

声 明



本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《基于蚁群算法自动配煤系统的设计及应用》，是本人在华北电力大学攻读硕士学位期间，在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。据本人所知，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北电力大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。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了谢意。

学位论文作者签名：何军 日期：2010年3月15日

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解华北电力大学有关保留、使用学位论文的规定，即：①学校有权保留、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤同意学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

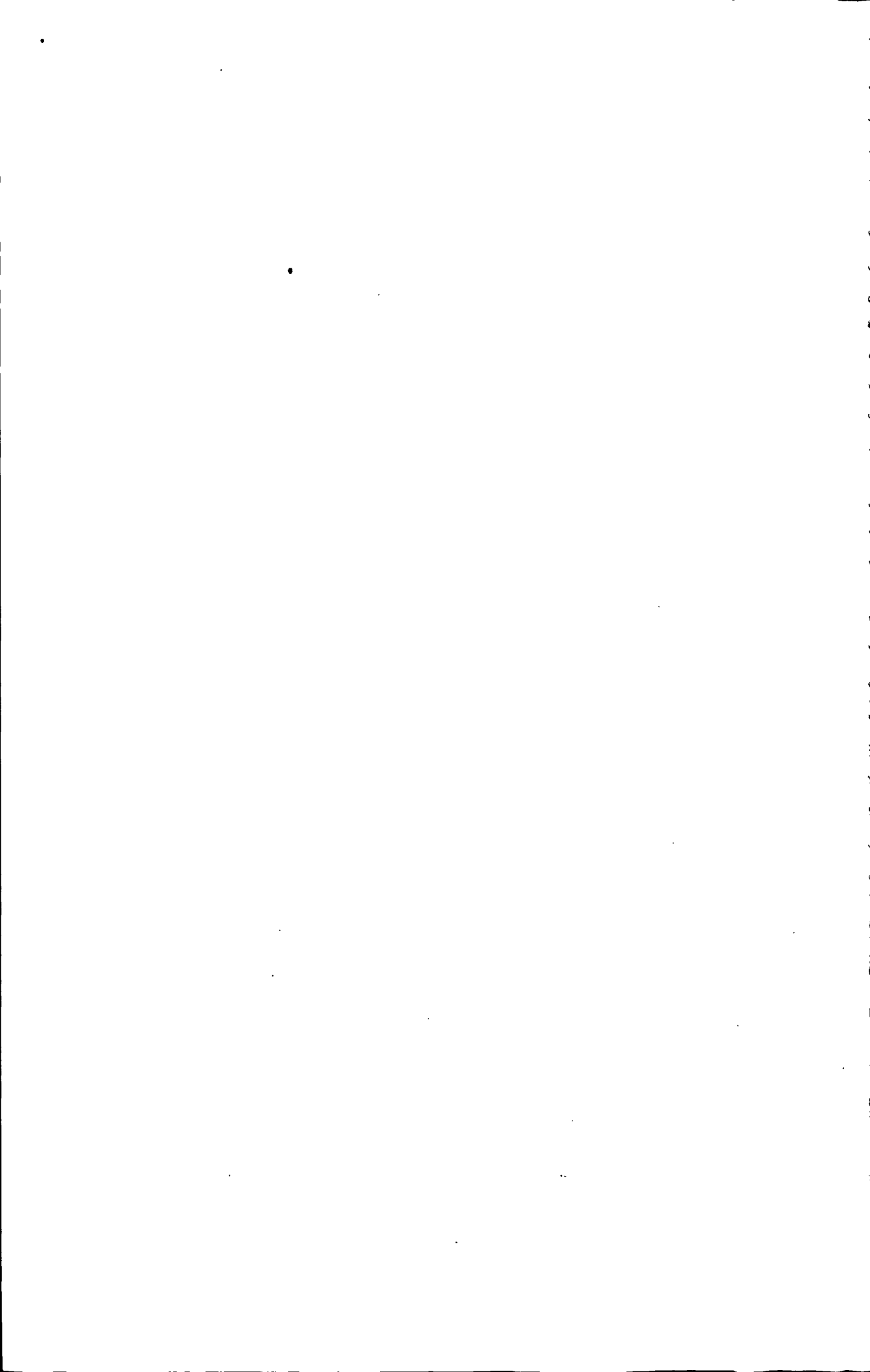
(涉密的学位论文在解密后遵守此规定)

作者签名：何军

导师签名：梁伟

日期：2010年3月9日

日期：2010年3月10日



摘 要

自动配煤系统是火力发电厂输煤程控系统的重要组成部分,当前国内火力发电厂自动配煤系统控制方法欠合理性,基于蚁群算法的基本思想改进后的优化控制方法提高了电厂自动配煤系统的合理性、安全性、稳定性。文章基于安徽蚌埠火力发电厂自动配煤系统,依据蚁群算法的基本思想,优化了现场自动配煤方式,并以EDPF-NT+集散控制系统软件为平台绘制程控画面,搭建系统逻辑组态,并通过了最终调试。工程实践表明:该系统运行可靠,抗干扰能力强,自动化程度高,为实现火电厂自动配煤完全自动化打下了坚实的基础。

关键词:自动配煤系统,集散控制系统,蚁群算法,火电厂

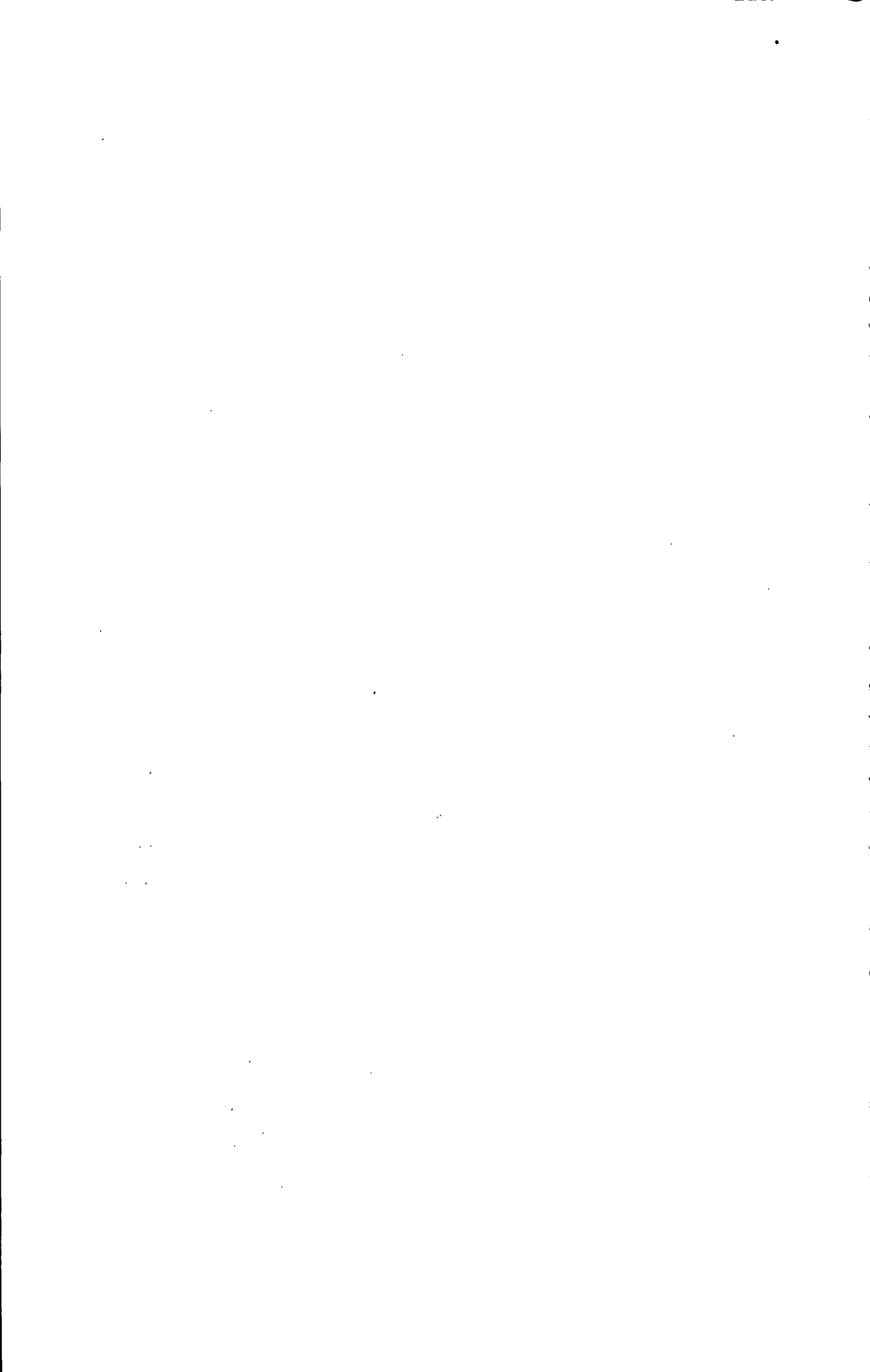
ABSTRACT

The automatic Coal-Mixing system is an important component of the coal handling system in a thermal power plant, nowadays the control method of Coal-Mixing system in power station is reasonless, optimized method based on the basic idea of ant colony algorithm enhance the rationality, safety and stability of the automatic Coal-Mixing system in power station. Based on Coal-Mixing system of the Anhui Bengbu thermal power plant in this paper, we solve the optimization of the on-site Coal-Mixing system by using the basic idea of ant colony algorithm, drawe program-controlled screen, build system logic configuration by using the EDPF-NT+ distributed control system, and pass the last debugging. The results in the engineering practice show that, with high operation stability and automatic, strongly anti-jamming ability, the level of operational guidance and energy-saving control is improved, offering solid foundation for achieving a fully automated automatic Coal-Mixing system in Power Plant.

Ren Pingjie (Control Theory and Control Engineering)

Directed by associate prof. Liang Weiping

KEY WORDS: automatic mixing coal system, distributed control system, ant colony algorithm, power plant



目 录

中文摘要

英文摘要

第一章 绪论	1
1.1 选题背景及其意义	1
1.1.1 自动配煤系统优化的意义	1
1.1.2 自动配煤系统的发展现状	2
1.2 蚁群算法简介	3
1.3 集散控制系统现状	4
1.3.1 DCS 的组成及特点	4
1.3.2 集散控制系统的发展	7
1.4 论文的主要工作	8
第二章 自动配煤系统控制理论基础	9
2.1 蚁群算法的发展	9
2.2 蚁群算法基本原理	10
2.3 蚁群算法的实现	12
2.4 小结	16
第三章 蚁群算法在自动配煤中的应用	17
3.1 输煤系统工艺分析	17
3.1.1 输煤程控设备简介	17
3.1.2 输煤工艺基本流程	21
3.1.3 输煤系统基本控制方法	26
3.2 自动配煤系统的实现	27
3.2.1 传统配煤系统简介	27
3.2.2 自动配煤系统的优化	28
3.3 小结	33
第四章 系统组态	34
4.1 组态软件介绍	34
4.1.1 组态软件现状	34
4.1.2 EDPF-NT Plus 简介	34
4.1.3 组态软件的发展	37

4.2 输煤系统组态研究.....	38
4.2.1 系统总图的绘制.....	39
4.2.2 自动配煤系统组态.....	42
4.2.3 系统运行规程.....	45
4.3 小结.....	46
第五章 结论和研究展望.....	47
5.1 结论.....	47
5.2 研究前景.....	48
参考文献.....	49
致 谢.....	51
在学期间发表的学术论文和参加科研情况.....	52

第一章 绪 论

1.1 选题背景及其意义

1.1.1 自动配煤系统优化的意义

在我国火力发电厂中，输煤计量及煤仓料位检测控制对于储料式供料的锅炉，料位（物料高度）的监测控制很重要。煤仓料位过高或溢出，会发生原煤溢出事故，煤仓料位过低或空仓，会造成锅炉燃烧不稳，甚至锅炉熄火停机。因此，对煤仓料位进行有效并且精确的监控，才能使锅炉安全高效地运行。以往输煤系统是由现场人员手操进行的，由于这类系统对调度的实时性要求很高，在高密度的运行条件下将不能满足原煤斗用煤运输高效、可靠的要求，现场运行人员的劳动强度很大，因此自动有效的输煤程控系统就显得尤为重要。

皮带传输系统因其结构简单，使用方便，造价低廉被广泛应用于工业、商业、农业、医药、军事等方面，在采矿运输、冶金送料、车站及码头的货物运输更是广泛使用，同样，发电厂的输煤系统也采用皮带传输。随着发电厂规模的逐渐扩大，煤耗量也逐渐提高，对发电厂输煤系统的性能要求越来越高。传统的发电厂输煤系统是一种基于继电接触器和人工手动方式的半自动化系统，现场环境十分恶劣，运行人员启动皮带运输机及给煤机向锅炉前的原煤仓输煤，经常有皮带跑偏、皮带众向撕裂、皮带打滑及落煤管堵塞等等。但对发电厂而言，蒸汽工序的炉膛是不容许断煤的；于是，锅炉前通常有一个很大的原煤仓。输煤系统工作时尽量将煤装满储煤仓，不仅可以保证输煤系统故障时，运行人员也有足够的时间排除故障，保证输煤设备有充分的时间检修。因此建立全自动化的输煤系统，不仅可以让工人从恶劣的环境中，繁重的劳动中解放出来。而且可以通过建立控制网网络将相距较远的各输煤机架控制器相连，实现信息的相互传递，不仅保证了控制的实时性，可靠性，同时便于输煤现场的管理。

火电厂输煤系统原煤仓自动配煤一直是业内的一大难题。为了适应国民经济飞速发展的形势，我国目前已经建成和正在建设的大型火力发电厂数量很庞大，一座装机总容量百万千瓦的火力发电厂，每昼夜耗煤量多达一万吨左右，每天需要由二、三百节标准车皮进入电厂。如此多的煤每天要进行卸车、计量、检验、破碎、筛分、混煤、配仓直至送入锅炉燃烧，如果没有一个完善的、高效率的燃料输送系统是很难实现的。需要指出目前我国电厂的输煤系统无论从设计水平、设备质量、自动化程度还是管理水平等等诸多方面还是比较落后的。因此说火力发电厂的输煤系统是火力发电厂的一个重要组成部分，是发电厂中主厂房外最大的组成单元，特点是运

行环境恶劣,条件复杂,尤其对工作人员来讲,工作强度大,并且粉尘、噪音等严重损害了身体健康。然而其中的配煤系统更是如此,逻辑程序复杂但容错性差、控制流程不尽合理、控制系统对现场设备运行工况要求苛刻、现场检测手段难以满足控制要求等,多种因素造成很多电厂的自动配煤系统难以正常工作甚至无法投用。因此这方面的问题亟待解决。

1.1.2 自动配煤系统发展的现状

我国发电厂输煤控制系统主要经历了以下几个阶段:

(1) 就地手动控制

就地手动控制的主要控制设备是装有一组数台起停控制按钮的小型就地控制箱,并设有工况、报警状态的简单提示。就地手动控制不能实现复杂的连锁要求,现在多数只作为设备检修,调试时的辅助手段。

(2) 集中手动控制

在集中手动控制中,设备的起停控制集中在一个控制屏上,其连锁保护通常由继电器逻辑阵列实现。控制屏上有设备运行工况的模拟指示、信号报警等。集中手动控制能够实现简单运行方式控制及设备起动连锁的一般要求。其缺点是电缆敷设量大,接线复杂,一旦制造完成,其运行方式即不易改变。

(3) 集中程序控制

集中程序控制是以可编程控制器为主控设备的集中自动控制,它用可编程控制器的逻辑软件取代继电器的逻辑阵列,能够实现输煤系统复杂运行方式的控制要求。同时应用多媒体技术,把多媒体电视监视系统引进到输煤系统中来,结合上位机的监控软件,监视现场设备的运行状况。与上面两种控制方式相比,它具有可靠性高,控制方式灵活,及时发现设备故障等优点。

(4) 集散自动控制

随着 DCS 成本的降低,PLC 技术的发展和电厂趋向集中监控的方向的发展,现在又提出了用辅助 DCS 系统来控制输煤系统,这个系统有直接采用 DCS 控制的输煤系统,也有用 DCS 和 PLC 结合起来控制的输煤系统^[6]。DCS 和 PLC 结合起来控制的输煤系统,这样就充分发挥了 DCS 和 PLC 的特点。

下面总结一下传统输煤系统中的特点,以及我们的改进后的系统的优点。

传统输煤系统具有以下特点:

(1) 输煤任务重:为了保证工业用煤,输煤系统必须始终处于完好的状态。日累计运行时间达8-10小时以上。

(2) 工作环境差、劳动强度大:由于各种因素造成输煤系统的运行环境恶劣、

脏污，需要占用大量的辅助劳动力。

(3) 设备关联复杂，安全联锁要求高:同时起动的设备高达20-30台以上，在起动或停机过程中有严格的联锁要求，一般按照顺停逆起的原则。

综上所述，输煤程序控制系统是决定输煤系统成败的关键，该系统不仅有强大的工程应用背景，而且有极大的市场潜力。

本文基于蚁群算法的自动配煤系统得基本工作方式如下：

自动加仓配煤方式包括低煤位优先配、顺序时间配和余煤配。

首先对低煤位仓进行优先配煤，当所有仓低煤位消失后，程序转入顺序配煤方式，直至所有仓出现高煤位后，转入余煤配煤，同时发程配完毕信号，从煤源处延停各设备。在顺序配过程中，某仓又出现低煤位，则立即转向该仓进行低煤位优先配，至该仓低煤位消失后，延时一段时间再返回至配煤方式工作。顺序配煤过程中还可设置免配仓，此时程序自动跳过该仓，不给予加煤。这样一来，我们的自动配煤系统不但能自动跳过超高煤位仓，还能自动跳过检修仓，而且如果料位检测准确的话，现场几乎是不需要运行人员的，我们还有自己的一套输煤工业但是系统，对现场情况进行实时监控。

作者参加了国电蚌埠发电有限公司蚌埠电厂输煤系统建设，参与并设计了一套输煤程控系统。论文将输煤程序控制系统的优化控制和可靠性作为研究内容，进一步探讨了自动配煤系统得安全性和稳定性。

1.2 蚁群算法简介

根据蚂蚁“寻找食物”的群体行为，意大利著名学者Dorigo M, Maniezza V, Colomi A等于1991年在法国巴黎召开的第一届欧洲人工生命会议(European Conference on Artificial Life, ECAL)上最早提出了蚁群算法的基本模型。1992年，Dorigo M又在其博士学位论文中进一步阐明了蚁群算法的核心思想。

蚁群算法(ant colony algorithm)是一种基于种群的启发式仿生进化系统。蚁群算法最早成功应用于解决著名的旅行商问题(traveling salesman problem, TSP)^[13]，该算法采用了分布式正反馈并行计算机制，易于与其他方法结合，而且具有较强的鲁棒性。

蚁群算法创立近二十年来，无论在算法理论还是在算法应用方面都取得了很多突破性研究进展。它已经从单纯地解决对称 TSP 拓展到解决非对称 TSP、指派问题(quadratic assignment problem, QAP)以及车间作业调度问题(job-shop scheduling problem, JSP)等。尤其是近几年来，作为一个前沿性的热点研究领域，蚁群算法已引起越来越多国内外研究者的关注，其研究人员和研究成果均成几何级数增长。有

