

# 矿井通风智能化技术研究现状与发展方向

卢新明<sup>1 2 3</sup>

(1. 山东省智慧矿山信息技术重点实验室, 山东 青岛 266510; 2. 山东省智慧矿山软件工程技术研究中心, 山东 泰安 271000;  
3. 山东科技大学, 山东 青岛 266510)

**摘要:** 基于文献分析, 综述了有关矿井通风智能化领域的主要研究成果, 分析了矿井通风智能化技术所涉及的通风网络解算、数据采集与处理、通风系统优化、灵敏度与可靠性计算、漏风处理技术、状态识别方法、最优调节与控制、智能装备等领域的研究现状; 设计了建立矿井通风自动化系统的技术路线, 并分析了矿井通风自动化系统的应用前景; 提出了实现矿井通风系统自动化还有待解决的2个关键问题及其解决思路, 如风量超前计算模型与方法, 以及全量程风表和风速传感器的研制。最后指出矿井通风智能化技术的发展方向是: 基于“互联网+”和现代矿山物联网技术, 全面实现矿井通风系统自动化和无人化。

**关键词:** 矿井通风; 智能化技术; 自动化系统; 互联网+; 物联网

**中图分类号:** TD72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)07-0047-06

## Study status and development orientation of mine ventilation intelligent technology

Lu Xinming<sup>1 2 3</sup>

(1. Shandong Provincial Key Lab of Intelligent Mine Information Technology, Qingdao 266510, China; 2. Shandong Provincial Research Center of Intelligent Mine Software Engineering and Technology, Tai'an 271000, China; 3. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

**Abstract:** Based on the literature analysis, the paper stated the main study achievements of the mine ventilation intelligent fields and analyzed the study status of the ventilation network solution, data acquisition and processing, ventilation system optimization, sensitivity and reliability calculation, air leakage treatment technology, status recognition method, optimal adjustment and control, intelligent equipment and other fields related to the mine ventilation intelligent technology. A technical route to establish the mine ventilation automation system was designed and the application prospects of the mine ventilation automation system were analyzed. The two key problems to be solved to realize the automation of the mine ventilation system as well as the solution idea were analyzed. The required ventilation volume pilot computing model and method as well as the full measuring range wind gauge and the wind speed sensor should be researched and developed. Finally, the paper pointed out that the development orientation of the mine ventilation intelligent technology would be based on the internet plus and the modern mine internet technology of things to fully realize the automation and unmanned of the mine ventilation intelligent technology.

**Key words:** mine ventilation; intelligent technology; automation system; internet plus; internet of things

## 0 引言

矿井通风是保障矿井安全最主要的技术手段之一, 在矿井生产过程中, 必须源源不断地将地面新鲜空气输送到井下各作业地点, 以供给工作人员呼吸, 并稀释和排除井下各种有毒、有害的气体 and 矿尘。

只有科学地、可靠地控制矿井风流, 才能有效地为防治瓦斯、煤尘爆炸以及降温、防尘、灭火创造良好的工作环境, 保障井下作业人员的身体健康、劳动安全和设备的正常运转。矿井通风就是根据井下各个地点的温度、湿度、有害气体和矿尘浓度实时保证供风质量, 以满足正常时期和灾变时期各用风地点按时

收稿日期: 2016-05-10; 责任编辑: 代艳玲 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.07.008

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA062202); 泰山学者攀登计划基金资助项目(tspd20150208)

作者简介: 卢新明(1961—), 男, 河南济源人, 教授, 博士生导师, 博士。Tel: 13853803297, E-mail: 13853803297@139.com

引用格式: 卢新明. 矿井通风智能化技术研究现状与发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 47-52.

Lu Xinming. Study status and development orientation of mine ventilation intelligent technology [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 47-52.

