

通风网路理论

VENTILATION
NETWORK THEORY

煤炭工业出版社

74.1334
9400004

通风网路理论

VENTILATION NETWORK THEORY

徐 瑞 龙 编著

煤炭工业出版社

(京)新登字042号

内 容 提 要

通风网路理论是矿井通风的基础理论之一。本书在总结国内外对通风网路研究与应用的基础上,系统地介绍网路的基本原理与性质、网路分风、风路的稳定性、网路的稳定性、主要通风机的工况分析、网路的可靠性,以及网路中的优化问题、网路的风温计算和灾变对网路的影响等,是一本起点较高的网路理论入门书。

本书可作为矿业大专院校师生的教学参考书,也可供从事煤矿生产、设计和科研部门的工程技术人员参考。

通风网路理论

徐 瑞 龙 编 著

责任编辑: 邓 菊 香

煤炭工业出版社

(北京安定门外大街45号 100029)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 787×1092mm^{1/32} 印张 9^{1/2} 插页 2

字数 208 千字 印数 1—1,750

1993年4月第1版 1993年4月第1次印刷

ISBN 7-5020-0790-3/TD·730

书号 3558 GO247 定价 8.60元

前 言

矿井通风是围绕着两个核心内容——风流理论与网路理论而展开的。前者研究风流在井巷中的流动特征，后者研究风流在网路中的特性。可以说前者讨论风流的微观现象，后者讨论风流的宏观现象。网路理论是以风流理论为基础，即风流在网路中也同样要遵守风流理论的诸定律。它们既有内在联系，又相互自成体系。

全书共分十章：网路基本性质与拓扑关系、网路分风、通风系统、风路的稳定性、网路的稳定性、网路的可靠度、主要通风机的工况分析、网路中的优化问题、网路的风温预算、灾变对网路稳定性的影响。本书运用图论来揭示网路的基本性质，以工程数学、计算数学、运筹学等为数学工具，

以计算机作为计算手段，开展分风、稳定性、可靠性的讨论。这些内容均反映了国内外80年代的新理论、新观点、新思想及新的技术手段。本书是一本起点较高的通风网路理论的入门书。

此前本人编写过《计算机在通风中的应用》、《矿井通风理论》、《通风网路理论及其应用》、《矿井通风网路分析》等讲义和刊授教材，曾多次为我院本科生、研究生开设选修课及全国煤矿工程师安全技术知识更新刊授使用。本书就是在其基础上，并吸收了国内外书刊杂志的有关论点，其中也包括作者本人的研究成果编著而成。

本书初稿曾得到黄元平教授、王英敏教授审阅与指导，

在这里向两位同行老前辈表示崇高的敬意和衷心的感谢。没有广大同行、同仁的大力支持，本书是难以与读者见面的。

由于本人水平所限，书中缺点和欠妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

作 者

1991年6月于阜新矿院

目 录

第一章 網路的基本性质与拓扑关系	1
第一节 通风網路的基本性质	1
第二节 通风網路的拓扑关系	7
第三节 通风網路的特征图	30
第二章 網路分风	37
第一节 自然分风 (網路解算)	37
第二节 按需分风 (风量调节)	56
第三节 分风优化	66
第四节 分风算法的评估	72
第三章 通风系统	82
第一节 采场通风系统	82
第二节 矿井通风系统	89
第三节 生产矿井通风系统的分析与改造	104
第四节 通风系统的评价	109
第四章 风路的稳定性分析	113
第一节 角联风路的确定	113
第二节 角联风路的风向判别	117
第三节 风路的稳定性分析	130
第五章 網路的稳定性分析	137
第一节 稳定性的基本概念	137
第二节 稳定性的定性分析	140
第三节 稳定性的定量分析	148
第六章 網路的可靠性	161
第一节 可靠性的基本概念	161

第二节	简单网路的可靠度	165
第三节	复杂网路的可靠度	167
第四节	通风构筑物的可靠度	173
第七章	多台主要通风机的工况分析	180
第一节	主要通风机个体特性的数学模型	180
第二节	多台主要通风机的工况确定	184
第三节	多台主要通风机的相互调节	194
第四节	多台主要通风机的稳定性分析	199
第八章	网路中的优化问题	205
第一节	井巷合理阻力的分布	205
第二节	井巷合理断面的确定	213
第三节	通风系统最大流与最小流	221
第四节	主要通风机优选	232
第九章	网路的风温预算	254
第一节	矿井热源	254
第二节	风流的热交换	257
第三节	风流温度的预测计算	263
第十章	灾变对网路稳定性的影响	272
第一节	火风压的基本性质与数学模型	272
第二节	灾变对上行风流的影响	279
第三节	灾变对下行风流的影响	283
第四节	井下灾变的风流控制	285
参考文献		293

第一章 网路的基本性质与拓扑关系

本章介绍通风网路的基本性质与拓扑关系，它是研究通风网路理论的基础。运用图论揭示网路的基本性质是本章的重点。同时，介绍通风网路的数学模型及其空间几何意义、通风网路的特征图。

