

文章编号:1674-2869(2017)02-0182-04

伸缩保差法求解矿井风网电费优化问题

胡章地¹,倪小山²,李卫³,胡文军^{4*},徐亮²,邱丹丹⁴,刘豪⁴

1. 湖北虎渡河科技有限公司,湖北荆州 434300;
2. 湖北兴发化工集团股份有限公司,湖北宜昌 443700;
3. 宜昌市夷陵区安全生产监督管理局,湖北宜昌 443100;
4. 武汉工程大学资源与土木工程学院,湖北武汉 430074

摘要:选用伸缩保差法作为算法,并开发便于操作的软件,求解矿井风网通风电费优化问题.以部分自然分风、部分按需分风通风系统的主扇及辅扇年总电费最小为优化目标,把非固定风量分支的风量及分支增阻、增压调节值作为变量,进行优化计算的初始点由风网解算结果进行调整而得.将风网解算软件和风网优化计算程序进行集成开发出C#应用软件,软件考虑了节点号不连续、自然风压作用等实际问题.软件通过一简例予以调试验算,计算结果表明风网电费优化效果显著.

关键词:矿井通风系统;优化;伸缩保差法;软件

中图分类号:TD725 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2017.02.014

Optimization of Electricity Cost of Mine Ventilation Network by Flexible Tolerance Method

HU Zhangdi¹, NI Xiaoshan², LI Wei³, HU Wenjun^{4*}, XU Liang², QIU Dandan⁴, LIU Hao⁴

1. Hubei Huduhe Technology Co., LTD, Jingzhou 434300, China;
2. Hubei Xingfa Chemical Group Co., LTD, Yichang 443700, China;
3. Administration of Work Safety in Yiling District of Yichang, Yichang 443100, China;
4. School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

Abstracts: We chose the flexible tolerance method as solution method, and developed a software to optimize the electricity cost of mine network ventilation. We took the annual minimum electricity cost of main and auxiliary fans in ventilation system, where natural and on-demand air splitting both exist, as the objective. The air quantity of unfixed-quantity branches, regulated value of increased resistance and air pressure of branches were selected as variables, and the initial values were obtained through adjusting calculation results of ventilation network in mine. A software based on C# was developed by integrating calculation software of ventilation network with ventilation optimization program. This software also takes discontinuous node numbers and natural air pressure into consideration. The software was debugged successfully by a case and the calculation result proves the obvious optimization effect of electricity consumption.

Keywords: mine ventilation system; optimization; flexible tolerance method; software

随着矿山生产不断发展和变化,我国一些矿山的通风系统一方面存在主要运输行人巷道和采掘工作面通风效果差、污风循环使用现象严重等

问题,另一方面又存在风量分配不合理、漏风现象严重、井下辅扇及通风构筑物的设置缺乏科学计算而不合理导致通风电能的浪费^[1-5].因此,对矿井

收稿日期:2016-09-14

作者简介:胡章地,硕士. E-mail:hzd62514931@163.com

*通讯作者:胡文军,硕士,教授. E-mail:huwenjunwuhan@126.com

引文格式:胡章地,倪小山,李卫,等.伸缩保差法求解矿井风网电费优化问题[J].武汉工程大学学报,2017,39(2):182-185.

HU Z D, NI X S, LI W, et al. Optimization of electricity cost of mine ventilation network by flexible tolerance method [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(2): 182-185.

风流进行优化控制已势在必行. 本文旨在选用一种较为有效的非线性规划求解方法, 并开发便于操作的软件, 对矿井风流控制进行优化, 在满足用风需要、满足风流基本规律、不妨碍生产运输、技术上可行的条件下, 使通风电费最少^[6-7].

1 风网电费优化数学模型

以部分自然分风、部分按需分风通风系统的主扇及辅扇年总电费最小为优化目标, 满足节点风量平衡定律、回路风压平衡定律、同一分支(增阻、增压)调节唯一性、调节量上限约束, 将非固定风量分支的风量及分支阻力调节值作为未知量, 得到式(1)的非线性规划问题^[8]:

$$\begin{aligned} \text{Min} Z = & \frac{C \cdot t_v}{1000} \sum_{K=1}^{N_f} \left[\frac{Q_{K_a}(K)}{\alpha_{K_a}(K)} \left\{ \sum_{j \in e_1(K)} B_{lj} \cdot R_j \cdot Q_j \cdot |Q_j| + \right. \right. \\ & \left. \sum_{j \in e_2(K)} B_{lj} \cdot [(R_j + S_j) \cdot Q_j \cdot |Q_j| - p_j - \left(\sum_{j \in e_1(K)} B_{lj} \cdot H_{nj} + \right. \right. \\ & \left. \left. \left. \sum_{j \in e_2(K)} B_{lj} \cdot H_{nj} \right) \right] \right\} + \frac{C \cdot t_v}{1000} \sum_{i \in e_2} \frac{p_j \cdot Q_j}{\alpha_i} \right]. \quad (1) \end{aligned}$$