按需供风。但是,一般大中矿井的通风系统都是由数百条,甚至上千条风道组成的非线性流体网络,而且随着地面大气压和地温的变化、巷道的变形、掘进工作面 and 回采工作面的推进、通风设施的状态参量改变和各种车辆、设备的扰动,有许多风道的风阻和自然风压都是随时变动的。多年来国内外有很多专家、学者致力于矿井通风理论、技术和应用方面的研究,但矿井通风状态识别和自动调控方面一直没有取得实质性的突破。迄今为止,矿井的通风系统还停留在人工或半人工阶段,因此造成大型的矿井,特别是大型煤矿难以实现有效通风和按需供风,不仅造成严重的人力、物力和财力浪费,而且“一通三防”事故和瓦斯事故时有发生,发生灾变后也不能实时地、有效地控制风流以满足均压灭火、控灾、抗灾和救灾的需要,造成巨大的人员伤亡和经济损失。当前,“互联网+”和现代物联网技术在我国的发展如火如荼,矿山物联网也取得了很大的进步,无论在矿井的环境监测、灾害预警、人员定位方面,还是在设备状态监测和故障诊断方面都安装了大量传感器,目前,千兆甚至万兆工业以太网和4G基站已经铺设到井下。但目前还没有一套真正的智能化矿井通风系统问世,如果能够充分利用矿山物联网技术和智能设备实现矿井通风系统的自动化和智能化,必将会对矿井安全生产的减人提效起到至关重要的作用。

## 1 矿井通风智能化技术研究现状

关于矿井通风智能化技术的研究主要涉及通风网络解算、数据采集与处理、通风系统优化、灵敏度与可靠性计算、漏风处理技术、状态识别方法、最优调节与控制、智能装备等,关于这些技术的研究现状和进展分析如下。

1) 通风网络解算是通风系统分析、状态估计、优化、调控的基础,自1936年Cross H<sup>[1]</sup>提出流体网络分析方法后,科研人员就开始采用数值运算方法和图论理论来分析和求解矿井自然分风问题。1951年英国的斯科特(Scott)和恒斯雷(Honsley)对哈德-克劳斯(Hard-Cross)方法进行了改进,提出了著名的Scott-Honsley方法。同年,日本京都大学的平松良雄也提出了类似的方法,称为京大方法。但是这些方法在理论上很不完善,都不能保证算法的收敛性。仅文献[2-3]给出了简单加压问题解的存在唯一性讨论和收敛算法,文献[4]给出了双树定解条

件,文献[5-7]虽然也采用了最优化技术求解平差方程组,但仅限于简单情况,且远不如文献[2-3]的结果。直到文献[8]给出非线性管网方程组的定解条件和全局收敛算法,通风网络解算问题在理论上才得到全面的解决。文献[9]提出的包括矿井通风在内的非线性动力网络方程组的性质与解法,解决了矿井通风系统多态(包括层流、紊流等)流动的网络分析计算问题,不仅使得高速风流、低速风流、巷道风流、采空区风流和漏风通道风流可以混合解算,其解更符合实际,而且给出了算法的收敛性条件和定理,文献[10]又对文献[8]的算法进行简化,使其解算效率得到进一步提高。至此,关于矿井通风系统的分风解算问题得到彻底解决。

2) 关于矿井通风系统优化问题的研究,一般有线性规划法<sup>[11]</sup>、最大通路法<sup>[12]</sup>、非线性规划法<sup>[8,10,13-20]</sup>以及固定风量法等。其中,线性规划法和最大通路法对系统进行大量的简化,计算结果只是在某种条件下的近似解。而固定风量法其实质就是定解问题<sup>[8-9]</sup>的特例,用这种方法求出的风阻可能为负值,使得方案不可行。非线性规划方法虽然没有对系统进行简化,但就最优调节问题而言,如文献[16]给出的迭代算法并不是最优的,文献[17-19]将风道的风压作为调节变量进行处理,这种处理方法对煤矿通风系统而言,其计算结果一般不可行,因为当风压调节值的正负如果和风流方向不一致,就只能通过降阻或采用辅助通风机进行调节,这在煤矿一般地点是不允许的。文献[20]采用的GECP方法和关键路径法也没有给出最优论证,事实上,文献[8,15]提出的序列子规划方法和单纯形交替法已经比较彻底地解决了通风系统优化和算法的收敛性问题。文献[21-23]虽然发明了矿井通风系统在线调节方法和装置,但都是局部和近似的,在计算原理上没有完备性。而文献[24-25]发明的线闭环优调优控方法和联合优调优控方法比较完整地解决了矿井通风系统的在线最优调节问题和全局最优调节问题,由其得到的方案不仅可行,而且可以达到通风机和系统的全局最优。

