炼铁区域再进行二次调压；（3）氮气、氩气均采用在到达用户区域后再调压的方式进行输送。图 3.4 为京唐公司氧气系统简图，图中可看出此氧气系统配置和压力输送方案。

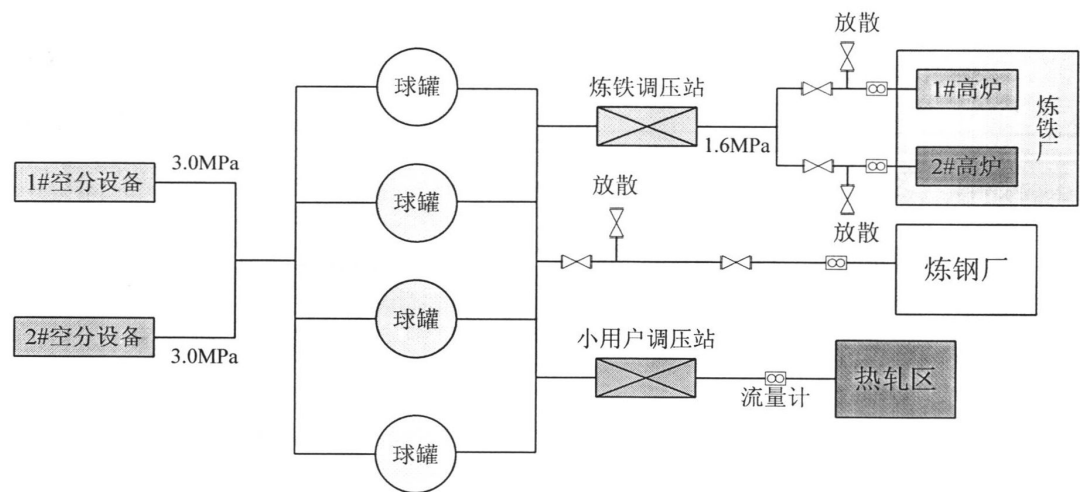


图 3.4 首钢京唐氧气系统简图

Fig. 3.4 The simple diagram of oxygen system of Shougang Jingtang

由图 3.4 可以看，首钢京唐的两台制氧机组均生产的是 3.0MPa 的氧气，然后并入高压管网，但由于高炉富氧压力与转炉吹氧所需的压力不同，这就使得有部分压力能浪费，即浪费了电能。根据对京唐实际数据的分析，可采用 3.1.2 节针对增压机及氧压机的电耗分析确立的产品综合经济效益指标，对生产压力及加压方式进行改造分析，这将在下一节进行。

3.3.3 决策指标的应用及分析

本节是对于对本章所建立的生产端和用户端决策指标，应用到首钢京唐公司进行实

际运用与分析。

3.3.3.1 产品综合经济效益指标应用

此部分将液体产品的综合经济效益与整个系统的生产与压力输送方案相结合，根据京唐公司的氧气内压缩压力方案特点，提出了内压缩压力方案的改进方案，并对方案的经济性进行了分析。

实际生产数据表明，首钢京唐的两台内压缩流程机组具有很好的安全生产性及经济性。由于炼铁富氧量的不确定，及富氧压力为低压氧气，所以考虑对内压缩流程进行如下改进：将 1#机组改为氧气 1.6MPa 内压缩，所产生的氧气一部分经中压球罐直接供给炼铁厂，另一部分由外配的一台 75000m³/h 的氧压机将氧气从 1.6MPa 增压到 3.0MPa 并入管网。同时，氮气也配备两台 37500m³/h 氮压机将压力从 1.6MPa 增压到 3.0MPa。2#机组仍然按原来的配置采用氧气和氮气为 3.0MPa 的内压缩。改进的流程简图如下：

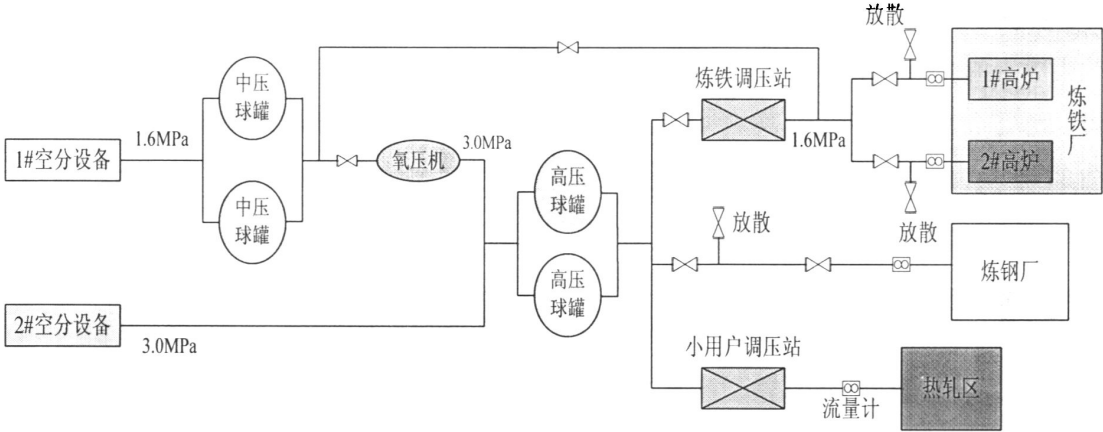


图 3.5 首钢京唐氧气压力输送改进简图

Fig. 3.5 The simple diagram of improved oxygen pressure conveying of Shougang Jingtang

供气制度为：1#机组产生的 1.6MPa 氧气先满足炼铁厂高炉富氧的供应，若有剩余，则经氧压机加压到 3.0MPa 后并入高压氧气管网；若 1#机组产生的 1.6MPa 氧气量不足供应高炉富氧，则有管网高压氧气经调压补充供氧。

由此配置方案，有如下优点：（1）可减少制氧机内部循环增压机的工作压力和流量，进而可减小其规格和投资及运行费用；（2）直接将生产的 1.6MPa 氧气供给高炉，相对于原来的 3.0MPa 减压供气，可消除压降损失，节约能源；（3）中压球罐相对于高压球罐节省成本。除此优点外，该配置改进方案技术上可以实现，而且供气制度有很好的供气效果。

根据 3.12 节的分析，按此配置则其机组电耗可降低约 2~3%，若按节电 3%，每年（按 355 天，即 8520 小时）可节省约 1375 万 kW·h，电费按 0.5 kW·h 计算，则每年可

节约电费 $1375 \times 0.5 = 687.5$ 万元人民币。

对于此改进方案，新增的氧压机的投资需要增加约 6000~7000 万元，此外，厂房、设备等建设投资也将增加大约 500~600 万元人民币，氧压机和氮压机的备件投资也将增加 500~700 万元。由此，按照这种配置的话，需要增加投资约 7000 万元（此处是按最小值计算）。在不计检修成本和设备维护成本的条件下，约 10 年可收回投资。

若按 NPV 计算，取 $N=20$ ，则：

$$NPV = 0.5 \times 8520 \times \frac{1+0.03}{1+0.1} \times \frac{1 - \left(\frac{1+0.3}{1+0.1}\right)^{20}}{1 - \frac{1+0.3}{1+0.1}} = 31181 \text{元}$$

也就是说，1 kW·h 的电 0.5 元，一年按 8520 小时计算，则该 1 kW·h 的电费为 $0.5 \times 8520 = 4260$ 元，按工作 20 年计算，则电费为 $4260 \times 20 = 85200$ 元，则 $85200 - 31181 = 54019$ 元是相应增加的净收入。

由以上的分析可以看出，该改进方案有很好的经济性和可行性，若按 10 年可收回投资，制氧站的工作寿命为 20 年，年通货膨胀率不变的话，则在剩余的 10 年可为企业节约 $687.5 \times 10 = 6875$ 万元。

3.3.3.2 制氧相对电耗指标应用

首钢京唐公司 2010 年高炉年产 912.15 万吨铁，每吨铁富氧耗纯度为 99.6% 氧气约 51.5m^3 ，内压缩流程制纯氧电耗为 $0.724 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{m}^3$ （包括制氧电耗和内压缩增压机的压氧电耗），电价按 0.5 元/kW·h，根据制氧相对电耗指标，进行如下计算：

4) 若使用 99.6% 纯度氧气富氧，计算结果如下：

全年用氧： $51.5 \times 912.15 \times 10^4 = 46975.72 \times 10^4 \text{m}^3$

电耗： $46975.72 \times 10^4 \times 0.724 = 34010.42 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{a}$

需要电费 $34010.42 \times 10^4 \times 0.5 = 17005.21 \times 10^4$ 元/a

5) 若使用 95% 纯度氧气富氧，计算结果如下：

需要电费： $17005.21 \times 10^4 \times 0.9054 = 15396.52 \times 10^4$ 元/a

6) 若使用 90% 纯度氧气富氧，计算结果如下：

需要电费： $17005.21 \times 10^4 \times 0.9321 = 15850.56 \times 10^4$ 元/a

从以上计算结果可以看出：（1）高炉若使用 95% 纯度氧气代替 99.6% 纯度氧气，年电费可节约 $17005.21 - 15396.52 = 1608.69$ 万元，折合吨铁成本降低约 1.76 元；（2）高炉若使用 90% 纯度氧气代替 99.6% 纯度氧气，年电费可节约 $17005.21 - 15850.56 = 1154.65$ 万元，折合吨铁成本降低约 0.824 元。

如上分析，仅从制氧、压氧电耗方面来看，高炉采用低纯度氧气能降低成本，而低纯度中又以 95%纯度更具优势。可见，通过引入制氧相对电耗指标，京唐公司若采取高纯机组制低纯氧供给高炉富氧的方案的话，可带来直观的节能效果和经济效益。

3.3.3.3 用户端决策指标应用分析

这里选取 1#脱碳转炉作为用氧均衡度的计算分析对象。图 3.6 即为某一用氧方案方案下的某一时段的 1#脱碳转炉的流量曲线，其为利用式(2.10)简化后的矩形波。

由图中可见，该转炉的吹氧时间约为 15 分钟，相邻冶炼周期的氧气流量波动不大，但不同时段的转炉工作状态变化很大，如图中 3.5h~7.5h 这段。这里，根据式(3.12)和 (3.13)，可得其用氧均衡状况图如图 3.7。

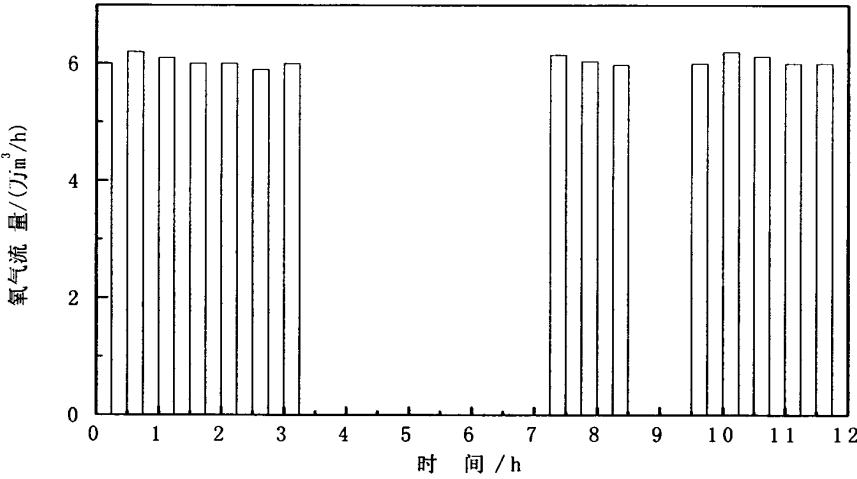


图 3.6 某时段 1#脱碳转炉用氧流量

Fig. 3.6 The oxygen flow of 1# decarburization converter

由图 3.6 可知，该用氧方案用氧十分不均衡。前部 0~3.5h 用氧十分集中，中间几乎没有用氧，而到后来用氧又开始集中且波动较大。图 3.7 则能更直接、更形象的反映用氧的不均衡性。即实际用氧线的前半部偏离均衡用氧线的距离较大，后半部也是如此。根据公式(3.13)计算可得其用氧均衡度为 0.7128，与均衡用氧相差了 0.2872，差幅将近 30%。

由上面的计算分析表明，用氧均衡度和用氧均衡状况图能直接、形象的反映转炉用氧的均衡情况。用氧均衡度可作为指标，为决策者根据本厂的实际情况对某时段的用氧方案进行决策分析，比如建议全厂的用氧均衡度大于 0.9。

对于首钢京唐公司，共有 5 个转炉，同一时段每个转炉的用氧制度均不相同，所以同一时段内，其用氧均衡度也不同，对每一座转炉的用氧均衡度进行计算分析，可得到炼钢厂的总用氧均衡状况图，根据总的用氧均衡状况图。