统计表明, 2000 年蚁群算法的相关学术论文还不足 200 篇, 而截至 2005 年 11 月, 蚁群算法的相关学术论文已经超过了 1800 篇, 其应用范围几乎涉及到各个优化领域, 而且还出现了蚁群算法仿生硬件, 可见这种新兴的仿生优化算法已经显示出强大的生命力和广阔的发展前景。

蚁群算法 AA(Ant Algorithm)来源于对自然界蚂蚁寻找从蚁巢到食物的最短路径并找到回巢路径方法的研究。它是一种并行算法, 所有“蚂蚁”(工作单元)独立行动, 没有监督机构; 它是一种合作算法, 每一只“蚂蚁”选择路径时, 有残留信息的路径被选中的可能性要比没有残留信息的路径大得多; 它是一种鲁棒算法, 因为只要对算法作小小的修改, 就可以运用于别的组合优化问题。蚁群算法的历史还不是很长, 它的发展还没有形成完整的理论体系, 许多理论问题和实际运用问题还有待于逐步解决。但是可以预料, 随着研究的深入, 蚁群算法将给我们展示一个分布式和网络系统的优秀寻优算法。

1.3 集散控制系统现状

集散型控制系统是以微型计算机为基础的分散型综合控制系统。该系统在发展初期是以实现分散控制为主, 国外一直用分散控制系统的名称, 因此又称为分散控制系统, 简称 DCS (Distributed Control System)。

自从美国霍尼韦尔 (Honey Well) 公司 1975 年成功的推出第一套 TDCS2000 至今 30 几年间, DCS 产品几经更新换代, 技术性能达到日趋完善的程度。不管事新上马的建设或扩建项目, 还是老厂的技术更新改造, DCS 早已发展成为当今工业控制的主流系统。据不完全统计, 迄今全世界数百家厂家已开发了各种类型的集散控制系统 1500 余种, 销售量已超出数万套。DCS 以其先进、可靠、灵活和操作简便及其合理的价格而得到广大工业用户的特殊青睐, 已被广泛用于化工、石油、电力、冶金和造纸等工业领域。

1.3.1 DCS 的组成及特点

集散型控制系统是计算机、通信、CRT 显示和控制技术发展起来的产物。它采用危险分散、控制分散、而操作和管理集中的基本设计思想, 以及分层、分级和合作自治的结构形式, 适应现代的工业生产和管理要求。常规模拟调节仪表组成的过程控制系统存在许多局限性, 如难以实现多变量相关对象的控制; 难以实现复杂的高级控制规律和参数的集中显示与操作。由于生产规模的扩大和工艺过程的复杂, 就要增加仪表, 相应的模拟仪表盘也要增大。而计算机的集中 DDC 控制会导致危险集中。不难实现用一台计算机去控制几十个甚至上百个回路, 但这样必然会降低系统的安全运行性能^[20]。集散控制系统吸收了模拟仪表和计算机集中控制的优点,

将多台微机分散应用于过程控制,全部信息经通信网络由上级计算机监控;通过CRT装置、通信总线、键盘和打印机等设备,又能高度集中地操作、显示和报警。下面介绍一下集散控制系统的组成及特点。

集散型控制系统通常由过程控制单元、过程接口单元、CRT显示操作站、管理计算机以及高速数据通道等五个部分组成^[1]。其基本机构图如图 1-1 所示。

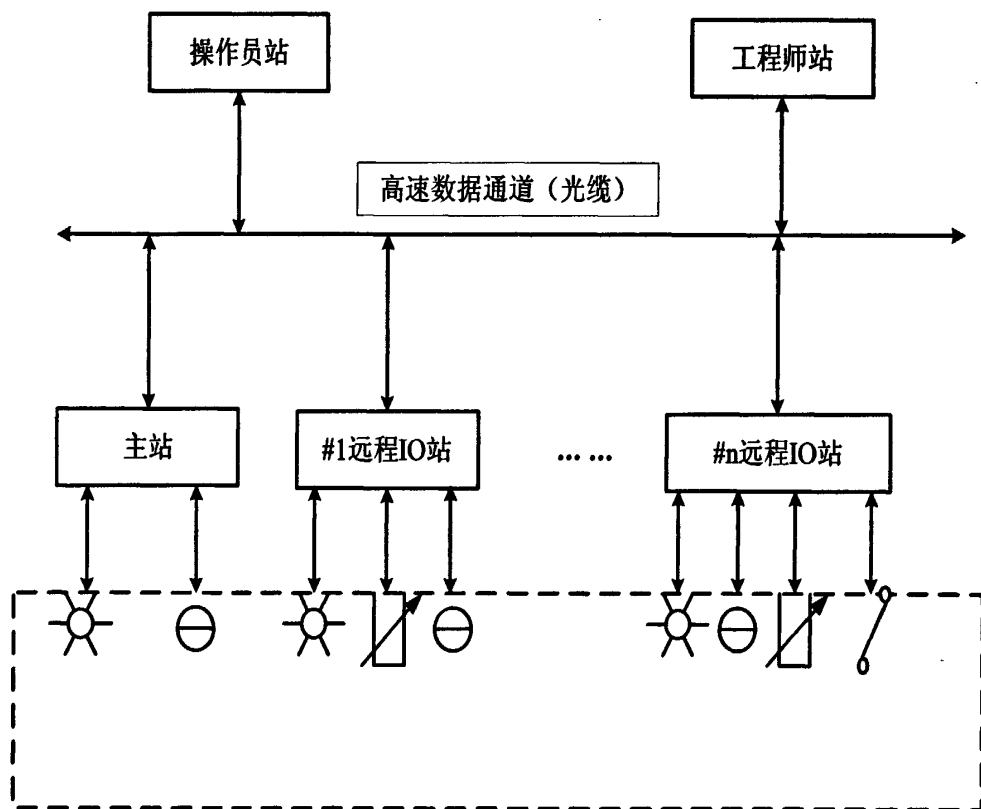


图 1-1 集散控制系统基本结构图

操作员站（OPS: Operating Station）是集散控制系统的人机接口系统，一般来说是一台工业控制计算机。其主要用途除监视操作，打印报表外，系统地组态、编程也在操作员站上进行。远程 IO 站又叫现场站，它是 DCS 的核心部分，对生产过程进行闭环控制，可控制数个至数十个回路，还可进行顺序、逻辑和批量控制。它所连接的 IO 模块则可以完成数据的采集和预期处理，还可以对实时数据进行加工处理，供 CRT 操作员站显示和打印，实现开环监视。

操作员站供操作人员使用，可调出有关画面，进行相关操作，如对某回路进行手操，以达到其停某个设备的目的、确认报警和打印报表等。工程师站主要供技术人员组态用，所有的监控点、控制回路、各种画面、报警清单和工艺报警表均由技术人员通过工程师键盘进行输入。

高速的数据通道 (DH: Data Hiway) 又叫高速通信总线、大道和公路等, 是一种具有高速通信能力的信息总线, 一般由双绞线、同轴电缆或光导纤维组成。它将远程 IO 分站、操作员站和工程师站等连成一个完整的系统^[21], 以一定的速率在各单元之间传输信息。

运用分散控制和集中显示、操作及管理这一基本思想构成的 DCS 系统, 与常规模拟仪表相比, 具有以下特点^[2]:

(1) 完善的控制功能: 集散控制系统可以完成连续、离散、顺序、逻辑和批量的控制功能; 完成从单回路、串级、前馈—反馈复合到非线性、自适应、多变量解耦、多变量模型优化、多参数预估和模糊等高级控制; 可以执行常规 PID 运算, 也可以执行 Smith 预估、三阶矩阵乘法等各种运算。

(2) 丰富的监测功能: 操作人员通过 CRT 和操作键盘, 可以监视生产装置以及整个车间情况, 将系统总貌、分组和单元数据及时恰当地呈现出来, 实现全系统统一操作。技术人员可按预定的控制策略组态不同的控制回路, 并调整回路的任一参数或设置工作方式, 而且还可以对机电设备进行各种控制, 从而实现真正的集中操作和监控管理。

(3) 灵活的扩展功能: 集散控制系统采用模块结构, 用户可根据要求方便地扩大或缩小规模, 或改变系统的控制级别。系统采用组态方法构成各种控制回路, 很容易对方案进行修改。也可以通过系列选型或系统生成, 构成各类系统。因扩展灵活, 故有利于分批投资, 分批受益。

(4) 极高的可靠性能: 由于采用了多台微处理机分散控制结构, 故危险分散。系统中关键设备采用双重或多重冗余, 如控制站多使用的 3: 2: 1 热冗余技术。系统还设有中断自动备用系统合完善的自诊断功能, 使系统的平均无故障时间 MTBF 达 2^2 天。故障出现时可自动报警, 甚至可提供故障维修服务。许多系统可以提供远方技术中心服务, 是平均修复时间 MTTR 为 10^{-2} 天, 系统利用率 A 达 99.999 9%。

(5) 简便的安装调试: 集散控制系统的各单元都安装在标准机框内, 模块之间采用多芯电缆、标准化插件相连; 与过程连接时采用规格化端子板, 到中控室操作员站只需铺设同轴电缆进行数据传输, 所以布线量大大减小, 安装工作为常规仪表的 1/3~1/2。系统采用专用软件进行调试, 调试时间仅为常规仪表的 1/2。

(6) 良好的性能价格比: 在性能上集散控制系统技术先进, 功能齐全, 可靠性高, 适用于多级递阶管理控制。在价格方面, 目前在国外, 80 个控制回路的生产过程采用集散系统的投资, 已与常规模拟仪表相当。系统规模越大, 平均每个回路的投资费用越低。

1.3.2 集散控制系统的发展

DCS 发展很快, 影响其发展的主要因素是微处理器及超大规模集成电路 (VLSI) 技术的应用。现在的 32 位微处理器已应用于现场控制站, 功能更强, 速度更快, 存储容量不断速增。人一机接口技术的交互图形、复合窗口及触摸屏的应用, 使操作站更趋完善, 操作更为便捷, 彩色 CRT 分辨率更高^[3]。专用集成电路 (ASIC) 和表面安装技术 (SMT) 在硬件设计上的使用, 使板级上的元件数量更少, 硬件的可靠性大大提高。智能半导体器件进入到现场一级, 成为现场仪表, 包括直接数字传感器、光纤传感器和智能执行器。标准化的数据通信链路和通信网络技术的发展, 影响网络体系结构的变化。各种公共网络体系的建立和通信网络技术的普及, 使得网络环境下新的各类控制系统得开发成为了可能。开放式结构和集成技术将对 DCS 产生深刻影响。下面介绍其发展前景^[1]。

(1) 开放化。DCS 的通信用实现开放系统互联 (OSI) 来满足工厂自动化要求。各种设备 (计算机、DCS、单回路调节器、PLC 等) 之间通信能力的加强, 可方便的构成一个大系统。DCS 制造厂商为适应这种发展, 竞相将自己的专用网络改造成符合国际标准的网络, 或将自己的专用网络与普通网络之间加入网关, 使其与以太网、MAP 网连接。开放化的关键是技术标准的统一。新一代的集散控制系统得开放型结构, 将方便地与指挥生产管理得上位计算机进行信息交换, 实现计算机集成生产系统。

(2) 小型化。个人计算机的性能不断提高, 价格不断降低, 使得中小规模的 DCS 可广泛采用高档微机以及加固的工业 PC 机来构成低价格的集散控制系统, 以满足小型工厂和装置的应用。从规模来看, 大量小型计算机和廉价的 PLC 已开始起着大型 DCS 的作用, 可靠、廉价的 DCS 将深受用户们的欢迎。越来越多的小型系统的应用是十分有意义的事情。

(3) 智能化。人工智能特别是知识库系统 (KBS) 和专家系统 (ES) 在过程控制中的应用包括: 自整定和自适应控制其、实时数据采集、故障诊断、生产计划和调度、过程优化、控制系统得计算机辅助设计、仿真培训和在线维修等。可以说人工智能将会在 DCS 的各级实现随着微电子技术的发展, 结合现代控制理论, 应用人工智能技术, 以微处理器为基础的智能设备将相继出现, 如智能变送器、可编程调节器、智能 PID 自整定控制、智能人一机接口和智能集散控制系统能够等。

(4) 基于现场总线的 PLC。PLC 以其结构紧凑、功能简单、速度快、可靠性高和价格低廉等优点, 迅速获得广泛应用, 已成为与 DCS 并驾齐驱的主流工业控制系统。目前以 PLC 为基础的 DCS 发展得很快, PLC 与 DCS 相互渗透、相互融合、相互竞争, 已经成为当前工业控制系统得发展趋势。

随着 PLC 计算机与 DCS 和其他控制回路之间接口的迅速发展, 已可以将连续控制

回路、逻辑功能、批量控制功能、信息处理能力、速度及组态软件等汇入在统一的高性能系统中，从而将 PLC 和 DCS 融合在一起，满足了协调的需要，以适应离散类和批量工业自动化的要求^[3]。

1.4 论文的主要研究工作

深入研究蚁群算法的理论基础，并将其应用在配煤程控系统中，整个过程将由 EDPF-NT 系统来实现。论文的研究任务主要有两个方面：一是理论研究，二是应用研究。

理论研究方面的主要工作有下面两个方面：

(1) 对蚁群算法的基础理论进行深刻的学习研究：通过查阅文献资料认真学习蚁群算法的基础知识，熟悉算法，了解其发展的历程；

(2) 基于蚁群算法的自动配煤系统的设计的可行性研究：了解蚁群算法的实际应用，以及各种工控软件的基础知识。

应用方面需要做的工作就是把理论移植到实际应用中。在应用的过程中，需要对实际应用中出现的问题进行处理，另外还要考虑如何加入现场人员的意见来指导优化，主要做下面两方面的工作：

(1) 基于蚁群算法的自动配煤系统的上位画面的设计工作：熟悉输煤系统工艺流程，对各种设备的性能要清楚了解（国电蚌埠输煤现场），上位画面要布置清楚，功能齐全，简单易懂，可操作性强，便于现场作业人员作业，从而大大降低运行人员劳动强度，具有很大的市场潜力；

(2) 基于蚁群算法的自动配煤系统的下位逻辑的编写工作：熟悉下位编程软件的使用，尽量做到逻辑合理，调理清晰，以便于后期调试，修改以及改造工程的顺利进行。

第二章 自动配煤系统控制理论基础

2.1 蚁群算法的发展

自1991年意大利学者Dorigo M等提出蚁群算法后的近5年时间里,并没有在国际学术界引起广泛关注,自然这段时期在蚁群算法理论及其应用上也没有取得突破性进展。到了1996年, Dorigo M等在《IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part B》上发表了“Ant system: optimization by a colony of cooperating agents”一文,在这篇文章中, Dorigo M等不仅更加系统的阐述了蚁群算法的基本原理和数学模型,还将其与遗传算法、禁忌搜索算法、模拟退火算法、爬山法等进行了仿真实验比较,并把单纯地解决对称TSP拓展到解决非对称TSP、指派问题(quadratic assignment problem,QAP)以及车间作业调度问题(job-shop scheduling problem,JSP),且对蚁群算法中初始化参数对其性能的影响做了初步探讨,只是蚁群算发展史上又一篇奠基性文章^[6]。从目前公开发表的蚁群算法相关论文来看,其中70%以上的论文将这篇文章或1991年Dorigo M等在ECAL上发表的“Distributed optimization by ant colonies”一文列为参考文献。自1996年之后的5年时间里,蚁群算法逐渐引起了世界许多国家研究者的关注,其应用领域得到了迅速拓展,这期间也有大量有价值的研究成果陆续发表。

对蚁群算法不断高涨的研究热情导致了1998年10月15日至10月16日在比利时布鲁塞尔召开了第一届蚁群算法国际研讨会(ANT' 98),会议由创始人Dorigo M负责组织。第一届就吸引了来自世界各地的50多位蚁群算法研究者,对后每隔两年都要在布鲁塞尔召开一次蚁群算法国际研讨会,历届会议的论文集均由著名的《Lecture Notes in Computer Science》(SCI Index)结集出版。2000年, Dorigo M和Bonabeau E等在国际顶级学术刊物《Nature》上发表了蚁群算法的研究综述,从而把这一领域的研究推向了国际学术的最前沿^[6]。鉴于Dorigo M在蚁群算法研究领域的杰出贡献,2003年11月欧盟委员会特别授予他“居里夫人杰出成就奖(Mari Curie Excellence Award)”。

进入21世纪后的最近几年,国际著名的顶级学术刊物《Nature》曾多次对蚁群算法的研究成果进行报道,《Future Generation Computer Systems》(Vol.16, No.8)和《IEEE Transactions on Evolutionary Computation》(Vol.6, No.4)分别于2000年和2002年出版了蚁群算法特刊。如今,在国内外许多学术期刊和会议上,蚁群算法已经成为一个备受关注的研究热点和前沿性课题。

Gutjahr WJ于1999年撰写的技术报告和2000年发表的学术论文在蚁群算法发展史上有着特殊的作用,因为这两篇文章首次对蚁群算法的收敛性进行了证明。

Gutjahr WJ将蚁群算法的行为简化为在一幅代表所求为题的有向图上的行走过程,进而从有向图论的角度对一种改进蚁群算法——图搜索蚂蚁系统(graph-based ant system,GBAS)的收敛性进行了理论分析,证明了在一些合理的假设条件下,他所提出的GBAS能以一定概率收敛到所求问题的最优解。

我国在蚁群算法领域的研究起步较晚,从公开发表的论文(以投稿日期为标准)看,国内最先研究蚁群算法的是东北大学控制仿真研究中心的张纪会博士与徐心和教授(1997年10月)。在国内众多的蚁群算法研究者中,值得一提的是当时年仅17岁的高二学生陈焯于2001年在《计算机工程》(Vol.27, No.12)上发表了“带杂交算子的蚁群算法”一文,并基于Visual Basic开发了一个功能齐全、界面友好的“蚁群算法实验室”,引起了国内广大蚁群算法研究者的极大关注,正如《计算机工程》的“编者按”所言:“一个高中生能写出如此论文实属不易”。

回顾蚁群算法自创立以来近二十年的发展历程,目前人们对蚁群算法的研究已由当初单一的TSP领域渗透到了多个应用领域。由解决一维静态优化问题发展到解决多维动态组合优化问题,由离散域范围内研究逐渐拓展到了连续域范围内研究,而且在蚁群算法的硬件实现上取得了突破性进展,同时在蚁群算法的模型改进及与其他仿生化算法的融合方面也取得了相当丰富的研究成果^[7],从而使这种新生的仿生优化算法展现出前所未有的勃勃生机,并已经成为一种完全可与遗传算法相媲美的仿生优化算法。

2.2 蚁群算法的基本原理

蚂蚁是一种非常微不足道的生物,然而像“蚂蚁搬家蛇过道,明日必有大雨到”一样的谚语却是我们耳熟能详的。正是这种非常常见的小生物引起了越来越多的学者的关注,1991年M. Dorigo等人首先提出了蚁群算法(Ant Colony Algorithms)。人们开始了对蚁群的研究:相对弱小,功能并不强大的个体是如何完成复杂的工作的(如寻找到食物的最佳路径并返回等)^[14]。在此基础上一种很好的优化算法逐渐发展起来。

蚁群算法是一种由于受自然界生物的行为启发而产生的“自然”算法,它是从对蚁群行为的研究中产生的。正如M. Dorigo等人在关于蚁群算法的第1篇文章中指出的:蚁群中的蚂蚁以“外激素”(Stigmergy)为媒介的间接的异步的联系方式是蚁群算法的最大的特点。蚂蚁在行动(寻找食物或者寻找回巢的路径)中,会在它们经过的地方留下一些化学物质(我们称之为“外激素”)。这些物质能被同一蚁群中后来的蚂蚁感受到,并作为一种信号影响后到者的行动(具体表现在后到的蚂蚁选择有这些物质的路径的可能性。比选择没有这些物质的路径的可能性大得多),