3) 关于阻力测定与测量平差的研究。众所周知,无论是分风解算、系统优化、系统改造还是调控风,都需要知道一部分系统参数,特别是各分支的风阻。如果已知的参数精度较低,甚至是错误数据,则无论计算方法再先进,计算结果再精确也是徒劳的。关于如何提高参数精度的研究,过去大都局限

于测定方法和测定仪器,但由于矿井通风网络是复杂多变的系统,测定时还有随机扰动,即使消除了系统误差,随机误差也在所难免。为此,文献[26]首次提出了矿井通风网风量测量平差的概念,文献[27]将这一概进行了完善,利用最大似然原理不仅可以识别和消除错误数据,也得到了比较完整的矿井通风网络测量平差方法和软件。为了提高阻力测定效率和降低监测系统成本,文献[28-30]及其参考文献提出了测点最优布局方法并成功用于实际工作和工程中。文献[31]的平差原理与文献[27]类似,这里不再详述。

4) 关于矿井通风系统可靠度和灵敏度的研究。文献[32]首次提出了矿井通风系统可靠度的概念,并利用可靠性数学和一般网络的元件可靠度理论给出了矿井通风系统可靠度的确定方法。文献[33]认为文献[32]的方法不适合矿井通风系统,通过给出矿井通风系统灵敏度计算公式,提出了基于矿井通风状态和灵敏度的矿井通风风道和系统的可靠度计算方法,并给出了可靠度优化模型和算例。在此之后,矿井通风系统的可靠度计算方法就分成 2 大类,以文献[34]辽宁工程技术大学为代表的主要研究者大部分沿用文献[32]的计算思想,其他大部分学者<sup>[35-38]</sup>沿用了文献[33]的研究思路。截至目前,除文献[33]之外,关于矿井通风系统可靠度优化的研究成果还很少,事实上,可靠度优化对矿井通风系统的稳定运行非常重要。

5) 关于矿井通风系统状态识别技术的研究。鉴于矿井通风系统参数,特别是风道风阻、自然风压(热力风压)、风道风量、漏风状态在调风控风的时变性和重要性,单纯依赖阻力测定和测量平差已经不能满足智能化通风的需要。虽然有专家给出了一些测风求阻的研究成果<sup>[39-41]</sup>,但这些方法不仅需要主动对系统进行调节,影响正常通风,而且当调节点、调节时机和调节量设置不当时,将形成一个病态方程组,很难得到正确的结果。文献[42]利用矿井通风系统本身的时变性产生的多态特征,建立了一个通用的巷道风阻识别模型,利用该模型在不需要人工干预的情况下可以自动识别各风道风阻的变化。文献[43]利用矿山物联网技术,不仅给出了传感器最优布置方法,而且建立了矿井通风系统状态识别的数学规划算法,比较完整地解决了除漏风之外的其他参数在线识别问题。文献[44-46]虽然给出了局部漏风测算方法和漏风通道的参数计算,但

至今还没有形成系统的漏风点和漏风通道识别模型和算法。

6) 关于矿井通风系统在线调节方法和装置的研究。文献[21-23]虽然针对不同的环节发明了一些调节装置,但无论是理论上,还是系统上都是局部的监测和局部的调节。以文献[22]为例,仅通过调节本风道卷帘门的开启高度(单风道卷帘门压差调节法),使通过的风量达到目标风量的要求,对于流体管网来说,在原理上就不通,因为整个风网要满足平衡定律,各风道相互制约,比如,最简单的 2 个并联风道 A 和 B,要想使通过风道 B 的风量达到最大,不仅要把风道 B 的卷帘门开到最大,而且要把风道 A 的卷帘门关到最小,而只靠调节风道 B 本身不可能使其通过的风量达到其目标风量,况且调节风道 B 时同样也影响到其他风道,使整个系统处于混乱状态。文献[47-49]虽然论述了整体调节方法,但没有给出全局最优调节算法和具体调节装置。文献[50]发明了包括卷帘式、推拉式、百叶窗式及其它们的组合和变种等各类智能调控装置,利用这些调控装置在不能影响运输提升设备正常运行的条件下,可进行大范围的精确调节,结合文献[24-25, 42-43]的监测数据处理、状态识别和全局优调优控方案计算,就可以实现“信息遥测-状态识别-需风计算-方案优化-远程调控-信息遥测”闭环调控的矿井通风系统自动化。

