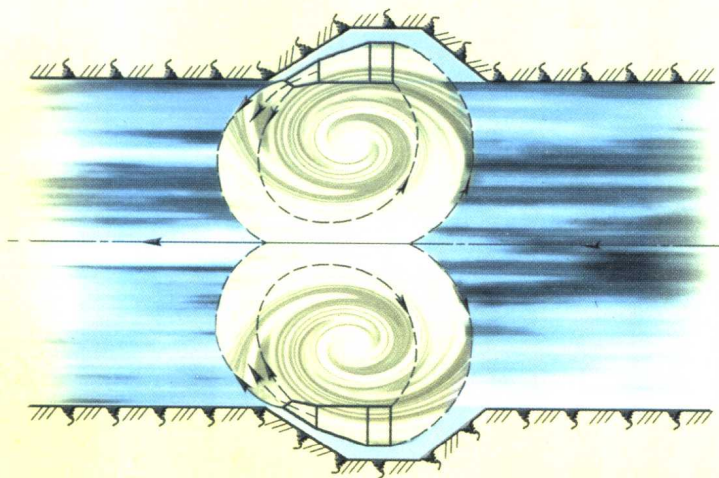


矿井风流流动

KUANGJING FENGLIU
LIUDONG YU KONGZHI

与控制

王海宁 著



冶金工业出版社

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

矿井风流流动与控制

王海宁 著

北京
冶金工业出版社
2007

内 容 简 介

本书在介绍矿井通风方面研究现状的基础上,阐述了矿井风流流动的基础理论、矿井通风网络基本性质、矿井通风构筑物及选型方法、矿用风机及选型方法、矿用空气幕的理论及应用、溜井风流控制及矿井通风节能技术及应用等内容。重点介绍了矿井风流调控新技术——矿用空气幕的隔断风流、引射风流和对风流增阻的理论模型及模拟分析、矿用空气幕的设计方法、矿用空气幕的多个工程应用实例。此外,还详细介绍了溜井漏风的特性及控制新技术和矿井通风节能的方法。

本书可供从事矿业开采研究与工程开发的科研院所、矿山企业的研究与工程技术人员阅读,也可作为高等院校采矿专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

矿井风流流动与控制/王海宁著. —北京:冶金工业出版社,2007.1

ISBN 978-7-5024-4150-0

I. 矿… II. 王… III. 矿井—矿山通风—研究
IV. TD72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 155330 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

责任编辑 张卫(联系电话:010-64027930;电子信箱:bull2820@sina.com)

张爱平(联系电话:010-64027928;电子信箱:zaptju99@163.com)

美术编辑 李心 责任校对 朱翔 李文彦 责任印制 丁小晶

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2007年1月第1版,2007年1月第1次印刷

148mm×210mm;8.625印张;254千字;264页;1-3000册

30.00元

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

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

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

众所周知,采矿业是工业生产所需原料和能源的基础,在社会发展进程中占有极其重要的地位。与其他工业部门相比,矿山生产的安全问题历来就显得非常突出。尤其是地下开采的矿山,由于矿床类型和性质的不同,地质情况千差万别,开采技术条件千变万化,无固定生产模式,随着井下客观条件的变化,在生产过程中会不断出现新情况。因此,特殊的生产条件使采掘中的不安全因素增多,工作面空间狭小、工作面不断变化、采矿作业过程中产生的粉尘和有毒有害气体等工作面环境的污染等带来了矿山安全的特殊性。尤其是大型机械化或井下地质条件不太好的矿山,矿井通风过程中存在着风流短路、漏风、无风死角、风流反向、污风循环等风流控制的难题,使矿井的有效风量率、风流分配等受到极大的影响,直接威胁到矿山井下的安全生产和工人的身体健康。多年来,矿井风流调节与控制技术的研究和开发一直受到高度重视,矿井漏风控制技术及设备,引射风流技术,无风墙辅扇通风技术,可控循环通风技术,井下风量、粉尘、有害气体、温度、湿度的自动检测技术,矿井通风自动控制技术,通风节能技术等方面的技术水平在不断发展。目前,国内在处理在主扇的作用下新鲜风流不能达到工作地点或通风网络中出现漏风、风流短路、风流循环等问题时,一般是采用人工通风构筑物、辅扇、引射器等措施对风流的大小和方向进行调控,而对于矿井运输巷道上的风流调控始终是一大难题。

