

矿井通风系统

可靠性分析与实践

王洪德 马云东 著

KUANGJING TONGFENG XITONG

KEKAOXING FENXI YU SHIJIAN

西北工业大学出版社

矿井通风系统可靠性分析与实践

王洪德 马云东 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书针对目前国内外矿井通风与安全技术理论及工程应用方面存在的现实问题,从知识提取和数据处理角度,将网络流理论、ANN技术和粗集理论与系统可靠性工程理论相结合,对矿井通风系统可靠性进行了系统的分析,并结合工程实际进行了实践验证。全书共分6章,内容包括矿井通风系统可靠性、矿井通风系统可靠性评价、主要通风机可靠性的Markov过程分析、矿井通风系统可靠性仿真、矿井通风系统可靠性预警和矿井通风系统可靠性设计。

本书可作为矿业工程、安全工程、系统工程、网络工程、机械和电子工程等专业的本科生、研究生的教材,也可供从事系统可靠性研究的相关领域科研工作者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿井通风系统可靠性分析与实践/王洪德,马云东著. —西安:西北工业大学出版社,2013.8

ISBN 978-7-5612-3793-9

I. ①矿… II. ①王… ②马… III. ①矿山通风—通风系统—可靠性—研究
IV. ①TD724

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 207151 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:727 mm×960 mm 1/16

印 张:12.25

字 数:220 千字

版 次:2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷

定 价:36.00 元

前 言

我国煤炭工业正迈向高效、安全、洁净、结构优化、可持续发展的新型工业化之路。在坚持“安全第一,预防为主,综合治理”方针的前提下,煤炭工业高效集约化生产技术与装备,煤矿企业管理现代化,以及新材料、新技术、新工艺的应用,都对矿井通风系统可靠性提出越来越高的要求。为保障煤矿生产安全有序进行,降低各类事故的发生,减少生命财产的损失,迫切要求完善通风系统可靠性评价和预警方法,建立起更加贴近矿井生产实际的通风系统可靠性评价及预警技术体系。

通风系统可靠性分析与实践研究,主要是针对该领域存在的一些问题而提出的。其目的是提高现代化矿井通风系统安全可靠水平,降低建设和维护成本,防止和减少各类灾害事故发生,保障矿井高产高效的实现。因此,进一步完善矿井通风系统可靠性分析理论和技术,改进现有通风系统可靠性评价和预警机制,更新技术和管理手段,是增强矿井通风系统可靠性研究的实效性、可行性和推广应用性的关键,也是优化矿井通风设计、促进安全煤矿生产的一项重要任务。

本书融入了笔者多年来从事复杂网络系统可靠性、特别是矿井通风系统可靠性研究的科研成果,希望能在通风系统可靠性评价和预警技术研究方面发挥一定作用。主要研究内容如下所述。

(1) 矿井通风系统可靠性分析

根据矿井通风系统的自身特点,将其看成是由通风网络系统和主要通风机系统两个子系统构成的可修系统。应用网络流理论,针对通风网络拓扑结构及通风构筑物特性,建立通风网络可靠性评价模型,并给出求解网络可靠性指标的不变化最小路集算法;针对矿井主要通风机子系统的可修特性,应用Markov过程原理,建立基于冷储备可修原理的矿用主要通风机子系统可靠性模型。

(2) 矿井通风系统故障过程分析

矿井通风系统是一个多环节、动态、随机、时变的大系统,影响该系统可靠性运转的因素十分复杂和繁多,各影响因素之间相互关联,具有很强的耦合特

性,本书在对影响矿井通风系统可靠性因素全面分析的基础上,建立基于 BP 神经网络的通风系统可靠性评价仿真模型;采用 Weibull 过程模型和自适应神经网络技术分析通风系统故障过程,给出基于影响因素属性的故障过程改善和劣化的定量描述;论证通风系统故障过程的改善(劣化)与故障强度、累积故障强度之间的关系;推导平均故障间隔时间和首次故障时间等特征参数的计算模型。