而后到者留下的外激素会对原有的外激素进行加强，并如此循环下去。这样，经过蚂蚁越多的路径，在后到蚂蚁的选择中被选中的可能性就越大（因为残留的外激素浓度较大的缘故）。由于在一定的时间内，越短的路径会被越多的蚂蚁访问，因而积累的外激素也就越多，在下一个时间内被其他的蚂蚁选中的可能性也就越大。这个过程会一直持续到所有的蚂蚁都走最短的那一条路径为止。

多样性保证了蚂蚁在觅食的时候不致走进死胡同而无限循环，正反馈机制则保证了相对优良的信息能够被保存下来。我们可以把多样性看成是一种创造能力，而正反馈是一种学习强化能力。正反馈的力量也可以比喻成权威的意见，而多样性是打破权威体现的创造性，正是这两点小心翼翼的巧妙结合才使得智能行为涌现出来了。

引申来讲，大自然的进化，社会的进步、人类的创新实际上都离不开这两样东西，多样性保证了系统的创新能力，正反馈保证了优良特性能够得到强化，两者要恰到好处的结合。如果多样性过剩，也就是系统过于活跃，这相当于蚂蚁会过多的随机运动，它就会陷入混沌状态；而相反，多样性不够，正反馈机制过强，那么系统就好比一潭死水。这在蚁群中来讲就表现为，蚂蚁的行为过于僵硬，当环境变化了，蚂蚁群仍然不能适当的调整。

既然复杂性、智能行为是根据底层规则涌现的，既然底层规则具有多样性和正反馈特点，那么也许你会问这些规则是哪里来的？多样性和正反馈又是哪里来的？我本人的意见：规则来源于大自然的进化。而大自然的进化根据刚才讲的也体现为多样性和正反馈的巧妙结合^[22]。而这样的巧妙结合又是为什么呢？为什么在你眼前呈现的世界是如此栩栩如生呢？答案在于环境造就了这一切，之所以你看到栩栩如生的世界，是因为那些不能够适应环境的多样性与正反馈的结合都已经死掉了，被环境淘汰了！

蚁群算法实际上是一类智能多主体系统，其自组织机制使得蚁群算法不需要对所求问题的每一方面都有详尽的认识。自组织本质上是蚁群算法机制在没有外界作用下是系统熵增加的动态过程，体现了从无序到有序的动态演化，其逻辑机构如图 2-1 所示^[4]。

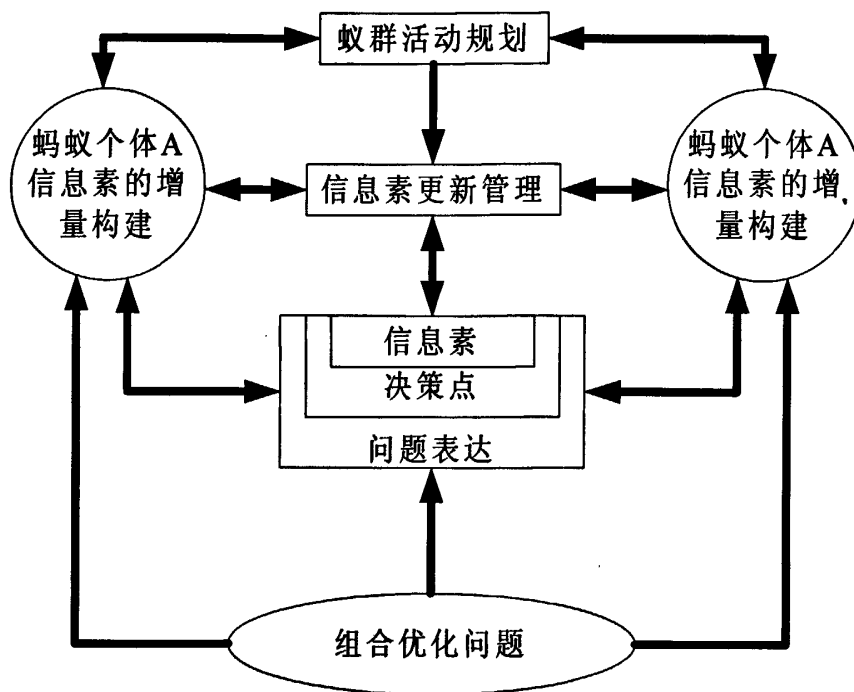


图2-1 基本蚁群算法的逻辑结构

2.3 蚁群算法的实现

蚁群算法最早成功应用于解决著名的TSP，TSP的简单形象描述就是：给定n个城市，有一个旅行商从某一城市出发，访问各城市一次且仅有一次后再回到原出发城市，要求找出一条最短的巡回路径。TSP可分为对称TSP(symmetric traveling salesman problem)和非对称TSP(asymmetric traveling salesman problem)两大类。若两城市往返的距离相同，则为对称TSP，否则为非对称TSP^[10]。本文未做说明，均指非对称TSP。

下面给出标准TSP的定义^[4]：设 $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$ 是n个城市的集合， $L = \{l_{ij} \mid c_i, c_j \in C\}$ 是集合C中元素(城市)两两连接的集合， $d_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 是 l_{ij} 的Euclidean距离，即

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

$G = (C, L)$ 是一个有向图，TSP的目的是从有向图G中寻出长度最短的Hamilton圈，此即一条对 $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$ 中n个元素(城市)访问且只访问一次的最短封闭曲线。

有向图：给定一个有向图D的三元组为 (V, E, f) ，其中V是一个非空集合，其元素称为有向图的结点；E是一个集合，其元素称为有向图的弧边；f是从E到 $V \times V$ 上的一个映

射(函数)。

对于TSP解的任意一个猜想,若要检验它是否为最优,则需要将其与其他所有的可行遍历进行比较,而这些比较有指数多个,故根本不可能在多项式时间内对任何猜想进行检验。因此,如果这一问题得到解决,则同一类型中的多个问题都可以迎刃而解。

TSP的已知数据包括一个有限完全图中各条边的权重,其目标是寻找一个具有最小总权重的Hamilton圈。对于 n 个城市规模的TSP,则存在 $\frac{(n-1)!}{2}$ 条不同的闭合路径^[9]。求解该问题最完美的方法应该是全局搜索,但当 n 较大的时候,用全局搜索法精确的求出其最优解几乎不可能,而TSP又具有广泛的代表意义和应用前景,许多现实问题均可抽象为TSP的求解^[4]。

基本蚁群算法的数学模型可以如下建立^[5]:

(1)每只蚂蚁都有一个记录自己已经走过城市的禁忌表,以控制蚂蚁寻找路径的合法性, $(tabu_k(s))$ 从起点出发遍历其它所有城市1次且仅有1次,并最终回到起点。

(2)每只蚂蚁根据城市 i 到城市 j 的移动概率和禁忌表来决定下一个要到达的城市,在 t 时刻蚂蚁的移动概率表示为:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{j \in allowed_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} & , \text{若 } j \in allowed_k \\ 0, & , \text{否则} \end{cases} \quad (2-1)$$

其中: $\tau(t)$ 表示在循环 t ,边 E_{ij} 上的信息素强度; η_{ij} 表示 E_{ij} 上的路径信息, $\eta_{ij}(t) = \frac{1}{d_{ij}}$;

α, β 是权重参数; $j \in allowed_k$,表示禁忌表中还未经过的城市。

(3)循环完成后,蚂蚁在它每一条访问的边上留下信息素。信息素根据下式调整:

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t) \quad (2-2)$$

$$\Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t) \quad (2-3)$$

式(2-2)中 $\rho \in (0,1)$, $1-\rho$ 表示信息素的蒸发速度,初始时刻 $\tau_{ij}(0)$ 是1个常数;式(2-3)表示本次循环中路径 E_{ij} 上信息素的增量(即为 m 只蚂蚁本次循环留在路径上的信息素之和)。 $\Delta \tau_{ij}^k$ 是在循环 t 第 k 只蚂蚁留在边 E_{ij} 上的信息素的增量。

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/L_k, & \text{若第}k\text{只蚂蚁在本次循环中经过}(i,j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (2-4)$$

式中, Q 表示信息素强度, 它在一定程度上影响算法的收敛速度; L_k 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中所走路径的总长度。

在Ant-Quantity模型中

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/d_{ij}, & \text{若第}k\text{只蚂蚁在}t\text{和}t+1\text{之间经过}(i,j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (2-5)$$

在Ant-Density模型中

$$\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q, & \text{若第}k\text{只蚂蚁在}t\text{和}t+1\text{之间经过}(i,j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (2-6)$$

区别: 式(2-5)和式(2-6)中利用的是局部信息, 即蚂蚁完成一步后更新路径上的信息素; 而式(2-4)中利用的是整体信息, 即蚂蚁完成一个循环后更新所有路径上的信息素, 在求解TSP是性能较好, 因此通常采用公式(2-4)作为蚁群算法的基本模型。

以TSP为例, 基本蚁群算法的实现步骤如下^[4]:

(1) 参数初始化。令时间 $t=0$ 和循环次数 $N_c=0$, 设置最大循环次数 $N_{c_{max}}$, 将 m 蚂蚁置于 n 个元素(城市), 令有向图上每条边 (i,j) 的初始化信息量 $\tau_{ij}(t)=const$, 其中 $const$ 表示常数, 且初始时刻 $\Delta\tau_{ij}(0)=0$ 。

(2) 循环次数 $N_c \leftarrow N_c + 1$ 。

(3) 蚂蚁的禁忌表索引号 $k=1$ 。

(4) 蚂蚁的数目 $k \leftarrow k + 1$ 。

(5) 蚂蚁的个体根据状态转移概率公式(2-1)计算的概率选择元素(城市) j 并前进, $j \in \{C-tabu_k\}$ 。

(6) 修改禁忌表指针，即选择好之后将蚂蚁移动到新的元素（城市），并把该元素（城市）移到该蚂蚁个体的禁忌表中。

(7) 若集合 C 中元素（城市）未遍历完，即 $k < m$ ，则跳转到第（4）步，否则执行第（8）步。

(8) 根据公式（2-2）和式（2-3）更新每条路径上的信息量。

(9) 若满足结束条件，即如果循环次数 $N_c \geq N_{c_{max}}$ ，则循环结束并输出程序计算结果，否则清空禁忌表跳转到第（2）步。

下面给出基本蚁群算法的程序结构流程^[4]，如图2-2所示。

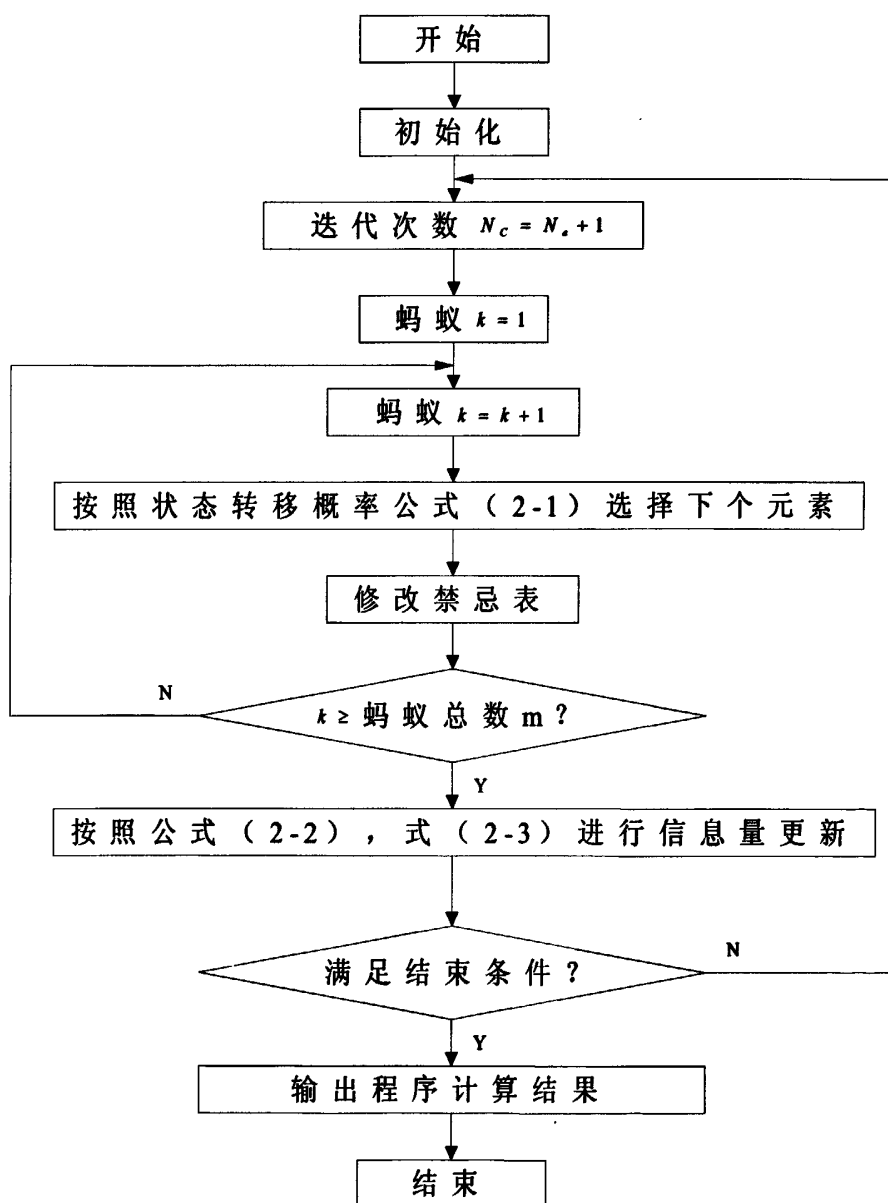


图2-2 基本蚁群算法的程序结构流程图

2.4 小结

随着蚁群智能理论和应用算法研究的不断发展,研究者已尝试着将其用于各种工程优化问题,并取得了意想不到的收获。多种研究表明,群智能在离散求解空间和连续求解空间中均表现出良好的搜索效果,并在组合优化问题中表现突出。

蚁群优化算法并不是旅行商问题的最佳解决方法,但是它却为解决组合优化问题提供了新思路,并很快被应用到其它组合优化问题中^[8]。比较典型的应用研究包括:网络路由优化、数据挖掘以及一些经典的组合优化问题。随着科学技术的飞速发展,计算机测量与控制系统的信息化、数字化及智能化的发展趋势锐不可挡。在自动化测试与控制系统中,存在着控制策略、规则、结构以及控制参数的组合优化问题,因此,在计算机自动控制系统中,控制和优化始终是两个重要问题。

虽然人们对蚁群算法的研究时间不长,在这一领域还有很多问题需要进一步地研究和解决,但是通过理论研究和实际应用表明,蚁群算法是一种很有前途的仿生优化算法。随着人类认识的进步和社会发展的加速,仿生智能及最优化系统理论将越来越成为科学认识和工程实践的有力工具。因此,关于蚁群算法理论及其应用的研究必将是一个长期的研究课题。同时,我们有理由相信随着人们对仿生智能系统理论及应用研究的不断深入,蚁群算法这一新兴的仿生优化算法必将展现出前所未有的勃勃生机。

第三章 蚁群算法在自动配煤中的应用

3.1 输煤系统工艺流程

自Dorigo M等首次将蚁群算法应用于TSP以来,国内外许多学者对其进行了大量的研究工作,将其推广到了诸多优化领域^[11],并已经取得了相当丰富的研究成果。

现代火电厂输煤技术日益成熟,但是由于各种原因,导致原煤仓配煤尚不能完全实现自动化,现场运行人员工作环境恶劣,劳动强度大,这些问题是我们一直以来非常关注的。为了解决这些问题,我们学习蚁群算法基本知识,并将其成功应用到输煤的现场实际中去,并且得到了较好结果。

3.1.1 主要输煤设备简介

国电蚌埠发电有限公司一期工程 $2\times 600\text{MW}$ 燃煤机组,燃用安徽省淮南新集矿区烟煤,燃煤全部采用铁路运输方式,煤炭运输经矿区铁路专用线、阜淮线、淮南线运至水蚌线西泉街站,运距约 135km ,再通过电厂铁路专用线运输整列进厂,专用线全长 14.05km 。厂内铁路一期工程按两条重车线、两条空车线、一条机车线布置,厂内铁路线全长 850m 。

铁路来煤采用两台FZ15-100“C”型转子式翻车机卸车,铁路日最大来煤量为 12240t ,综合考虑铁路干线及铁路专用线的列车牵引定数(4000t),每列车50节左右,日最大进厂列车约为4列,最大日来煤车辆数为204节。单台翻车机卸车能力为23节/每小时。空车线外侧设置长 50m 、宽 10m 的硬化路面,用于存放人工清理的空车余煤、翻车机出现事故或异型车辆人工卸车的燃煤。每台翻车机下设2个地下煤斗,煤斗入口采用振动斜平煤篦卸煤,煤斗出料口设有全封闭移动式滚筒配煤车将煤送入下部的胶带机。

一期建设一座四列式煤场,每个煤场底边宽 47.5m ,堆高 14m ,煤场长 300m ,存量约为 30.6 万吨,储量按 $4\times 600\text{MW}$ 机组额定工况下15天耗煤量设计。煤场装设两台贯通式布置的DQ1500/1600.38悬臂式斗轮堆取料机,堆料能力 1500t/h ,取料能力 1600t/h ,并配有三台TY220型推煤机及一台ZL50型装载机,用作煤场整平、压实等辅助性作业以及铁路空车余煤回收。

碎煤机室设有两台出力为 1600t/h 的XGS-1812A型倾角滚轴筛和两台出力为 1000t/h 的KRC12 \times 26环锤式碎煤机,碎煤机的入料粒度 $\leq 400\text{mm}$,出料粒度 $\leq 25\text{mm}$ 。碎煤机之前设有三级除铁器,在碎煤机之后设一级除铁器。

输煤控制系统采用火车来煤方式,卸煤方式为翻车机。程控系统在选择控制设备容量、性能、及扩展能力时,应考虑输煤系统的能力,并考虑输煤系统从卸煤后

经皮带和转运站，到斗轮堆取料机分流，再到电厂煤仓间进行配煤的全过程控制、监视、报警、显示、计量、管理和保护等功能。

输煤系统控制设备包含如下：翻车机、皮带机、斗轮机、皮带机制动器、三通挡板、电磁除铁器、碎煤机、滚轴筛、缓冲滚筒、电动双侧犁式卸料器、电动单侧犁式卸料器、振打器、转运站除尘器、取样装置、皮带机液压拉紧装置、刮水器、循环链码、煤场水喷淋等。