近十年来,作者针对目前矿井通风中存在的风流控制难

题,在矿用空气幕阻隔风流、引射风流和对风流增阻的理论模型的建立与理论数值分析、矿用空气幕特性实验室试验研究、高溜井漏风和冲击粉尘污染、矿井通风节能以及在一些特大型和大型矿山的现场应用方面开展了一系列研究,解决了大量的实际难题,具有开拓意义。在开展研究的同时,作者完成了博士学位论文,并获得国家安全生产监督管理局科技成果二等奖3项,实用新型专利两项,发表学术论文多篇。现将这些材料整理成书,希望它的出版有助于推动我国在相关领域的技术与开发,也希望能对矿山企业及同行有所帮助和应用。如果是这样,那将是对作者极大的肯定和鼓励。

本书能得以顺利完成,要感谢金川集团有限公司、铜陵有色金属(集团)公司、福建省马坑矿业股份有限公司、江西省科技厅、中南大学、江西理工大学等的大力资助和关心,感谢古德生院士、吴超教授的悉心指导,感谢张红婴、任如山、吕志飞、王花平等的大力帮助。

由于时间紧迫加之作者水平有限,书中存在的疏漏和不足,敬请读者批评指正。

王海宁

2006年9月

目 录

1 绪论	1
1.1 国内外金属矿山通风研究与发展	2
1.1.1 国内外矿井通风网络成果分析	2
1.1.2 矿井通风节能技术研究进展	9
1.1.3 矿井通风网络优化调节	10
1.1.4 矿井通风系统优化设计	14
1.1.5 矿井通风控制技术	17
1.1.6 人工智能在矿井通风中的应用	18
1.2 矿井通风不良的危害与防治	21
1.2.1 矿井通风不良的危害	22
1.2.2 矿内空气中有毒有害气体的允许浓度	27
1.2.3 矿井通风不良的防治	28
2 矿井风流流动基础理论	30
2.1 矿井风流流动基本定律	30
2.1.1 风量平衡定律	30
2.1.2 风压平衡定律	31
2.1.3 阻力定律	31
2.2 串并联通风网路的基本性质	32
2.2.1 串联通风网路	32
2.2.2 并联通风网路	33
2.2.3 角联通风网路	36
2.3 流体流动的能量方程及应用	39
2.3.1 不可压缩性实际流体能量方程式及其在	

矿井通风中的应用·····	39
2.3.2 可压缩性实际流体能量方程·····	41
2.4 矿山井巷中的风流结构·····	43
2.4.1 流速的时均化·····	43
2.4.2 应力的时均化·····	43
2.5 井巷风速分布规律·····	47
2.6 矿山硐室中的射流·····	54
2.6.1 自由射流·····	54
2.6.2 诱导射流·····	54
2.7 无风墙辅扇通风·····	56
2.7.1 无风墙辅扇有效压力理论·····	57
2.7.2 无风墙辅扇在井巷中单独工作·····	58
2.7.3 无风墙辅扇通风中的几个问题·····	60
3 矿井通风构筑物·····	62
3.1 挡风墙·····	62
3.2 风桥·····	62
3.3 风门·····	63
3.3.1 碰撞式自动风门·····	64
3.3.2 气动或水动风门·····	64
3.3.3 电动风门·····	65
3.4 导风板·····	66
3.4.1 汇流导风板·····	66
3.4.2 降阻导风板·····	66
3.4.3 引风导风板·····	67
3.4.4 导风板引风防漏·····	68
3.5 调节风窗与纵向风障·····	74
3.6 主扇风硐、扩散器与反风装置·····	74
3.6.1 主扇风硐·····	74
3.6.2 扩散器·····	76
3.6.3 反风装置·····	76