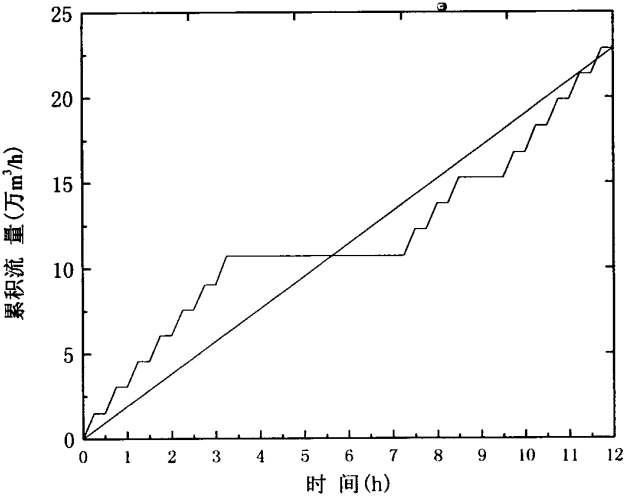


图 3.7 1#脱碳转炉用氧均衡状况图

Fig. 3.7 The oxygen equilibrium state of 1# decarburization converter

决策者即可对各转炉的用氧计划进行内部协调，即使个别转炉的用氧均衡度较小，也无关紧要，只要能保证总的用氧均衡度达到预期值即可。

可见，用氧均衡度和用氧均衡状况图可为企业氧气决策者提供有效的决策指标，可作为管理用氧方案的手段，为氧气发生系统决策者和氧气用户决策者提供满足氧气生产和使用要求的指标及计算方法。这就有效地减缓了氧气供需不平衡的矛盾，最终可减少氧气放散。

第4章 首钢京唐公司氧气优化管理模型研究

氧气管理系统通常由氧气用量预测模型与氧气优化分配模型两部分组成,决策者可将预测模型的预测值输入到优化模型,进而对生产进行计划安排,以提高氧气系统经济性和减少氧气放散。

本章主要内容分为两部分:一是对基于 MATLAB 的人工神经网络的氧气预测研究,首先介绍了 BP 人工神经网络的工作原理,然后利用 BP 网络对首钢京唐的用氧系统进行了预测,最后对预测结果进行了分析;二是针对氧气系统的特性建立了氧气的优化调度分配模型,包括正常生产的日最优调度分配模型、空分停机模型及高炉休风用氧模型。

4.1 钢铁企业用氧量预测模型

钢铁企业对各用氧单位的用氧量的预测可以为确立生产计划和合理安排检修计划提供参考依据,也可决策每台制氧机组的最佳工况,从而可降低氧气放散率,达到及节能减排的目的。所以对钢铁企业用氧量的预测显得尤为重要。

目前国内外常用的能源消耗量预测方法主要有能源消费弹性系数预测法、因果关系预测法、时间序列预测法和神经网络预测法。由于神经网络对复杂不确定问题具有较强的自适应和自学习能力,能以任意精度逼近任意连续非线性函数等特点,所以本文选用神经网络法对氧气系统进行预测。

4.1.1 神经网络(BP 网络)的原理及结构

人工神经网络是一种应用类似于大脑神经突触连接的结构进行信息处理的数学模型。神经网络是一种运算模型,有大量的节点(或称神经元)之间相互联接构成。每个节点代表一种特定的输出函数,称为激励函数(activation function)。每两个节点之间的连接都代表一个对于通过该信号的加权值,称之为权重,这相当于人工神经网络的记忆。网络的输出则依据网络的连接方式、权重值和激励函数的不同而不同。图 4.1 是神经元的基本结构。^[45]

在神经元中,权值和传输函数是两个关键因素。权值的物理意义是输入信号的强度,若涉及多个神经元则可以理解成神经元之间的连接强度;传输函数可以理解成对 u_i 信号的非线性映射,一般的传输函数应该为单值函数,从而使得神经元是可逆的。

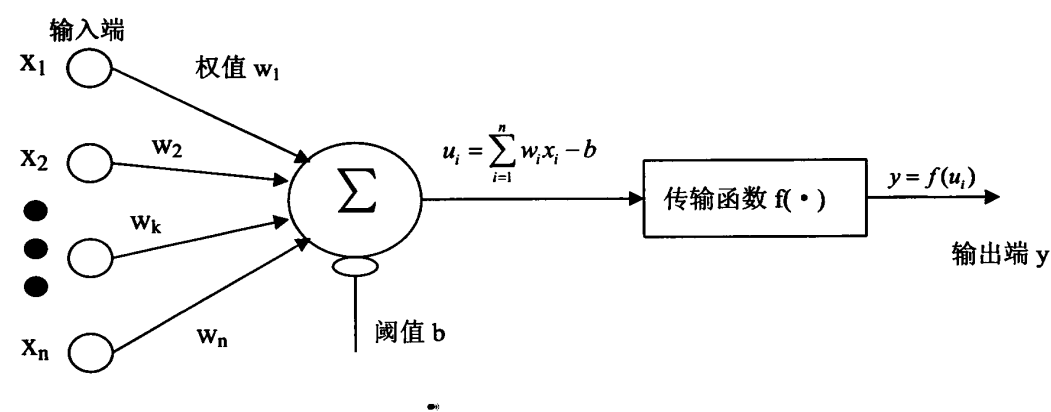


图 4.1 神经元的基本结构

Fig. 4.1 The basic structure of the neurons

目前应用比较广泛的神经网络是 BP 神经网络（又称误差反向神经网络），它的学习规则是使用最速下降法，通过反向传播来不断调整网络的权值和阈值，使网络的误差平方和最小，图 4.2 为 BP 神经网络的基本结构图。输入层个神经元负责接收来自外界输入的信息，并传递给中间层各神经元；中间层是信息内部处理层，负责信息变换，根据信息变化能力的需求，中间层可以设计为单隐层或多隐层结构；^[46]最后一个隐层传递到输出层各神经元的的信息，经进一步处理后，完成一次学习的正向传播过程，由输出层向外界输出信息处理结果。当实际输出与期望输出不符时，进入误差的反向传播阶段。误差通过输出层，按误差梯度下降的方向修正各层权值，向隐层、输入层逐层反传。周而复始的信息正向传播和误差反向传播过程，是各层权值不断调整的过程，也是神经网络学习训练的过程，此过程一直进行到网络输出的误差减少到可以接受的程度，或者预先设定的学习次数为止。^[47]图 4.3 为标准 BP 算法流程。

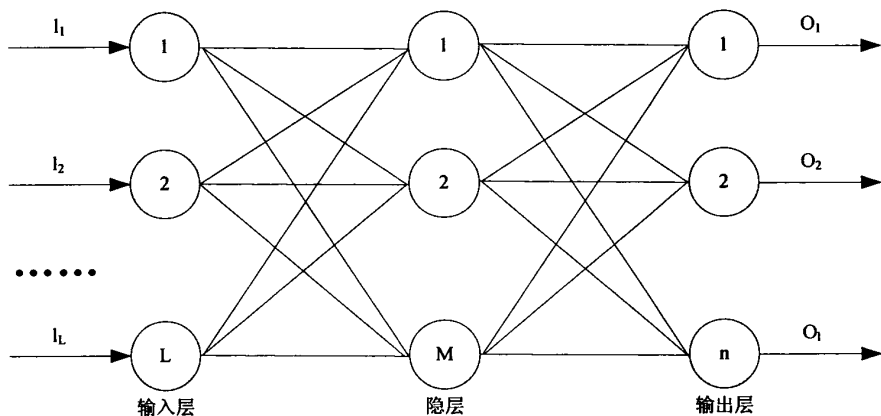


图 4.2 三层 BP 神经网络结构图

Fig. 4.2 Three-layer BP's structure of the neurons

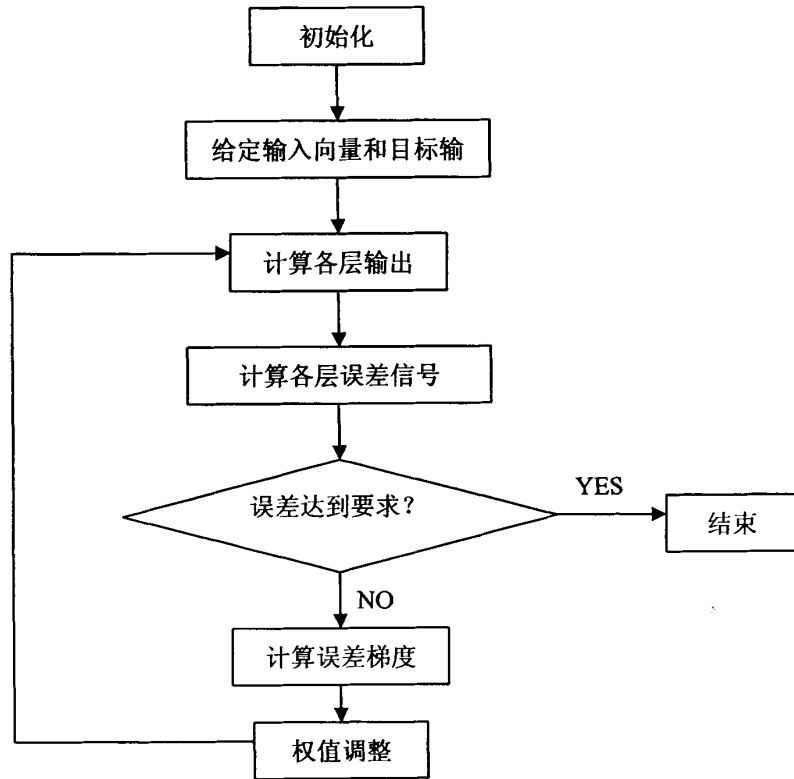


图 4.3 标准 BP 算法流程

Fig. 4.3 The standard BP algorithm process

从上面的介绍可以看出，BP 神经网络的工作原理具体包括下面三部分。

(1) 输出节点的输出 O_l 的计算公式

隐层节点的输出 y_j ：

$$y_j = f\left(\sum_{j=1}^L w_{i,j} x_j - \theta_i\right) \quad (4.1)$$

式中： x_j ——输入层节点的输入；

L ——输入层神经元数。

$w_{i,j}$ ——输入层第 j 个神经元到隐层第 i 个神经元的连接权值；

θ_i ——隐层第 i 个神经元的阈值；

输出层节点的输出 O_l ：

$$O_l = f\left(\sum_{i=1}^M T_{l,i} y_i - \theta_l\right) \quad (4.2)$$

式中： $T_{l,i}$ ——隐层第 i 个神经元到输出层第 l 个神经元的连接权值；

θ_l ——输出层第 l 个神经元的阈值；

M ——隐层神经元个数。

(2) 隐层节点到输出层节点修正公式：

误差控制：

$$E = \sum_{f=1}^p e_f < \varepsilon \quad (4.3)$$

$$e_f = \sum_{l=1}^n |t_l^{(f)} - O_l^{(f)}| \quad (4.4)$$

式中： t_l ——输出层节点的期望输出；

E ——所有样本误差和；

e_f ——第 f 个样本的误差；

p ——样本个数；

ε ——设定的目标误差；

n ——输出层神经元数。

输出层误差：

$$\delta_l = (t_l - O_l) \cdot O_l \cdot (1 - O_l) \quad (4.5)$$

权值修正：

$$T_{l,i}(k+1) = T_{l,i}(k) + \eta \delta_l y_i \quad (4.6)$$

式中： k ——迭代次数；

η ——学习率。

阈值修正：

$$\theta_l(k+1) = \theta_l(k) + \eta \delta_l \quad (4.7)$$

(3) 输入层节点到隐层节点的修正公式：

隐层误差：

$$\delta_i = y_i(1 - y_i) \sum_{l=1}^n \delta_l T_{l,i} \quad (4.8)$$

权值修正：

$$w_{i,j}(k+1) = w_{i,j}(k) + \eta \delta_i x_j \quad (4.9)$$

阈值修正：

$$\theta_i(k+1) = \theta_i(k) + \eta \delta_i \quad (4.10)$$

此外，神经网络用于预测具有如下主要优点：

- (1) 不须要假设函数 $f(x)$ 的数学结构；
- (2) 理论上可以任意精度实现模型函数 $f(x)$ ，即预测精度非常高。

利用图 4.2 的三层 BP 神经网络对钢铁企业氧气用量进行预测时，左端输入层输入的是历史时间序列的影响氧气用量的各因素，然后再经隐含层处理后传入输出层，其输出值 Y 即为氧气用户的氧气预测量。

4.1.2 MATLAB 简介

MATLAB 是由美国 mathworks 公司发布的主要面对科学计算、可视化以及交互式程序设计的高科技计算环境。他将数值分析、矩阵计算、科学数据可视化以及非线性动态系统的建模和仿真等诸多强大功能集成于一个易于使用的视窗环境中，为科学研究、工程设计以及必须进行有效数值计算的众多科学领域提供了一种全面的解决方案，并在很大程度上拜托了传统非交互式程序设计语言（如 C、Fortran）的模式编辑，代表了当今国际科学计算软件的先进水平。^[48]

MATLAB 系统由 MATLAB 开发环境、MATLAB 数学函数库、MATLAB 语言、MATLAB 应用接口（API）五大部分构成。^[49]它具有友好的工作平台编辑环境、简单易用的程序语言、强大的科学计算机数据处理能力、出色的图形处理能力、应用广泛的模块集合工具箱、实用的数据接口和发布平台等优点。基于 MATLAB 强大的函数工具箱，可以实现很多科学数据处理功能，如 MATLAB 自带的神经网络工具箱。

