



首都经济贸易大学出版基金资助

复杂矿井通风系统 稳定性研究

FUZA KUANGJING TONGFENG XITONG
WENDINGXING YANJIU

谢中朋
宋晓燕 © 著



首都经济贸易大学出版社
Capital University of Economics and Business Press

大学出版基金资助

复杂矿井通风系统 稳定性研究

谢中朋
宋晓燕 ◎ 著

FUZA KUANGJING TONGFENG XITONG
WENDINGXING YANJIU



首都经济贸易大学出版社

Capital University of Economics and Business Press

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

复杂矿井通风系统稳定性研究/谢中朋,宋晓燕著. -- 北京:首都经济贸易大学出版社,2018.9

ISBN 978 - 7 - 5638 - 2859 - 3

I. ①复… II. ①谢… ②宋… III. ①矿井通风系统—研究 IV. ①TD724

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 209637 号

复杂矿井通风系统稳定性研究

谢中朋 宋晓燕 著

责任编辑 刘元春 田玉春

封面设计  砚祥志远·激光照排
TEL: 010-65976003

出版发行 首都经济贸易大学出版社

地 址 北京市朝阳区红庙(邮编 100026)

电 话 (010)65976483 65065761 65071505(传真)

网 址 <http://www.sjmcb.com>

E-mail publish@cueb.edu.cn

经 销 全国新华书店

照 排 北京砚祥志远激光照排技术有限公司

印 刷 北京七彩京通数码印刷有限公司

开 本 710 毫米×1000 毫米 1/16

字 数 216 千字

印 张 12.25

版 次 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5638 - 2859 - 3/TD · 3

定 价 42.00 元

图书印装若有质量问题,本社负责调换

版权所有 侵权必究

前 言

矿井通风系统是矿井生产系统中的重要组成部分,对保证生产的正常进行和防止灾害的发生有着至关重要的作用。通风系统是一个复杂的动态系统,影响通风系统稳定性的因素有很多,每个因素的变化都可能会引起整个系统的变化,甚至会导致事故的发生。因此,研究矿井通风系统的稳定性及其影响因素有着重要的现实意义。

复杂通风系统指的是包含多条大角联分支的系统,稳定性指的是系统受到干扰后恢复原来状态的能力。矿井通风系统稳定性的研究,主要是针对目前该领域内存在的一些问题而提出的,其目的是提高矿井通风系统的稳定性水平,从而可以防止和减少井下灾害事故的发生,保障矿井高产高效地运行。因此,进一步完善和改进现有矿井通风系统稳定性是增强通风系统稳定性研究的实效性、可行性和推广应用的关键,也是优化矿井通风设计、促进安全生产的一项重要任务。

关于通风系统稳定性的研究,某些国家在这方面研究比较早,他们将矿井通风系统可靠性定义为:矿井通风系统在运转过程中保持其工作参数值的能力,以维持井下所必须清洁风量的供应。该定义中,保持矿井通风系统工作参数值,其实质就是确保通风系统工作参数稳定,属于矿井通风系统稳定性的研究范畴。

20 世纪 90 年代以来,系统工程理论在国内得到了广泛的应用,随后我国许多高校和同行业研究人员在通风系统稳定性方面进行了大量研究,并做出了很多成果,但大都局限于对某一类系统的研究,对影响通风系统稳定性的各种因素没有定量化,尤其是对于多风井矿井通风系统稳定性没有进



行系统的研究。多风井通风系统的稳定性对确保大规模矿井的通风效果是极为必要的,因此,有必要对不同条件下多风井通风系统稳定性进行分析研究。

本书作者在整理前人的研究成果基础上,应用流体力学理论对影响通风系统稳定性的风网结构、通风机及外界因素进行了详细定量研究。从影响通风系统稳定的风网结构、主通风机及外界因素三个主要方面进行逐层深入分析。建立了通风系统稳定性方程,提出了基于敏感度的度量指标,推导了风机联合运行稳定性数学模型。通过对河南省永城市正龙煤业有限公司城郊煤矿进行现场实测,分析系统通风阻力的分布规律,并通过模拟解算发现存在的问题;根据网络计算结果分析提出了空气幕控风的方法,通过 Fluent 模拟及城郊矿现场试验得到了单、双机幕安装角与阻风性能的关系,为角联巷道风流控制提供了新的方法。建立了罐笼运行效应下的井筒空气流体动力学理论模型,得出罐笼顺风、逆风运行及交会时的活塞风速、活塞风压与罐笼运行速度及井筒风速的关系;定性地分析了罐笼运行效应对通风系统的影响程度。最后,作者对不同类型风机做出了数值模拟和噪声频谱分析,证实了风机具有特定的噪声特征频谱段,通过对风机噪声特征频谱对比分析可以为通风机性能变化的早期诊断提供依据;利用对风机噪声特征频谱段的分析可以对风机的运行状态进行快速判断,这为风机的检测工作提供了极大的帮助和便捷。