3.7 矿井通风构筑物的最优选型·····	77
3.7.1 主扇扩散塔·····	77
3.7.2 风桥·····	86
3.7.3 主扇风硐·····	89
4 矿用空气幕理论及应用·····	95
4.1 空气幕研究与发展现状·····	95
4.1.1 大门空气幕·····	95
4.1.2 矿用空气幕·····	101
4.2 矿用空气幕理论·····	105
4.2.1 矿用空气幕隔断风流·····	106
4.2.2 矿用空气幕引射风流·····	114
4.2.3 矿用空气幕对风流增阻·····	121
4.2.4 空气幕阻隔和引射风流能力的影响因素分析·····	126
4.2.5 空气幕出口安装角与其工作效率的关系分析·····	131
4.2.6 小结·····	132
4.3 矿用空气幕特性与实验·····	133
4.3.1 Matlab 语言的特性·····	134
4.3.2 空气幕隔断风流理论的数值分析·····	134
4.3.3 空气幕引射风流理论的数值分析·····	141
4.3.4 试验验证·····	146
4.4 矿用空气幕现场应用研究·····	155
4.4.1 矿用空气幕隔断风流·····	156
4.4.2 矿用空气幕引射风流·····	163
4.4.3 矿用空气幕对风流增阻·····	180
4.4.4 效益分析·····	189
4.5 结论·····	190
5 溜矿井风流控制·····	194
5.1 溜矿井放矿时的冲击风流·····	194
5.1.1 冲击风流的形成·····	194

5.1.2	影响冲击风速的因素	196
5.1.3	冲击风速(或风量)的计算	200
5.1.4	连续卸矿时的冲击风流	204
5.2	高溜井漏风及卸矿粉尘污染控制技术	205
5.2.1	控制冲击风流的措施	206
5.2.2	粉尘污染控制措施	207
5.3	高溜井多片式挡风板研究	211
5.3.1	技术方案	212
5.3.2	多片挡风板结构设计	212
5.3.3	现场应用与分析	214
5.3.4	小结	215
6	矿用风机及通风节能技术	216
6.1	矿用风机	216
6.1.1	扇风机的构造与分类	216
6.1.2	扇风机特性	219
6.1.3	扇风机联合作业	223
6.2	矿井通风节能技术	226
6.2.1	漏风控制及其节能效益	226
6.2.2	降低井巷风阻及其节能效益	227
6.2.3	新型节能扇风机的应用及其节能效益	227
6.2.4	主扇调速节能技术	228
6.2.5	合理分风及其节能效益	232
6.2.6	优化调控系统及其节能效益	234
6.2.7	多风路排风系统及其节能效益	235
6.2.8	综合节能效益的估算方法	237
6.3	网络节能技术应用研究	238
6.3.1	扩大回风石门的断面	239
6.3.2	掘回风平巷	239
6.3.3	掘回风天井	239
6.3.4	完善通风构筑物	240

6.4 矿井通风系统存在问题及研究方向	240
附 录	243
附录 1 12 行斜坡道空气幕阻风率测定结果.....	243
附录 2 12 行斜道空气幕有效风量增加量测定结果.....	245
附录 3 二矿区 1428m 空气幕运行测定结果.. ..	247
附录 4 12 行分斜坡道空气幕现场及风向判断照片.....	252
参考文献	254