本章的氧气预测模型及其它优化调度模型均采用 MATLAB 程序进行编程及求解。

4.1.3 预测模型的建立

根据上述 BP 神经网络的原理及结构，下面借助 MATLAB 2011b 来建立首钢京唐公司氧气用量预测模型。

4.1.3.1 模型参数的选取及数据预处理

首钢京唐公司的用氧大户主要是两座 5500m³ 高炉、两座 300 吨脱磷转炉及三座 300 吨脱碳转炉。综合考虑，高炉、转炉每天的产量是影响其用氧量的最主要因素，所以，在此选择高、转炉的产量作为 BP 神经网络的输入参数，即输入节点为 7 个，分别为 1#高炉日产量、2#高炉日产量、1#脱磷转炉日产量、2#脱磷转炉日产量、1#脱碳转炉日产量、2#脱碳转炉日产量、3#脱碳转炉日产量。根据已有的数据，每个节点处的输入向量为 10 个元素。输出向量为 7 个，即各用氧单位的用氧量，所以输出神经元为 7 个。

而网络中间层神经元个数的选取暂未定论，根据常用的经验公式有：

$$i=\sqrt{n+m}+a \tag{4.11}$$

其中， i 为中间层神经元个数， n 为输入层神经元个数， m 为输出层神经元个数， a 为常数且 $0<a<10$ 。所以此处的 i 可选值为 4~14，试取神经元个数分别为 4、6、8、10、12、14，经过多次迭代实验，本网络的中间层神经元个数选 14 时网络性能最优。见图 4.4。

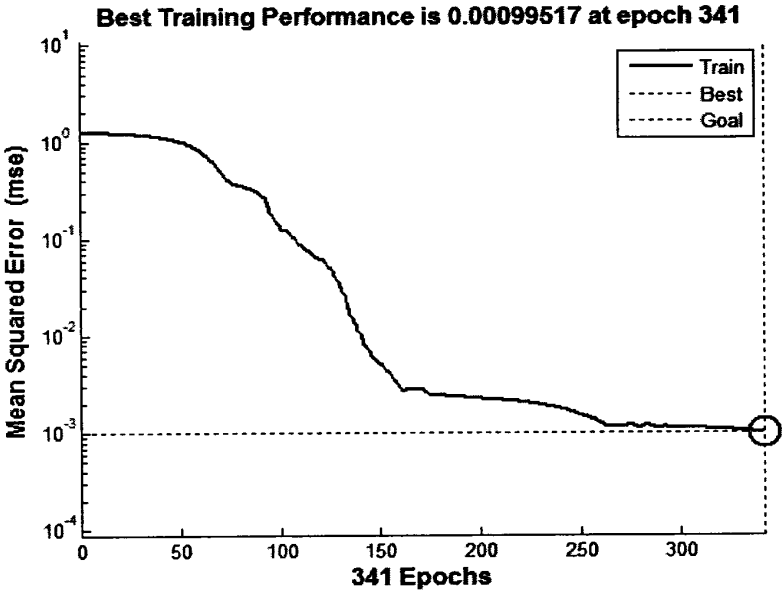


图 4.4 隐含层神经元数为 14 时的训练曲线

Fig. 4.4 The training curve when hidden layer's neuron is 14

在 BP 神经网络中，常采用 sigmoid 函数的正切或者对数函数和线性函数作为神经元传输函数。常用的传输函数有 tansig 函数、logsig 函数、handlims 函数、radbas 函数等，其中 tansig 型函数不仅具有可微分性，而且其形状接近于生物信号源信号的输出形式。

此外，tansig 型函数还具有饱和非线性特性，从而增强了网络的非线性映射能力。经过多次程序的调试，在此选用 tansig 函数作为传输函数，其函数形状见图 4.5。

综上所述，网络参数的确定共进行了 $6\times4=24$ 次试验和调试，每次调试都需对结果进行分析比较，将误差最小的一组参数组合作为网络的训练参数，才可用作对构建训练网络，建立完整的网络模型。

建立完整网络模型之后，需要对网络进行训练，泛化后方可用来进行模型的预测。再根据预测结果，对模型进行反馈调节。

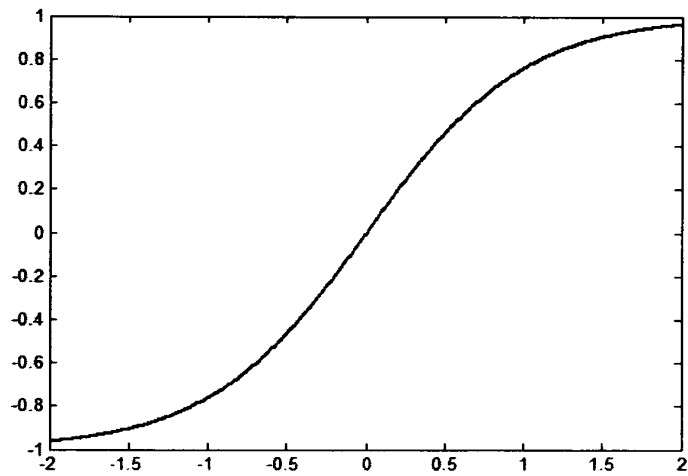


图 4.5 $y=\text{tansig}(x)$ 的函数图形
Fig. 4.5 The function graph of $y=\text{tansig}(x)$

由于各用氧单位产量作为网络的输入，个用氧单位的用氧量作为输出数据，所以表 4.1 和表 4.2 给出了所需的数据。

表 4.1 用氧单位产量原始数据
Table 4.1 The oxygen units' production original data (单位: t/d)

日期	1#高炉 产量	2#高炉 产量	1#脱磷转 炉产量	2#脱磷转 炉产量	1#脱碳转 炉产量	2#脱碳转 炉产量	3#脱碳转 炉产量
2011/3/16	11490	11591	5847	3676	4343	4318	4845
2011/3/17	10988	12108	5890	3700	4282	4388	4820
2011/3/18	10990	11680	5700	3721	4108	4400	4737
2011/3/19	11045	11784	5822	3710	4249	4410	4618
2011/3/20	11089	10876	5743	3668	4198	4050	4022
2011/3/21	10224	10980	5588	3569	4044	4087	4012
2011/3/22	11580	12788	5860	3688	4012	5066	5700
2011/3/23	11236	12005	5800	3710	4185	5015	4531
2011/3/24	10033	11027	5745	3605	4188	3880	3636
2011/3/25	12200	11880	5852	3790	4310	4988	5100
2011/3/26	11035	11982	5845	3700	4425	4118	4918
2011/3/27	11105	12050	5800	3710	4430	4210	4975
2011/3/28	11085	11900	5850	3680	4510	4300	4850
2011/3/29	11120	11985	5834	3685	4487	4355	4898

表 4.2 用氧单位用氧量原始数据

Table 4.2 The oxygen using of oxygen using units' original data (单位: m³/d)

日期	1#高炉 用氧量	2#高炉 用氧量	1#脱磷转 炉用氧量	2#脱磷转 炉用氧量	1#脱碳转 炉用氧量	2#脱碳转 炉用氧量	3#脱碳转 炉用氧量
2011/3/16	631876	637505	354044	212180	257551	259872	291630
2011/3/17	602280	668845	351890	222000	256920	263314	289200
2011/3/18	603898	640050	341890	224013	246363	264100	281335
2011/3/19	608044	648100	350066	221977	255000	264818	277100
2011/3/20	610055	599100	344300	221056	252024	243116	241420
2011/3/21	571122	603070	334858	214495	242610	245167	240564
2011/3/22	641010	700134	352000	222010	240882	304010	342100
2011/3/23	613452	661200	348100	222700	251200	301024	271926
2011/3/24	551078	606012	344560	215899	252010	233100	218200
2011/3/25	661000	653988	351008	227550	258800	300012	305898
2011/3/26	616910	679498	351410	224295	257800	251223	253145
2011/3/27	620605	686955	350394	226714	257610	252590	248279
2011/3/28	624198	676840	352888	221600	258498	261338	243440
2011/3/29	624200	676710	352938	221685	257910	251892	243510

根据以上所述，本文选用 1#高炉日产量、2#高炉日产量、1#脱磷转炉日产量、2#脱磷转炉日产量、1#脱碳转炉日产量、2#脱碳转炉日产量、3#脱碳转炉日产量这七个量作为初选输入变量。根据首钢京唐提供的数据，可得到 2011 年 3 月 16 日到 3 月 29 日的各用氧单位的产量及氧气消耗量。这里我们选取 3 月 16 日到 3 月 25 日这 10 组数据作为输入数据对神经网络进行训练，而 26~29 日这 4 组数据作为神经网络泛化后的验证数据。

由图 4.5 可以看出，函数的值域为[-1,1]，当网络的输入和目标矢量的取值为[-1,1]时，训练函数可以达到最好的训练效果，所以在进行网络训练前需要对输入与输出数据进行归一化处理。归一化是一种无量纲处理手段，是物理系统数值的绝对值变成某种相对值计算，是简化计算，缩小量值的有效方法。同时归一化处理还可以消除数据中的奇异样本带来的影响。这里输入数据的归一化采用 MATLAB 工具箱内置的函数 `premnmx()` 及数据变换函数 `trmnmx()` 便可实现。

对表 4.1 和表 4.2 的数据进行归一化处理，处理结果见表 4.3 和表 4.4。

表 4.3 归一化后的数据
Table 4.3 The normalized data

日期	1#高炉 产量	2#高炉 产量	1#脱磷转 炉产量	2#脱磷转 炉产量	1#脱碳转 炉产量	2#脱碳转 炉产量	3#脱碳转 炉产量
2011/3/16	0.3447	-0.5659	0.7152	-0.0317	1.0000	-0.2614	0.1715
2011/3/17	-0.1186	0.2887	1.0000	0.1855	0.6314	-0.1433	0.1473
2011/3/18	-0.1168	-0.1590	-0.2583	0.3756	-0.4199	-0.1231	0.0669
2011/3/19	-0.0660	-0.0502	0.5497	0.2760	0.4320	-0.1062	-0.0484
2011/3/20	-0.0254	-1.0000	0.0265	-0.1041	0.1239	-0.7133	-0.6260
2011/3/21	-0.8237	-0.8912	-1.0000	-1.0000	-0.8066	-0.6509	-0.6357
2011/3/22	0.4278	1.0000	0.8013	0.0769	-1.0000	1.0000	1.0000
2011/3/23	0.1103	0.1810	0.4040	0.2760	0.0453	0.9140	-0.1328
2011/3/24	-1.0000	-0.8421	0.0397	-0.6742	0.0634	-1.0000	-1.0000
2011/3/25	1.0000	0.0502	0.7483	1.0000	0.8006	0.8685	0.4186

表 4.4 归一化后的数据
Table 4.4 The normalized data

日期	1#高炉 用氧量	2#高炉 用氧量	1#脱磷转 炉用氧量	2#脱磷转 炉用氧量	1#脱碳转 炉用氧量	2#脱碳转 炉用氧量	3#脱碳转 炉用氧量
2011/3/16	0.4701	-0.2398	1.0000	-1.0000	0.8606	-0.2449	0.1853
2011/3/17	-0.0684	0.3806	0.7755	0.2778	0.7902	-0.1478	0.1461
2011/3/18	-0.0390	-0.1894	-0.2670	0.5398	-0.3882	-0.1257	0.0191
2011/3/19	0.0365	-0.0300	0.5853	0.2748	0.5758	-0.1054	-0.0492
2011/3/20	0.0731	-1.0000	-0.0157	0.1550	0.2437	-0.7175	-0.6252
2011/3/21	-0.6353	-0.9214	-1.0000	-0.6988	-0.8071	-0.6597	-0.6390
2011/3/22	0.6363	1.0000	0.7869	0.2791	-1.0000	1.0000	1.0000
2011/3/23	0.1349	0.2293	0.3804	0.3689	0.1517	0.9158	-0.1328
2011/3/24	-1.0000	-0.8632	0.0114	-0.5161	-0.2421	-1.0000	-1.0000
2011/3/25	1.0000	0.0865	0.6835	1.0000	1.0000	0.8872	0.4156

而在输出端所要输出的数据又必须经过反归一化处理，变为原来的量纲数据才可输出，这一过程的完成可采用 MATLAB 工具箱内置的 postmnmx()函数，在此不作具体介绍。

4.1.3.2 预测模型的运行

用 MATLAB 打开编辑好的 m 文件，点击运行，系统便开始进行神经网络的训练和

泛化，并输出结果。程序的运行过程和最后的结果输出可在 Command Window 窗口里看到。图 4.6 是此神经网络模型的框体图。可见模型是由输入端（7 个节点）、隐含层（单层）和输出端（7 个节点）三部分组成，数据在输入端与输出端之间经隐含层传输函数的不断训练，当误差值满足要求后，网络训练完毕。