7) 关于矿井通风系统故障诊断的研究,已经有了一些研究成果<sup>[51-54]</sup>,但这些成果还不够深入,也不系统。事实上,要实现通风系统的故障诊断,包括识别风阻异常、构筑物的状态异常、热力风压异常等均可用文献[42-43]的通风系统状态识别方法和风道参数识别方法进行解决。

8) 关于矿井通风智能化技术,除了上述研究之外,随着采矿技术的进步,现代化大型矿井越来越多,除了非煤矿山之外,很多大型煤矿的辅助运输和人员输送都采用了大型无轨胶轮车。大量无轨胶轮车在井下运行,不仅要排放大量的一氧化碳等有害气体,胶轮车的运行过程与大型提升装备一样,其活塞风将对整个矿井的通风系统造成严重影响。因此,矿井活塞风影响与轨胶车模拟调度也是一个需要解决的问题,但目前除了借鉴地铁和隧道等简单环境的活塞风有一些研究结果外<sup>[55]</sup>,对大型矿井这样的复杂系统,其活塞风研究,还没有可用和系统性的成果,在这方面还需要加大研究力度。

## 2 矿井通风自动化有待解决的问题

1) 需风量超前计算模型与方法。关于用风点和矿井需风量计算问题,虽然矿井通风教科书及相关文献给出了一些计算方法,但是这些计算方法都是建立在瓦斯涌出量、炮烟产生量、粉煤尘产生量、环境温度、机械散热和人员数量等参数已知的基础上,然而由于每个矿井、每个用风点的环境、工艺差别都比较大,不可能用统一的方法计算需风量,即这种计算方法对矿井安全来说是不可靠的;即使可利用传感器和人员定位系统采集到瓦斯涌出量、炮烟产生量、粉煤尘产生量、环境温度、机械散热和人员数量后再计算需风量,这时已经处于滞后状态,中间一定存在一个具有安全隐患的灰色区间,给矿井安全造成一定的风险。因此,新版《煤矿安全规程》<sup>[56]</sup>已没有具体的需风量计算公式,规定由煤矿企业根据其具体情况自行制定。但无论是自动调风,还是人工调风,需风量超前计算都是不可回避的问题,即建立一套有效的需风量超前计算模型与方法是矿井通风工作有待解决的问题之一。关于需风量超前计算问题,解决的思路是用智能化的方法建立一个在线学习软件系统,结合各种传感技术和物联网技术,实现每个用风点用风量的超前预测。

2) 全量程风表和风速传感器。目前的风表或风速传感器其量程都不小于 $0.2\text{ m/s}$ ,这样就使得很多具有较低风速的风道的风量无法精确测定,不仅严重影响了通风系统状态识别,也严重影响着日常的矿井通风阻力测定、数据平差、风速传感器调校等工程质量。因此,研制大量程( $0.01\sim 30\text{ m/s}$ )的风表或风速传感器也是实现矿井通风自动化亟需解决的问题之一。关于全量程风表和风速传感器的研发问题,解决的思路是利用断面的局部缩放技术对放大的风速进行监测,尔后再缩小成真实风速,或者直接研发基于微震动、超声波等新型微速传感器,实现低风速精确测量。

## 3 矿井通风智能化技术发展方向

借“互联网+”行动指南和“机械化减人、自动化换人”专项行动,矿井通风智能化研发领域也迎来前所未有的发展机遇,其发展方向就是充分利用现代物联网技术、通信技术和自动化技术实现矿井通风系统全程自动化<sup>[57]</sup>,即把矿井通风系统改造成包括下列内容的全程智能化系统。

1) 通过对矿井通风网络的等效简化,优化矿井传感器和调控设施布置方案,利用气压、风速、温度、湿度、粉尘、有害气体浓度传感器以及矿井通风系统状态估计软件,实现各风道风阻、自然风压、热力风压、设施状态及环境的全面在线感知。