1 绪 论

矿井通风就是向井下供氧、排除有毒有害物质、排热和除湿、为寒冷矿井供暖等。矿井污染物超标可充分反映出矿井通风不足的问题。其预防方法一般是根据矿山通风系统的复杂性情况,而合理使用辅扇。对于生产中的矿井,其通风网络已经形成,主扇已定型,因此,若通风系统存在问题,一般靠加强通风构筑物及辅扇对风流的调控,以达到完善通风系统的目的。可见,矿山通风工作是矿山安全管理重中之重。因为,矿山生产中的凿岩、爆破、放矿、装运、破碎等环节会产生大量的粉尘,其中凿岩生产是主要的产尘源之一,作业区的粉尘浓度随凿岩时间的增长而升高,一般作业半小时后,矿尘浓度可达 250 mg/m^3 , 3 h 后达 800 mg/m^3 。而爆破作业的产尘量虽最大且飘散距离远,但含高浓度粉尘空气的持续时间较短。当然,若不及时采取有效的通风防尘措施,爆破数小时后,巷道内空气粉尘浓度仍比正常值高 10~20 倍。装运作业同样是主要的产尘源,一般人工装岩时的粉尘浓度可达 $700 \sim 800 \text{ mg/m}^3$,机械装岩时可高于 1000 mg/m^3 。此外,矿内爆破炮烟、柴油机尾气、火灾、硫化物的燃烧等会产生大量的有毒有害气体如 CO 、 H_2S 、 SO_2 、 NO_x 等;开采铀矿床及含铀、钍伴生的金属矿床时产生的氡等放射性气体污染;深井矿山开采时井下地热等对风流温度的影响,等等,均对井下作业人员、机械设备、安全生产以及巷道围岩的稳定性造成极大的危害。因此,矿山井下需要完善的通风系统,源源不断地将地表新鲜空气送到井下每一个作业面,排出污浊的空气。

然而,在当今国民经济发展十分迅速、矿产资源开发速度非常快和国家对企业安全生产特别重视的背景下,矿山企业在积极生产的同时,虽投入了大量的人力和财力进行矿井井下通风和安全方面的研究与应用,取得的不少成果已应用于生产,对安全生产起到了积极的作用,但是,在许多地下开采的矿山,尤其是大型机械化或井下地质条件较复杂的矿山,多年来,井下的通风过程中一直存在着风流控制的难题,如新

鲜风流短路或漏风、无风死角、风流反向、污风循环等,特别是在主要的运输巷道中,此类问题解决的难度更加突出,常常出现井下作业面风量不足、污风不能及时排出等问题,这无疑对井下通风的有效风量率、风流的分配等影响很大,直接威胁到矿山井下的安全生产。因此,在矿山井下生产过程中加强风流调节和通风管理工作就显得十分重要。

1.1 国内外金属矿山通风研究与发展

矿井通风系统是由向井下各作业地点供给新鲜空气、排出污浊空气的通风网络和通风动力及通风控制设施等构成的工程体系。矿井通风系统与井下各作业点相联系,对矿井通风安全状况具有全局性影响,是搞好矿井防尘的基础工程。无论新设计的矿井或已生产的矿井,都应把建立和完善矿井通风系统作为搞好安全生产、保护矿工安全健康、提高劳动生产率的一项重要措施。矿井通风系统按服务范围分为统一通风和分区通风;按进风井和回风井在井田范围内的布局分为中央式、对角式和中央对角混合式;按主扇的工作方式分为压入式、抽出式和压抽混合式。此外,阶段通风网络、采区通风网络和通风构筑物,也是通风系统的重要构成要素。防止漏风,提高有效风量率,是矿井通风系统管理的主要内容。

一个完整的矿井通风系统必须包括通风网络、通风动力和通风控制设施等。通风网络是指由分支和节点构成的连通的物理网路。通风动力是指在通风系统中提供动力以克服通风阻力部分,扇风机是提供通风动力的主要设备,自然风压也可为矿井通风提供动力。矿井通风构筑物是矿井通风系统中的风流调控设施,用以保证风流按生产需要的路线流动。合理地安装矿井通风构筑物,并使其经常处于完好状态,是矿井通风技术管理的一项重要任务。