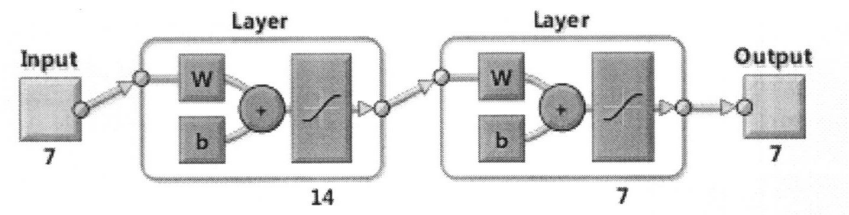


图 4.6 钢铁企业用氧量预测神经网络框图

Fig. 4.6 The neural network’s block diagram of iron and steel enterprise’s oxygen prediction

该网络的迭代次数图见图 4.4，在迭代到 341 步时，学习精度达到 0.00099517，且其学习速度很快。图 4.7 是该预测模型的训练状态图，从图中可以看出，网络训练到第 341 步时就已达到收敛，其误差下降梯度达到最小值 0.0011323，学习速率为 7.6803。图 4.8 是训练过程中，输入数据点的回归拟合情况图。可见，该模型具有良好的数据拟和能力。

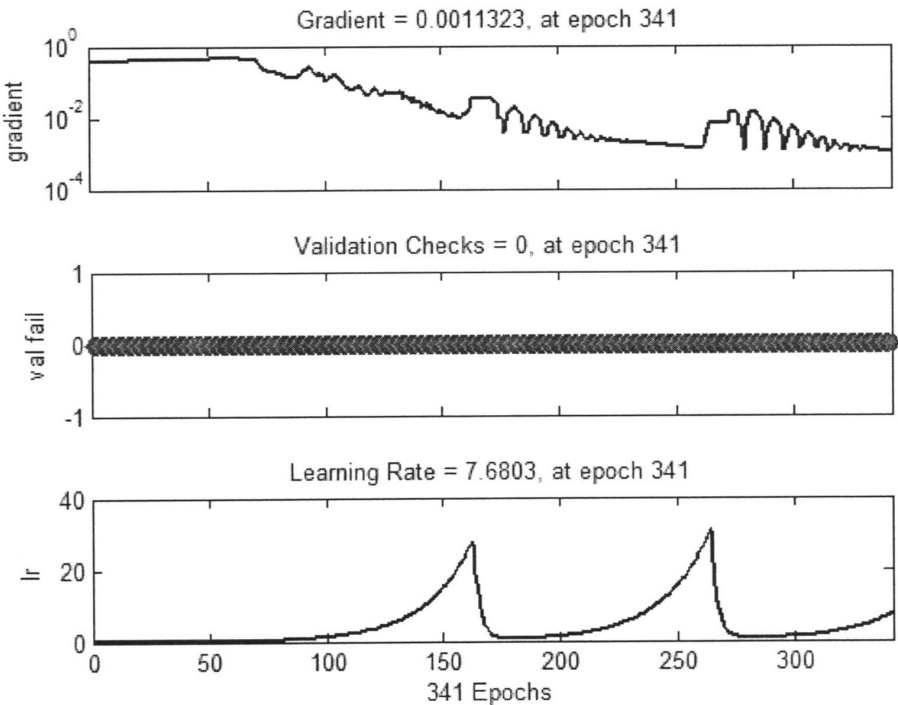


图 4.7 模型训练状态图

Fig. 4.7 The model’s training state diagram

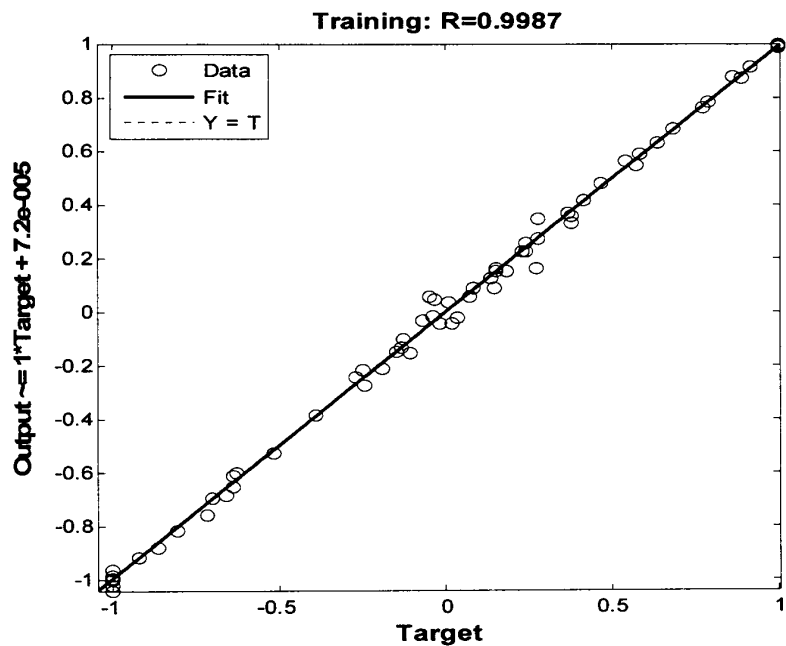


图 4.8 模型数据拟合图

Fig. 4.8 The model’s data fitting diagram

以上是网络训练情况，可见网络可以的达到很好的收敛性。下面对该模型的预测结果进行分析。

4.1.4 预测结果分析

以 3 月 26、27、28、29 日的数据作为预测输入数据，利用训练和泛化好的 BP 网络对其进行预测，预测结果见下表 4.3。

表 4.3 用氧单位用氧量预测结果

Table 4.3 The forecast result of oxygen consume of the using units (单位：m³/d)

日期	1#高炉用 氧量	2#高炉用 氧量	1#脱磷转 炉用氧量	2#脱磷转 炉用氧量	1#脱碳转 炉用氧量	2#脱碳转 炉用氧量	3#脱碳转 炉用氧量
2011/3/26	618820	679330	351920	227010	258340	249760	252910
2011/3/27	620430	687210	351010	226590	257180	252530	248110
2011/3/28	624990	676970	352740	221580	258680	261980	243180
2011/3/29	626810	676950	353180	221890	253980	255830	243840

将上表的预测值与续表 4.1 的实际值相比较，可得到实际值与预测值的绝对误差和相对误差，见下表 4.4。

表 4.4 预测误差表
Table 4.4 The prediction error table

日期	误差	1#高炉	2#高炉	1#脱磷 转炉	2#脱磷 转炉	1#脱碳 转炉	2#脱碳 转炉	3#脱碳 转炉
2011/3/26	绝对误差	1910	-168	510	2715	540	-1463	-235
	相对误差 (%)	0.31	-0.02	0.15	1.21	0.21	-0.58	-0.09
2011/3/27	绝对误差	-175	255	616	-124	-430	-60	-169
	相对误差 (%)	-0.03	0.04	0.18	-0.05	-0.17	-0.02	-0.07
2011/3/28	绝对误差	792	130	-148	-20	182	642	-260
	相对误差 (%)	0.13	0.02	-0.04	-0.01	0.07	0.25	-0.11
2011/3/29	绝对误差	2610	240	242	205	-3930	3938	330
	相对误差 (%)	0.42	0.04	0.07	0.09	-1.52	1.56	0.14

根据该误差表可以绘制图 4.8 的氧气预测误差图。

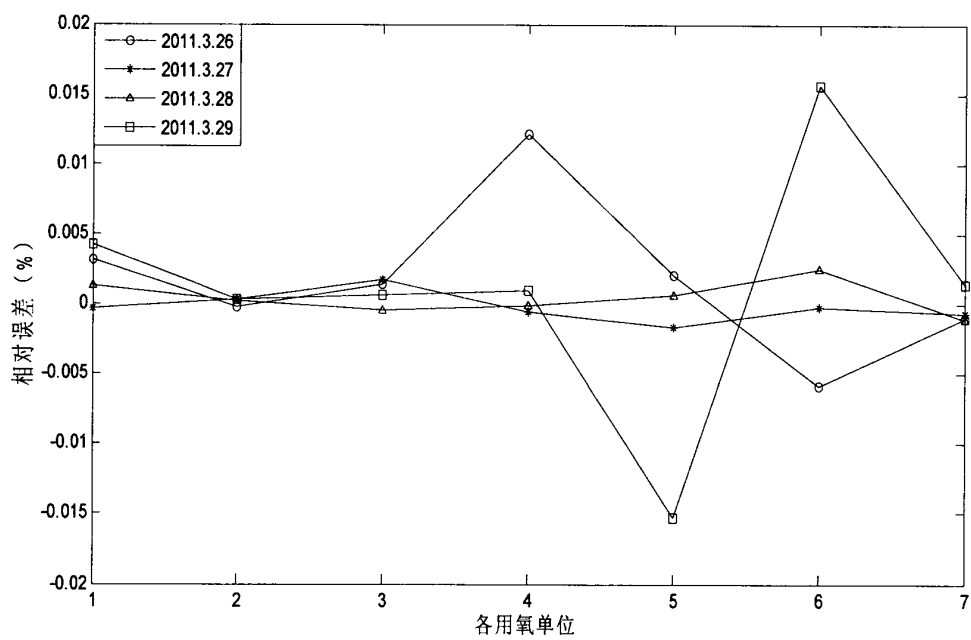


图 4.8 氧气预测误差图
Fig. 4.8 The oxygen prediction error diagram

由上图和表可以看出，整个预测模型相对误差的最大值为 1.56%，最小仅为 0.01%。其中，2011.3.29 这组数据的第 5 个和第 6 个用氧单位的预测误差较大，其误差绝对值分别为 1.52%和 1.56%，但都在 2%的范围内，其余组的预测误差则相对较小。可见，

模型具有较好的预测效果，可将该模型应用到氧气管理系统中，其预测值可作为氧气优化分配模型的输入数据。

4.2 氧气优化分配模型

氧气优化分配的目的是，在确保氧气安全生产和稳定供应的前提下，优化其使用和分配结构，以最大程度提高氧气的综合利用效率，降低放散，提高经济效益。调度问题通常都是以预测能源变化趋势为基础的。同时，由于钢铁企业的工序复杂、设备繁多、各工序间相互关联等特点，使得能源系统网络错综复杂。因此，我们需要根据企业的实际结构、生产情况及用户使用具体要求等，建立整个氧气系统的合理有效的优化分配模型。模型由正常生产日分配模型、高炉休风用氧模型及空分停机用氧模型组成。

4.2.1 正常生产氧气分配模型

与国内其它钢铁企业不同，首钢京唐公司的空分系统采用的是 2 套 75000m³ 大型内压缩流程制氧机，而国内其它钢铁企业多是在原有外压缩机组的基础上新建或改造内压缩流程机组。对此，考虑到全内压缩机组，要根据内压缩流程的特性建立调度分配模型。

4.2.1.1 问题的描述

下图是首钢京唐公司的氧气系统缩略图，由于是全内压缩流程机组，所以出制氧机的是高压氧气，其一部分经管网和储罐供给高压用户，一部分按需求压力减压成低压氧气供给低压用户。所以，系统中没有氧压机。

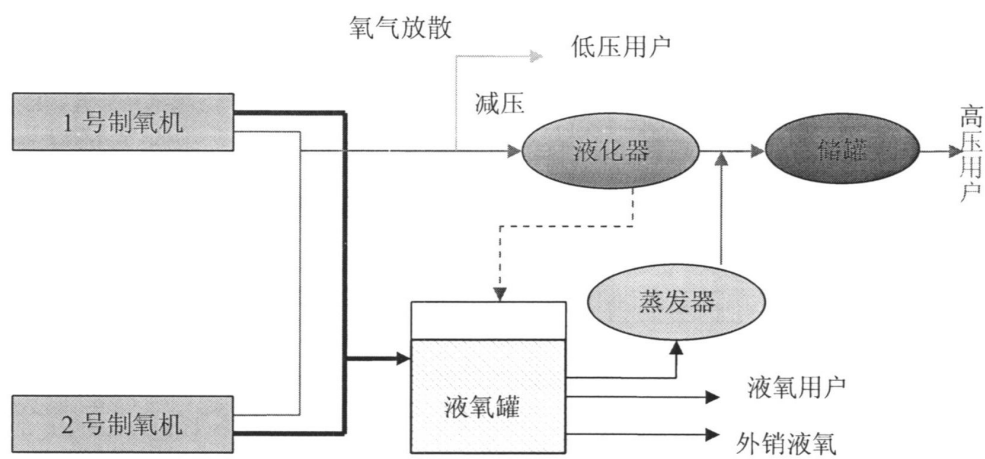


图 4.9 首钢京唐公司氧气系统简化图

Fig. 4.9 The simplified diagram of JingTang Shou-steel's oxygen system

对于内压缩流程制氧系统，氧气的压力输送方案与外压缩流程的不同。京唐公司的

气体压力输送方案如下：(1) 转炉炼钢用氧采用 3.0MP_a 的氧气直接供气，到了炼钢区域再设压力调节设施；(2) 供高炉炼铁生产用的氧气在制氧厂内从 3.0MP_a 调压到 1.6MP_a 后再输送，到了炼铁区域再进行二次调压；(3) 氮气、氩气均采用在到达用户区域后再调压的方式进行输送。

从图 4.9 可以看到，该分配模型所要解决的问题就是在确定的氧气用户用量下，对气液产品产量及配比、氧气液化量、液氧蒸发量以及液氧外卖量进行决策。所以，可通过问题的简化假设来建立数学模型。