下面以C10A/B皮带为例简单介绍一下主要设备及其实现的功能（程控相关），如图3-1，3-2所示为一条皮带和一个原煤仓各程控设备简图。

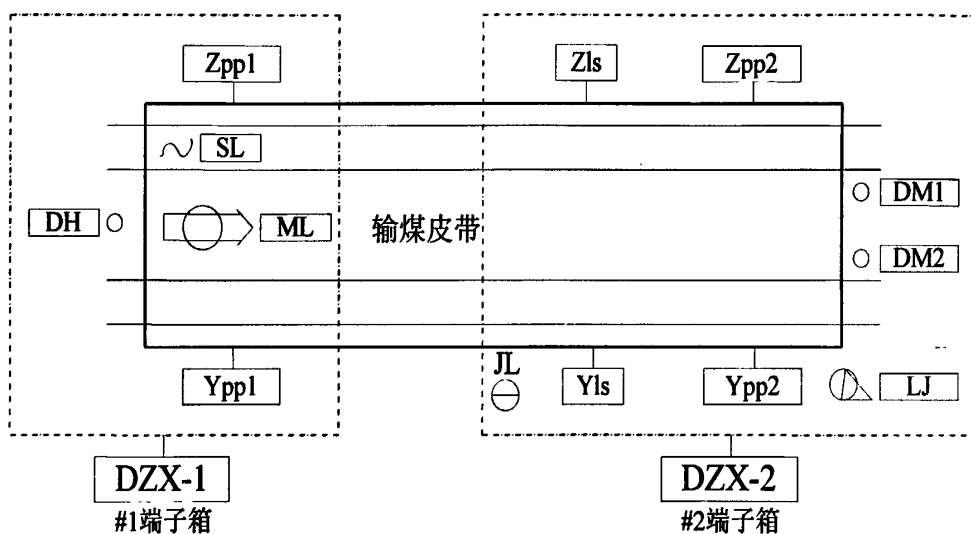


图3-1 C10A/B带式输送机简图

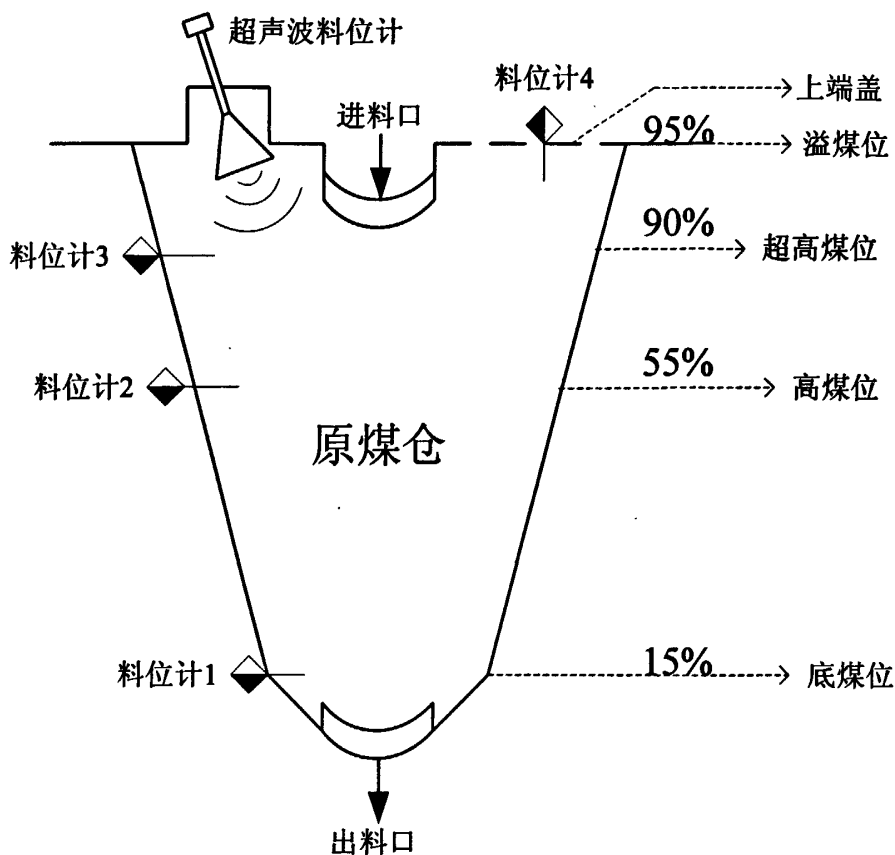


图3-2 原煤仓简图

(1) 打滑检测仪 (图3-1中的DH)

打滑检测仪是一种带式输送机失速保护装置，用于检测带式输送机在运行中出现的胶带与主动滚筒之间的打滑，防止打滑所造成的恶性事故。因为在皮带机运行过程中，由于各种原因造成的胶带和电机之间的相对速度不等于零，可能会对造价昂贵的胶带产生重大的损坏，甚至导致火灾，造成严重的经济损失。

检测器通过触轮与胶带紧密的接触，当触轮和运动的胶带以线速度动作时，本装置内部检测采用无源传感，输出脉冲信号进入计数单元，单片机接到信息后进行运算判断处理，对运行的胶带速度情况进行适时监控，当运行的胶带速度低于正常速度的25%~30%时，发出一开关量，用户可利用这一开关信号在自己的控制网络实现失速停机，防止由胶带打滑而造成的生产事故。

(2) 纵向撕裂保护装置 (图3-1中的SL)

纵向撕裂保护装置主要用于检测各种规格型号的带式输送机胶带的纵向撕裂，当胶带发生纵向撕裂时能及时发出停机信号以防止撕裂事故扩大。由于在原煤输送的过程中，不可避免的在原煤中混入锐利的金属等杂物，这些锐利固体有可能刺穿胶带，从而导致胶带的纵向撕裂损坏。

本系统所采用的纵向撕裂保护装置有感知器和电控箱构成，感知器采用先进的导电橡胶技术，属本质安全型产品。当胶带输送机的胶带被物料穿透后，随胶带运行而挤压感知器，或溜槽输料口与胶带之间因物料堵塞，通过活动门挤压感知器输出撕裂信号。

(3) 煤流检测仪（图3-1中的ML）

本装置是作为胶带输送机输送物料时，用来检测物料瞬时状态的一种装置。如：空载、有载、满载、超载等。用户可将其接至控制室，通过指示灯来观察送料状态，也可将其与自动洒水装置配套使用，实现有料自动洒水功能。通过调整限位板的位置，这种装置就能适用于任意坡度的带式输送机。

(4) 胶带跑偏检测仪（图3-1中Zpp和Ypp）

由于在胶带输送原煤的过程中，容易发生胶带跑偏的现象，如果这种情况较为严重就会产生重大事故，比如拉断胶带，从而造成重大的经济损失，有时甚至对现场操作人员的身体造成损伤。本系统所采用的跑偏检测仪为两极跑偏开关。在工作过程中，输送机胶带跑偏时，胶带触碰开关立辊，当立辊偏转至I级动作角度时，I级开关动作，并输出信号轻跑偏报警^[25]。如胶带继续跑偏使开关的立辊达到II级动作角度时，II级开关发出重跑偏信号——停机信号，如将其接自控制线路中即可实现自动停机。

(5) 拉绳开关（图3-1中Als和Yls）

拉绳开关是胶带输送机运行现场出现事故时，实现系统紧急停机的保护开关，能及时有效地避免事故扩大化和加强人身自我保护手段，达到保障安全生产目的。

(6) 防水警铃（图3-1中JL）

在皮带机启之前、停止前以及故障状态时都要响铃，以免对现场作业人员产生人身伤害，避免事故的发生，达到安全生产的目的，警铃是要参与程控连锁中去的。

(7) 堵煤保护装置（图3-1中DM）

堵煤保护装置适用于检测胶带机运输系统中的三通落煤管和溜槽堵塞故障。当落煤管或溜槽内形成堵塞时，检测器将发出报警、振打或停机信号，防止由物料堵塞溜槽而造成的恶性事故。

本系统采用的振棒式堵煤开关运用音叉的“共振”原理，振动管和内置的振动棒构成“音叉”共振探头，在压电元件的驱动下，发生振动。当探头触及被测物料时，振动幅度急剧减小，由此转化为电子信号，使继电器动作，输出一个开关量达到控制或报警的目的。

(8) 连续料位计（图3-2中超声波料位计）

超声波料位计是一种能连续监测煤位的仪表^[24]。这里使用的是德国西门子秒声力系列超声波料位计，可以测量连续的料位变化，超声波传感器以一个窄的波束垂直于其表面发射声音脉冲，物位计测量系统根据发射脉冲和接收反射脉冲（回波）的时间差，从而计算出超声波传感器表面到物料之间的距离。内置的温度传感器可以补偿在量程范围内温度变化所引起的声速变化。连续料位的测量准确性直接影响到自动配煤的实现。

(9) 料位开关（图3-2中料位计1、2、3、4）

不连续料位计采用射频导纳式物位控制器，用于检测原煤仓中原煤的煤位处于何种情况，一般原煤仓中测量点分为底煤位，高煤位，超高煤位，溢煤位四个测点。

射频导纳式物位计是利用高频技术，由电子线路产生一个小功率射频信号于探头上，探头作为敏感元件，将来自物位介电常数引起的信号变化反馈给电子线路，由于这些变化包括电容量和电导量的变化，因而电子线路中处理的是电抗信号^[15]，电抗的变化又引起了极棒上高频信号的相位发生变化，因此极棒上的高频信号与电子线路中的基准信号的相位差也随之发生变化，该变化经处理后，驱动输出电路发出报警信号，从而达到检测煤仓在这个测点有无物料的目的。

3.1.2 基本流程介绍

本工程输煤控制系统采用火车来煤方式，卸煤方式为翻车机，共十台带式输送机（分A/B两路），两台斗轮机，四个煤场，十二个煤仓，十台双侧犁煤器，十六台单侧犁煤器。其流程大致可分为卸煤系统、贮煤系统、上煤系统以及配煤系统^[23]。基本工艺流程如图3-3所示。

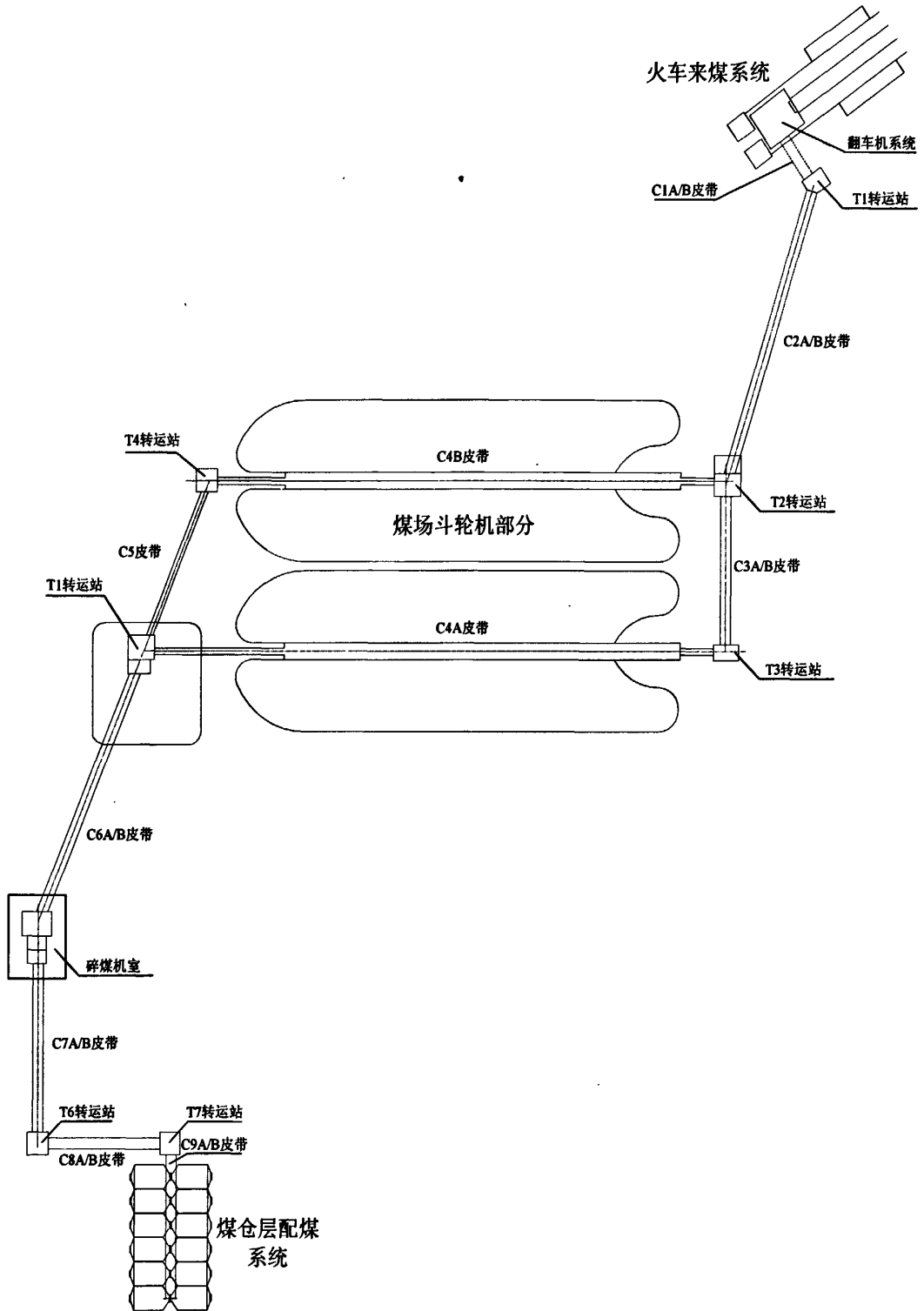


图3-3 输煤系统总图

(1) 卸煤系统：两套翻车机系统；移动式滚筒配煤车；C1AB~C3AB带式输送机，双路布置，一路运行，一路备用；卸煤输送系统具有双路同时运行的条件。如图3-4所示。

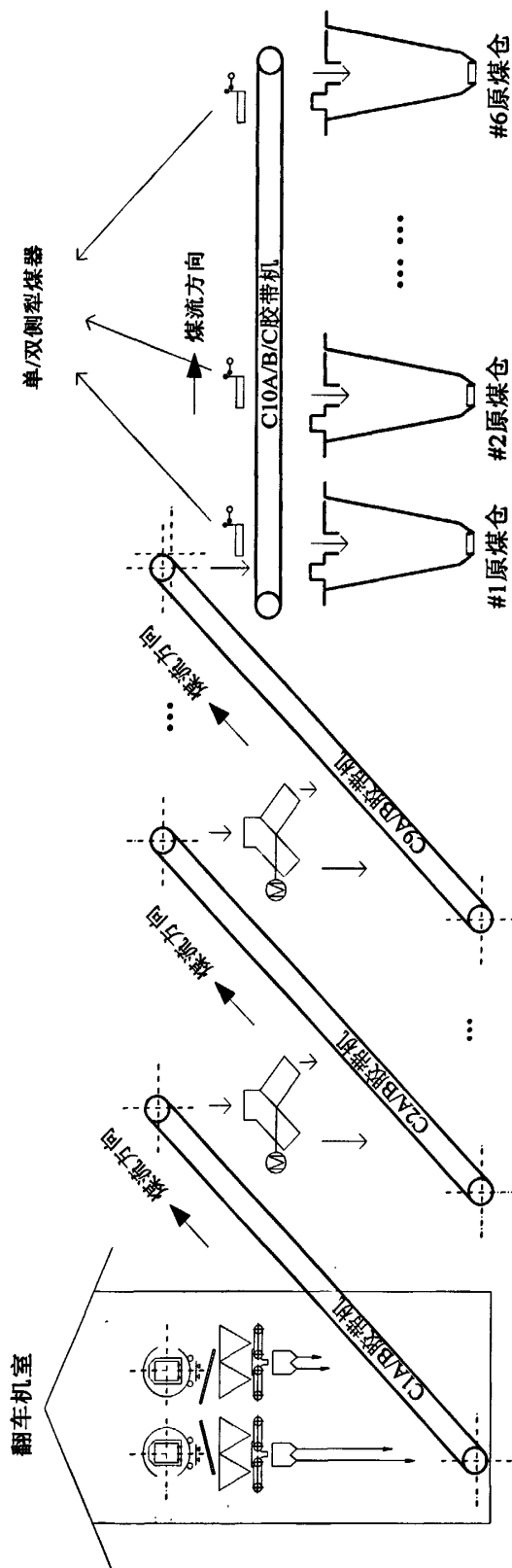


图3-4 卸煤系统流程图

(2) 贮煤系统：两套斗轮堆取料机系统；C4AB和C5带式输送机；四个大型煤场。如图3-5所示。

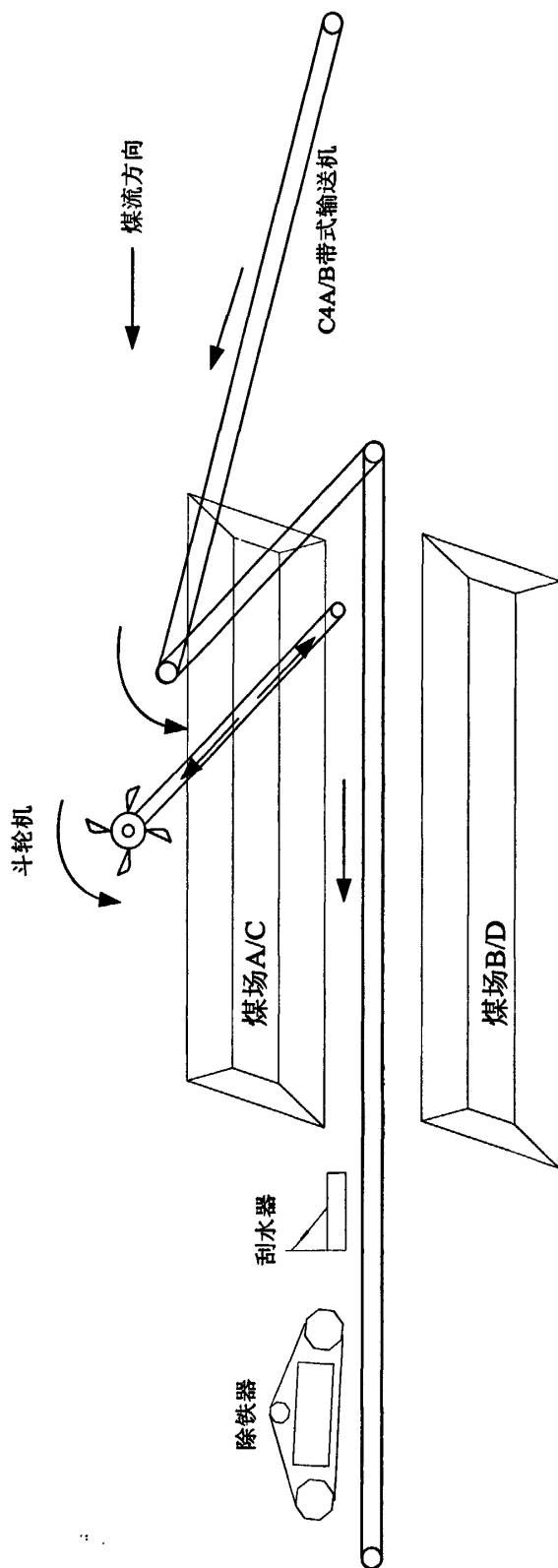


图3-5 输煤系统斗轮机部分

(3) 上煤系统: T5~煤仓间转运站之间输送系统, C6AB~C9AB带式输送机, 双路布置, 一路运行, 一路备用, 并具有双路同时运行的条件. 煤仓间皮带C10ABC带