1.1.1 国内外矿井通风网络成果分析

数字计算技术用于矿井通风网络分析始于1953年。20世纪60年代末,在世界范围内,计算机广泛地用于矿井通风系统的设计和分析。到目前为止,已有大量有关矿井通风的软件,用于解决地下开采中出现的不同问题。

从近几十年有关矿井通风网络分析方面的文献可以看出,矿井通风网络模拟变得越来越完善,也越来越有用。纵观矿井通风网络分析软件的研究进展大体经历了如下几个大阶段,如图 1-1 所示。

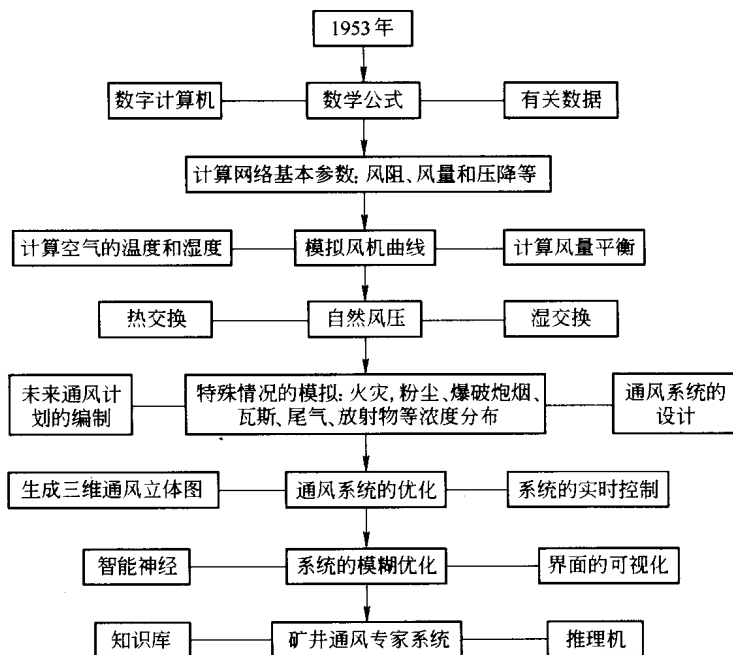


图 1-1 不同时期矿井通风系统分析软件的主要功能

1953年,Scott和Hinsley首先使用计算机来解决通风网络问题。1967年Wang和Hartman开发出解算含多风机和自然通风的立体通风网络程序,该软件表明,用于解决矿井通风基本参数的应用程序走向一个成熟的阶段。从那之后,世界上很多通风研究人员开发出大量的用于更加复杂的通风系统的程序。

1974年,宾夕法尼亚州州立大学的Stefanko和Ramani对通风系统网络分析的发展作了很大的贡献。他们的论文《矿井通风系统中柴油废气浓度的数值模拟》研究了井下柴油机对通风系统的影响,并提出了一系列的相关数学公式,这些公式的有效性得到了相关实测数据的检验。1981年,Greue发表了题为《矿井通风系统污染物和燃烧实时分

布的计算》的文章,该软件是当矿井火灾时,污染模拟的最具代表性的程序之一。这个程序可以模拟矿井大气中的烟尘和其他污染物的运动情况,计算在给定点、给定时间的浓度,判定矿井中不同位置的总污染强度。同样,它可以处理多个污染源或污染源随时间变化的情况,还可以解决污风循环的问题。发达国家早期的通风软件也较多,以美国和法国为例,列出软件的主要参数如表 1-1 所示。