(3) 矿井通风系统可靠性预警技术研究

当通过采用神经网络技术对通风系统进行可靠性预警仿真时发现,由于系统特征参数过多,造成了网络规模过大、训练时间过长、系统规则库存在冗余等现象,导致了可靠性预警仿真模型实用性能降低。因此,将粗集方法作为 BP 神经网络的前置系统,通过对通风系统属性特征的提取和影响因素的约简,优化神经网络中的输入节点个数,降低神经网络结构的复杂性,从而形成精确度更高、解算速度更快的基于 RS-ANN 的矿井通风系统可靠性预警仿真模型。在此基础上,给出分层发掘通风系统可靠性的 RS-ANN 仿真概念,使专业用户可以根据各自需求,在不同层次上对通风系统进行可靠性评价。

(4) 基于单元特性的通风系统可靠性设计

在已知系统可靠性综合指标基础上,建立基于单元相对易损度、单元重要度和复杂度,以及单元相对故障频度的矿井通风系统可靠性分配模型,并用于主要通风机子系统研究中。通过对主要通风机风量变化规律及故障类型的统计分析,建立基于效率可靠度的主要通风机子系统可靠性设计模型,并运用该模型求解出矿用主要通风机运行各阶段的可靠度指标值,及其对主要通风机合理工况范围的影响。

以上解析模型和仿真模型的建立和特征参数的求取,均编制了具体实现的计算机源程序,并在 VC++ 和 Matlab 环境下运行通过。

本书所展示的研究内容主要是大连交通大学王洪德教授及其研究团队在这一领域中进行的研究工作和所取得的成果。这些研究成果不仅大大丰富矿井通风系统可靠性评价及预警的理论内涵,而且促进矿井通风系统故障诊断及分析技术的进步。

本书第 1 章至第 5 章由王洪德执笔,第 6 章由马云东执笔。

由于水平有限,书中难免存在不周之处,祈请读者指正。

著 者

2013 年 1 月

目 录

第 1 章 矿井通风系统可靠性	1
1.1 矿井通风系统可靠性的基本指标	1
1.2 矿井通风系统可靠性的内涵	3
1.3 矿井通风系统可靠性的研究现状分析	5
参考文献	14
第 2 章 矿井通风系统可靠性评价	17
2.1 矿井通风系统可靠性的评价方法概述	17
2.2 网络系统可靠性综述	18
2.3 基于网络流理论的可靠性评价模型	22
2.4 风网系统可靠性不交最小路集算法	38
参考文献	44
第 3 章 主要通风机可靠性的 Markov 过程分析	45
3.1 可修系统的 Markov 过程模型	45
3.2 基于 Markov 的主要通风机可靠性分析	48
3.3 实例分析	50
3.4 主要通风机系统影响因素分析	52
3.5 提高主要通风机可靠性的措施	55
参考文献	56
第 4 章 矿井通风系统可靠性仿真	57
4.1 系统可靠性模型选择	57
4.2 人工神经网络技术及其应用	58

4.3 系统可靠性 BP 网络模型	61
4.4 基于自适应神经网络的可靠性参数估计	69
4.5 矿井通风系统的可靠性、维修性和有效性	73
4.6 通风系统可靠性影响因素解析	85
4.7 通风系统运行期间使用可靠性	91
4.8 主要通风机首次故障时间	103
参考文献	105
第 5 章 矿井通风系统可靠性预警	108
5.1 预警作用及研究手段	108
5.2 粗集理论及其应用	110
5.3 粗集的基本原理	113
5.4 数据的预处理	124
5.5 通风系统可靠性的 RS-ANN 预警	126
5.6 通风系统可靠性预警实现	135
5.7 可靠性评价网络的分层发掘	148
参考文献	151
第 6 章 矿井通风系统可靠性设计	155
6.1 通风系统可靠性设计目的	155
6.2 通风系统可靠性分配方法	156
6.3 主要通风机可靠性分配实例	162
6.4 基于分配可靠度的主要通风机工况点研究	166
6.5 主要通风机性能曲线的自动绘制	173
参考文献	182
附录	184
附表 1 某矿井通风网络分支参数测量结果汇总表	184
附表 2 某矿井通风阻力测量结果汇总表	187
附表 3 某矿井通风阻力最小、最大路线结果汇总表	190