2) 通过矿井环境参数预测和安全规程的环境参数指标要求,利用需风量预测软件,实现各用风点用风量的超前计算。

3) 根据矿井通风系统状态估计结果和用风点用风量预测结果,利用智能调控风软件,计算包括调节设施和智能动力装备的全局最优调节方案,并发布调控命令,实现矿井通风系统远程调控。矿井通风系统自动化就是在不需要人工参与的前提下自动实现闭环运行,只有当出现故障和移装时才需要人工参与。利用该技术,不仅可以大幅度地减少瓦检、测风、方案优化、数据处理和系统调整等通风技术人员数量,更重要的是能充分利用矿井物联网和自动化技术实现矿井通风系统的在线分析、识别、诊断和优调优控,确保矿井通风系统正常时期和灾变时期的按时按需低功耗最优供风。

### 参考文献(References):

- [1] Cross H. Analysis of flow in network of conduits or conductors [R]. Illinois: Engineering Experiment Station of University of Illinois, 1936.
- [2] 王长钰. 非线性管道网络中的线性逼近法的收敛性及推广 [J]. 应用数学学报, 1978, 1(4): 269-282.  
Wang Changyu. Convergence and extension of the linear approximation method in nonlinear pipe network [J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1978, 1(4): 269-282.
- [3] 张建中. 一类求解管道网络方程的迭代法及其推广 [J]. 应用数学学报, 1981, 4(2): 175-189.  
Zhang Jianzhong. An iterative method for solving the equation of pipe network and its extension [J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1981, 4(2): 175-189.
- [4] 黄翰文, 聂义勇. 矿井按需分风双树解算法 [J]. 煤炭学报, 1983, 8(4): 1-11.  
Huang Hanwen, Nie Yiyong. Bitree method for solution of mine air distribution [J]. Journal of China Coal Society, 1983, 8(4): 1-11.
- [5] Collins M, Cooper L, Helgason R et al. Solving the pipe network analysis problem using optimization techniques [J]. Management Science, 1978(24): 747-760.
- [6] Ueng T H, Wang Y J. Analysis of mine ventilation network using nonlinear programming techniques [C]. SME Preprint, AIME Annual Meeting, California, 1984.
- [7] Bhamidipati S, Procarione J A. Nonlinear programming technique for analysis of mine ventilation network [J]. Mine Industry, 1986,