本书所介绍的研究成果是在河南省永城市正龙煤业有限公司城郊煤矿通风部领导及技术人员的大力支持下完成的,本书的出版得益于首都经济贸易大学出版社的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。写作过程中参考了大量的书籍文献,特向各位作者致以由衷的感谢。

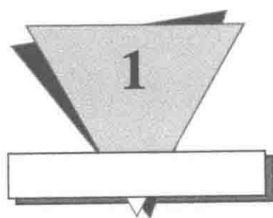
由于学识和水平有限,本书作为在矿井通风系统稳定性研究方面的探索和尝试,难免存在不足之处,敬请广大专家、读者朋友批评指正。

目 录

1 引言	1
1.1 研究背景及意义	3
1.2 矿井通风系统稳定性国内外研究现状	5
1.3 不足之处	12
1.4 主要研究内容	14
1.5 技术路线	15
2 通风系统稳定性影响因素分析	17
2.1 影响通风系统稳定性的主要因素	19
2.2 通风系统稳定性理论分析	25
2.3 多台主要通风机的稳定性分析	29
2.4 本章小结	34
3 多风井复杂通风系统大角联控制研究	37
3.1 城郊矿通风系统概况	39
3.2 矿井通风系统参数测定	40
3.3 矿井通风系统现状模拟仿真	48
3.4 通风系统角联控制	54
3.5 空气幕隔断风流理论研究	57
3.6 空气幕隔断风流的数值模拟	63
3.7 现场空气幕增阻实验	67
3.8 本章小结	70



4	轨道巷活塞风模型及其对通风系统稳定性影响分析	73
4.1	轨道平巷活塞风基本假设及理论计算模型	75
4.2	轨道平巷内的活塞风数值模拟	78
4.3	实验验证	86
4.4	本章小结	89
5	立井提升设备活塞风对通风系统冲击模型及影响分析	91
5.1	井筒提升设备活塞风理论计算模型	93
5.2	井筒提升设备活塞风数值模拟	98
5.3	实验验证	105
5.4	本章小结	111
6	基于噪声频谱分析的风机运行稳定性快速判别	113
6.1	通风机噪声与性能基本理论	115
6.2	轴流对旋风机叶片正常、扭曲流场数值模拟	120
6.3	离心式风机叶片正常、扭曲流场数值模拟	131
6.4	风机叶片正常和扭曲情况下噪声频谱实验分析	140
6.5	现场风机噪声频谱实验	155
6.6	本章小结	161
7	总结	163
	附表	169
	参考文献	179



引言



1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

中华人民共和国成立后,我国煤矿共发生一次性死亡 100 人以上的特大事故 25 起,共死亡 3 839 人,除了 2 起水灾引起死亡的 304 人外,其余 23 起都是由瓦斯煤尘爆炸、煤与瓦斯突出、火灾事故引起,共死亡 3 535 人。数据指出:绝大多数煤矿重大灾害事故都与通风系统存在的问题有一定联系。

2010 年全国煤矿 30 起较大瓦斯爆炸事故中,有 23 起是由于通风系统不合理、漏风大、循环风、风流短路及矿井总风量不足引起瓦斯积聚而导致的,此类事故数量占事故总数的 76.7%。

2011 年全国煤矿 30 起较大以上瓦斯爆炸事故中,有 23 起是由于通风系统不合理、局部通风机安装不合理及停电停风引起的。22 起较大瓦斯爆炸事故中,有 12 起是由于通风系统不合理、风流短路、系统循环风或有效风量不足引起的。全国 8 起重大以上瓦斯爆炸事故中,有 6 起是由于局部通风机安装位置不符合规定或停电停风造成瓦斯积聚引起的。