第 1 章 矿井通风系统可靠性

现代工业的发展使得人们越来越重视系统可靠性,也对它提出了越来越高的要求^[1-3]。对于诸如矿井通风系统这样的复杂系统,快速准确地定性分析和定量计算其可靠性,无论是对正确估计实际系统性能指标、及时掌握系统可能出现的灾变趋势,还是为提高系统可靠性而进行的可靠性设计,都是十分必要的。

1.1 矿井通风系统可靠性的基本指标

1.1.1 可靠度与不可靠度

可靠性是指一个元件、设备或系统在规定的时间内,在规定的条件下完成规定功能的能力。下面对可靠性的相关概念作简要介绍。

可靠度是指产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率。产品寿命 T 是随机变量,可靠度 $R(t)$ 为

$$R(t) = P(T > t) \quad (1-1)$$

式中, t 为规定的时间。

显然, t 时刻的可靠度是指产品在 $[0, t]$ 内完成规定功能(或正常工作)的概率,即 t 时间内正常工作的概率。

不可靠度 $F(t)$ 为

$$F(t) = P(T \leq t) \quad (1-2)$$

显然, t 时刻的不可靠度是指产品在 $[0, t]$ 内发生故障(或不能正常工作)的概率,即 t 时间内发生故障的概率,也称累积故障概率。因此,有

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1-3)$$

对于有限样本,设产品的总数目为 N_0 ,经过 t 时间,故障数目为 $r(t)$,则可靠度和不可靠度的估计值为

$$\left. \begin{aligned} R(t) &= \frac{N_0 - r(t)}{N_0} = \frac{N_s(t)}{N_0} \\ F(t) &= \frac{r(t)}{N_0} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中, $N_s(t)$ 为经过时间 t 后, 非故障样本数目。

1.1.2 故障概率密度函数

故障概率密度函数 $f(t)$ 是不可靠度的导数, 即

$$f(t) = \frac{dR(t)}{dt} \quad (1-5)$$

对于有限样本, 设产品的总数目为 N_0 , 经过 t 时间, 故障数目为 $r(t)$; 经过 $t + \Delta t$ 时间, 故障数目为 $r(t + \Delta t)$, 则故障概率密度函数的估计值为

$$f(t) = \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{N_0 \Delta t} \quad (1-6)$$

即故障概率密度函数的物理意义是表示任意时刻 t , 产品总数目中单位时间内发生故障的概率。

1.1.3 故障率

故障率是指工作到某时刻 t 尚未失效的产品, 在该时刻 t 后单位时间内失效的概率, 用 $\lambda(t)$ 表示, 单位是 $1/h$, 或者为 $10^{-5}/h$, 或者为 $\%/(10^3 h)$ 。

对于有限样本, 设产品的总数目为 N_0 , 经过 t 时间, 故障数目为 $r(t)$; 经过 $t + \Delta t$ 时间, 故障数目为 $r(t + \Delta t)$, 则故障率估计值为

$$\lambda(t) = \frac{[r(t + \Delta t) - r(t)]/\Delta t}{N_0 - r(t)} = \frac{\Delta r(t)}{N_s(t) \Delta t} \quad (1-7)$$

即故障率 $\lambda(t)$ 的物理意义是表示任意时刻 t , 尚未发生故障的产品在单位时间内发生故障的概率。

1.1.4 寿命

(1) 平均寿命(mean life)

平均寿命是指产品寿命的均值。对于不可修复产品是指产品失效前工作时间的均值, 即平均无故障工作时间(mean time to failures, MTTF); 对于可修复产品是指无故障工作时间的平均值或两相邻故障之间的平均时间, 即平均故障间隔时间(mean time between failures, MTBF)。两者用下式表示, 即

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1-8)$$

$$MTBF = \int_{t_1}^{t_2} R(t) dt \quad (1-9)$$

(2) 可靠寿命 θ (percentile life)