- 95: 8-14.
- [8] 卢新明.非线性管道网络中的数学规划问题及解法[J].应用数学学报,1989,12(3): 281-291.  
Lu Xinming. Mathematical programming problem and solution in nonlinear pipeline network [J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1989, 12(3): 281-291.
- [9] 卢新明.一类非线性动力网络方程组的性质与解法及其应用[J].系统工程学报,1991,6(2): 99-107.  
Lu Xinming. The properties and solution of a class of nonlinear dynamical network equations and its application [J]. Journal of Systems Engineering, 1991, 6(2): 99-107.
- [10] 修乃华,张国樑,王旭东.非线性管道网络中的一类改进数学规划算法及收敛性[J].应用数学学报,1993,16(2): 275-278.  
Xiu Naihua, Zhang Guoliang, Wang Xudong. An improved mathematical programming algorithm and its convergence for nonlinear pipeline networks [J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1993, 16(2): 275-278.
- [11] Wang Y J, Pana M T. Solving mine ventilation network problem by linear programming [C]. SME Preprint, AIME Annual Meeting, New York, 1971.
- [12] 陈开岩.矿井通风系统优化理论及应用[M].徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 79-82.
- [13] Shamir U. Optimization in water distribution systems engineering [J]. Mathematical Programming Study, 1978(11): 65-84.
- [14] Thomas A, Morley, Wang Y J. The minimization of ventilation costs for controlled flow network [C]. SME Preprint, Annual Meeting, Yrah, 1983.
- [15] 卢新明.矿井通风系统最优调节问题的研究[J].煤炭学报, 1985, 10(1): 56-64.  
Lu Xinming. Study on optimal regulation of mine ventilation system [J]. China Journal of Coal Society, 1985, 10(1): 56-64.
- [16] 王树刚,孙多斌.稳定流体管网理论[M].北京: 煤炭工业出版社, 2007: 114-116.
- [17] 黄元平,李湖生.矿井通风网络优化调节问题的非线性规划解法[J].煤炭学报,1995,20(2): 14-20.  
Huang Yuanping, Li Husheng. Nonlinear programming method for optimal regulation of mine ventilation network [J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(2): 14-20.
- [18] 李江,陈开岩,林柏泉.遗传算法在矿井通风网络优化中的应用[J].中国矿业大学学报,2007,36(6): 789-793.  
Li Jiang, Chen Kaiyan, Lin Boquan. Application of genetic algorithm in optimization of mine ventilation network [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(6): 789-793.
- [19] 库向阳,常新坦,孙艺珍.基于遗传算法的通风网络两步法风流调节优化算法[J].中南大学学报: 自然科学版,2011(9): 2729-2736.  
She Xiangyang, Chang Xintan, Sun Yizhen. Optimization algorithm of air flow regulation in two step ventilation network based on genetic algorithm [J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2011(9): 2729-2736.
- [20] 司俊鸿.矿井通风系统风流参数动态监测及风量调节优化[D].徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [21] 周翔,刘戎,徐峰,等.一种矿井通风节能自动调速系统: 中国, CN202811437U [P]. 2012-07-25.
- [22] 司俊鸿,徐文全,王鹏,等.一种矿井通风自适应调节装置及方法: 中国, CN103291345A [P]. 2013-06-28.
- [23] 周福宝,宋小林,胡依鲁,等.一种煤矿井下风窗智能调节装置: 中国, CN103670480A [P]. 2013-12-26.
- [24] 卢新明,尹红.一种矿井通风系统在线闭环优调优控方法: 中国, ZL201510256743.X [P]. 2015-08-12.
- [25] 卢新明,尹红.一种矿井通风系统的联合优调优控方法: 中国, ZL201510256440.8 [P]. 2015-09-30.
- [26] 戚颖敏.矿井通风网风量测量的平差[J].煤矿安全,1981,12(10): 29-35.  
Qi Yingmin. The equation of airflow measurement in mine ventilation network [J]. Safety in Mines, 1981, 12(10): 29-35.
- [27] 卢新明.矿井通风网络测定平差新探[J].中国矿业学院学报, 1988, 17(3): 78-84.  
Lu Xinming. A new approach to the adjustment of measurement of mine ventilation network [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1988, 17(3): 78-84.
- [28] Lu xinming. Optimization problems in mine ventilation systems engineering and their solutions [C]. Proceedings of the international symposium on modern mining technology, Taian, 1988.
- [29] Lu Xinming. The Micro-computer assistant analysis for mine ventilation network [C]. Proceedings of 5th US Mine Ventilation Symposium, 1991: 432-439.
- [30] 卢新明,潘正伯.非线性管网分析与优化的微机辅助系统, 计算机开发应用成果汇编[M].北京: 科学出版社, 1991: 179-183.
- [31] 陈开岩,陈发明.矿井通风测量数据处理方法的集成与应用[J].中国矿业大学学报,2002,31(6): 600-604.  
Chen Kaiyan, Chen Faming. Integration of mine ventilation data processing methods and its application [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(6): 600-604.
- [32] 徐瑞龙.通风网络的可靠度确定[J].阜新矿业学院学报, 1985, 4(3): 31-39.  
Xu Ruilong. Determination on ventilation network reliability [J]. Journal of Fuxin Mining Institute, 1985, 4(3): 31-39.
- [33] 卢新明.矿井通风系统的可靠度及其优化[J].山东矿业学院学报,1987(4): 29-37.  
Lu Xinming. Reliability of mine ventilation system and its optimization [J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1987(4): 29-37.
- [34] 马云东,宋志,孙宝铮.矿井通风系统可靠性分析理论研究[J].阜新矿业学院学报,1995,14(3): 5-10.  
Ma Yundong, Song Zhi, Sun Baozheng. Study on the reliability analysis theory of mine ventilation system [J]. Journal of Fuxin Mining Institute, 1995, 14(3): 5-10.
- [35] 谢贤平.矿井通风网络的可靠度计算[J].工业安全与防尘,