式输送机，三路布置，可以满足其中二路同时运行的方式^[26]，其中C10C为C10A和C10B带式输送机公共备用设施。如图3-6为其中的碎煤机部分。

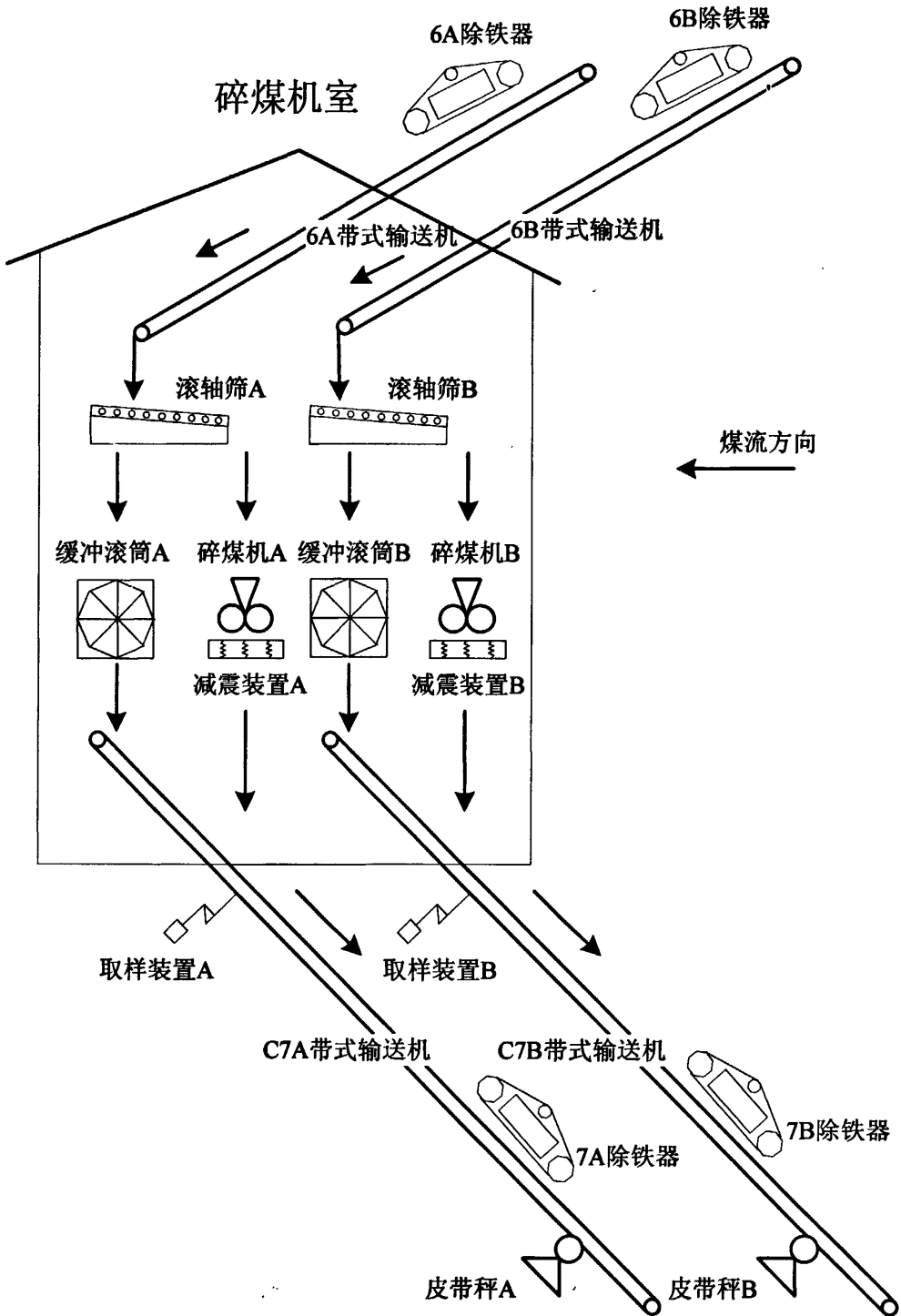


图3-6 输煤系统碎煤机部分

(4) 配煤系统：由10台电动双侧犁式卸料器，16台电动单侧犁式卸料器以及煤斗料位系统组成。关于配煤系统，后面我们将重点讨论。

该系统的作用就是将煤从煤场输送到煤仓。输煤控制系统使用EDPF-NT+分散控制系统（DCS）对整个输煤系统实现自动控制，即通过CRT画面和键盘对上对整个工艺系统进行集中监视、管理和自动程序控制，并可通过输煤控制系统操作员站实现远方手操。由于煤场离煤仓距离较远，所以不可能由一条皮带实现直接输送，应该由多条皮带组成，这样输煤系统的实现路径比较好设计^[8]；同时输煤系统是火力发电厂的众多环节中的一个重要环节，煤不经输煤系统的运输，就不能达到锅炉的燃烧炉膛，锅炉无煤，就不能将水转换为蒸汽，无蒸汽，气轮机就不能带动发电机，发电机未能转动，就无法正常进行发电生产。可见，火力发电厂煤炭运输是十分重要，因此输煤系统必须可靠。为了提高可靠性，必须采用备用路径方式。

3.1.3 输煤系统基本控制方法

本工程煤仓层由带式输送机C10A/B/C三条皮带，十二个原煤仓，十台双侧犁煤器，十二台单侧犁煤器以及一些控制设备组成。由于各种原因，以往火力发电厂极少真正实现自动配煤，最大的影响因素就是各程控设备的接收和发出信号的准确性和控制策略的合理性。

首先我们先要了解一下煤仓层各工艺流程，原煤由C9A/B皮带经过各单侧犁煤器被卸到C10A/B/C皮带上，再由各单双侧犁煤器卸到原煤仓里。根据程控要求我们可以将输煤系统的控制方式分为程控自动、联锁手动、解锁手动、就地控制四种运行方式。

(1) 程控自动：是在控制室上位机工作站上，根据运行需要选择一条完整的流程。自检合格后，上位机提示“流程合格”，然后进行启动前的预启操作，所选流程的挡板及犁煤器自动到位，除铁器、除尘器启动，当上位机出现“允许启动”提示后，操作程启按钮，沿线所选设备自动按逆煤流方向依次启动，同时在各设备启动前，伴有启动预报（现场电铃）。在运行中当设备发生可检测到的故障时，立即停故障设备，同时联停逆煤流方向设备，细碎机除本身事故外，不进行联停。当输煤结束，程序停机时从煤源设备开始按顺煤流方向自动延时停机。

(2) 联锁手动：由上位机控制，联锁手动要求设备按逆煤流方向手动启动，顺煤流方向手动停机。设备满足联锁逻辑关系后，手动操作设备。对于运行中的流程，若某一台设备出现故障，处理方式同程控。在联锁手动方式下，可以方便地实现多路运行。

(3) 解锁手动：当某一设备处于解锁手动时，它与全系统将解除联锁关系，但不影响系统内其它设备的联锁关系。解锁手动可以任意启、停某一台设备，适用于单台设备的调试、校正、试验。

(4) 就地控制：系统中的各设备均可通过现场控制箱内的转换开关脱离程控，

在现场直接一对一启停设备。此时全系统解除联锁关系，它适用于单台设备的调试、校正、试验；同时也可作为上位机损坏时的手动紧急上煤方式。

输煤系统遵循以下控制原则：

- (1) 正常运行时，输煤设备应按逆煤流方向顺序启动。
- (2) 正常停止时，输煤设备应按顺煤流方向顺序延时停机。
- (3) 除铁器、除尘器、挡板、犁煤器不参与皮带机联锁启、停，流程选择后预启。
- (4) 事故停机时，从事故设备起逆煤流顺序立即停机（细碎机除本身事故外，不停机）。
- (5) 由于紧急情况需立即停所有设备时，操作台及上位机上均有急停按钮，此按钮一旦动作，主机能立即接到命令，使设备立即停下来（注：细碎机延时停机）。

3.2 自动配煤系统的实现

3.2.1 传统配煤系统介绍

依据以往煤仓层配煤经验，自动配煤的控制流程大致是这样的：作业人员首先需要选定定旁路仓、检修仓、尾仓，以确定需要加煤的原煤仓地址；然后，启动自动配煤程序，由输煤调度人员进行全自动配煤。自动配煤运行过程中遵循低煤位优先、高煤位自动换仓、顺序配煤等原则。

(1) 低煤位优先配煤：低煤位优先配煤也称补低配煤。一般把中低煤位分为2档，分别称为低煤位、超低煤位。配煤过程中无论在什么情况下，只要出现超低煤位仓，应立即切换到超低煤位仓配煤，防止发生空仓，从而导致不该有的事故。当同时存在多个超低煤位仓时，则按照先后次序依次配煤，消除该仓超低煤位并持续加至低煤位后切换到下一个超低煤位仓进行配煤，一次循环。

(2) 高煤位自动换仓：如果没有超低煤位报警或所有超低煤位仓补低完成后，自动配煤过程按照前后顺序依次给非高煤位煤仓加煤，每个煤仓在加到出现高煤位信号以后，自动切换到下个非高煤位仓加煤（自动跨过高煤位仓和检修仓），如此依次进行直至加仓结束。

(3) 顺序配煤：配煤过程中的总体顺序是从煤仓皮带机尾部的煤仓，依次向皮带机头部的煤仓方向从前往后进行配煤。

传统配煤方式虽然也能满足一般的配煤需要，但是在现场实际运行过程当中也存在很多局限性，有几个很常见的问题就是配煤终止不及时，煤仓溢出，有时甚至导致打滑，皮带超载从而损坏胶带等严重事故。

3.2.2 自动配煤系统的优化

依据蚁群算法的基本原理,根据以往现场运行人员留下的宝贵经验以及作者在安徽火力发电厂现场所遇到的情况,可作出如下调整:主厂房原煤仓的配煤采用(按照仓位设定值)煤仓位置顺序配煤为主的方式。辅以条件配煤:高煤位越过,低煤位优先。根据配合工艺需要,在主控室通过切换选择开关,在主控室内实现远手操对犁煤器进行控制。自动加仓配煤功能应具有煤种设定功能,根据锅炉对不同煤种的加仓要求,加仓前由输煤控制室的值班人员在LCD上调出加仓画面,同时通过键盘输入给定加仓指令,实现自动加仓配煤。

其中加仓配煤的基本过程如下:

(1) 加仓开始,先顺序给超低煤位仓配煤并报警,配一定数量的煤,消除煤仓超低煤位状态。

(2) 依次给出现低煤位的仓顺序配煤,消除煤仓的所有低煤位信号。

(3) 所有低煤位信号消失后,再恢复按照设定值顺序配煤,当仓满后转到下一个煤仓进行顺序配煤,直到所有仓满。

(4) 顺序配煤过程中,如果又出现超低煤位、低煤位仓,则停止煤仓按照设定值顺序加仓程序,优先为超低煤位、低煤位仓配煤,配一定数量后,再转入按照设定值顺序加仓程序。

(5) 当某一煤仓发出高煤位信号时,应能使该煤仓上面犁煤器犁头抬起停止配煤。

(6) 当全部煤仓出现满煤位信号后,程序自动停机并把皮带上余煤均匀分配给各煤仓。

(7) 当每一煤仓装满煤后,如果煤源点是煤场,则应先停煤源。如煤源为火车卸煤区,则应改变执行程序,将煤转移至煤场。

(8) 在配煤过程中能自动跳过满仓、高煤位仓、超高煤位仓及检修仓。

(9) 检修仓设定可通过上位机进行设定,加仓时检修仓不允许配煤。

(10) 自动配煤考虑有单路配煤和两路配煤两种方式,在双路配煤时,先配甲路,配完后先停煤源1-2分钟,待皮带上余煤走空,自动切换挡板,再给乙路配煤。

(11) 顺序配煤过程中,允许操作员修改加仓指令,不影响设备或系统的正常运行。

(12) 每个煤斗需设置定位限位开关。

(13) 每台机组共设6只原煤斗,煤斗采用通仓形式,更换机组加仓或过检修仓时能自动切换挡板,来煤卸至尾仓。各煤仓至少设置低煤位、高煤位保护开关、超高煤位保护开关,溢煤保护开关做为煤仓保护。

运行时首先对低煤位仓进行优先配煤,当所有仓低煤位消失后,程序转入顺序配方

式，直至所有仓出现高煤位后，转入余煤配煤，同时发程配完毕信号，从煤源处延停各设备。在顺序配过程中，某仓又出现低煤位，则立即转向该仓进行低煤位优先配，至该仓低煤位消失后，延时一段时间再返回至配煤方式工作。顺序配煤过程中还可设置免配仓，此时程序自动跳过该仓，不给予加煤。如图 3-7 所示为煤仓层配煤系统图。

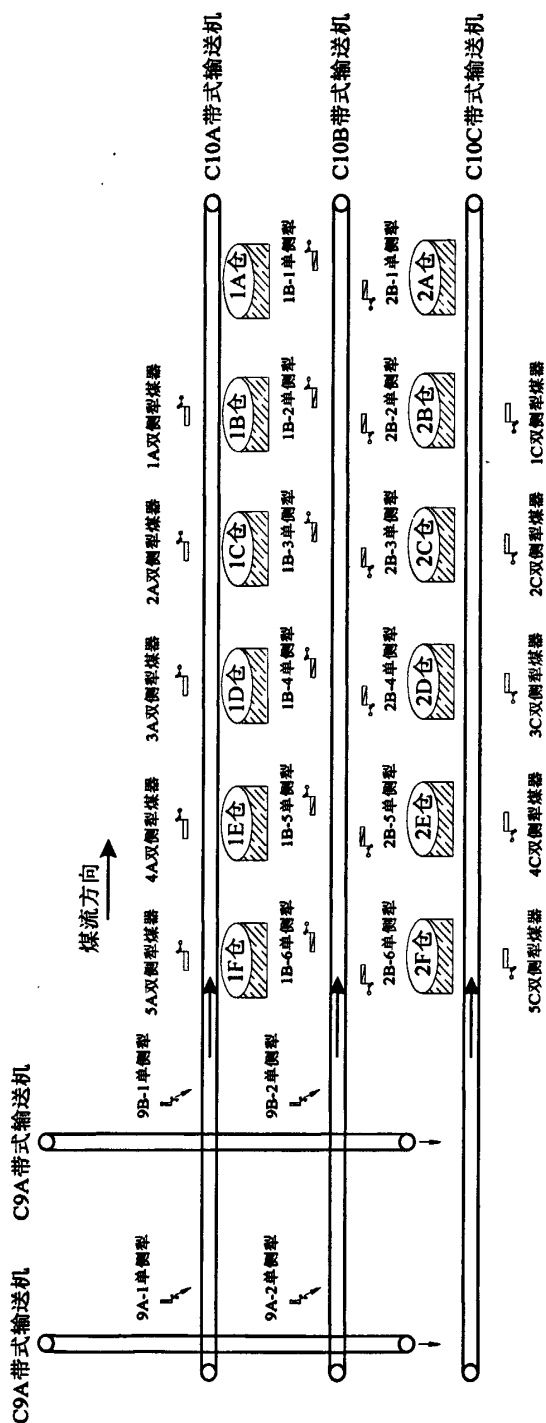


图 3-7 输煤系统煤仓层部分

下面根据原煤仓配煤的基本过程来简单描述一下符合配煤过程的蚁群觅食行为，煤源方向相当于蚁巢，煤位的高低相当于信息素的浓度，煤仓相当于食物源，皮带相当于路径，此方案可类比于蚁群觅食的一种简单形式，如下图所示，可以做一个结合了觅食行为的配煤各路程的简单分析：

在第一轮煤配时，所有仓均空仓，煤位达到煤仓有效高度的 55% 时换仓进行配煤，此时煤仓煤位高度到达 55% 为蚁群信息素浓度最低，应换仓继续煤配流程；煤仓煤位在 15% 时为信息素浓度最高，应立即给其配煤。此时的非工作仓可直接跳过，认为此食物源方向食物数量为零，相应的拐点处信息素浓度为最低。如图 3-8 所示，图中食物源 4 没有食物，也就相当于四号煤仓处与非工作位，直接跳过。

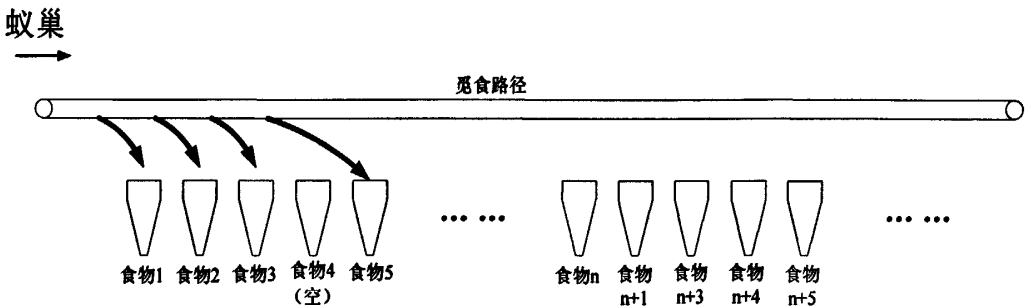


图 3-8 第一轮觅食路径分析（第一轮配煤流程）

当第一轮煤配完成时，也就是所有仓（除去非工作仓）的煤位达到 55%，进行第二轮煤配流程，此时蚁群信息素浓度的判别发生了变化，在配煤过程中如果其煤位达到 90% 则停止给其配煤，也就是信息素浓度最小（煤位 $\geq 90\%$ ）；如果信息素浓度最大（55% \geq 煤位 $\geq 15\%$ ），应立即给其配煤，直到煤位到达 90%。其基本流程如上图所示。

当以次配煤到第五号仓时， $n+1$ ， $n+4$ ， $n+5$ 号仓出现低煤位报警（煤位 $\leq 55\%$ ）应立即先进行补低配煤流程。当低煤位报警出现时，相应拐点的信息素浓度达到最高，应停止顺序流程，立即进行补低。具体流程如图 3-9 所示。

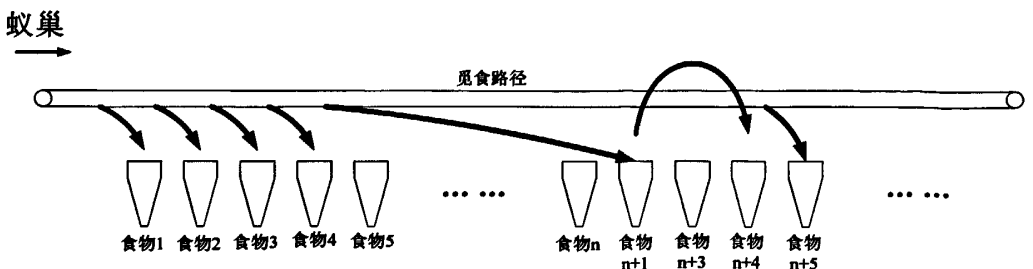


图 3-9 优先觅食路径分析（补低配煤流程）

对于配煤过程中尾仓的处理，这个流程是在补低之后进行的，之所以要对尾仓进行切换，主要是在每一轮的配煤过程中总会有犁煤器落犁不严，从而导致皮带有余煤进入尾仓，从而导致尾仓发生高煤位报警，当报警发生时，我们可以认为尾仓拐点处的信息素浓度达到最小值，应立即切换尾舱，如图 3-10 所示，当 $n+5$ 仓为尾仓且煤位过高，则自动切换尾仓到 $n+4$ 仓 ($n+4$ 仓煤位 $< 90\%$)，如果 $n+4$ 仓煤位 $> 90\%$ ，则切换 $n+3$ 煤仓为尾仓，以此类推。