建模的过程为先对模型进行简化和假设，然后定义模型的变量，根据问题确立优化目标函数，最后确定该目标函数的约束条件。

4.2.1.2 模型简化与假设

- 1、制氧机组和高、转炉无故障和检修，正常生产；
- 2、用户用氧压力波动不大或恒定；
- 3、氧气和液氧的内部供应按内销价格计算；
- 4、氧气调节过程中氮、氩供应满足要求，即忽略氮、氩的约束；
- 5、液氧用户使用量较小，可忽略。

4.2.1.3 变量的定义

$G_{i,t}$ —— t 时段内各制氧机的氧气产量， m^3/h ；

$L_{i,t}$ —— t 时段内各制氧机的液氧产量， m^3/h ；

$LG_{O_2,t}$ —— t 时段内液氧蒸发量， m^3/h ；

$GL_{O_2,t}$ —— t 时段内氧气液化量， m^3/h ；

$S_{L_{O_2},t}$ —— t 时段内液氧的外卖量， t ；

P_{O_2} ——氧气沿程储罐的终压力。

4.2.1.4 目标函数

目前，首钢京唐的氧气剩余量很大，远不能达到原计划设计的氧气放散率和过余液氧外卖量，大量的氧气放散和过余液氧外卖也反映了氧气的供需不平衡，这也正是氧气分配模型要解决的问题。

设该模型是 T_N 个周期的数学优化分配问题。系统的氧气放散率、电耗及综合经济效益通常是生产管理者所关心的指标。所以，根据首钢京唐的实际生产情况和设备的运

行, 针对全内压缩流程氧气系统, 各目标函数表达式为:

(1) 氧气放散量最小

$$\min F = \min \sum_{t=1}^{T_N} (\sum_{i=1}^n G_{i,t} - GL_{O_2} - U_{O_2,L} - U_{O_2,H}) \quad (4.12)$$

(2) 总电耗最小

$$\min D = \min \sum_{t=1}^{T_N} (h_1 \cdot \sum_{i=1}^n G_{i,t} + h_2 \cdot \sum_{i=1}^n L_{i,t} + h_3 \cdot LG_{O_2,t} + h_4 \cdot GL_{O_2,t}) \quad (4.13)$$

(3) 经济性目标

$$\begin{aligned} \max E = \max \sum_{t=1}^{T_N} [(K_h \cdot U_{O_2,H} + K_l \cdot U_{O_2,L} + K_c \cdot GL_{O_2,t} + K_s \cdot S_{L_{O_2,t}}) - \\ (P_g \cdot \sum_{i=1}^n G_{i,t} + P_l \cdot \sum_{i=1}^n L_{i,t} + P_{LG} \cdot LG_{O_2,t} + P_{GL} \cdot GL_{O_2,t})] \end{aligned} \quad (4.14)$$

以上各式中:

h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 ——分别为制氧机单位制氧电耗、生产液氧电耗、液氧蒸发电耗、氧气液化电耗, $\text{kW} \cdot \text{h} / \text{m}^3$

K_h 、 K_l 、 K_c 、 K_s ——分别为高压氧气、低压氧气、卖液化器液氧、外销液氧的价格, 元/ m^3 或元/t

P_g 、 P_l 、 P_{LG} 、 P_{GL} ——分别为生产氧气的成本(能耗全部分摊到氧气上)、生产液氧、液氧蒸发、氧气液化的成本, 元/ m^3 或元/t

$U_{O_2,L}$ 、 $U_{O_2,H}$ ——分别为低压氧气、高压氧气的使用量, m^3/h 或 t/h 。

上面的目标函数是多目标优化函数, 可以按多目标最优函数求解, 也可以对(1)(2)引入价格系数, 同时对各目标函数引入罚函数 ζ 、 η 、 μ , 结合(3), 从而转换为单目标函数。如下:

$$\min C = \min(\zeta \alpha F + \eta \beta D - \mu E) \quad (4.15)$$

式中, α ——放散氧气的折算价格, 元/ m^3 ;

β ——企业的电价(不考虑内购还是外购), 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$;

ζ 、 η 、 μ ——分别为优化目标的罚函数。

但是, 由于此时的罚函数 ζ 、 η 、 μ 难以确定, 使求得的最优解不是该优化问题的全局最优解。所以该模型还是按多目标最小值进行优化, 具体求解方法见 4.3 节。

4.2.1.5 约束条件

(1) 各台制氧机氧气产量的约束:

$$G_{O_2,\min,i} \leq G_{i,t} \leq G_{O_2,\max,i} \quad (i=1,\dots,n) \quad (4.16a)$$

(2) 各台制氧机液氧产量的约束:

$$L_{i,t} \leq L_{O_2,\max,i} \quad (i=1,\dots,n) \quad (4.16b)$$

(3) 蒸发器蒸发能力的约束:

$$LG_{O_2,t} \leq LG_{O_2,\max} \quad (4.16c)$$

(4) 液化器液化能力的约束:

$$GL_{O_2,\min} \leq GL_{O_2,t} \leq GL_{O_2,\max} \quad (4.16d)$$

(5) 液氧储罐的约束:

$$T_{O_2,\min} \leq T_{O_2,1}, T_{O_2,2} \leq T_{O_2,\max} \quad (4.16e)$$

上式中, $T_{O_2,1}, T_{O_2,2}$ 为液氧外卖前、外卖后时刻的液氧储量, 其值可根据 $T_{O_2} = b \cdot t \cdot \sum L_{O_2,i} + T_{O_2,0} - S_{O_2,t} - b \cdot t \cdot LG_{O_2}$ 求得。

(6) 氧气供应量及用户使用量的平衡约束:

$$U_{O_2,L} + U_{O_2,H} + GL_{O_2,t} \leq \sum G_{O_2,i} \quad (4.16f)$$

(7) 氧气沿程储罐压力的约束:

$$P_{O_2,\min} \leq P_{O_2} \leq P_{O_2,\max} \quad (4.16g)$$

(8) 变量非负约束

$$G_{i,t}, L_{i,t}, LG_{O_2,t}, GL_{O_2,t}, S_{L_{O_2,t}}, P_{O_2} \geq 0 \quad (4.16h)$$

以上各式中:

$G_{O_2,\min,i}$ 、 $G_{O_2,\max,i}$ 、 $L_{O_2,\max,i}$ ——各制氧机的最低制氧能力、最高制氧能力及最大液氧产量, m^3/h

$GL_{O_2,\min}$ 、 $GL_{O_2,\max}$ 、 $LG_{O_2,\max}$ ——液化器最小液化量、最大液化量及液氧蒸发的最大能力, m^3/h

$T_{O_2,\min}$ 、 $T_{O_2,\max}$ 、 $T_{O_2,0}$ ——液氧储罐的最低安全储量、最高安全储量及初始时刻的液氧储量, t

$P_{O_2,\min}$ 、 $P_{O_2,\max}$ ——氧气管网及储罐的上、下压力极限, P_a

b 、 t ——气氧到液氧的转换系数 ($b=0.00143t/m^3$) 和计算时长 (h)

类似, 我们还可以建立氮气、氩气的调度分配模型, 在此不再讨论。

上述的模型是对正常生产状态建立的基于数学规划的分配模型, 在适应的范围之内能求得最优解, 但该模型是建立在一定的假设条件上, 当氧气有较大波动时就会出现超出使用的范围。所以, 下面针对两种特殊工况建立氧气优化分配模型。

4.2.2 高炉休风用氧模型

4.2.2.1 问题的描述

高炉休风是炼铁生产中不可避免的程序，可分为计划性休风和非计划性休风两种。首钢京唐的计划休风通常为一个月一次，每次休风持续 12~24 小时不等；而因突发故障等引起的非计划性休风次数则相对较多，持续时间也不等，通常非计划性休风只能提前数小时预知。

在高炉休风期间，高炉停止供氧，同时转炉也可能会随后修炉，这就造成了用氧量的减少，而与此同时，如果制氧机没做出相应的调节，由于供大于求，氧气的放散就会大大的增加。可见，高炉休风是造成氧气放散率高的原因之一，有必要对高炉休风期间的氧气系统工作制度进行优化。本模型就是在满足氮气、氩气供应等的条件约束，使得氧气的放散最小。

4.2.2.2 模型简化与假设

- 1、最大休风时间不超过 24 小时；
- 2、休风期间制氧机可减量生产或停机；
- 3、氧、氮、氩产出按比例可调节。

4.2.2.3 变量的定义

$G_{O_2,i,t}$ 、 $G_{N_2,i,t}$ 、 $G_{Ar,i,t}$ ——第 t 时段各制氧机的氧气、氮气、氩气产量， m^3/h ；

$U_{O_2,t}$ 、 $U_{N_2,t}$ 、 $U_{Ar,t}$ ——第 t 时段氧、氮、氩的用量， m^3/h ；

$T_{O_2,t}$ 、 $T_{N_2,t}$ 、 $T_{Ar,t}$ ——第 t 时段液氧、液氮、液氩的储存量， m^3 ；

$LG_{O_2,t}$ 、 $LG_{N_2,t}$ 、 $LG_{Ar,t}$ ——第 t 时段所需蒸发的液氧、液氮、液氩量， m^3/h 。

4.2.2.4 目标函数

用户的用氧量减少，此时，为了减少放散，可以通过减少氧气发生端的气体产量。

即确保在约束条件下， $\sum_{i=1}^n G_{O_2,i,t}$ 、 $\sum_{i=1}^n G_{N_2,i,t}$ 、 $\sum_{i=1}^n G_{Ar,i,t}$ 分别最小。目标函数为

$$\min \sum_{t=1}^{T_N} \sum_{i=1}^n G_{O_2,i,t} + \min \sum_{t=1}^{T_N} \sum_{i=1}^n G_{N_2,i,t} + \min \sum_{t=1}^{T_N} \sum_{i=1}^n G_{Ar,i,t}。$$

此时，若只考虑氧气的最优分配所以目标函数可表示为：

$$\min \sum_{t=1}^{T_N} \sum_{i=1}^n G_{O_2,i,t} \quad (4.17)$$

该优化目标就使各制氧机的产品产量之和最小，以达到气体的放散量最小，从而降低放散率。根据不同时段用户的需求信息和管网及储罐信息作为约束条件，即可求解此

优化目标。

4.2.2.5 约束条件

(1) 制氧机组减量调节的约束

制氧机的工作工况通常会有个范围,首钢京唐的制氧机的工作可调负荷为设计工况的75%~105%。可见,制氧机的减量调节受到制氧机自身可调范围的约束。

制氧机的产量限制如下:

氧约束: $G_{O_2,i,t,\min} \leq G_{O_2,i,t} \leq G_{O_2,i,t,\max}$, 其中, $G_{O_2,i,t,\min}$ 、 $G_{O_2,i,t,\max}$ 分别为 t 时段第 i 台制氧机的氧产量下限和上限;

氮约束: $G_{N_2,i,t,\min} \leq G_{N_2,i,t} \leq G_{N_2,i,t,\max}$, 其中, $G_{N_2,i,t,\min}$ 、 $G_{N_2,i,t,\max}$ 分别为 t 时段第 i 台制氧机的氮产量下限和上限;

氩约束: $G_{Ar,i,t,\min} \leq G_{Ar,i,t} \leq G_{Ar,i,t,\max}$, 其中, $G_{Ar,i,t,\min}$ 、 $G_{Ar,i,t,\max}$ 分别为 t 时段第 i 台制氧机的氩产量下限和上限。

(2) 生产计划对使用量的约束

$$\sum_{i=1}^n G_{O_2,i,t} \geq U_{O_2,t}; \quad \sum_{i=1}^n G_{N_2,i,t} \geq U_{N_2,t}; \quad \sum_{i=1}^n G_{Ar,i,t} \geq U_{Ar,t} \quad (4.18a)$$

(3) 资源约束

$$\text{氧约束:} \quad \sum_{i=1}^n G_{O_2,i,t} + b_{O_2} T_{O_2,t} \geq U_{O_2,t} + LG_{O_2,t}; \quad (4.18b)$$

$$\text{氮约束:} \quad \sum_{i=1}^n G_{N_2,i,t} + b_{O_2} T_{N_2,t} \geq U_{N_2,t} + LG_{N_2,t}; \quad (4.18c)$$

$$\text{氩约束:} \quad \sum_{i=1}^n G_{Ar,i,t} + b_{O_2} T_{Ar,t} \geq U_{Ar,t} + LG_{Ar,t}。 \quad (4.18d)$$

式中, b_{O_2} ——液氧转化为气氧的体积系数, 其值为 $832.2\text{Nm}^3/\text{m}^3$ 。

(4) 吹扫用氮的约束

高炉休风时需要用大量的氮气对其进行吹扫。

$$\sum_{i=1}^n G_{N_2,i,t} + b_{N_2} T_{N_2,t} \geq G_{c,N_2} \cdot T_{c,N_2} \quad (4.18e)$$

$$\sum_{i=1}^n G_{N_2,i,t} + LG_{N_2,t} \geq G_{c,N_2} \quad (4.18f)$$

式中, t_l ——吹扫时间段;

b_{N_2} ——液氮转化为气氮的体积系数, 其值为 $648\text{Nm}^3/\text{m}^3$;