2012 年全国煤矿 11 起较大瓦斯爆炸事故中,有 3 起是由于局部通风机安装位置不符合规定形成循环风或风筒漏风、送风距离过长致使有效风量不足引起的;有 2 起是由于通风系统不稳定、通风设施不可靠造成风流短路,使主要用风地点风量不足引起的;有 2 起是由于停电停风引起的。

长期以来,发生在我国煤矿的多起恶性瓦斯爆炸事故有其偶然性,又有其必然性,主要原因在于通风系统不稳定造成瓦斯积聚所致。



1.1.1.1 通风系统不稳定

通风系统不稳定指在系统受到外界扰动时导致井下风流紊乱而造成瓦斯积聚。如2001年发生在陕西陈家山煤矿的重大瓦斯爆炸事故一次性死亡38人。该矿在生产区域通风系统没有完全成型的情况下就进行采掘活动。当时该区域的415掘进工作面的瓦斯浓度已达 $8\text{m}^3/\text{min}$ ，而该矿仅利用4台局扇供风，由于供风量的不足，导致掘进工作面风流不稳定，又因一台局部通风机未正常运行，电气失火引爆瓦斯所致。但该煤矿人员事后并没有接受事故教育，于2004年11月28日在415采煤工作面又发生瓦斯爆炸，死亡166人。2005年4月—7月，根据国务院第81号文件，国家组织了煤矿安全专家组对通风系统存在的问题进行“会诊”。

1.1.1.2 通风系统不合理

通风系统不合理指不及时安装通风设施。如2010年7月22日，某煤矿瓦斯爆炸，其原因是2个开切眼贯通后，没有及时构筑通风设施，风流从靠近盘区巷道的第二开切眼短路，造成作业地点无风，瓦斯积聚最终造成事故发生。

1.1.1.3 通风设施不可靠或位置不对

2004年10月20日郑州大平煤矿发生瓦斯突出，主要原因在于掘进工作面的回风系统设了调节风门，突出后大量高浓度瓦斯不能及时从回风系统排走，瓦斯逆流进入矿井总进风系统，架线电机车产生火花，引起瓦斯爆炸，造成148人丧生。2005年8月10日，某煤矿瓦斯爆炸，是由于外切眼处用风幛代替风门，质量低劣不起挡风作用，造成风流短路、工作面无风而形成瓦斯积聚导致瓦斯爆炸事故发生。2011年7月12日，某煤矿发生一起瓦斯爆炸事故，直接原因是在施工密闭时，未切断巷道四周的管线及金属物，也未掏槽，煤矿领导现场检查时发现密闭质量不合格，要求



返工，在返工时无风作业，引爆了密闭内的瓦斯，最终爆炸。2000年9月27日，贵州省水城木冲沟煤矿发生瓦斯爆炸事故，事故前，连接+1800水平大巷与采区回风下山的石门内3道风门中的2道被运送综采支架的平板车卡住不能关闭，另一道风门又被车撞变形，致使整个下山采区处于微风状态，用于排放一个掘进工作面瓦斯，工人拆卸矿灯时引起瓦斯爆炸。该事故波及除+1800水平大巷以外的井下所有系统，井下作业的224名矿工中，160人遇难，11人重伤。

1.1.2 研究意义

由于井下采掘活动、采区的接替、矿井开拓工程的延伸等工作使矿井风网结构处于动态的变化中，同时也使通风系统的稳定性处于动态的变化中，亦有可能使本来稳定的通风系统变得不稳定。虽然通风系统的风网结构是可以预先规划的，但由于存在通风巷道变形、阻塞使系统的风阻增大；井下通风设施的变形、老化使得系统内部漏风量增大；另外，如主要通风机、局部通风机存在磨损、锈蚀，使其性能逐渐降低、有效风量减小；罐笼、矿车等设备的运行、大气压变化、自然风压的变化对通风系统的冲击等问题，使可能本来稳定可靠的通风系统变得不稳定、不可靠。

由此可见，从整个矿井风网的稳定性角度出发，对影响风网稳定性的通风机、网络结构和外界因素进行深入研究，对于提高风网稳定性乃至可靠性，以及最大限度地减少事故的发生是极为重要的。