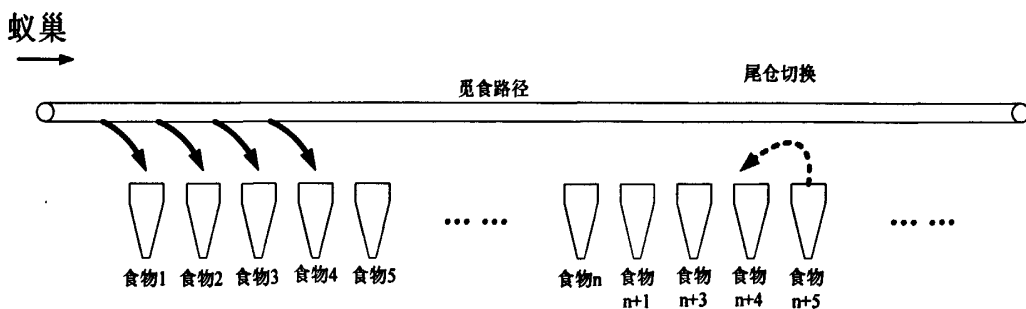


图 3-10 尾仓切换流程

当实际尾仓煤位逐渐下降到底煤位报警，则切换尾仓到实际位置即可，也就是实际尾仓拐点处信息素浓度逐渐增加，从而改变了蚁群的觅食路径。如图 3-11 所示。

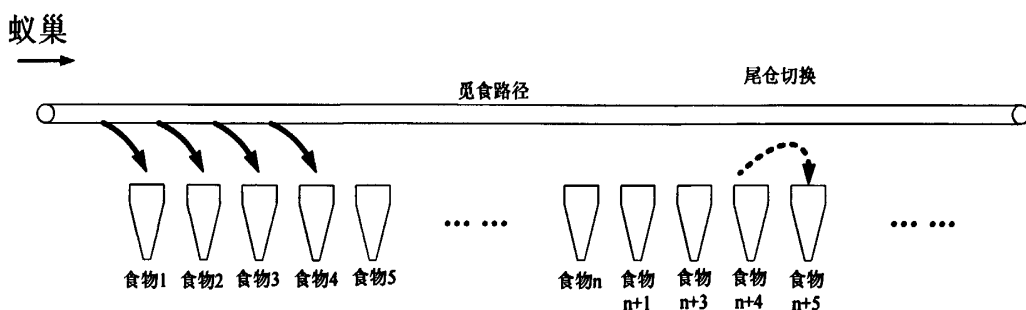


图 3-11 实际尾仓切换流程

依次完成上述各种流程，然后进入下一轮配煤流程，当出现其他报警，如火灾，皮带拉绳，断路器跳闸等情况，煤源处则自动联锁停机，也就相当于蚁群觅食路径遭到破坏以至于无法完成一个完整的觅食任务。如图 3-12 所示为依据蚁群算法基本原理而得出的逻辑流程图。

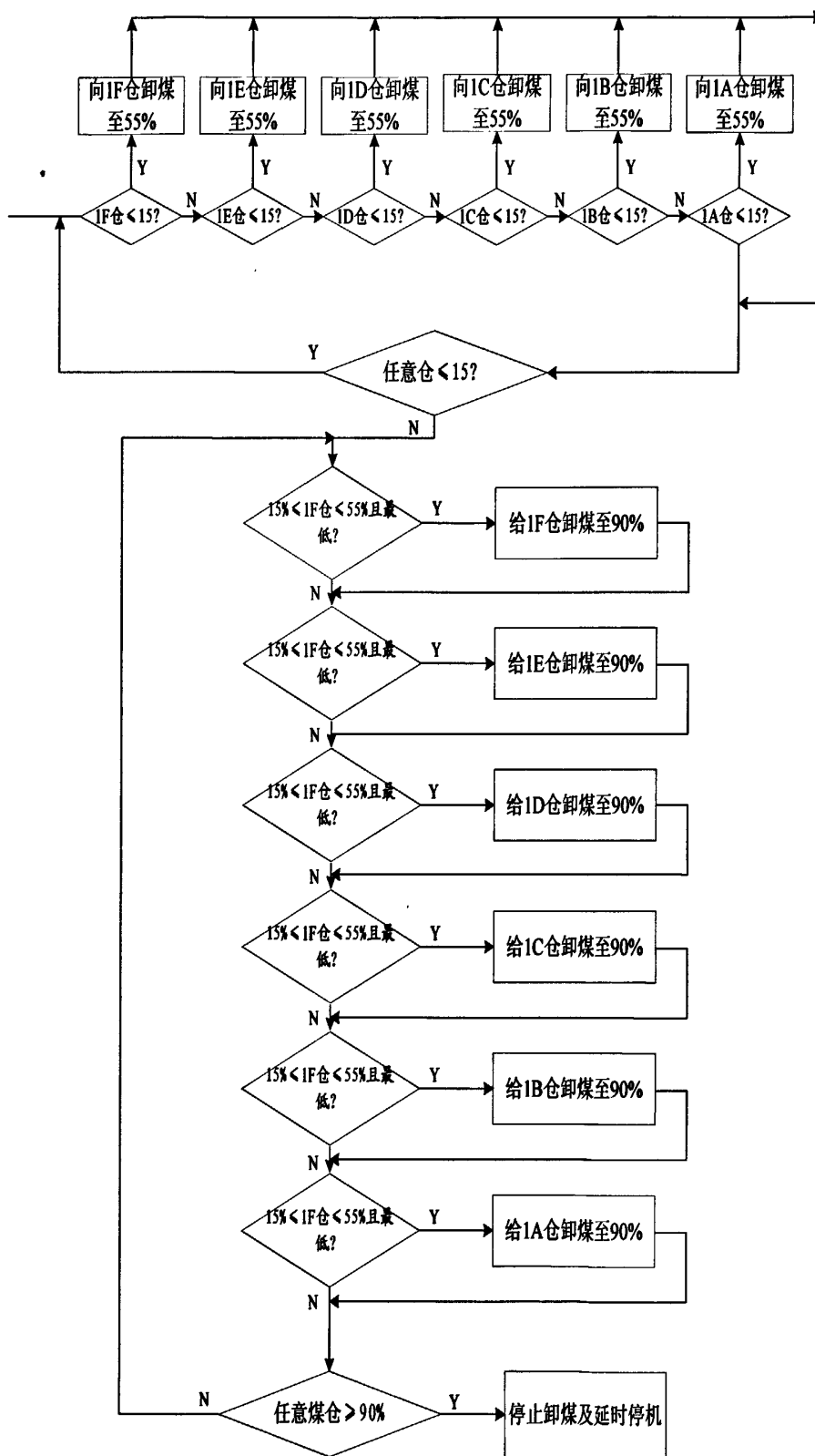


图 3-12 高低煤位判别流程图

3.3 小结

本章介绍了蚌埠2×600 MW燃煤火力发电厂输煤程控系统的设计方案。该系统不仅实现了储煤、上煤、取煤、堆煤、配煤各流程的自动控制，而且能够对各种运行的设备状态数据进行实时采集、动画监控、实时报警以及对历史数据的维护和管理等。运行结果表明系统设计合理，功能完善，可靠性高，圆满完成了预定的技术指标。

自动配煤系统的优化能大幅度的减轻运行人员劳动强度，最大化减少事故的发生，所以该课题的研究意义重大。本文介绍的设计方案是在实际工程调试中不断调整和完善的结果。这里直接介绍了最终方案，该输煤程控系统除了实现了煤仓自动配煤之外，还实现了皮带机自动运行方式在运行状态下的手动切换、分仓计量等功能，达到了较高的自动化程度。系统投产后，工作稳定可靠，达到了让甲方比较满意的生产效果。

第四章 系统组态

4.1 组态软件介绍

组态软件是指一些数据采集与过程控制的专用软件，它们是在自动控制系统监控层一级的软件平台和开发环境，使用灵活的组态方式，为用户提供快速构建工业自动控制系统监控功能的、通用层次的软件工具。组态软件应该能支持各种工控设备和常见的通信协议，并且通常应提供分布式数据管理和网络功能。组态软件的出现，把用户从繁杂的控制系统中解脱出来，用户可以利用组态软件的功能，构建一套最适合自己的应用系统。随着它的快速发展，实时数据库、实时控制、SCADA、通信及联网、开放数据接口、对 I/O 设备的广泛支持已经成为它的主要内容，随着技术的发展，监控组态软件将会不断被赋予新的内容^[2]。

4.1.1 组态软件现状

组态软件产品于 20 世纪 80 年代初出现，并在 20 世纪 80 年代末期进入我国。但在 20 世纪 90 年代中期之前，组态软件在我国的应用并不普及^[11]。究其原因，大致有以下几点。

(1) 国内用户还缺乏对组态软件的认识，项目中没有组态软件的预算，因此您愿投入人力物力针对具体项目做长周期的繁冗的上位机的编程开发，也不采用组态软件。

(2) 在很长时间里，国内用户的软件意识还不强，面对价格不菲的进口软件（早期的组态软件多为国外厂家开发），很少有用户愿意去购买正版。

(3) 当时国内的工业自动化和信息技术应用的水平还不高，组态软件提供了对大规模应用、大量数据进行采集、监控、处理并可以将处理的结果生成管理所需的数据的功能，国内的这些需求并未完全形成。

随着工业控制系统应用的深入，在面对规模更大、控制更复杂的控制系统时，人们逐渐意识到原有上位机编程的开发方式，对项目来说是费时费力、得不偿失的，同时，MIS（Management Information System，管理信息系统）和 CIMS（Computer Integrated Manufacturing System，计算机集成制造系统）的大量应用，要求工业现场为企业的生产、经营、决策提供更详细和深入的数据，以便优化企业生产经营中的各个环节。因此，在 1995 年以后，组态软件在国内的应用逐渐得到了普及。

4.1.2 EDPF-NT Plus 简介

EDPF-NT+系统是国电智深公司开发的一款工控软件，是 EDPF-NT 的升级版本，

它采用窗口模式并且以 Windows 为平台, 界面更加人性化, 使得工程技术人员的工作更为便利, 现场操作人员也更容易上手, 它是一种融计算机、网络、数据库和自动控制技术为一体的工业自动化产品, 完全实现控制与信息一体化设计, 具有开放式结构和良好的硬件兼容性和软件的可扩展性。可应用于火电站、水电站、冶金、化工、造纸等行业的分散控制和过程自动化控制和信息监视与管理。系统主要特点有:

(1) 系统无通讯管理器, 实现物理、逻辑上的完全冗余, 达到了多重化冗余, 任何故障都将被限制在有限范围内, 决不会导致系统崩溃, 真正实现了功能分散、危险分散。

(2) 系统面向厂区级、多广播域设计, 在不增加网络负荷的情况下可灵活实现多域系统控制。为电厂公用系统和辅助车间集中监控提供了独到的解决方案。

(3) 以优秀的操作系统 Windows 为平台开发的人机界面, 运用 OLE 技术、Active X 技术以及多线程处理机制等使人机界面更加丰富多彩、易学易用、操作流畅。

(4) 便捷的全图形化组态, 支持自定义算法。

(5) 高性能历史站, 性能优越, 工作稳定。在收集 4 万点的历史数据时, 仍然能够快速响应多用户的并发查询。通过“卷”管理功能, 借助外部存储介质, 可以轻松地保存几年的生产数据。

(6) 具有完整的分层自诊断功能, 可诊断网络、站、I/O 卡件直至 I/O 点。

(7) 独有的体积小巧模块式 DPU 控制器, 运行更加可靠, 维护更加简便。

(8) I/O 采用全分散型智能测控装置, 功能和危险更分散。

(9) 可实现脉冲式调节, 去掉了精度低、故障高的伺放装置, 具有更高的控制可靠性和控制精度。

(10) 可直接采集和处理各种类型信号: 电流、电压、各型热电偶、各型热电阻、频率及脉冲、电气 PT 和 CT 等信号。

(11) 强化的结构设计, 所有 I/O 模块和电源模块采用全封闭结构, 防尘、防静电、抗电磁干扰。所有 I/O 采用光电隔离技术实现与外部的电气隔离和各通道的电气隔离。

(12) 模拟量输入模件经过精心设计容许信号类型混排, 电压信号, 热电偶信号、变送器信号可接入同一模件, 模件还可为变送器提供电源, 为设计和施工带来了方便。

(13) 各级供电电源均采用冗余配置。

EDPF-NT plus 控制系统主要包括工程师站、操作员站、历史站、控制组态以及

过程画面几个方面。下面简单介绍一下各组成部分的功能特点以及实现方法。

(1) 工程师站是 EDPF-NT plus 控制系统中组态、管理和维护工程的计算机。一个系统可以存在多台工程师站，安装了工程师软件，具有相应权限的计算机就是工程师站。用户可以在工程师站上创建工程、组态、安装 DPU、维护工程服务器的数据、维护运行站的数据、管理运行站、以及进行各种系统的管理工作。工程师站是系统的核心，但生产过程的控制并不依赖于工程师站，在系统正确部署后，操作员站、DPU、历史站等各功能站都可以正常运行，无需工程师站。

(2) 操作员站是 EDPF-NT plus 控制系统的重要组成部分，是 MMI 站 (Man Machine Interface, 指具有人机交互功能的计算机) 的一种。实时运行状态下，操作员通过操作员站实现对生产过程的实时监控。一个系统中可以有多个操作员站，各站之间相互独立，互不干扰。操作员站能够以过程画面、曲线、表格等方式为操作人员提供生产过程的实时数据，借助人机对话功能，操作人员可对生产过程进行实时干预。

(3) 历史站在 EDPF-NT plus 分散控制系统中发挥着极为重要的作用。历史站 (Historical Storage and Retrieval Station) 提供了对点数据和报警、SOE 事件的采集、存储、检索服务的功能。

使用工程组织工具 (Project Organizer) 对历史站和点进行组态，生成历史站使用的配置文件和测点列表。历史站根据配置文件和测点列表采集和存储生产控制过程中的历史数据和报警数据，并存储在相应的介质上，并作为服务器对操作员站、制表站等其它 MMI 站提供服务，使之能够显示历史趋势曲线、报警历史信息列表、形成运行报表。历史站功能的实现过程是：将 DCS 从生产过程中采集到的参数或衍生数据以某种规范的格式储存到存储介质中，使用者可以通过某种规范的查询方式获得系统的数据集合。

(4) 控制组态和过程画面。控制组态工具是 EDPF-NT plus 控制系统工程师站进行控制逻辑和 IO 卡件组态的工具。其特点有：利用 Microsoft Visio 图形设计软件的全图形绘图界面，直接绘制 SAMA 图；为用户提供功能完善的算法库，可实现各种控制逻辑；专用的编译工具可以将 SAMA 图编译成为控制站使用的目标文件；内置专用转换工具可将 SAMA 图转换为 MMI 站使用的过程画面，用于实时监控与调试。如图 4-1、4-2 所示为逻辑组态流程图和卡件组态流程图。

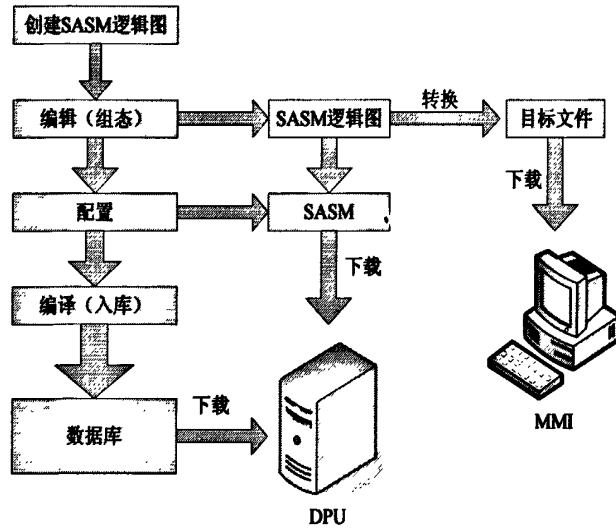


图 4-1 逻辑图组态流程

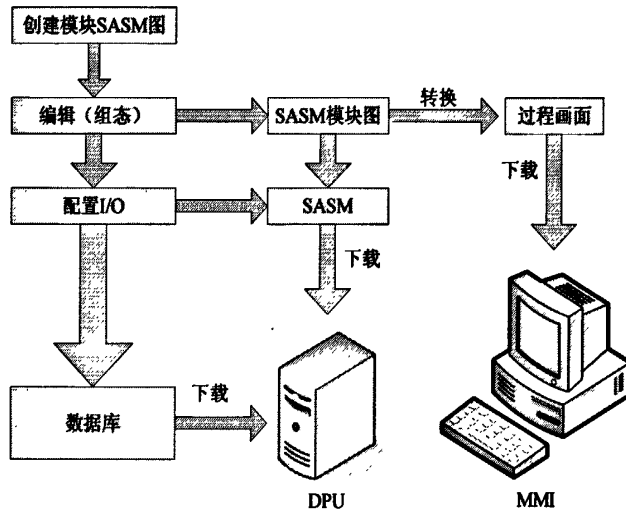


图 4-2 卡件图组态流程

4.1.3 组态软件的发展

目前看到的所有组态软件都能完成类似的功能：比如，几乎所有运行于 32 位 Windows 平台的组态软件都采用类似资源浏览器的窗口结构，并且对工业控制系统中的各种能资源（设备、标签量、画面等）进行配置和编辑；都提供多种数据驱动程序；都使用脚本语言提供二次开发的功能，等等。但是从技术上说，各种组态软件提供实现这些功能的方法却各不相同。从这些不同之处以及 PC 技术发展的趋势，可以看出组态软件未来发展的方向。

首先是数据的采集方式方面的趋势，大多数组态软件提供多种数据采集程序，

用户可以进行配置。然而在中情况下，驱动程序只能由组态软件开发商提供，或者由用户按照某种组态软件的接口规范编写，这就为用户提出了过高的要求。基于微软的 OLE/DCOM 技术的 OPC 规范则应运而生，OPC 现在已经得到了包括 Interllution、Siemens、GE、ABB 等国外知名厂商的支持。随着支持 OPC 的组态软件和硬件设备的普及，使用 OPC 进行数据采集必将成为组态中更合理的选择。

其次脚本语言是扩充组态系统的重要手段。因此，大多数组态软件提供了脚本语言的支持。而面向对象的脚本语言提供了对象访问机制，对系统中的对象可以通过其属性和方法进行访问，比较容易学习、掌握和扩展，但实现比较复杂。

最后就是组态软件的可扩展性和开放性。可扩展性为用户提供了在不改变原有系统的情况下，向系统内增加新功能的能力，这种增加的功能可能来自于组态软件开发商、第三方软件提供商或用户自身。增加功能最常用的手段是 ActiveX 组件的应用，组态软件能提供完备的 ActiveX 组件引入功能及实现引入对象在脚本语言中的访问。随着管理信息系统合计算机集成制造系统的普及，生产现场数据的应用已经不仅仅局限于数据采集和监控。在生产制造过程中，需要对现场的大量数据进行流程分析和过程控制，以实现生产流程的调整和优化。随着生产决策活动对信息需求的增加，可以预见，组态软件与管理信息系统或领导信息系统得集成必将更加紧密，并很可能以实现数据分析与决策功能的模块形式在组态软件中出现。