可靠寿命是指给定可靠度所对应的工作时间,也就是完成规定功能的产品的比例恰好等于给定可靠度所对应的时间。

中位寿命是指当可靠度 $R = 0.5$ 时所对应的工作时间,用 $\tau = t_{0.5}$ 表示。

1.1.5 可靠性指标间的关系

在可靠度、不可靠度、故障概率密度函数和故障率中,只要知道其中一个指标,就可以确定另外三个指标。

$$R(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

$$f(t) = \frac{dR(t)}{dt}$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

1.2 矿井通风系统可靠性的内涵

1.2.1 可修系统可靠性

系统的可靠性(system reliability)^[4]是指系统在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。从整体上看,系统能否完成预期的功能有多个衡量指标。对于可修系统,机器设备常用可靠度、平均故障间隔时间、平均修复时间(mean time to repair, MTTR)、可用度、有效寿命和经济性等指标表示。对于不可修系统或产品常用可靠度、可靠寿命、故障率、平均寿命等指标表示。

可修系统的可靠性研究是从20世纪80年代开始的。1981年,Thompson用随机点过程描述可修系统故障过程时,区分了点过程的事件发生率(ROCOF)和分布失效率(FOM),并讨论了用于可修系统的点过程模型^[5]。同年,Prentice及Williams, Peterson等人,提出了将回归模型技术应用于可修系统^[6],该技术可用于评价概率模型所不能描述的因素的作用。1982年, Lawless在可靠性著作中首次讨论了失效数据的 Laplace 检验法^[7]。1988年, Schilling, Praca, Queiroz 以及 Singh, Ascher 等人采用 Mann 非参数统计方法,跟踪10台热电装置失效数据,分析了这些装置的性能劣化(改善)问题,并指

出分析可修系统性能劣化(改善)的重要性^[8]。

在国外矿业系统可靠性工程研究领域中,加拿大哥伦比亚大学的 R. A. 霍尔博士将可靠性分析技术作为露天采矿设备评价与选型的工具^[9],通过对设备故障和维修时间数据的统计分析,制定了矿山公司设备选型新标准。美国的 D. U. Deere(迪尔)和苏联的 Z. T. Bieniowski 等人将可靠性理论用于围岩稳定性等级分类的研究,取得了很好的效果。此外,法国学者 E. Simode^[10] 和波兰学者 W. Dziurzynski^[11] 等也相继将可靠性理论应用于矿井灾害预测和控制研究中,并编制了相应的计算机模拟程序。

1.2.2 通风系统可靠性

矿井通风系统(mine ventilation system, MVS)是由通风网络(包括风网中各条巷道及其风流、通风构筑物和各类用风场所)和主要通风机两个子系统组成的大型复杂关联系统(large complex correlative system, LCCS)。其关联属性具体表现为系统的多环节性(more sectors character)、非线性(non-line character)、时变性(change with time character)和可维修性(repairable character)以及因素之间的强耦合性(strong coupling character)^[12]。因此,易随机产生大量影响矿井正常通风及安全生产的随机故障或事故隐患。

矿井通风的目的是为矿井各用风场所提供足够的新鲜风量,保证作业空间良好气候条件,冲淡或稀释有毒有害气体和矿尘等。而矿井通风系统可靠性就是满足以上通风目的的可靠程度,它包含两方面含义:一是指系统在规定时间内保持正常运转功能,使矿井生产得以正常进行;二是能够预防各类灾害性事故的发生。

然而,随着通风系统服务年限的增长,通风设备逐渐呈现出老化征兆,网络结构也可能发生动态变化,促使系统及其单元发生故障的可能性增大,引起矿井通风系统降低或失去预定的功能,甚至造成灾难性事故,产生严重的社会影响及巨大的经济损失。

通风系统可靠性的研究目的,就是及时发现系统正常运转过程中可能出现的故障和事故隐患,给矿井通风系统的设计规划和维修改造提供了科学依据,为通风系统整体或单元性能的评价找到更加全面、合理的指标。它是防止和减少矿井通风系统事故发生,保障其合理、经济、高效运转的关键;也是优化通风设计、促进安全生产的一项重要任务。