其约束条件为:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N_b} A_{ij} \cdot Q_j = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_j - 1; \\ & \sum_{j \in e_1} B_{sj} \cdot R_j \cdot Q_j \cdot |Q_j| + \sum_{j \in e_2} B_{sj} \cdot [(R_j + S_j) \cdot Q_j \cdot |Q_j| - p_j] = \\ & \sum_{j \in e_1} B_{sj} \cdot H_{nj} + \sum_{j \in e_2} B_{sj} \cdot H_{nj}, \quad s \in e_s; \\ & S_i \cdot p_i = 0, \quad i \in e_2'; \quad 0 \leq S_i \leq S_i^u, \quad i \in e_2'; \\ & 0 \leq p_i \leq p_i^u, \quad i \in e_2'. \end{aligned}$$

其中, $Q_j = \begin{cases} Q_j, & j \in e_{XQ} \\ Q_{zj}, & j \in e_{NX} \end{cases}$ ($j=1, 2, \dots, N_b$), Q_j 为

分支 j 中通过的风量, m^3/s ; A_{ij} 为关联矩阵中第 i 行第 j 列的元素值(节点流向符号); B_{lj} 为回路矩阵中第 l 行第 j 列的元素值(网孔中分支的风向符号), B_{sj} 与 B_{lj} 同义, 其中 l 为第 K 台主扇所在独立回路号; α_i 为第 i 台风机的效率; R_j 为分支 j 的风阻, $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$; S_j 为分支 j 的增阻值, $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$, 上限值为 S_j^u ; p_j 为分支 j 的增压值, Pa , 上限值为 p_j^u ; H_{nj} 为分支 j 的自然风压或恒压源压头, Pa ; $e_1(K)$ 为第 K 台风机所在回路不可调分支号集合; $e_2(K)$ 为第 K 台风机所在回路可调分支号集合; e_1' 为整个风网中不可调分支号集合; e_2' 为整个风网中可调分支号集合; e_1'' 为无风机回路 s 中不可调分支号集合; e_2'' 为无风机回路 s 中可调分支号集合; e_{XQ} 为风网中固定风量分支号集合; e_{NX} 为风网中非固定风量

分支号集合; e_s 为无主扇回路号集合; $K_a(K)$ 为第 K 台主扇所在分支的编号; N_b 为风网分支数; N_j 为风网节点数(最大节点号为 M_j); N_f 为风网主扇台数; C 为年电费单价, 元/千瓦时; t_v 为年通风时间, h ; Z 为主扇及辅扇年总电费, 元.

2 风网电费优化数模的求解方法

大多数约束非线性最优化方法基本围绕下列三个基本思路之一: 借助反复的线性逼近把线性方法扩展到非线性规划问题中, 采用罚函数把约束非线性问题变换为一系列无约束问题, 采用伸缩保差法以便同时容纳可行和不可行的自变量矢量. 考虑到解非线性规划问题的相对有效性、计算逻辑的简单性及实际的适用性, 本文采用伸缩保差法(又称可变容差法).

伸缩保差法用于求解带有等式约束和不等式约束(约束皆可为线性或非线性函数)的最优化问题^[9]. 伸缩保差法的原理是将多约束求优问题转变为单约束求优问题, 即:

$$\text{Min } f(X), \quad X \in E^n \quad (2)$$

满足于 $\Phi^{(k)} - T(X) \geq 0$. 式中: $\Phi^{(k)}$ 为公差准则函数, 表示在进行第 k 步探索时给定的可变允许公差, $\Phi^{(k)}$ 是一个下降序列, 随迭代次数的增加逐渐趋近于 0; $T(X)$ 为约束破坏估计量, 表示变量不满足约束的程度.

伸缩保差法的运算过程: 给定初始点 $X^{(0)}$ 和初始单纯形边长 l . 从初始点 $X^{(0)}$ 出发, 按照无约束的单纯形加速法, 对 $f(X)$ 进行下降迭代. 将问题(2)的约束区域适当伸缩, 并在近似可行的基础上, 借用非线性单纯形法求解非线性规划问题.

3 风网电费优化软件

3.1 风网电费优化软件结构

本文采用全球使用最多的 .NET 用户界面控件套包 DXperience, 开发出 C# 应用软件, 软件分 3 大模块: 工程基础模块, 用于工程管理与系统帮助; 风网解算模块, 用于参数设置、风网解算、结果展示; 风网优化模块, 用于优化参数、风网优化、优化结果.

项目主工程为 C# 工程, 项目核心算法为 FORTRAN 工程, WANGFOR 为风网解算算法, VENTOPT 为风网优化算法^[10], 项目采用 C# 与 FORTRAN 外部调用的方式进行集成, VENTOPT.exe 为风网优化程序, 系统将直接对 FORTRAN 程序进行输入输出控制.