表 1-1 美国、法国早期通风网络程序的技术参数

机构名称	时 间	程序名称	编程语言	输入数据	输出数据
France; Cherchat	1987 年	PC Vent	Fortran77	节点号,节点数,固定风量,分支阻力,风机曲线	网络参数,风机工况
France; Cherchat	1987 年	Vendis	Fortran77	可用数值化仪输入	可计算风路的各种参数
Bethlehem Steel USA	1975 年		Fortran4		阻力,风量,优化风机安装角,转速调整
Colorado School of Mines	1979 年		Fortran		风量,风速,风流压降,风机工况
Control Data	1980 年	MIVENDES	Fortran	标高,分支长度,局部阻力,入口温度,固定风量	风阻,废气,风量,工况,瓦斯,放射性
Geomin	1981 年		HP Basic	最小风量	压力,风机风量,阻隔室的特征
Michigan Techn Univ	1981 年		Fortran4	网络参数,污染源,几何参数,地热条件	风量分配,污染物浓度
Virginia State Univ	1968 年	VENTSIM	Fortran4		阻力,风机曲线,功率,流速,风量调整
Virginia State Univ	1976 年		Fortran4		阻力和水头损失
Pennsylvania State Univ	1967 年		Fortran		
Pennsylvania State Univ	1971 年		Fortran4		瓦斯排放量
Pennsylvania State Univ	1973 年		Fortran	节点,阻力系数,巷道尺寸,风路类型	网络参数,风机特性曲线

续表 1-1

机构名称	时 间	程序名称	编程语言	输 入 数 据	输 出 数 据
Pennsylvania State Univ	1974 年		Fortran4		使用扩散法分析网络中柴油机废气浓度
Pennsylvania State Univ	1979 年		Fortran		
Pennsylvania State Univ	1979 年	PSU/MVS	Fortran		
Pennsylvania State Univ	1979 年		BASIC		压力损失,局部损失,速度调节,以及通风巷道的费用分析

注:自 20 世纪 90 年代以来,发达国家出现了专门从事开发用于采矿业的软件,其开发队伍庞大,资金雄厚,开发的软件功能相当完善。但价格较贵,一般的中小型企业难以承受,著名的有 MinTech 公司和 DataMine 公司等。

我国的科技人员在这方面也做了大量的工作。1984 年,沈斐敏等编写了讲义《微型电子计算机在矿井通风中的应用》,于 1992 年改编为采矿专业本科生的教材《矿井通风微机程序设计与应用》,为更多的人接触有关矿井通风网络解算的知识开了一扇方便之门。1987 年,原中南工业大学吴超在瑞典律勒欧工业大学做访问学者期间,完成专著《Mine Ventilation Network Analysis and Pollution Simulation》。该专著回顾了国内外通风网络分析的发展历史,阐述了通风网络基本理论并给出了相关的源代码,使用的计算机语言主要是 Fortran77。1991 年中国矿业大学的张惠忱编写了《计算机在矿井通风中的应用》,为计算机在矿井通风领域里进一步的应用提供了技术支持。

在发达国家,大多数的矿井通风系统网络解算的应用软件已经商品化,有自己的版权和商标,同时也有一个较大的客户群。而在国内,大多数通风方面的软件是由科研机构或研究所自行开发的,客户仅限于与他们有项目合作的工矿企业,没有正规的商业化的运作。软件的功能不是很完善,其发展也在一定的程度上受到制约,不利于该产业的进一步发展。

在检索了自 1989 年以来的国内有关矿井通风的软件文献后,发现只有一个软件较为正式,即通风专家 3.0 版。有正式的版本号,是低版

本的升级版,功能较为完善,有一定的推广价值。该通风专家系统开发始于 20 世纪 80 年代中期,经历近 10 年的不断完善,是目前国内较为先进的采矿类应用软件,适用于各类井下开采矿山(煤矿、金属矿、非金属矿)矿井通风系统优化设计或相关系统设计。目前通过该系统设计的国内外大中型矿山已超过 50 座,如大红山铜矿、大红山铁矿、会东铅锌矿、大寨锗煤矿、谦比西铜矿等,已投产的矿山大部分取得了较好的通风效果和经济效益。通风专家 3.0 版采用汇编语言、编译 BASIC、数据库(FoxPro)等计算机语言综合编程,兼容 DOS 6.22/Windows9x 操作系统,软件系统全部为菜单结构,界面友好,使用简单,支持键盘以及鼠标操作、程序代码简洁,运算速度极快,不易被病毒攻击。通风专家系统主要有原始数据处理、通风网络计算、通风绘图、结果报表、风机数据库、知识库等六大模块组成,可对复杂通风系统进行网络生成、网孔圈定、风机优选、网络解算、结果报表生成等;系统可自动记录原始节点坐标、自动组建通风系统网络。此外,通风专家还可以采用任意角度和比例生成通风系统立体图以及通风平面图等大量辅助性报表。