1.3 矿井通风系统可靠性的研究现状分析

1.3.1 国外研究现状分析

可靠性理论作为一门独立的工程基础学科于20世纪30年代初率先在美国形成。最初,它运用统计方法于工业产品的质量控制中。在第二次世界大战期间,许多复杂系统,如航空电子设备、通信系统以及武器系统,都暴露出低劣的可靠性水平。20世纪五六十年代着手实施的各类太空研究计划,成为了推动可靠性工程兴起和发展的主要动力。1965年,国际电工委员会(IEC)可靠性专业委员会的成立,标志着可靠性技术成为了一门国际化技术。目前,可靠性工程技术理论已逐渐渗透到了宇航、电子、化工、机械、建筑等许多大型系统领域,形成了一门较为新兴的学科——可靠性工程^[13]。例如,工业现代化程度较高的日本,其可靠性技术的发展是在第二次世界大战以后开始的,他们专门设立了对策委员会来管理产品及设备的质量问题,使得其工业设备能更加安全可靠地运转,工业技术,特别是机电产品技术逐渐处于国际领先地位;而德国可靠性工程的发展是从系统可靠性研究开始的,为了提高德国Ⅵ和Ⅷ火箭的可靠性,发展了定量的、用统计方法处理的基本原理。

苏联在这方面研究得较早,他们将矿井通风系统的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。他们将通风系统的失效按重要性分为三级:一级失效是指整个矿井失效;二级失效是指矿井的很大部分失效(一个煤层、一翼、一个矿层);三级失效是指矿井的个别采区失效。他们所采用的评定方法主要有结构法、模拟模型法以及统计评价法^[14]等。

(1) 结构法

以确定巷道单位长度的相对可工作系数 $\bar{K} = K_i/K_0$ 为基础,可靠性指标 $\bar{K}$ 值与矿井通风系统可工作系数成正比,即

$$\bar{K} = (w - n + 1)/M \quad (1-10)$$

式中, w 为通风网络中的巷道条数; n 为通风网络的节点数; M 为综合巷道指标系数。

若对矿井通风系统的不同设计方案按式(1-10)计算出可靠性指标,并进行比较,则可选择最可靠的方案。对评定可靠性、制定提高通风系统可靠性的

措施也可采用这种比较方法。

这种方法相当简单,但必须具备通风系统的拓扑值、巷道长度、通风构筑物的数目和类型、主要巷道群的相关可工作系数。

(2) 模拟模型法

按照系统通风参数的分布密度来模拟矿井通风系统的可能状态(各部分的通风阻力值和主要通风机装置的负压)。确定通风系统工作过程的时间离散化,应考虑系统各单元预防检修到突然破坏的时间间隔分布密度。通风系统状态模拟运算次数应根据其可靠性计算精确度来决定。每次模拟运算均需计算系统的风量分配和记录失效情况。根据各次运算状态的模拟结果,可计算出全矿通风系统的可靠性总指标。

模拟模型法是以求解矿井通风网络为基础的,因此可自行校正。该方法具有很大潜力,是一种有发展前途的方法。

(3) 统计评价法

统计评价法认为通风系统应当按照设计的风量分配运转,即通风系统各分支的风量都应在容许范围内。如果这种状况受到破坏,就是矿井通风系统发生了故障^[15]。一般认为,导致通风系统故障的主要因素是巷道和通风构筑物的通风阻力随时间的随机变化过程。而随机过程取决于矿山地质和采矿工艺条件,很明显,这些条件的统计指标对于在相同条件下运转的矿井通风系统是一样的。因此,为了评价矿井通风系统可靠性指标,必须按矿山地质和采矿工艺条件对矿井进行分类研究。

此外,在通风网络解算方面,各国通风专家学者提出了许多理论上可行的方法。在通风网络可靠度不交和算法^[16-18]中,学者 Fong 等人提出的改进算法是很有效的;在参考文献[17]中,Fong 等人引入了路径集中独立集的概念,使复杂、多路径的矿井通风网络解算工作得以在计算机上实现,避免了传统节点遍历法造成的内存空间不足问题。