从表1看出,简例风网经过优化后主、辅扇功耗之和(19.38 kW),小于一般风网解算结果(24.45 kW)。

5 结 语

1)本文选择伸缩保差法求解矿井风网电费优化非线性规划问题,其优化计算的初始点由矿井风网解算结果进行调整而得;考虑到自变量参数的量级悬殊可能导致迭代失败,根据自变量的上限值及下限值,对自变量进行数值变换,使其均在0~1之间变化。

2)本文开发的C#应用软件从界面和程序框架2个方面对软件后期的维护升级预留接口,将矿井风网解算软件和风网优化计算程序进行集成;软件支持.xml和.xlsx两种数据输入输出格式,利用excel强大的编辑功能可以方便实现数据的批量处理;软件考虑了节点编号不连续、自然风压作用等实际问题。

3)本文开发的软件以一简例予以调试、验算通过,其优化计算结果表明,简例风网经过优化后主、辅扇功耗之和小于一般风网解算结果,优化效果较为明显。

4)下一步的研究工作方向:对某磷矿通风系统进行实际工程应用,得出该矿通风系统风流优化控制方案。

参考文献:

- [1] 陈国平,阮德超,胡文军,等. 大冶铁矿尖林山车间井下通风系统改造[J]. 武汉工程大学学报, 2013, 35(6): 80-86.
CHEN G P, RUAN D C, HU W J, et al. Reconstruction of Jianlinshan mine ventilation system in Daye iron mine [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2013, 35(6): 80-86.
- [2] 文永胜. 金属矿山地下开采通风系统优化的重要性[J]. 金属世界, 2009(2): 63-66.
WEN Y S. The importance of ventilation system optimization for underground mining at metal mines[J]. Metal World, 2009(2): 63-66.
- [3] 赵千里,刘剑. 用矿井通风仿真系统(MVSS)确定通风系统优化改造方案[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(2): 14-18.
ZHAO Q L, LIU J. Optimizing the reform protocol for ventilation system by mine ventilation simulation system [J]. China Safety Science Journal, 2002, 12(2): 14-18.
- [4] 杨文杰,贺昶友. 昭通市铅锌矿井下通风系统改造设计风量计算[J]. 云南冶金, 2009, 38(3): 8-12.
YANG W J, HE C Y. Air quantity calculation for the reformation design of underground ventilation system in Zhaotong lead & zinc mine [J]. Yunnan Metallurgy, 2009, 38(3): 8-12.
- [5] 姜勇国. 矿井通风管理及其信息管理系统[J]. 煤炭技术, 2008, 27(5): 169-170.
JIANG Y G. Mine ventilation management and information management system [J]. Coal Technology, 2008, 27(5): 169-170.
- [6] 叶巍巍,谢贤平,李镇. 金属矿山井下通风系统网络结构优化分析[J]. 矿冶, 2014, 23(2): 40-48.
YE W W, XIE X P, LI Z. Analysis of optimization of underground ventilation system of metal mine [J]. Mining & Metallurgy, 2014, 23(2): 40-48.
- [7] 梅林芳,吴冷峻. 大冶铁矿井下通风系统改造设计[J]. 矿业快报, 2007, 23(4): 63-64.
MEI L F, WU L J. Design for reconstruction of underground ventilation system in Daye iron mine [J]. Express Information of Mining Industry, 2007, 23(4): 63-64.
- [8] 胡文军. 一种风量调节优化数模及其解法[J]. 暖通空调, 1997(1): 10-12.
HU W J. Mathematical model for optimal air volume regulating in mine ventilation [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 1997(1): 10-12.
- [9] 罗雄麟,杨斌,杨洁琦,等. 全局校正的可变容差法及其在化工过程在线优化中的应用[J]. 化工进展, 2010, 29(10): 1832-1839.
LUO X L, YANG B, YANG J Q, et al. Global-guided flexible tolerance method and its application to on-line optimization of chemical process [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(10): 1832-1839.
- [10] 万耀青,梁庚荣,陈志强. 最优化计算方法常用程序汇编[M]. 北京:工人出版社, 1983: 220-257.
- [11] 王德明. 矿井通风与安全[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2007: 199-218.
- [12] 支学艺,张红婴. 矿井通风与防尘[M]. 北京:化学工业出版社, 2013: 81-103.
- [13] 王丽铮,席龙飞. 可变容差法在船舶最优化设计中的应用[J]. 武汉造船, 1996(3): 1-4.
WANG L Z, XI L F. Application of flexible tolerance method in optimal ship design [J]. Wuhan Shipbuilding, 1996(3): 1-4.
- [14] 刘敏华,郑洁,严彩梅. 基于可变容差法的电力系统最优潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(11): 34-36.
LIU M H, ZHENG J, YAN C M. Optimal power flow computation in electric power systems based on flexible tolerance method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(11): 34-36.
- [15] 王从陆. 复杂矿井通风网络解算及参数可调度研究[D]. 长沙:中南大学, 2003.

本文编辑:苗 变