1.2 矿井通风系统稳定性国内外研究现状

复杂通风系统指包含多条大角联分支的系统，稳定性指系统受到干扰



后恢复原来状态的能力。影响系统稳定性的主要因素有风网结构、通风动力设备和外界扰动等因素。其中风阻变化、矿井开拓延伸、通风设施改变等属风网结构因素；主要通风机、局部通风机运行状态或性能变化属通风动力设备因素；罐笼、矿车等设备的运行状态、大气压变化以及自然风压变化对系统的影响属外界扰动因素。

1.2.1 矿井通风系统稳定性研究现状

对于通风系统稳定性，国内外专家进行了大量研究，但大部分采用数值分析法，其中以里亚普诺夫（Lyapounov）提出的稳定性理论最为典型。

国内许多学者利用数理统计指标来衡量通风系统稳定性，陈建强等运用标准偏差分析法判断矿井系统稳定性程度。魏引尚等建立了风流稳定矩阵模型，通过风流变化的敏感性及稳定性指标对通风系统稳定性进行分析。

20 世纪 90 年代以来，系统工程理论得到了广泛应用，我国许多高校在通风系统稳定性、可靠性指标确定方面进行了大量研究，但总体上定性多、定量少。

国内学者对通风系统稳定性的研究主要集中于对风流方向的研究，主要采用风阻判别法，但这种方法对复杂通风系统风网分支的风向判别非常困难。随着计算机技术的发展及风网解算软件的开发，这个问题已经得到解决。但是对于分支风阻的变化对系统内其他分支的影响却没有解决。目前，对于风网内分支风流稳定性判别，尤其对于角联分支风向的判别一般采用网络解算或实验的方法。

刘剑认为通风系统各因素是随时间变化而变化的动态过程，对其变化



规律进行分析的过程就是稳定性分析,应针对不同的网络结构、规模建立通风系统稳定性数学模型以对其稳定性进行分析。

吴超在对某分支风阻变化导致风网中所有分支风流变化研究基础上,提出分支敏感度的概念,并给出通风系统稳定性的判别式,该判别式对于多风井系统稳定性分析尤为适用。

陈开岩利用多层次模糊综合评价法提出主因素突出法和加权平均法,实现对系统稳定性的定量评价。

马云东利用系统论的原理,在对通风动力(主要通风机、局部通风机等)、调节设施及井巷分支相互影响研究基础上,构建通风系统可靠性理论模型。

王海桥提出分析通风系统稳定性的可修系统理论,对于通风系统稳定性、可靠性分析以及日常通风管理提供了理论依据。

魏建平建立通风系统不稳定性数学模型,利用压缩映射原理解决通风系统不稳定性数学模型不收敛的问题,为矿井风网解算程序编制提供数学基础。

徐瑞龙应用图论法,提出对通风网络的定量判别途径,建立复杂系统可靠度数学模型,采用通路法或半割集法通过构筑物的漏风率来评判矿井通风系统的可靠程度。

黄光球、陆秋琴确定井巷风阻与风量的非线性映射关系,构建影响通风系统稳定性的最大通风阻力路线的 RBF 神经网络模型,利用 RBF 模型确定井巷风阻变化对系统风流的影响,最后通过风流变化确定影响系统稳定性的主要分支。

赵永生利用线性回归法对通风系统的敏感风路进行求解,利用因变量 q_j 与自变量 r_i ($i=1, 2\cdots n$) 之间的相互关系对 q_j 进行预估时,采用线性回



归法就可得到 q_j 与 r_i ($i=1, 2\cdots n$) 的回归方程, 并找出影响通风系统稳定性的主要因素, 从而实现回归方程的最优化。

方 (Fong) 采用独立集的概念, 使复杂矿井通风系统风网解算程序的编制得以实现, 从而使网络解算工作实现计算机化。

伊尔森 (Ilson) 提出以井巷风量、有毒有害气体浓度、煤岩表面析出气体以及可燃气体为研究对象, 对通风系统稳定性进行分析。

1.2.2 角联分支研究现状

由于角联分支风流较不稳定, 因此对角联的识别、风向判断以及控制是通风系统稳定的核心。

1925 年继波兰专家切克佐特 (Czeczott) 第一次提出角联概念之后, 拜斯特隆 (Bystron) 对其进行定义: 在并联的两条分支之间, 还有一条或几条分支相通的连接形式称为角联网络。