- 1992(8):5-9.
- Xie Xianping. Reliability calculation of mine ventilation network [J]. Industrial Safety and Dust Prevention, 1992(8):5-9.
- [36] 李湖生. 矿井通风系统的敏感性和风流稳定性[J]. 淮南矿业学院学报, 1997, 17(3):32-37.
- Li Husheng. Sensibility and airflow stability of mine ventilation system[J]. Journal of Huainan Mining Institute, 1997, 17(3):32-37.
- [37] 吴风国. 矿井通风系统安全评价与优化研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2012.
- [38] 胡利明. 煤矿复杂风网“瓦斯异常涌出-变频调风稀释”自动控制理论及方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [39] 刘泽功. 测风求阻法解算矿井复杂通风网络[J]. 淮南矿业学院学报, 1992, 12(3/4):45-54.
- Liu Zegong. Wind resistance method for solving mine complicated ventilation network [J]. Journal of Huainan Mining Institute, 1992, 12(3/4):45-54.
- [40] 周丽红, 吕军, 刘小军. 测风求阻法的原理及实现[J]. 西安科技学院学报, 2004, 24(2):148-150.
- Zhou Lihong, Lyu Jun, Liu Xiaojun. Principle and realization method for wind resistance [J]. Journal of Xi'an Institute of Science and Technology, 2004, 24(2):148-150.
- [41] 司俊鸿, 陈开岩. 基于 Tikhonov 正则化的矿井通风网络测风求阻法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6):994-998.
- Si Junhong, Chen Kaiyan. Mine ventilation network for wind resistance method based on Tikhonov regularization [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6):994-998.
- [42] 卢新明, 尹红. 一种矿井通风系统状态识别方法: 中国, ZL20140182176.3[P]. 2014-07-23.
- [43] 卢新明, 尹红. 一种矿井通风系统风道参数的多态自动识别方法: 中国, ZL201410542762.4[P]. 2015-01-07.
- [44] 倪文耀. 抽出式通风矿井外部漏风率的正确测算法[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(4):90-92.
- Ni Wen Yao. Accurate calculation of exterior leakage of exhausting ventilator in mine pit [J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(4):90-92.
- [45] 鹿荣荣, 杨胜强, 郭晓宇, 等. 采煤工作面漏风通道参数研究与应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(3):59-63.
- Lu Cunrong, Yang Shenqiang, Guo Xiaoyu et al. Study and application of leakage channel parameters of coal working faces [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(3):59-63.
- [46] 黄光球, 陆秋琴, 刘冠. 基于鱼群算法的通风巷道漏风点辨识方法研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(12):2677-2682.
- Huang Guangqiu, Lu Qiuqin, Liu Guan. Study on tunnel ventilation air leakage points identification method based on artificial fish swarm algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(12):2677-2682.
- [47] 程健维. 一种巷道风阻参数自调整的验证矿井通风系统状态的方法, CN103266906A[P]. 2013-08-28.
- [48] 陈开岩. 一种矿井通风系统运行状态控制决策方法: 中国, CN104564120A[P]. 2015-04-29.
- [49] 程健维, 李思远. 一种矿井通风系统自动调节系统: 中国, CN104612740A[P]. 2015-05-13.
- [50] 卢新明, 尹红. 一种矿井通风系统全局自动调节控制装置及方法: 中国, ZL201410541885.6[P]. 2015-07-25.
- [51] 胡千庭, 杨守国, 文光才, 等. 一种矿井通风系统在线监测及分析预警方法及系统: 中国, CN102650214A[P]. 2012-08-29.
- [52] 程卫民, 张孝强, 王刚, 等. 一种矿井通风系统分区稳定式动态监测与预警系统: 中国, CN103953393A[P]. 2014-07-30.
- [53] 周福宝, 宋小林, 洪克宽, 等. 一种基于光纤传感器的矿用轴流式通风机测振系统: 中国, CN103696977A[P]. 2014-04-02.
- [54] 周福宝, 胡依鲁, 宋小林, 等. 一种煤矿井下风门故障预警系统: 中国, CN103670515A[P]. 2014-03-26.
- [55] 王从陆. 非灾变时期金属矿复杂矿井通风系统稳定性及数值模拟研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [56] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.
- [57] DB37/T 2322—2013, 智慧矿山建设规范[S].