4.2 输煤系统组态研究

本输煤控制系统采用辅控 DCS 的控制结构方式，软件采用国电智深 EDPF-NT plus 集散控制系统，并通过标准工业以太网接入全厂辅网。利用 DPU 对整个输煤系统中的设备进行数据采集和控制，通过工程师站和操作员站的人机接口对系统设备发出控制命令，同时系统中各设备的运行状态信息在上位机 LCD 上直观、动态地显示出来。工程师站和操作员站和 DPU 之间通过数据通讯接口进行联系。输煤程序控制系统通过以太网光纤交换机上的冗余通讯口连接本系统内各个程控系统，并通过冗余光纤接口连接全厂辅助系统集中监控网络，以实现可以在机炉集中控制室进行集中监视和控制。如图 4-3 为程控系统结构图。

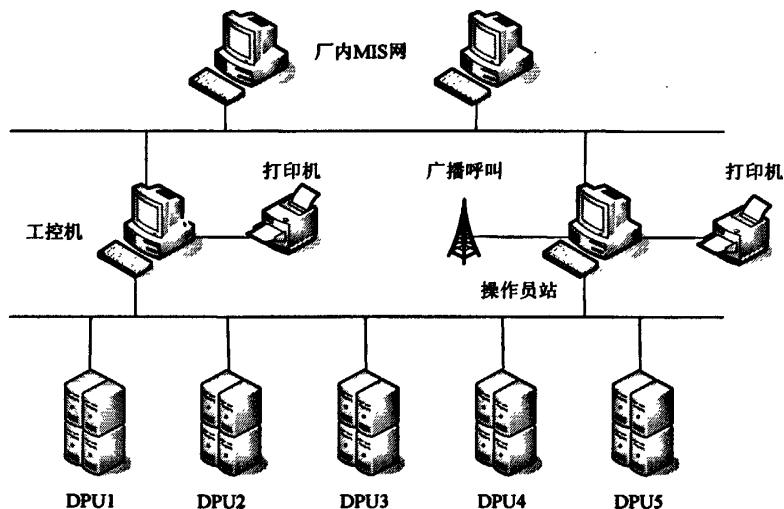


图 4-3 程控系统结构图

4.2.1 系统总图的绘制

过程画面工具 GB (Graphics Builder) 是 EDPF-NT plus 系统工程师站重要的组态工具软件。该工具为用户提供一个过程画面图形编辑的集成开发环境, 利用该工具编辑生成过程画面。这些画面用于 EDPF-NT plus 系统 MMI 站, 被实时画面显示程序 GD (Graphics Display) 调用。

GB 为 Windows 风格的多文档全图形编辑界面, 可同时编辑多个画面, 支持多面之间的图形的复制。GB 为用户提供了完备的图形工具, 可绘制各种静态图形及各种动态对象, 包括棒图、趋势、点记录属性等。具有多种操作方式的操作区使操作员实现人机交互。图形编辑工具功能齐全。各图形对象可分别根据要求设置条件语句, 对象的颜色、文本、图符等在实时状态下可按指定条件改变, 或实现对象的隐藏。它可以编辑制作的图形文件可分为主图(即过程画面)、窗口图、图符三类, 其编辑方法基本相同, 但图符中不能包含图符、操作区、数据类对象。这三种图形文件的扩展名分别为 goc (主图)、gow (窗口图)、gos (图符)。各种图形文件在实时状态下的打开方式也不同。主图可由实时显示程序 GD 直接打开, 也可以用操作性质为调图的操作区打开, 而窗口图必须用操作区打开。图符文件在实时状态下并不使用, 其仅在 GB 下创建, 并可以被引入到主图、窗口图的画面中, 或根据条件语句作为内嵌对象嵌入到画面文件中。

工程师站安装了 EDPF-NT plus 后, 在程序组的快捷方式中会有一个 GB 图标



。点击该图标, 即打开 GB 主窗口, 如图 4-4 为 Graphics Builder 操作界面。

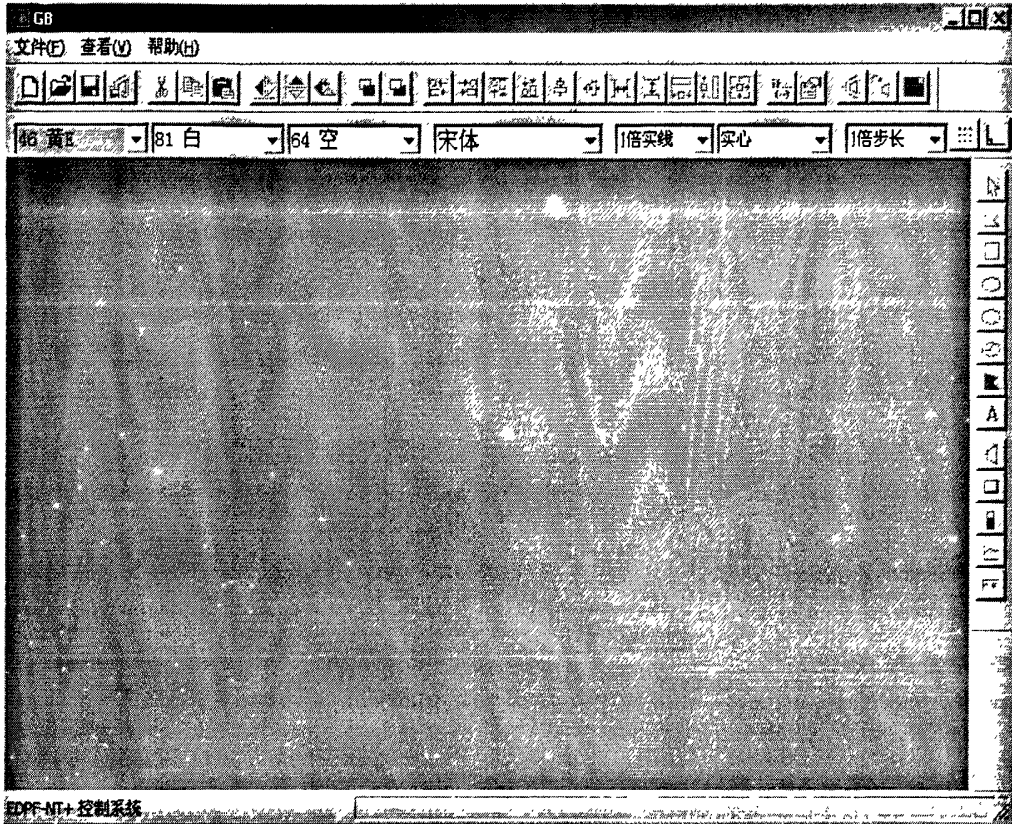


图 4-4 Graphics Builder 操作界面

根据输煤系统的工艺流程，设计的组态监控系统应当具有以下功能：

(1) 按照预定的输煤工序控制各执行设备的开启和关闭，包括供电机的启停、滚轴筛的启停、细碎机的启停、除尘器和除铁器的启停、自动洒水装置的启停、电动三通挡板的启停及其挡板所在位置等。

(2) 实时采集、显示和输出各电机的运行状态（包括电流、震动和转轴温度的数据），保证电机的稳定运行。

(3) 随时存取、打印历史数据和趋势曲线，并保存到外部数据库。

(4) 对异常状况进行监测、报警并进行紧急情况自动处理，保存有关报警数据。

(5) 基于下位机优先原则，能够在上位机和下位机实现自动和手动功能及其切换。

(6) 为了提高输煤系统的自动化程度及其运行稳定性，提供与外部程序之间的接口和数据交换功能，以提供对输煤系统智能控制的数据平台。

根据以上原则及第三章中输煤系统控制原则绘制输煤系统总图，具体绘图步骤就不一一赘述了，如图 4-5 为蚌埠电厂输煤系统总图、图 4-6 为从火车煤源到原煤场部分、图 4-7 为从煤场到原煤仓部分。

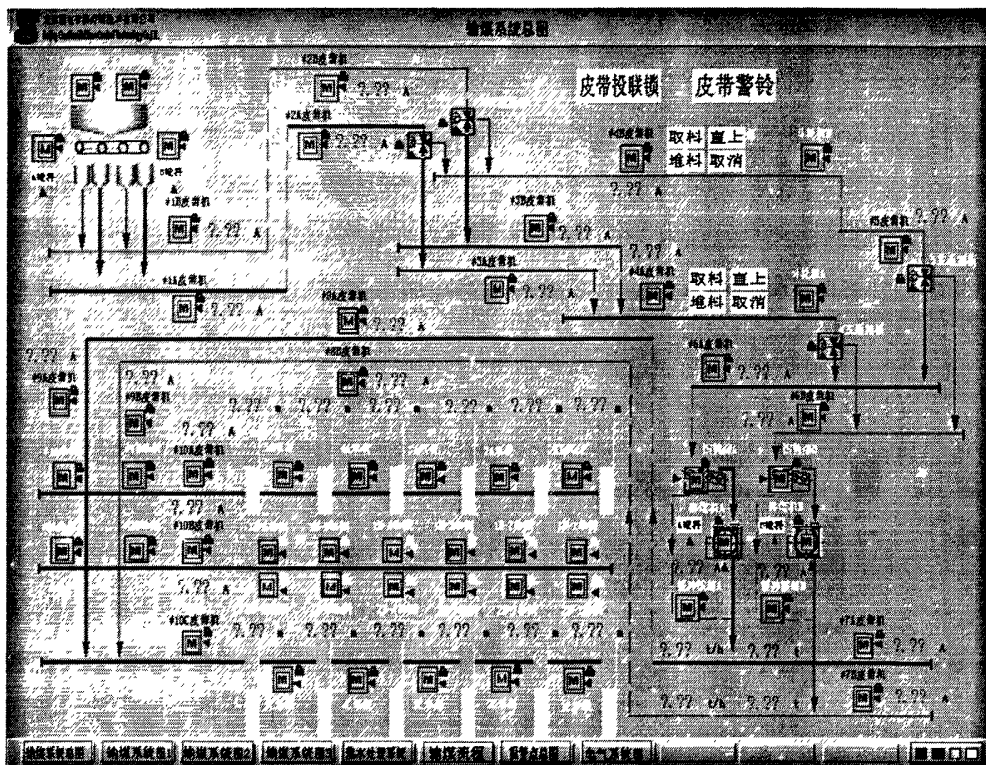


图 4-5 蚌埠电厂输煤系统总图

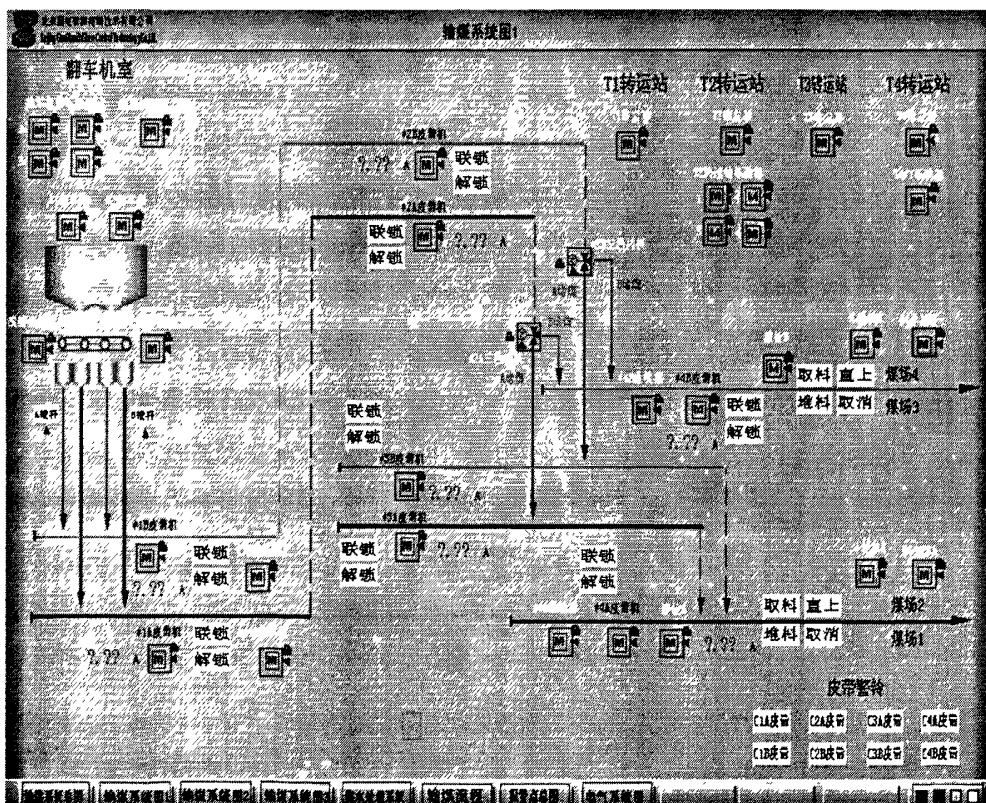


图 4-6 火车到煤场部分总图

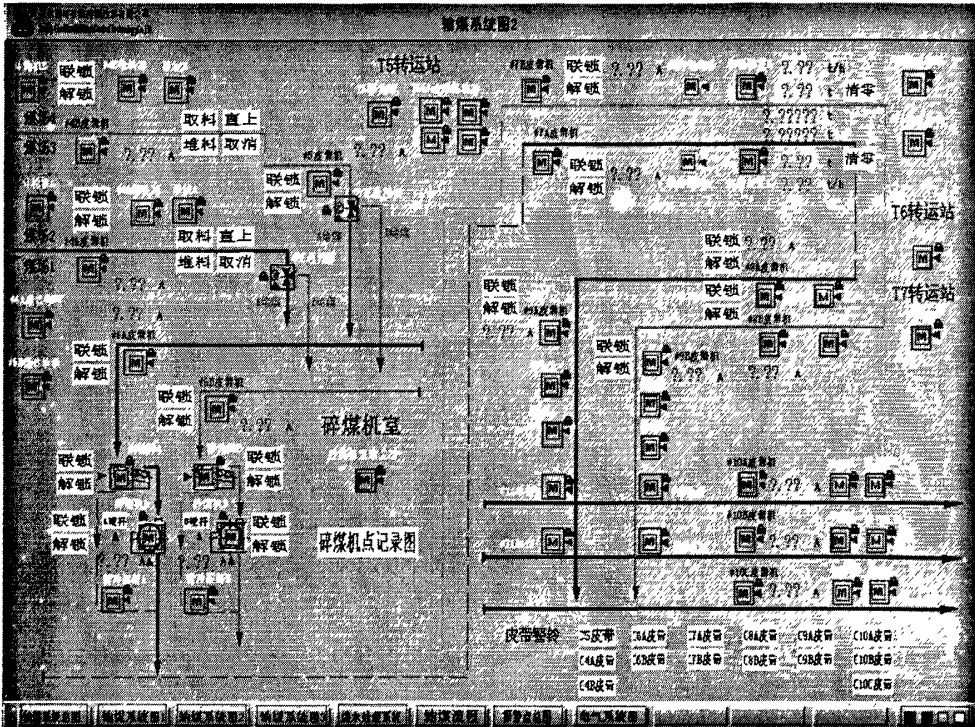


图 4-7 从煤场到原煤仓部分

4.2.2 自动配煤系统组态

自动配煤系统组态是自动配煤程控系统的重要部分，是我们基于蚁群算法的自动配煤系统的实现方式，其最简单的实现方式就是工程应用，并且能得到甲方以及调试小组的一致认可，下面我们就详细介绍一下自动配煤系统组态过程。

首先要列出 IO 清单，IO 清单所记录的各测点名及其对应的 KKS 编码是构成数据库的最重要的内容，如下表所示为单台#1A 侧犁煤器测点记录：

表 4-1 #1A 侧犁煤器测点

00EAE10BZ004XG03	#1A 单侧犁煤器	故障	#1A 单侧犁煤器故障	DI	煤仓间
00EAE10BZ004XB02	#1A 单侧犁煤器	抬到位	#1A 单侧犁煤器抬到位	DI	煤仓间
00EAE10BZ004XB01	#1A 单侧犁煤器	落到位	#1A 单侧犁煤器落到位	DI	煤仓间
00EAE10BZ004XG01	#1A 单侧犁煤器	远方	#1A 单侧犁煤器远方	DI	煤仓间
00EAE10BZ004XB12	#1A 单侧犁煤器	抬起	#1A 单侧犁煤器抬起	DO	煤仓间
00EAE10BZ004XB11	#1A 单侧犁煤器	落下	#1A 单侧犁煤器落下	DO	煤仓间

该表只是#1A 侧犁煤器测点记录，其他单侧犁煤器和双侧犁煤器所有测点都和此表所列一致，都包括 3 个开关量输入信号（DI），2 个开关量输出信号（DO），

00EAE10BZ004XG**为各个信号的 KKS (Kraftwerk-Kennzeichensystem) 编码 (电厂标识系统), 这些编码在整个工程中是唯一的, 这些测点都属于煤仓间部分。

下面给出 C10A 皮带机所含测点清单如表 4-2 所示 (由于篇幅原因省略了 KKS 编码)。

表 4-2 C10A 皮带机测点

C10A 皮带机	重跑偏	C10A 皮带机控制箱重跑偏	DI	煤仓间
C10A 皮带机	轻跑偏	C10A 皮带机控制箱轻跑偏	DI	煤仓间
C10A 皮带机	打滑	C10A 皮带机控制箱打滑	DI	煤仓间
C10A 皮带机	左侧拉绳	C10A 皮带机控制箱左侧拉绳	DI	煤仓间
C10A 皮带机	右侧拉绳	C10A 皮带机控制箱右侧拉绳	DI	煤仓间
C10A 皮带机	撕裂	C10A 皮带机控制箱撕裂	DI	煤仓间
C10A 皮带机	煤流	C10A 皮带机控制箱煤流	DI	煤仓间
C10A 皮带机	就地箱切换开关在远方位置	C10A 皮带机控制箱就地箱切换开关在远方位置	DI	煤仓间
C10A 皮带机	液力耦合温升	C10A 皮带机控制箱液力耦合温升	DI	煤仓间
C10A 皮带机	就地箱失电	C10A 皮带机控制箱就地箱失电	DI	煤仓间
C10A 皮带机	警铃	C10A 皮带机控制箱警铃	DO	煤仓间
C10A 皮带机	电流	C10A 皮带机控制箱电流	AI	煤仓间
C10A 皮带机	电机 A 相绕组测温	C10A 皮带机控制箱电机 A 相绕组测温	RTD	煤仓间
C10A 皮带机	电机 B 相绕组测温	C10A 皮带机控制箱电机 B 相绕组测温	RTD	煤仓间
C10A 皮带机	电机 C 相绕组测温	C10A 皮带机控制箱电机 C 相绕组测温	RTD	煤仓间
C10A 皮带机	电机轴承测温	C10A 皮带机控制箱电机轴承测温	RTD	煤仓间

每条皮带机操作箱所包含的测点基本一致, 都包含 10 个开关量输入信号 (DI), 一个开关量输出信号 (DO), 还有包括 5 个模拟量信号 (1 个电流测量信号 AI, 3 个电阻测量信号 RTD)。如果包括皮带机的启停, 则还应该包括 2 个开关量输入信号, 即 C10 皮带机启动命令和 C10 皮带机停止命令。下表为皮带机制动器的 IO 测点清单。

表 4-3 C10A 皮带机制动器测点

C10A 皮带机制动器	合闸命令	C10A 皮带机制动器合闸命令	DO	煤仓间
C10A 皮带机制动器	跳闸命令	C10A 皮带机制动器跳闸命令	DO	煤仓间
C10A 皮带机制动器	合闸信号	C10A 皮带机制动器合闸信号	DI	煤仓间
C10A 皮带机制动器	跳闸信号	C10A 皮带机制动器跳闸信号	DI	煤仓间
C10A 皮带机制动器	远方	C10A 皮带机制动器远方	DI	煤仓间
C10A 皮带机制动器	保护动作	C10A 皮带机制动器保护动作	DI	煤仓间
C10A 皮带机制动器	故障	C10A 皮带机制动器故障	DI	煤仓间