G_{c,N_2} ——高炉休风吹扫用氮量, m^3 ;

T_{c,N_2} ——高炉休风氮气吹扫持续时长, h 。

根据上面的模型, 可对高炉休风期间制氧机的工况进行决策, 确定空分产品产量, 以对制氧机进行准确的减量调节, 必要时可以对空分系统进行停机操作, 以减少能源的浪费。

(5) 变量非负约束

即上述变量均为非负值。

4.2.3 空分停机用氧模型

4.2.3.1 问题的描述

在实际生产过程中, 制氧机会发生故障而造成空分停机, 此时, 氧气、氮气、氩气的供应量减少, 造成供需矛盾, 此时的解决办法是: 未出现故障的制氧机提高运行负荷, 尽可能地增大产量, 看是否能提供足够的氧气; 若满足不了气体的供应, 则再根据液体储罐的液体储存量, 确定可蒸发的液体量, 蒸发储存的液体以维持原有的供应模式; 若液体的储存量不足以维持原有的供应量, 则给出系统可提供的最大蒸发量及故障期间液体储罐可提供的蒸发量。

由于制氧机故障时, 炼钢生产和炼铁生产的正常运行, 一般不会选择停炉等待, 所以, 需要根据选择的蒸发量及目前的生产用气量和生产计划来重新安排各用户的使用量, 即需要重新规划各用户的用气量。为保证炼钢生产的正常进行, 满足对转炉所需氧气的供应, 对氧气使用的重规划, 通常是适量减少高炉鼓风富氧率, 但这也会使高炉的焦比变大, 导致成本的增加。

下面建立制氧机故障停机时氧气的供应模型。

4.2.3.2 模型简化与假设

- 1、故障时长较短, 不会导致高、转炉停炉等待;
- 2、优先考虑转炉供氧;
- 3、高炉供氧减少时, 只考虑对焦比的影响;
- 4、不考虑氮、氩供应的影响。

4.2.3.3 变量的定义

i ——各用氧单位； j ——各个可工作的制氧机； t_2 ——制氧机故障时段；

U_i ——故障前各用氧单位的用氧量， m^3/h ；

U_{i,t_2} ——规划后各用氧单位的用氧量， m^3/h ；

G_{O_2,j,t_2} ——可工作制氧机在 t_2 时段的产量， m^3/h ；

T_{O_2,t_2} —— t_2 时段的液体储存量， m^3 ；

LG_{O_2,t_2} —— t_2 时段的液氧蒸发量 m^3/h ；

U_{O_2,l,t_2} —— t_2 时段的高炉总用氧量， m^3/h ；

U_{O_2,s,t_2} —— t_2 时段的转炉总用氧量， m^3/h 。

4.2.3.4 目标函数

氧气发生端的产量减少，此时，可通过用氧段氧气使用量最大来确保氧气的充分使用，达到 0 放散。即在满足约束条件下，目标函数如下：

$$\max \sum_{i=1}^n U_{i,t_2} = \max(U_{O_2,l,t_2} + U_{O_2,s,t_2}) \quad (4.19)$$

由于高炉供氧量可适当调节，可见，目标函数最终确定的高炉和转炉的供氧分配，使提供的氧气量使用率最大。

4.2.3.5 约束条件

(1) 资源约束

t_2 时段制氧机的氧气总产量和可蒸发液氧量的约束

$$\sum_{i=1}^n U_{i,t_2} \leq G_{O_2,j,t_2} + b_{O_2} T_{O_2,t_2} \quad (4.20a)$$

t_2 时段制氧机的氧气总产量和液氧蒸发量的约束（等式约束）

$$\sum_{i=1}^n U_{i,t_2} = G_{O_2,j,t_2} + LG_{O_2,t_2} \quad (4.20b)$$

(2) 各用户原用氧量的约束

$$U_{i,t_2} \leq U_i \quad (4.20c)$$

(3) 蒸发器蒸发能力约束

$$LG_{O_2, t_2} \leq LG_{O_2, t_2, \max} \quad (4.20d)$$

(4) 高炉焦比的约束

$$\beta(\alpha) \leq \tilde{\beta} \quad (4.20e)$$

式中, α ——高炉富氧鼓风率;

$\beta(\alpha)$ ——富氧率 α 下的高炉焦比, t/t;

$\tilde{\beta}$ ——焦比限定值, t/t。

(5) 变量非负约束

即上述变量均为非负值。

4.3 模型的算法与求解

4.3.1 模型的算法

对于 4.2.1 所建立的正常生产氧气优化分配模型, 模型可简化为:

$$\begin{aligned} \min & c_{11}x_1 + \cdots + c_{1n}x_n \\ & \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \min & c_{m1}x_1 + \cdots + c_{mn}x_n \\ s.t. & : a_{11}x_1 + \cdots + c_{1n}x_n \leq b_1 \\ & \dots \dots \dots \\ & a_{l1}x_1 + \cdots + a_{ln}x_n \leq b_l \\ & x_j \geq 0, j = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (4.22)$$

式中, $c_{ij} (i=1, \dots, m; j=1, \dots, n)$, $a_{ij} (i=1, \dots, l; j=1, \dots, n)$ 及 $b_i (i=1, \dots, l)$ 均为常数。可见, 该优化模型是一个复杂的多目标最优化模型。传统的多目标优化的求解方法有评价函数法、交互规划法、分层求解法等。近年来, 传统的多目标优化方法有了很大的发展, 遗传算法、模糊优化、神经网络等现代方法也被用到了多目标优化的求解中, 使得多目标优化方法取得了很大的进步。

但对于实际工程优化问题, 仅从纯数学模型的求解, 将多目标优化转化为单目标优化是不够的。因为, 我们忽略了现实中各目标的竞争性和冲突性的客观存在, 为此, 我们需要将其与决策者的决策相结合, 即以分析者的求解与决策者的决策相结合的求解过程, 对分析阶段进行反复交替求解的方法——逐步宽容约束法。

逐步宽容约束法的求解过程包括两个阶段, 即分析和决策。在分析阶段, 分析者对

模型的求解使用理想点法,即把得到的解所对应的一组参考目标值和理想目标值的最优满意目标给出,使其目标值做出让步的宽容量,以改善不满意目标。如此反复,逐步用宽容目标的让步去改善不满意目标,最终求得决策者满意的解。[50]

对于各分目标为线性函数 $f_i(x) = c_i^T x = \sum_{j=1}^n c_{ij} x_j, i=1, \dots, m$ 的多目标极小值问题,在目标函数约束集 X 上极小值各分目标函数 $f_j(x)(j=1, \dots, m)$, 使得极小点 x^j :

$f_j(x^j) \min_{x \in X} f_j(x), j=1, \dots, m$ 。逐步宽容约束法的计算步骤:

第 1 步: 分目标极小值。求 x^j 使 $f_j(x^j) \min_{x \in X} f_j(x), j=1, \dots, m$ 。若 $x^1 = \dots = x^m$, 则输出

绝对最优解 $x^* = x^j$, 否则进入第 2 步。

第 2 步: 列出目标列表。计算 m^2 个目标值 $f_{ij} = f_i(x^j), i, j=1, \dots, m$, 由此, 得到

$$f_i^* = f_{ii}, i=1, \dots, m; \quad f_i^* = \min_{1 \leq j \leq m} f_{ij}, i=1, \dots, m。$$

第 3 步: 给定初始约束集。令 $x^1 = x, k=1$ 。

第 4 步: 计算权系数 $w_1, \dots, w_m$ 。

第 5 步: 求解辅助问题, 求解极小值问题

$$\begin{cases} \min \lambda \\ s.t. x \in X \\ w_i \left(\sum_{j=1}^n c_{ij} x_j - f_i^* \right) \leq \lambda, i=1, \dots, m \\ \lambda \geq 0 \end{cases} \quad (4.23)$$

的最优解 $(x^k, \lambda^k)^T$, 其中 w_i 是第 i 项的权系数。

第 6 步: 比较目标值。对当前的参考目标值 $f_1(x^k), \dots, f_m(x^k)$ 和理想目标值 $f_1^*, \dots, f_m^*$ 进行比较。比较结果有三种: 1、若对所有的目标均满意, 则输出 $x = x^k$; 2、对所有的目标均不满意, 或者 $k=m$ 也对一些目标不满意, 则无解, 停止迭代运算; 3、若 $k < m$, 对目标 $f_{sk} (1 \leq sk \leq m)$ 表示满意, 则进行第 7 步。

第 7 步: 构造新的约束集。对满意目标 f_{sk} 给出对大宽容量 $\Delta_{sk} > 0$, 然后做出新的约束集 X^{k+1} , 令 $k=k+1$, 转到第 4 步。

图 4.10 即为宽容约束法的求解框图。

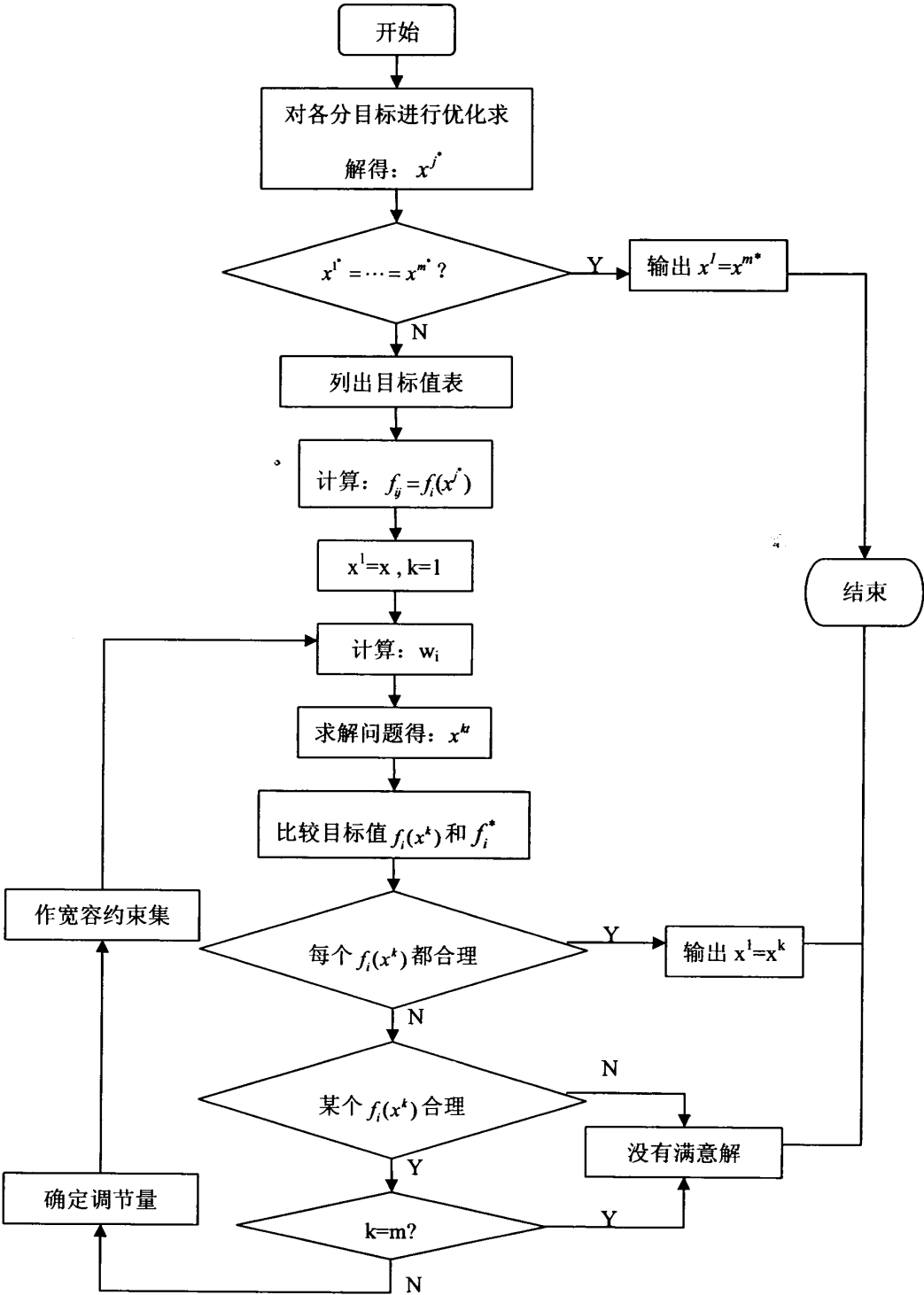


图 4.10 宽容约束法求解框图

Fig. 4.10 The diagram of tolerance constraint method

此外，对于此多目标值优化，MATLAB 虽然自带有求解函数，但其求解效果远不如利用宽容约束法这种人机互动的求解方法准确。对于宽容约束法，可利用 MATLAB

语言编程来实现。

对于 4.2.2 和 4.2.3 所建立的优化模型为单目标函数的有约束最优化问题，均可利用单纯形法进行求解，且 MATLAB 提供了详细的单目标函数的优化计算方法和函数，在此不做详细介绍。

4.3.2 模型的求解

MATLAB 的函数库自带有强大的有约束优化问题求解函数，4.2.1 节中的 3 个目标函数及约束条件均是线性规划问题。对于线性规划问题，求解方法很多，其中单纯形法是最有效的一种方法。^[51]