1.3.2 国内研究现状分析

1. 可靠性在国内相关领域的研究现状

20 世纪 60 年代,我国首先在电子工业部门进行了可靠性工程技术的开拓性工作;进入 80 年代后,国家颁布了一系列的可靠性工程技术标准和管理规定,在现代武器装备等大型系统的研制中全面推行可靠性工程技术,使我国工程可靠性工作进入规范化的轨道,并得到迅速的发展。目前,可靠性工程主要应用于航天制造业、机械工程领域、交叉学科领域以及通信领域等。例如,在地

震工程、风工程、抗火与抗爆工程等领域,由于可靠性理论的应用,提高了工程结构和工程系统抵御自然灾害和人为灾害的能力。

(1) 可修系统领域的可靠性研究现状

可维修性研究是可修系统可靠性研究的一个重要领域,以可靠性为中心的维修^[19](reliability-centered maintenance)建立在系统或设备的设计特点、运行功能、故障模式和后果分析的基础上,以最大限度提高设备的使用可靠性为目的,确定维修的必要性和可行性。它的最大特点是从故障后果的严重程度出发,尽可能避免或减轻故障后果,改变了过去那种根据设备故障的技术特性对故障本身进行预防的传统观念。然而,直到20世纪70年代末,人们对可修系统可靠性的研究^[20]仍是有限的,远没有不可修系统的研究那么深入,也没有形成分析计算可修系统的切实可行方案及方法。在对不可修系统的可靠性分析中,有成熟的系统分析方法,如故障树分析法^[21-22]等;对可修系统而言,由于系统元件的寿命与维修时间分布的任意性、元件修复程度的多样性、元件失效的相关性、系统逻辑结构的复杂性、人与系统的交互性等因素,使得用现有的随机过程理论来分析可维修系统的可靠性变得十分困难。

(2) 矿业系统工程领域的可靠性研究现状

自20世纪90年代以来,系统可靠性工程理论在矿业系统工程研究中也逐渐得到了应用。例如,在矿井支护系统可靠性理论和应用方面,古德生院士进行的“地下金属矿山无间柱连续采矿可靠性分析与设计”研究。辽宁工程技术大学马云东教授进行的“地下工程支护结构可靠性理论研究”基金课题以及其研究指导的“回采巷道锚杆支护可靠性研究”等都有较成功的论述,并取得了一些研究成果。湘潭矿业学院的罗善明教授应用强度分布和应力分布的干涉理论,对综放工作面移架-割煤系统的可靠性进行了较为详细的分析,并建立了相应的联结方程^[23]。在煤矿生产系统、运输系统及矿用设备可靠性研究方面,马云东教授通过采用模糊理论对回采工作系统随机可靠性分析,给出了随机可靠度、模糊可靠度和模糊随机可靠度的定义,提出了生产子系统、环境子系统和实施子系统的模糊随机可靠度的计算方法,建立了回采工作系统模糊随机可靠性分析的数学模型^[24]。湘潭矿业学院的朱川曲教授通过对矿井“采、运、提”系统可靠性模型的分析,建立了矿井“采、运、提”系统的可靠性数学模型,得出了系统可用度及产量的计算公式^[25]。在选煤工艺系统可靠性研究方面,中国矿业大学的张文军等人建立了煤炭分选系统的可靠性预测模型,探讨了系统设计时的可靠性分配原则及故障率权重分配法^[26]等。以上研究为矿业可靠性工程的深入发展发挥了重要作用。