这里还有除尘器、除铁器、皮带机框架断路器等设备由于篇幅原因没有列出。根据已有测点清单，我们可以布置卡件，布置卡件的基本原则就是条理清晰，便于系统组态、维修及后期调试等工作的进行，如下表就是煤仓间 DPU 机柜内部各模块的布置图。

表 4-4 煤仓间 DPU 机柜卡件布置图

正面						背面					
A	模块	底座	B	模块	底座	C	模 块	底座	D	模 块	底座
A1(01 H)	DIO	B32+DB 25	B1(07 H)	DIO	B32+DB 25	C1(0D H)	DI O	B32+DB 25	D1(13 H)	DI O	B32+DB 25
A2(02 H)	DIO	B32+DB 25	B2(08 H)	DIO	B32+DB 25	C2(0E H)	DI O	B32+DB 25	D2(14 H)	DI O	B32+DB 25
A3(03 H)	DI32	B64	B3(09 H)	DI32	B64	C3(0F H)	DI3 2	B64	D3(15 H)	DI3 2	B64
A4(04 H)	RTD16	B64	B4(0A H)	RTD16	B64	C4(10 H)	DI3 2	B64	D4(16 H)	DI3 2	B64
A5(05 H)	AI16(m A)	B32	B5(0B H)	AI16(m A)	B32	C5(11 H)	DI3 2	B64	D5(17 H)		
A6(06 H)			B6(0C H)			C6(12 H)			D6(18 H)		

蚌埠输煤程控工程电流信号测量 32 点，开关量输入信号 352 点，开关量输出信号 128 点，电阻测温信号 32 点，总计 544 点，按照各 DIO 卡件容量以及国电智深标准机柜排布，所需要的卡件数量及类别如上图所示。

下面给出单条皮带机的启停条件（以 C9A 皮带机为例）。

(1) 操作：手动启/停、顺控启/停、联锁启/停；

(2) C9A 皮带机启动允许条件：C9A 皮带机远方控制、C9A 皮带机电机 A 相绕组温度低于 80℃、C9A 皮带机电机 B 相绕组温度低于 80℃、C9A 皮带机电机 C 相绕组温度低于 80℃、C10A 皮带机已运行（1A 单侧犁煤器落到位）或 C10B 皮带机已运行（1A 单侧犁煤器抬到位，2A 犁煤器落到位）或 C10C 皮带机已运行（1A 单侧犁煤器抬到位，2A 犁煤器抬到位）、C9A 液压拉紧装置允许皮带机启动信号、C9A 皮带机无故障、C9A 皮带机无保护动作、无跳闸条件；

(3) C9A 皮带机联锁跳闸：下游皮带机故障或已停止。

当我们熟悉这些启停条件后，就可以转入逻辑组态了，这里就牵涉到了设置逻辑判断条件和执行语句，使得选定图形在实时运行状态下根据逻辑表达式计算结果改变图形对象属性，如颜色、文字、图符，显示或隐藏图形对象了。下面简单介绍

一个条件语句格式：IF (*****)1 ELSE.....2。其中：(*****)为逻辑判断表达式（KKS 编码），.....1 为逻辑条件为真时的执行语句；.....2 为逻辑条件为假时的执行语句。允许多个 IF 语句。一旦条件满足，相应执行语句执行后，其后的语句不再继续执行。其他设备得启停如除尘器，除铁器等设备的启停条件在这里就不一一赘述了。

根据各设备程控要求以及第三章所述输煤程控控制原则，可以绘制煤仓间自动配煤流程过程画面，如图 4-7 所示。

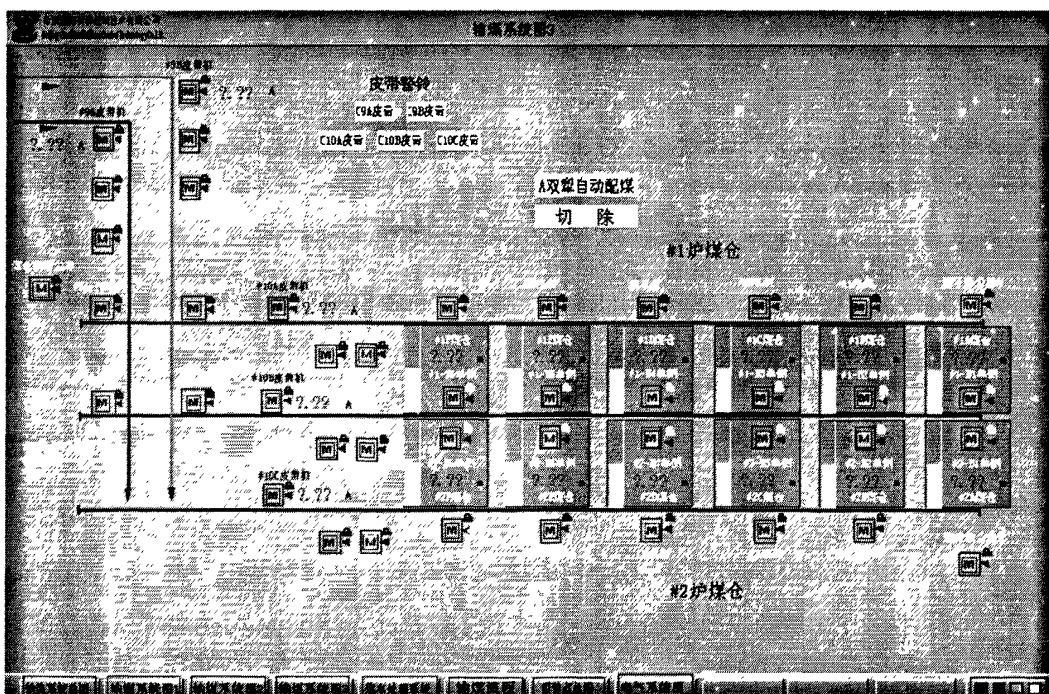


图 4-7 煤仓间自动配煤流程图

4.2.3 系统运行规程

输煤运行人员必须认真贯彻“安全第一，预防为主”的方针，切实保证系统的安全经济运行。当设备和系统发生异常或故障时，应坚持按保人身、保设备、保电网的原则及时果断的处理事故。应遵循以下原则：

(1) 凡设备发生故障，无法正常运行时，必须首先积极采取措施，千方百计组织上煤，完成上煤任务，确保锅炉用煤。

(2) 凡设备发生故障，应及时汇报班长，尽快查明故障原因，采取相应措施，并填好设备缺陷通知单，及时联系有关检修人员进行处理。

(3) 凡因设备故障停机的设备，在未查明原因，缺陷未消除前，任何人不得

启动该设备。

(4) 事故发生后, 相关班组必须本着实事求是、严肃认真的态度, 及时组织全班人员进行调查、分析, 同时必须执行“四不放过”的原则(事故原因分析不清楚不放过, 事故责任者和应受教育者没有受到教育不放过, 没有采取防范措施不放过, 整改措施没有落实不放过)

遇有下列情况, 严禁启动设备或系统: 设备未经全面检查, 设备缺陷消除情况不清; 设备大小修后, 未办理工作终结手续及试转验收; 设备发生故障, 未查明原因、缺陷未消除或缺陷消除后未验收; 未得到班长或程控主值班人员的启动命令。

设备发生下列情况, 应紧急停机: 机械或电气设备发生异常, 严重危及人身或设备安全时; 电动机、减速机发生剧烈振动, 轴向严重串轴, 且超过规定值时; 电动机、减速机轴承温度超过规定值且温度急剧上升时; 输煤系统设备发生火灾时; 工作现场照明电源全部中断时; 电动机冒烟、着火或两相运行时; 胶带严重跑偏、打滑、撕裂及磨损时; 胶带上易燃、易爆物品及大物件不能及时取出时; 碎煤机、落煤管等严重堵塞不能排除时; 电动机电流指示超过规定值时; 保护装置失灵, 危及设备安全运行时; 各种仪表指示异常, 电压波动超过额定电压 $\pm 10\%$ 时; 接到紧急停机的信号或命令时。

根据输煤系统的特点, 保证设备的可靠运行是关键, 如果没有一个良好健康的设备状况, 就谈不上安全与保障。输煤系统在发电厂中起着举足轻重的作用, 没有安全可靠的保证供煤, 就不可能保障机、炉、电的稳定运行, 故在输煤系统中, 狠抓安全管理, 提高安全生产水平, 才能保证设备的健康运行。

4.4 小结

组态软件(configuration software)指用于数据采集与过程控制的专用软件, 是自动控制系统监控层一级的软件平台和开发环境, 可以很方便地设置各种变量, 数据等, 并对现场的数据进行数据采集、数据处理等, 能根据要求进行诸如报表输出, 报警等操作。使各现场设备之间形成一个完整的系统。组态软件能以灵活多样的组态方式(而不是编程方式)提供良好的用户开发界面和简捷的使用方式, 其预先设置的各种模块可以非常容易地实现和完成监控层的各项功能, 并能向控制层和管理层提供软、硬件的全部接口, 进行系统集成。

本章主要介绍了基于蚁群算法的自动配煤方式的实现方法——EDPF-NT plus 辅助输煤程控系统。EDPF-NT plus 在蚌埠2*600MW燃煤机组输煤程控系统中的应用, 再一次显示了其控制方式的优越性: 简洁、直观的操作画面; 人性化的窗口操作模式; 低廉的价格; DPU的实时性、网络的兼容性等等。这些特点无不体现出了减员增效、降低成本、资源共享等优点。

第五章 结论和研究展望

5.1 结论

火力发电厂是利用煤、石油、天然气或其它燃料的化学能生产电能的工厂。电能的生产是从燃料的燃烧开始的。其能量的转换过程是：燃料的化学能→热能→机械能→电能。煤是地下储量最丰富的化石燃料，在火力发电厂中燃煤电厂占有很大的比例。

燃煤电厂每天燃用的煤量是很大的。一座装机容量为 600WM 的发电厂，若标准煤耗率为 400g/kw·h，如满负荷运行，则每天需要标准煤 5760t。要把这么多的煤运进电厂，将其卸下，并不断地送到锅炉燃烧，任务是相当繁重的。为此，必须有一个具有机械化及一定自动化水平的运煤系统与其适应才行。

蚌埠发电厂厂外运煤为铁路运输。蚌埠发电厂燃用安徽省淮南新集矿区烟煤，燃煤全部采用铁路运输方式，煤炭运输经由矿区铁路专用线、阜淮线、淮南线运至水蚌线西泉街站。厂内输送是指运煤车辆进厂卸煤起，经皮带输送到侧煤仓以保证锅炉连续不断的燃用。整个确定的系统中全套机械设备连同属于它们的建筑物，通常称为输煤系统。输煤系统在电厂中的地位十分重要，是火电厂的主要流程，承担发电用煤的供应。若供煤中断，轻则影响发电机减负荷，重则使锅炉灭火，造成停机事故，破坏电网的稳定，酿成重大经济损失^[27]。输煤系统的基本任务：都是承担燃料供应工作。输煤系统为锅炉制粉系统提供燃煤，对机组的安全运行有很大的影响。目前，分散控制系统(DCS)和可编程逻辑控制器(PLC)日趋成熟并得到了广泛地应用，许多电厂的输煤程控系统都采用了DCS或PLC^[28]，实现了设备的远方监控、联锁启停以及设备故障时的自动跳闸等功能。

自动配煤系统是整个输煤系统的重要组成部分，起着关键的作用，配煤方式的合理与否直接影响锅炉的正常运行，因此自动配方式的优化乃重中之重。本文针对传统配煤方式的各种缺陷，依据蚁群算法的基本思想，寻求最佳的配煤路径，降低了现场运行人员的劳动强度，提高了输煤效率，保证了电厂的稳定生产，最大概率的避免了煤仓溢出、锅炉熄火、皮带损伤等恶性生产事故的发生^[29]，有效地降低了现场运行人员的劳动强度，改善了输煤现场恶劣的环境。本工程采用了国电智深自主研发的 EDPF-NT plus 集散控制系统^[30]，该系统具有高可靠性和高可利用率，无通讯管理器，任何故障都被限制在有限范围内，决不会导致系统崩溃，真正实现了功能分散，危险分散^[31]。该系统所有重要设备和环节全部采用冗余设计，所有重要的功能都采用了多重容错方式实现，以确保系统的可靠性^[32]。本系统在蚌埠电厂的成功运行至今得到了厂方运行人员的一致好评。

5.2 研究前景

基于蚁群算法的自动配煤系统的研究还处于起步阶段，许多方法大多处于性能验证和试验阶段，缺乏有力的理论支持，因此在以下几个方面还有待于进一步的研究：

1. 与许多工程实际一样，本系统也不是十全十美的，蚁群算法的不成熟和数学基础的相对薄弱，决定了在将来相当长的时间内，其基本性质都将是首要研究内容。
2. 在自动配煤系统中本身就存在很多缺陷，例如各不连续料位监视的设备本身的不稳定性，比如探棒粘附煤块等异常现象都可以导致误报警的发生，这就要求现场检修人员要经常对各种敏感元件进行清理和日常维护工作。连续料位的监视目前一般都采用超声波探测器，单是煤仓内加煤的情况下，仓内粉尘量剧增，对料位的测量准确性影响是必然的，工程师站上所获得的数据显示与现场实际数据的差距也是巨大的，这些都是我们在工程实际调试中所遇到的问题。
3. 输煤方式的改进，这方面我国与欧美发达国家还有很大差距，目前国外发达国家火力发电厂通常采用封闭式输煤系统，国内输煤系统操作环境十分恶劣，粉尘浓度很大，长时间累积甚至导致火灾等事故发生，因此整个输煤系统的改进研究工作也势在必行。

参考文献

- [1] 杨宁, 赵玉刚. 集散控制系统及现场总线. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003. 9
- [2] 严盈富, 罗海平, 吴海勤. 监控组态软件与PLC入门. 北京: 人民邮电出版社, 2006. 11
- [3] 王爽心, 孙海波, 李亚光. “多媒体技术在电力生产监控中的应用现状与展望”, 《华北电力技术》, 2000 NO1, ISSN1003-9171, PP. 42~45
- [4] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用. 北京科学出版社, 2005
- [5] 胡小兵. 蚁群优化原理, 理论及其应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004, 3: 5~6
- [6] 王剑, 李平. 蚁群算法的理论与应用[J]. 机电工程, 2003(5): 126~129
- [7] 周勇, 陈洪亮. 蚁群算法的研究现状及其展望[J]. 微型电脑应用, 2002(2): 5~7
- [8] 温文波, 杜维. 蚁群算法概述[J]. 石油化工自动化, 2002: 19~22
- [9] 李有梅, 王文剑. 关于求解难组合优化问题的蚁群优化算法. 计算机科学, 2002, 29(3), 115~118
- [10] 张纪会, 徐心和. 一种新的进化算法—蚁群算法[J], 系统工程理论与实践, 1999, 3(3): 84~87
- [11] 张晓萍, 颜永年, 荆明等. 现代生产物流及仿真. 北京: 清华大学出版社, 1998: 17~64
- [12] Staeta control System Inc. 《News》, 1996, 6(19): 530~1058
- [13] Johnson 《News Release》 For Immediate Release July 19, 1994
- [14] 孙虎章. 自动控制原理[M]. 北京: 中央广播电视大学出版社, 1994
- [15] 王幸之. 单片机应用系统抗干扰技术[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2000
- [16] 朱善君等. 可编程序控制系统. 北京: 清华大学出版社, 1992
- [17] Freund Y. Boosting a weak algorithm by majority. Information and Computation, 1995. 121(2): 256~285
- [18] 马良. 全局优化的一种新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(9): 61~63
- [19] Cherkauer K J. Human expert level performance on a scientific image analysis task by a system using combined artificial neural networks. In: Proc the 13th AAAI Workshop on Integrating Multiple Learned Models for Improving and Scaling Machine Learning Algorithms, Portland, OR, 1996. 15~21
- [20] Krogh A, Vedelsby J. Neural network ensembles, cross validation, and active learning. Cambridge, MA: MIT Press, 1995. 231~238

- [21] Opitz D W, Shavlik J W. Generating accurate and diverse members of a neural network ensemble. In: Touretzky D, Mozer M, Hasselmo M eds. Advances in Neural Information Processing Systems 8, Cambridge, MA: MIT Press, 1996. 535~541
- [22] 徐精明, 曹先彬, 王煦法. 多态蚁群算法. 中国科学技术大学学报. 2005, 35(1):59~65
- [23] 李志刚, 刘媛. 发电厂输煤控制系统的研究与改进. 现代电力. 2002. 12
- [24] 高亮, 张兰绪, 高瑜. 火电厂输煤程序控制和监测保护系统设计. 电站系统工程, 1998
- [25] 邵裕森. 过程控制及仪表. 上海交通大学出版社. 1994
- [26] 桥保国. 上安电厂输煤控制系统设计思想浅析. 河北电力技术, 1996. 3
- [27] 程爱平, 裘炯, 王伟, 李兰馨. 基于程控系统的输煤故障诊断. 清华大学学报 1999, 12(39):76~78
- [28] 魏晓东:集散控制系统. 上海科学技术文献出版, 1991
- [29] 王宁. 火电厂输煤程控系统新功能开发. 山东电力工程咨询院, 山东济南 250013
- [30] 余庆广, 阎勇, 丁仁杰, 张羽. 大型火电厂输煤程控系统的网络控制系统设计. 电网技术, 2001, 25(2):43-45
- [31] 张新薇. 集散系统基础及其应用. 冶金工业出版社, 1990
- [32] 王常力, 廖道文. 集散控制系统的设计与应用. 清华大学出版社, 1993

致 谢

在我的硕士论文研究工作即将结束之际，我想把深深的谢意献给指导和帮助我的老师和朋友！

感谢我的导师梁伟平副教授。无论论文的选题、设计还是开展相应的研究工作以及论文的撰写，老师都给予了极大的关怀和悉心的指导。他严谨的治学态度，精湛的专业知识和丰富的现场经验让我深深钦佩，并让我受益匪浅。

同时，特别感谢王胜利工程师。在论文的选题和研究的整个过程中，王工给予了我莫大的关心和帮助，使我顺利完成课题研究，在整个研究生学习过程中一直尽心尽力地辅导我，帮助我，我的专业知识和业务水平得到很大的提高。

感谢华北电力大学计算机控制教研室的全体老师和同学！

感谢保定中能自控技术有限公司蚌埠电厂输煤程控项目研发小组的全体成员！

衷心感谢我的父母和所有关爱我的人，感谢他们默默的支持和无微不至的关怀！

在学期间发表论文和参加科研情况

发表的学术论文:

- [1] 梁伟平,任平杰,李尊基. 直接空冷机组空冷风机变频调速的节能分析. 中国电力, 2008, 25(5):58~60
- [2] 任平杰,梁伟平. 基于蚁群算法的自动配煤系统的设计. 仪器仪表用户, 2009, 16(5):20~21

参加科研情况:

- [1] 国电安徽蚌埠电厂输煤程控一期工程, 2008. 4-2009. 4, 主研人;
- [2] 山西兆丰铝业自备电厂电除尘系统改造项目, 2009. 5-2009. 8, 参加研发;
- [3] 包头第一热电厂输煤程控改造项目, 2009. 6-2009. 10, 参加研发.