MATLAB 最优化工具箱中实现了此算法，提供了求解线性规划问题的 `linprog()` 函数。所以可利用该函数分别求得各子目标的最优解 x^j 及最优值 f^j 。^[52]

下面利用现有的首钢京唐公司的数据，对氧气最优日调度模型进行求解如下。

首先，对模型中的变量进行简化，对于 $G_{i,t}$ 可用 x_1 和 x_2 分别表示两台制氧机的氧气产量，对于 $L_{i,t}$ 可用 x_3 和 x_4 分别表示两台制氧机的液氧产量， $LG_{O_2,t}$ 用 x_5 表示， $GL_{O_2,t}$ 可用 x_6 表示， $S_{L_{O_2,t}}$ 可用 x_7 表示。由此，4.2.1 节中的优化模型的 3 个子目标可表示为 3 个如下的线性规划问题：

$$\begin{aligned} \min \quad & f^T x \\ x \text{ s.t. } \quad & \begin{cases} Ax \leq B \\ A_{eq} x = B_{eq} \\ x_m \leq x \leq x_M \end{cases} \end{aligned} \quad (4.24)$$

为描述原问题的方便及求解得高效性，这里的约束条件已经进一步细化为限行等式约束 $A_{eq} x = B_{eq}$ ，线性不等式约束 $Ax \leq B$ ，以及 x 变量的上界向量 x_M 和下界向量 x_m ，使得 $x_m \leq x \leq x_M$ 。 $f^T x$ 可表示如下三个线性函数：

$$\begin{cases} x_1 + x_2 - x_6 - U_{O_2,L} - U_{O_2,H} \\ h_1(x_1 + x_2) + h_2(x_3 + x_4) + h_3x_5 + h_4x_6 \\ P_g(x_1 + x_2) + P_l(x_3 + x_4) + P_{LG}x_5 + (P_{GL} - K_c)x_6 - K_sx_7 - (K_h \cdot U_{O_2,H} + K_l U_{O_2,L}) \end{cases} \quad (4.25)$$

上式中除向量 x 的元素外，其余均是已知值。同样可以找到每个子目标用来求解所对应的约束条件。

对 3 个子目标及其对应的约束条件均利用 `linprog()` 函数即可求得 3 个最优解

x^{1*} 、 x^{2*} 、 x^{3*} 和最优值 f^{1*} 、 f^{2*} 、 f^{3*} 。以首钢京唐 2011 年 3 月 26 日的生产数据为例，计算结果如下：

$$\begin{cases} x^{1*} = (60188, 57729, x_3, x_4, x_5, 5834, x_7) \\ x^{2*} = (59850, 58067, 287, 255, 3.28, 5520, x_7) \\ x^{3*} = (58466, 59451, 315, 273, 3.59, 5880, 2.74) \end{cases} \quad (4.26)$$

可见， x^{1*} 、 x^{2*} 、 x^{3*} 所对应的元素值不同，即 x^{1*} 、 x^{2*} 、 x^{3*} 不是求得的最优值，进入宽容约束法求解的第二步。将求得的 x^{1*} 、 x^{2*} 、 x^{3*} 分别代入各个子目标函数，由于 x^{1*} 、 x^{2*} 解的不完整性，最终可得到 $3^2-2^2=5$ 个目标值构成的值域表，从表中可选取各目标的最优值 f^* 和相对最劣值 f^{*0} 。

利用 MATLAB 优化工具箱的 `fgoalattain` 函数可实现对多目标的线性规划问题的求解。首先构建 `fgoalattain` 函数应用背景的辅助条件，并根据约束条件和辅助条件求解出该多目标的最优解 x^{k*} 和对应的最优值 f^{k*} 。对求得的 f^* 和 f^{k*} 进行满意度计算，即比较目标值 f^* 和 f^{k*} ，计算其函数满意度和总体满意度，计算公式为：

$$K_i = (f^{k*} - f^{*0}) / (f^* - f^{*0}) \quad (4.27)$$

式中， K_i 为其满意度。

对于求得的 K_i ，当 $|K_i| \leq \alpha$ （ α 为设定的满意度）时，所有目标值均满意，则输出最优解和最优值。当 $|K_i| \geq \alpha$ 时，则返回上一步，在最大宽容约束条件下改变 `fgoalattain` 函数设定约束条件，重新求得最优解 x^{k*} 和对应的最优值 f^{k*} ，并再次计算满意度，直到满足 $|K_i| \leq \alpha$ 时，输出最优解和最优值。

4.4 实例分析

本结通过对首钢京唐公司的实例分析，对上面建立的氧气系统优化调度模型进行测试。实例分析的目的是基于 4.1 节建立的预测模型预测的数据，利用 4.2 节所建立的调度模型对氧气系统进行决策，并将结果与实际情况比较。

4.4.1 实例分析一

对于正常生产，由于预测模型存在误差，将导致调度模型的输入数据与实际数据存在误差，在此，选取预测结果相对误差最小和最大的两组数据作为优化调度模型的输入数据，这样可以更直观的反应模型的优化效果。下面分别选取 2011 年 3 月 27 日和 2011 年 3 月 29 日这两组数据作为验证数据，来验证正常生产调度模型的优化效果。

模型不仅需要各用氧单位的用氧量作为已知条件，同时还与制氧机氧气生产能力、

液氧生产能力、液化器液化能力、蒸发器蒸发能力、管网和储罐的状态等约束条件有关。

表 4.5~4.7 为各用氧单位预测值和各约束条件的状况表。

上述条件中，高炉用氧为低压氧气 $U_{O_2,L}$ ，转炉用氧为高压氧气 $U_{O_2,H}$ ，据表 4.5 可求得其值；其余条件均是约束条件值，分别代入各约束条件。根据采用的模型和算法，对 2011 年 3 月 27 日和 2011 年 3 月 29 日这两组数据的优化结果同实际生产情况的比较如表 4.8。

表 4.5 氧气用量预测值
Table4.5 The predictive value of oxygen consumption

日期	1#高炉用 氧量	2#高炉用 氧量	1#脱磷转 炉用氧量	2#脱磷转 炉用氧量	1#脱碳转 炉用氧量	2#脱碳转 炉用氧量	3#脱碳转 炉用氧量
2011/3/27	620430	687210	351010	226590	257180	252530	248110
2011/3/29	626810	676950	353180	221890	253980	255830	243840

表 4.6 液化器和蒸发器生产能力表
Table 4.6 The liquefaction and evaporator capacity table

项目	正常工况 (m³/h)	最大能力 (m³/h)
液化器	2000 (氧气)	2500 (氧气)
蒸发器	180 (液氧)	240 (液氧)

表 4.7 液氧罐液位状态表
Table 4.7 The status level of liquid oxygen storage tank

日期	容量 (m³)	初始液位 (m³)	最低安全液位	最高安全液位
2011/3/27	4000	3682	1200	3900
2011/3/29	4000	3645	1200	3900

表 4.8 优化值与实际值的比较
Table 4.8 Comparative of the optimize value and actual value 单位 (m³)

日期		1#制氧机 氧气产量	2#制氧机 氧气产量	1#制氧机 液氧产量	2#制氧机 液氧产量	氧气液 化量	液氧蒸 发量	液氧外 卖量
	实际值	1488395	1372660	63.3	60.8	35188	0	224
11/3/27	优化值	1348970	1119430	78	77	27451	0	296
	实际值	1451600	1372458	65.5	61.2	35202	0	185
11/3/29	优化值	1421080	1247250	81	79	28790	0	263

可根据预测数据优化的各决策变量有明显的改变。此时，决策者可根据优化结果和自己的经验进行氧气生产的决策和调度分配。以 3 月 27 日数据为例，可以减量调节两台制氧机的氧气产量到优化值，增加液氧产品的产量，根据液氧罐的液位对氧气液化量、汽化量和液氧外卖量进行决策。根据上表和优化模型目标函数，可以计算优化目标函数值，对调度结果的经济性进行分析。表 4.9 为优化值与实际值的经济性对比。

表 4.9 优化效果对比表
Table 4.9 The Optimization results' comparison table

日期		放散量/m ³	总电耗/kW·h	经济收益/万元	放散率/%
2011/3/27	实际值	198220	2494800	16.58	6.93
	优化值	104380	2482711	21.9	4.23
2011/3/29	实际值	187615	2488200	13.69	6.64
	优化值	109273	2454968	19.46	4.1

上表可以看出，3 月 27 日优化后的氧气放散率为 4.23%比实际的 6.93%降低 2.7%，此外，总电耗可降低 12111 kW·h，再加之经济收益增加 5.32 万元，计算可得当日可节省成本约 8.64 万元；同样，对于 3 月 29 日优化之后的氧气放散率为 4.1%比实际的 6.64%降低 2.54%，此外，总电耗可降低 33232 kW·h，再加之经济收益增加 5.77 万元，计算可得当日可节省成本约 9.69 万元。模型的优化效果明显。

从上面的经济性分析可见，正常生产状态下的氧气系统的优化分配模型有很好的节能性能，只需提高预测系统的精度，即可对氧气的调度和分配进行有效地决策，对能源中心的决策者具有一定的指导意义。

4.4.2 实例分析二

此实例分析主要是针对检修状态下的氧气系统优化模型。通常，钢铁企业都会对设备进行计划检修，首钢京唐公司也不例外。在此状态下，用氧单位的氧气使用量波动较大，下面选取具有代表性的数据进行分析，这里选取 2011 年 4 月 2 日的数据作为实例分析数据。表 4.10 为 4 月 2 日氧氮氩用户的检修信息表。

此实例的优化分配模型是 4.2.2 所建立的高炉休风模型。模型中约束条件不同于正常生产状态的氧气调度分配模型，约束条件中不止是氧气的约束，还有氮气与氩气的约束。所以表 4.10 也引入了氮气、氩气用户的检修信息。

表 4.10 检修信息表

Table 4.10 The servicing information table

单位	机组名称	检修事件	检修时间
炼铁	2#高炉	14 小时检修	08:00:00
炼钢	1#脱磷转炉	14 小时检修	08:00:00
炼钢	3#脱碳转炉	14 小时检修	08:00:00
焦化厂	3#焦炉	10 小时检修	08:00:00
轧钢	2250 热轧	10 小时检修	08:00:00
轧钢	1700 酸轧	10 小时检修	08:00:00

所以, 可根据正常生产时的数据和各检修单位的用气量的变化求得氧氮氩检修状态的需求量, 进而结合 4.2.2 的约束条件可求得检修状态的氧气分配情况。模型优化结果如表 4.11。

表 4.11 模型优化结果对比

Table 4.11 The comparison of optimal result of the model

符号	意义	实际值	优化值	单位
$G_{O_2,1}$	1#制氧机氧气产量	1165250	1055892	m^3
$G_{O_2,2}$	2#制氧机氧气产量	1371200	1082405	m^3
$G_{N_2,1}$	1#制氧机氮气产量	1074490	1084620	m^3
$G_{N_2,2}$	2#制氧机氮气产量	1182730	1100780	m^3
$G_{Ar,1}$	1#制氧机氩气产量	29400	29170	m^3
$G_{Ar,2}$	2#制氧机氩气产量	28800	28464	m^3
LG_{O_2}	液氧蒸发量	242	668	m^3
LG_{N_2}	液氮蒸发量	263	712	m^3
LG_{Ar}	液氩蒸发量	102	197	m^3
F_{O_2}	氧气放散量	518540	148056	m^3
$W_{总}$	总电耗	2122148	1862456	kW·h
α_{O_2}	放散率	20.44%	6.92%	

1#脱磷转炉和 3#脱碳转炉均停炉检修，其用氧量和用氩量均为 0；焦化厂的 3#焦炉停炉检修时的氮气消耗为 0；轧钢的 2250 热轧和 1700 酸轧均停止轧制，此时的耗氮量也为 0。

决策者对于检修状态下制氧机的实际操作分为减量生产和停机两个方法。从上表的实际数据可以看出，此时的氧气产量已小于最大减量时的 75%，所以采用了在满足氧气需求的情况下对 1#制氧机停机运行。

高炉从正常状态到休风的用氧量变化可根据第二章的式（2.9）求得：

$$I_{use}(t) = I - b_1 t \quad (4.28)$$

休风时，氧气需求量减少，制氧机采取减量生产或有必要采取停机，氧气的供应主要靠储存的液氧蒸发供应，氮气与氩气的供应也是如此。根据检修计划信息，可对检修日的氧气产量及液氧蒸发量进行优化分配。

同时，表 4.11 的比较可以看出，检修当日的氧气放散率为 20.44%，有很大一部分氧气被白白浪费，造成很大的经济损失。企业实际检修时是对 1#制氧机进行减量调节或停机，其氧、氮、氩的产量明显低于 2#制氧机，决策者对于液体储罐的液体蒸发量明显低于优化后的值。优化后决策者可通过降低制氧机工作负荷及增加液体蒸发量，来调整实际生产值满足优化值。优化后的氮气量明显高于实际生产的氮气量，这主要是休风时需要大量的氮气对高炉进行吹扫，使氮气使用量增加。系统日总电耗减少 259692 kW·h，放散率为 6.92%，仍然很高，但是比实际的 20.44%降低了 13.52%，经计算可得，当日可节约成本约 17.9 万元。