2. 可靠性在国内矿井通风领域的研究现状

我国矿井通风领域可靠性研究是从 20 世纪 80 年代开始的。北京理工大学、中国矿业大学、中国煤炭科学研究总院下属的抚顺分院、东北大学和辽宁工程技术大学、大连交通大学等科研院所与现场实际相结合,在矿井通风系统可靠性评价指标确定^[12]、通风系统可靠性基础理论研究以及不确定性环境下矿井通风网络分风理论研究^[27]等方面都进行了有益探讨。以上研究在一定程度上借鉴了机械、电子等领域可靠性研究的成果和结论。目前对矿井通风系统可靠性进行的定性研究多,定量研究少,尚无一个统一的标准来衡量矿井通风系统可靠性。其中,定量研究主要成果大致有以下几部分。

1985 年,徐瑞龙教授^[28]应用图论和可靠性理论相结合的方式讨论了通风网络的可靠度计算,为矿井通风系统的可靠性分析提供了一种定量判别的途径。文中定义了风路和风网的可靠度,提出了用通路法和半割集法计算风网的可靠度,以及用风网的灵敏度分析来找出影响整个风网的可靠度的关键风路,为矿井通风系统的可靠性分析提供了依据,同时给出了风网可靠度的理论计算公式。

1987 年,赵永生教授^[29]提出了用逐步线性回归分析法求对网络影响最大的风路。其基本研究思想:当研究因变量 q_k 与自变量 R_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 之间的相互关系并利用这种相互关系对因变量 q_k 进行预测和估计时,可采用多元回归的方法,把诸变量之间的相互关系用回归方程式表示出来。为了减少观测的项目和计算的工作量,人们通常并不把所有的自变量 R_i 和因变量 q_k 都建立在同一个回归方程之中,而是把为数众多的可能影响预报量 q_k 的自变量 R_i 进行“筛选”,找出最重要的因素,从而建立一个最优的回归方程。

最优回归方程的建立,可以采用逐步回归分析的方法。该方法的基本思想是把对因变量 q_k 有显著影响的自变量 R_i 逐个地引入回归方程中,首先选出与 q_k 相关程度最大的自变量,通过统计检验,当表明该自变量的作用显著时,就引入回归方程式,然后在剩余自变量中再挑选出与 q_k 关系最为密切的自变量,当已引入的自变量由于后来变量的引入而失去重要性时,则随时把它们从回归式中剔除出去。因此,逐步回归分析法的每一步都要进行多次检验,以保证每次在引入新的显著变量之前和剔除不显著变量之后的回归式中只包含有显著变量。如此反复进行,直至没有一个自变量可以引入和剔除时为止。该法可确定对系统影响最大的风路,但不能确定各风路对系统及各风路之间的相互影响值。

1990 年,王海桥教授^[30]以可修系统可靠性理论为基础,分析了矿井通风

网络的通风有效度问题,并进行了实例分析,为改善矿井通风系统的管理、评价矿井通风系统的好坏提供了一条新的依据。有效度是可靠性工程理论中的重要指标之一,其工程含义是系统、设备、元件等在规定条件下开始工作,在某时刻完成规定功能的概率。参考文献[30]中主要有以下观点。

(1) 分支通风有效度的计算

按照可靠性工程理论,将系统分为可维修系统和不可维修系统。认为分支通风有效度可用下式表示:

$$A_i = \frac{\text{平均正常通风时间}}{\text{平均正常通风时间} + \text{平均通风失效时间}} \quad (1-11)$$

式中, A_i 为分支 i 的通风有效度。

(2) 网络通风有效度的计算

矿井通风网络的有效度指标值与通风网络中矿井进、出风点间的最小路集有着密切关系。若矿井通风网络中所有最小路 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_k$ 已求得,则根据可靠性理论,通风网络的通风有效度为

$$A = P\left\{\bigcup_{i=1}^k L_i\right\} \quad (1-12)$$

即为所有最小路通风正常时的概率。

由初等概率论可知

$$A = \sum_{i=1}^k (-1)^{i-1} P_i \quad (1-13)$$

式中, $P_i = \sum_{j=1}^k P\{L_{j1} \cdots L_{ji}\} (i = 1, 2, \dots, m)$ 。

根据式(1-13)可知,当 k 很大时,每个 P_i 就得由 $\binom{m}{i}$ 项概率和求得。因此,式(1-13)中的 R 是对 $2^k - 1$ 项求和的结果,而且由于通风网络中最小路集的相容性,具有大量公共风路,计算相当复杂。因此,为了简化计算,需根据不交型布尔代数运算定律进行简化计算。该法是机械部件可靠性理论在矿井通风中的应用,应考虑可靠通风系统的特殊性。