1976 年, 法国学者西模 (Simode) 首次建立角联判别的数学模型, 并提出角联分支识别的通路法和集合运算法, 该模型只能判别角联分支, 不能判别该角联分支的关联分支。

马恒等通过对角联网络风流稳定性的模拟分析, 得出边缘风路风阻变化对角联风路的影响规律。

徐瑞龙建立单角联、T 型、V 型和 Y 型角联网络中角联分支的风流方向判别式。

郭建伟建立复杂通风系统角联风路中风流稳定性评价指标体系及评价准则。

李湖生提出基于节点位置的角联分支识别法。

刘新提出复杂系统通风网络平衡图的画法, 该平衡图能够直观反映角



联分支风流变化规律,可为角联风路对系统影响的研究提供便捷。

赵千里提出利用e型结构通路法对角联分支风量稳定性进行分析和判断的方法。

刘剑认为角联风路与通风系统参数无关,仅取决于网络拓扑关系。

贾进章等提出角联风路的关键影响风路及非关键影响风路的概念,并建立相应的数学模型。

1.2.3 通风系统灵敏度研究现状

国内外对通风系统灵敏度研究时间不长。在通风系统稳定性研究中,学者沙米尔(Shamir)提出风流灵敏度的概念,并将其与网络解算相结合,减少网络解算的迭代次数,提高网络解算效率。随后学者斯图纳(Stoner)把灵敏度概念引入天然气管网的解算当中,提高网络解算的精度。

波兰学者A. 弗里奇根据通风网络结构对灵敏度做了详细深入的分析,并提出一种确定风量对风阻灵敏度矩阵中任意一列数值的计算方法。

吴勇华于1990年从矿井风量调节的角度建立了风量对分支风阻敏感度的数学模型,利用风量、分支风阻敏感度矩阵对该数学模型的计算方法进行简化,并给出分支影响度和被影响度的定义。

赵永生、许文兴等于1993年提出灵敏度衰减率的概念。通过求解基尔霍夫定律的微分方程组计算风量对风阻灵敏度。利用计算机模拟得到矿井通风网络的大量统计数据,得出风量灵敏度及衰减率随分支风阻的变化规律,并通过回归分析法得到灵敏度与风阻的关系式。将灵敏度和灵敏度衰减率用于通风网络稳定性分析,并给出评价通风系统稳定性的判别式。

西安科技大学的张强、吴奉亮、王雨、王红刚、史东涛等先后将灵敏



度的概念引入风量异常分析中,即以风量实测值为基础,利用数理统计的方法对风量波动进行分析界定,进而找出导致风量异常的原因及可能后果,对矿井通风安全管理起到一定的辅助作用。

贾进章等于 2003 年分析角联分支对通风系统稳定性的影响,并给出灵敏度矩阵数值计算的算法。

王俭采通过用反复调用通风网络解算程序的方法求解风量对风阻灵敏度的数值解,提出相对灵敏度的定义及其几何意义,并利用风量对风阻灵敏度及全微分叠加原理预测风量变化量及风量波动范围。

1.2.4 风机故障诊断研究现状

主要通风机通风是矿井通风的主要形式,起到将新鲜空气送往井下、将污浊空气排到地面的作用,因此通风机的稳定运行是整个通风系统稳定的基础。当风机进入非稳定工况时,振动和噪声增强,叶片甚至整机产生强烈的震动,性能急剧降低,因此,当风机的工况点偏离稳定工况点范围时,找到消除办法对于提高通风系统稳定性是至关重要的。

20 世纪 80 年代随着计算机技术的发展,对大型设备的故障诊断逐步进入实用化阶段。期间各国竞相研制许多在线监测系统,如美国电力研究协会对主要通风机进行大量振动监测与故障诊断等方面的研究工作,并确定轴承振动监测的特征频谱段为 $30\text{kHz} \sim 50\text{kHz}$,利用该振动特征频谱段可以做到对风机故障的早期诊断,其有效性已在实践中得到证实。

近年来随着电子技术和人工智能技术的发展,风机故障诊断也进入频谱分析及神经网络和专家系统阶段。

冷军发和任志玲分别把基于细化分析和小波包分析应用到对风机的故障诊断研究当中;张红梅和王丹民在风机故障诊断中分别应用遗传、集成