可见因故障检修或计划检修时的氧气放散很大，具有很大的节能空间，针对这种情况建立的优化分配模型具有很好的优化效果。

第 5 章 结论与展望

5.1 结论

钢铁企业氧气的合理利用和优化,对企业的节能降耗具有重要意义。本文通过对国内钢铁企业氧气系统的充分调研,指出了现在钢铁企业存在的制氧系统配置不合理,氧气放散率高、氧氮产量矛盾等问题;从生产、输送、用户 3 个方面,对钢铁企业氧气系统特性进行了分析,并指出其对氧气放散的影响;针对 1000 万吨级钢铁企业,对氧气发生端和用户端分别建立了氧气系统新的决策指标并以首钢京唐为例,对所有指标进行了应用及分析;针对首钢京唐公司氧气系统,建立了氧气的预测和优化分配模型,并对模型进行了求解和实例分析,解决了氧气合理生产和分配的问题。通过这些研究工作,得到的主要结论如下:

(1) 对氧气系统的特性分析,主要是时变规律进行了分析,从得出的氧气动态平衡方程可看出,氧气系统的生产端、储存运输、使用端共同对系统的经济性和氧气放散产生影响。

(2) 对 1000 万吨规模钢铁企业,依据生产端电耗建立的氧气相对综合电耗、产品综合经济效益和制氧相对电耗这 3 个决策指标,具有很好的经济性决策作用;依据用户端建立的用氧均衡度指标,对转炉用氧方案有很好的决策作用。决策指标对首钢京唐氧气系统的决策分析也显示了很好的实用性和经济性。

(3) 利用人工神经网络(BP 网络)建立的氧气预测模型,对正常生产,具有很好的预测效果,预测结果可作为优化分配模型的录入数据。预测模型对首钢京唐部分数据的验证,其最大预测相对误差为 1.56%,最小相对误差为 0.01%,预测具有很好准确性。

(4) 针对 3 种情况建立的氧气优化分配模型,具有很好的优化效果。实例分析中,正常生产分配模型可使氧气放散率降低 2.54%,日总电耗降低 33232 kW·h,经济收益增加 5.77 万元,日节约成本 9.69 万元;检修状态的高炉休风模型可使氧气放散率降低 13.52%,日总电耗减少 259692 kW·h,当日可节约成本约 17.9 万元。

(5) 建立的预测模型和优化分配模型,可用在京唐公司氧气管理系统中,以降低电耗及减少氧气放散,提高系统经济性。

5.2 研究展望

本文的研究思路主要是从“节能、环保、经济性”的角度，建立一个氧气系统决策模型及动态的氧气预测和优化分配模型。静态决策模型是分别从氧气生产端和使用端着手建立的，对氧气系统配置进行静态优化，对氧气系统的经济配置有很好的决策和指导意义，为了更好地对系统决策，更可做出对生产端的空分产品配比、压力方案选择等更具体的决策，可使对系统配置有更好的经济性；对用户端的决策分析，是针对转炉的用氧特性进行的，若将考虑范围扩大到整个用户端，即包括高炉及其他用户，对氧气系统的决策将更为准确。所以该部分还需不断的改进与完善。

动态部分的优化由氧气使用量预测模型和优化分配模型组成。氧气使用量预测模型采用的 BP 网络预测会受参数设定、数据组数等因素的影响，所以，要根据情况的改变去改变模型参数的设定及对网络的训练，预测模型还是有一定的局限性。对于氧气的优化分配，虽有很好的优化效果，但在建立时设定了模型的条件假设，存在问题的简化，这使得优化效果与实际情况的匹配度不高。此外，预测与优化分配都只是针对首钢京唐的氧气系统建立的，缺少共性。所以，针对于钢铁企业的氧气系统而言，还需要向更能体现钢铁企业氧气系统实际情况与提高共性目标发展。

在对氧气系统各个模型完善建立后，即可开发软件使其可视化，建立完整的氧气管理系统，使决策者能更方便、更直接的进行管理。由于本人编程能力有限，仅尝试使用 MATLAB 的 GUI 工具使预测模型和优化分配模型可视化，但效果并不好。所以，对氧气系统的决策与优化分配，还需要专业人员利用更好、更专业的开发工具开发氧气管理系统。

参考文献

1. 丁皓,郭新有. 关于我国钢铁工业二次能源利用的思考[J],科技进步与对策,2004(10): 102-104.
2. 李化治. 制氧技术(第二版)[M],冶金工业出版社,2009.08, 1~5.
3. 陈桂林. 钢铁工业用氧与空分设备的配置[J],气体分离,2005.No.1:9~11.
4. 周智勇. 大型空分技术现状及进展[J],气体分离,2008.No.6:16~21.
5. 胡云芝,张延平,胡帅.钢铁企业氧气用量预测模型研究[J],资源利用,2005(8): 217~222.
6. 刘姿,汤学忠,赵立合. 钢铁企业氧气合理利用支持系统的开发研究[J],冶金能源,1998(11):6~11.
7. 陈光,蔡九菊,陆钟武. 宝钢氧气系统的现状分析及对策[J],冶金能源,2001 20(4): 7~10.
8. 朱惠中,高远等. 宝钢制氧系统的经济运行[J],. 宝钢技术,2009(2): 23~26.
9. 杨自厚等. 人工智能技术及其在钢铁工业中的应用(上)[J],冶金自动化,1995,18(6): 3~9.
10. Kouiss Khalid, Pierreval Henri,Nasser Mebarki Using multiagent architecture in FMS for dynamic scheduling[J]. J Of Intel Manuf, 1997, 8(1): 41-47.
11. Sakamoto Y, Tonooka Y, Yanagisawa Y. International Journal of Energy Conversion and Management [J], Estimation of energy consumption for each process in the Japanese steel industry, 1999, 40 (11): 1129-1140.
12. Panwalker S S , Iskander Wafik. A Survey of Scheduling Rules[J],Oper Res, 1977, 25(1): 45-67.
13. 顾明言, 陈光. 钢铁企业均衡用氧评价模型研究[J], 安徽工业大学报, 2003.04 第20卷 第2期: 113~116.
14. 莫友坤.钢铁企业供氧优化决策支持系统研究[D], 武汉: 华中科技大学, 2004.
15. Blackstone J H , Philips D T ,Hogg G T.A State-of-the-art Survey of Dispatching Rules for Manufacturing Job Shop Operations[J]. Int J of Oper Res, 1982, 20(1): 27-46.
16. Noronha S J ,Sarma V S. Knowledge-Based Approaches for SchedulingProblems: A Survey[J].IEEE Transactions on knowledge and data engineering,3(1), June 1991: 160-170.

17. De Jong K A. Learning with Genetic Algorithm An Overview[J], MachineLearning, 1988, 3(21) 21-138.
18. 陈光. 钢铁企业能源模型及其氧气系统动态仿真[D], 东北大学, 2003.
19. 王长华. 联合型钢铁企业管网氧气的供应与平衡分析[J], 冶金能源, 2002 21(8): 15~18.
20. 江楚标, 陈明敏. 内压缩与外压缩流程空分装置能耗的比较[J], 深冷技术, 2000.3:1~5.
21. 赵明星, 陈万里. 空分装置技术分析[J], 科技信息, 2010.11:29~33.
22. 黄友锐, 曲立国. PID控制器参数整定与实现[M], 北京: 科学出版社, 2010.08, 2~3.
23. 陈光, 陆钟武, 蔡九菊, 卜庆才. 钢铁企业氧气系统动态仿真[J], 东北大学学报, 2002.10:940~943.
24. 王夫龙, 刘家海. 优化操作降低空分设备运行能耗[J], 冶金能源, 2007.05:45~49.
25. Carl Williams. Tune In To Better Control And Reduce Energy Costs[J], STEEL TIMES, 1999, 227(5): 164~168.
26. J Eggerth, L.Gould & K Gruber. Integrated Compact Mills: Steel-making Solutions For The 21st Century[J], Steel Times International, 1998, 22(3): 17~22.
27. 童莉葛等. 降低氧气放散率的高炉休风模型[J], 冶金能源, 1999, 18(3): 16~18.
28. 王立, 张延平. 钢厂空分产品能耗结构[J], 北京科技大学学报, 2008.11:7~12.
29. 鲍有文等. 国产大型空分装置操作仿真系统的开发研究[J], 北京联合大学报, 2003.6:63~66.
30. 陈光. 钢铁企业氧气生产方案优化模型研究[J], 安徽工业大学学报, 2003.10 第 4 期: 17~20.
31. 江楚标. 漫谈钢铁企业用空分装置的流程选择[J], 冶金动力, 2003.4:26~30.
32. 倪建刚. 内压缩还是外压缩——对于如何选择大型空分设备的一些看法[J], 杭氧科技, 2003.02:40~43.
33. 刘勇军, 朱耀成. 内压缩流程是近期国内大型空分国产化的最佳选择[J], 气体分离, 2007.No1:42~47.
34. 林知望. 冶金企业制氧机流程的比较[J], 低温与特气, 2009.8, 第 27 卷第 4 期: 23~26.
35. 顾福民. 制氧机与钢铁生产[J], 冶金动力, 1985 (3) .
36. 林文胜等. 氧气纯度与空分经济性分析[J], 低温工程, 1999 年第 4 期: 38~41.
37. 王雅贞, 张岩, 张洪文. 氧气顶吹转炉炼钢工艺与设备[M], 北京: 冶金工业出版社,

38. 孙德英. 首钢京唐钢制氧工程的设计构思浅析[J]. 气体分离, 2008.No.3: 16~18.
39. 周玉磊. 首钢京唐钢铁厂压缩空气供气系统的优化及节能设计[J]. 冶金动力, 2007年第6期: 34~36.
40. 肖家立. 钢铁企业氧气放散与空分设备的负荷调节[J], 深冷技术, 2002 (6): 1~5.
41. 徐文灏. 钢铁厂供氧系统的发展历程[J], 深冷技术, 2003.4:19~22.
42. 郭敏. 钢铁企业制氧机组配置[J], 钢铁技术, 2007 年第 4 期: 46~50.
43. 吴绍刚. 适用于联合钢铁企业的制氧流程初步构想[J], 低温技术, 2009 (10): 28~31.
44. 宋铁鸿. 冶金工厂氧气站设计及优化[J], 科技信息, 2010 年第 17 期: 948~950.
45. 葛哲学. 神经网络理论与 MATLAB2007 实现[M], 北京: 电子工业出版社, 2007.
46. 郭涤. 基于 MATLAB 的神经网络预测模型研究[J], 物流科技, 2005.
47. 马莉. MATLAB 语言使用教程[M], 北京: 清华大学出版社, 2011.
48. 薛定宇, 陈阳泉. 刚等应用数学问题的 MATLAB 求解[M], 北京: 清华大学出版社, 2011.
49. 富飞, 贾志峰, 朱红艳. 基于宽容约束法的多目标水资源优化配置[J], 水资源与水工程学报, 2011 (04): 77~81.
50. 耿玉磊, 张翔. 多目标优化的求解方法与发展[J], 制造及自动化, 2003,8 (105~108).
51. Wang XH,Yu S,Huang GH. Land allocation based on integrated GIS: optimization modeling at a watershed level[J], Landscape and Urban Planning, 2004(66):61~74.
52. 郑荣宝等. 基于 GECM 与 CA+ANN 模型的资源优化配置与模拟[J], 自然资源学报, 2012 (03): 497~500.

致 谢

本论文是在杜涛教授的悉心指导下完成的，在论文的选题、研究方案确定以及论文的撰写过程中，杜老师都给予了深入、细致的指导。杜老师高深的学术造诣和对课题前沿的深刻理解，使我受益匪浅，让我能及时明确自己的研究方向，不断地在科研工作中得到锻炼和提升。在整个研究生学习阶段，不论在学习和生活各方面都得到了杜老师无微不至的关怀和照顾。从杜老师的身上我不止学到了科学知识，更多的学到的是做人，做事的态度。在此，谨向导师表示崇高的敬意和深深的谢意！

论文的完成也离不开实验室其他老师的指导与帮助，感谢蔡九菊老师、董辉老师给予我的指导，同时感谢张琦老师、岳强老师、王连勇老师、王爱华老师、高成康老师、冯杰老师在学习和生活上给予我的无私帮助！

感谢实验室的博士孙文强、宋军和硕士姬立胜、杨鑫秋、刘向斌、黎志明、王萌、高文等人，在两年的研究生学习生活中，他们给予了我诸多帮助。特别感谢师兄孙文强，在平时的学习中，我得到了他细心的指导和热心的帮助，在论文完成的过程中，他多次帮我修改论文，提出了许多宝贵意见。

感谢材料与冶金学院 2010 级硕士 08 班（含工程热物理、热能工程、低温与制冷工程 3 个专业）全体同学、国家环境保护生态工业重点实验室全体研究生陪伴我共同渡过了这段美好的岁月和对我无私的帮助，在此一并致谢！

感谢我的父母和亲友，他们的支持和安慰使我能勇敢的面对一切困难，为理想去努力奋斗！