徐瑞龙等人运用可靠性原理探讨了井下通风构筑物的可靠度,采用漏风率定义了各种构筑物的可靠度,针对复杂系统建立了一组系统可靠度确定的数学模型^[31]。该模型有一定的适用性,能为通风管理提供新的技术途径,也为煤矿质量标准化提供了评判指标。其中,构筑物系统的可靠度确定仍然用参考文献[13]所提出的通路法或半割集法;参考文献[32]提出了灵敏度及衰减率的概念,揭示了风网中某一风路的风量 q_i 相对于另一风路的风阻 r_k 变化

的灵敏度 d_{ik} 及其衰减率 t_{ik} 随着风阻 r_k 的变化规律;参考文献[33] 给出了灵敏度矩阵的简化计算方法、灵敏度及其衰减率的概念,对研究各风路之间的相互影响有着极其重要的作用。

1995年,马云东教授^[34]从矿井通风系统的整体出发,详细分析了矿井通风构筑物、主要通风机和风网各分支之间的相互联系和影响,给出了通风系统及其各单元可靠性的定义,建立了矿井通风系统可靠性分析的理论模型。文中将通风构筑物按用途分为三类,即截断风流构筑物、通过风流构筑物和调节风量构筑物,论证了通风构筑物系统的可靠程度可以通过通风系统的可靠性反映出来,单独讨论通风构筑物系统的可靠性意义不大的结论。

在参考文献[34]中,马云东教授将分支可靠度定义为分支风量保持在某一合理工作范围内的概率。在综合考虑了风网风阻、风压的随机扰动及通风构筑物的可靠性等因素以后,得出第 L 条风路风量保持在 $[Q(L,0) - w_L^{(1)}, Q(L,0) + w_L^{(2)}]$ 区间之内的概率,即可靠度为

$$R_p(L, t) = \int_{Q(L,0) - w_L^{(1)}}^{Q(L,0) + w_L^{(2)}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L^*} \exp\left\{-\frac{[Q(L,t) - \mu_L^*]^2}{2\sigma_L^{*2}}\right\} dQ(L,t) \quad (1-14)$$

式中, σ_L^* 为第 L 条风路在 t 时刻风量分布的标准差; μ_L^* 为第 L 条风路在 t 时刻风量分布的均值; $w_L^{(1)}$, $w_L^{(2)}$ 分别为第 L 条风路有效风量区间的上、下限。

1996年,薛河等人^[35]以矿井局部通风系统为研究对象,采用安全系统工程理论,对矿井局部通风系统的可靠性定额值进行了分析,采用灾害事件的逻辑模型法 MOC 和概率统计回归法确定了矿井局部通风系统可靠性定额。

1997年,李湖生^[36]给出了风量和风压敏感度的定义,推导出了风量和风压敏感度的计算公式,还给出了一种快速确定角联分支的算法。通过对通风网络的风量和风压敏感度的计算,可以定量确定各分支风阻的改变对某一特定分支风量和风压的影响程度,也可确定某一特定分支风阻改变对其他各分支风量和风压的影响程度。采用风量敏感度分析方法来研究角联分支的风流稳定性,不仅可以得到风向判别式的全部定性结果,而且还能得到一些对选择调节措施非常有用的定量信息。此外,这种方法不受通风网络规模和复杂程度的限制,因此是解决角联分支风量和风向调节问题的有效手段。

1998年,程远国等人^[37]以可靠性工程理论为基础,用两种方法研究了矿井通风系统的可靠性问题。以工作面为考查对象,通过对工作面(包括回采、掘进、开拓、备用)通风状况的统计分析,进行通风系统可靠性计算;撇开具体巷道、工作面,以影响通风系统的因素为研究对象,即通过对矿井通风机、通风构