其他与通风有关的软件,从不同的角度来反映、解决矿井通风中的不同问题,对完善矿井通风软件是有益的探索,充实了矿井通风的研究内容。根据检索结果,列举出软件的主要性能指标,如表 1-2 所示。

表 1-2 国内通风软件一览表

作者	推出时间	语言数据库	主要结构及功能
赵以蕙	1992 年	Fortran - 77	根据多孔介质流体动力学理论,把采空区看作是非均匀连续介质。风流在介质中的流动是过渡流,邻近层沼气稳定地均匀地(或非均匀地)涌入采空区,沼气在介质中的扩散符合 Fick 定律,由此建立了系列稳态条件下的数学模型
谢贤平	1995 年	GwBASIC	计算机集散控制系统的管理程序,下级计算机的采样及控制程序。两者之间利用通讯软件相互联系,进行数据交换和信息传递
黄元平	1995 年	C 语言	软件的用户界面良好,使用方便;采用动态内存管理技术可以直接使用扩展内存,因而原则上可用于任意大小的网络优化问题

续表 1-2

作者	推出时间	语言数据库	主要结构及功能
范明训			程序为菜单式结构,具有汉字自动提示功能;巷道可按任意顺序排列和调整;具有网路解算和绘图功能;具有参数及图形修改功能;可实现网路解算与绘图的计算机自动控制
黄继声	1995年		自动完成数据处理、通风网路解算、数据选择传递、编制风机风压计算表并绘制矿井通风系统立体图等一系列工作;操作简单,输入数据文件后,只需少量人机对话选择,其他一切皆自动完成;采用链式回路输入法、代码法、统计法和编辑输入法后,使输入数据量减少80%以上
曾无畏	1994年	Dbase	包含矿井通风管理中的矿井通风、矿井防突、瓦斯抽放、矿井防火、矿井防尘一、矿井防尘二、安全技术措和矿井通风质量评比八个项目,每个项目中均具有编辑数据、修改数据、查询数据和打印数据功能
戚宜欣			利用专家系统技术,经火灾救灾专家经过多年实践得出的经验和教训收集起来,经过整理加工,形成有关控风措施的知识库;此外,根据巷道供风作用为巷道分类,从而形成数据库,最后编制成推理机
蒋军成	1995年	Fortran	可用于生产矿井风量优化调节计算和新井通风设计时的调风计算;既可进行局部风网的风量调节计算,也可进行全矿规模的风量调节计算(包括多风机系统的风量调节计算)
刘师少	1994年	Foxbase + 2.10	程序设计模块化;舒适可靠的人机交互式工作环境;内存开销小;具有较强的图形处理功能
刘剑	1993年	Fortran CAD系统	可查询采场剖分信息,根据漏风源汇位置坐标,可查询对应的单元号,是否为边界单元等;根据漏风源汇的漏风量,计算单元号,确定单元均质区号及渗透系数等;绘制二维或三维的采场区域图、均质区划分图、漏风源汇位置及编号图、采场剖分图、流线或流管图、等压线或等压面图等
谭国运		Fortran77 Dbase-III	采用通路法进行风量调节,在计算风网调节的同时可以发现通风阻力最大的区段和地点,为降低阻力,改造通风系统提供途径;其次,该系统采用一体化通风管理方法,收到良好效果
杨娟	2001年	Visual C++ ODBC	主要包括动态调节系统、数据库系统与通风网络图绘制系统等模块