第一节 通风网路的基本性质

一、网路的术语

1. 节点、割点

我们称三条以上巷道的相交点为节点，记为 v_i ($i=1, 2, \dots, m$)。在标节点号时应保持由小节点号流向大节点号的规律，这样就比较规范，便于检查和校对。

通风网路的割点是这样一种节点，当把该节点从图中去掉后能使原来的通风网路图分为若干个子图。割点的这种几何特性为我们分析通风网路创造了很大的便利，割点的应用将在后面章节论述。

2. 风路（边）

两个节点之间的连接巷道称为风路，记为 e_j ($j=1, 2, \dots, n$)。依据风路在网路中的特征可划分为角联风路与一般风路；固定风量的风路与可变风量的风路等，风路的分类便于通风网路的调节与分析。

3. 回路、网孔

由两条以上的风路形成的闭合圈称为回路，记为 b_i ($i=$

1, 2, ..., $n - m + 1$)。

当闭合圈内无其它风路时, 该回路就称为网孔。显然, 网孔是回路的特殊情况。

4. 通路

将通风网路中所有的进风井口设为网路的起始节点, 该节点号为 v_1 ; 所有的排风井口设为网路的终止节点, 该节点号为 v_m 。从 v_1 到 v_m 由不同的风路组成的一条路径称为通路, 记为 P_i ($i = 1, 2, \dots, w$)。

5. 通风系统图、通风网路图

矿井通风系统图, 即在矿井的开拓平面图上标明采掘工作面的位置、风流方向、风量和通风、防火、防尘等通风设施与安全设施的安设地点, 借以表明矿井通风的状况及安全措施, 是矿井正常生产及通风的日常管理所必备的技术资料之一。

通风网路图是在矿井通风系统图的基础上抽象而成的, 是一种单线条的示意图。它是分析、研究矿井通风系统合理性, 解算网路, 改善通风管理等的基础资料。通风网路图与图论中所研究的图是一致的。

二、网路的基本性质

1. 质量守恒定律

在单位时间内, 任一节点流入和流出空气质量的代数和为零。即

$$\sum_{j=1}^n \rho_{ij} q_{ij} = 0 \quad (j \in i, i = 1, 2, \dots, m) \quad (1-1)$$

式中 ρ_{ij} ——在第 i 个节点上的第 j 条风路中的空气密度, kg/m^3 ;

q_{ij} ——在第 i 个节点上的第 j 条风路中的空气流量, m^3/s 。

当密度变化可以忽略不计时，上式可写为：

$$\sum_{j=1}^n q_{ij} = 0 \quad (1-2)$$

即风量平衡定律。该定律表明：对网路中的任一节点，流进的风量等于流出的风量。一般取流进的风量为正，流出的风量为负。

例1-1 在图1-1a中， v_1 的风量平衡方程式为：

$$q_{11} + q_{12} + q_{13} = q_{14} + q_{15}$$

或

$$q_{11} + q_{12} + q_{13} - q_{14} - q_{15} = 0$$

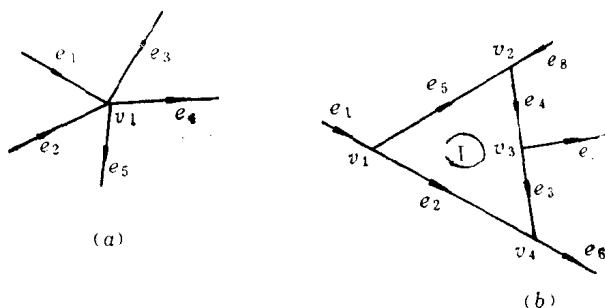


图 1-1

2. 能量守恒定律

在任何闭合回路（或网孔）上所发生的风流能量转换的代数数和为零。即

$$\sum_j h_{ij} = \sum_j h_{fij} + \sum_j h_{zij} \quad (j \in i, i = 1, 2, \dots, n-m+1) \quad (1-3)$$

式中 h_{ij} ——在第 i 个回路上的第 j 条风路的风压值,
Pa;

$h_{r,ij}$ ——在第 i 个回路上第 j 条风路中通风机
的风压, Pa;

$h_{z,ij}$ ——在第 i 个回路上第 j 条风路的自然风压,
Pa。

当回路上既无通风机又无自然风压时, 上式可写为:

$$\sum_j h_{ij} = 0 \quad (1-4)$$

即风压平衡定律。该定律表明: 在任一回路上, 不同方向的风流, 它们的风压(或阻力)必定相等。一般取顺时针风流方向的风路风压值为正, 反之则为负。

例 1-2 在图1-1b中, 第 i 网孔的风压平衡方程式为:

$$h_{i5} + h_{i4} + h_{i3} = h_{i2}$$

或
$$h_{i5} + h_{i4} + h_{i3} - h_{i2} = 0$$

3. 阻力定律

井下的风流多属于完全紊流的流态, 故其阻力定律遵守平方关系, 即

$$h_i = r_i q_i^2 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1-5)$$

式中 r_i ——网路中第 i 条风路的风阻值, $N \cdot s^2/m^8$;

q_i ——网路中第 i 条风路的风量值, m^3/s ;

h_i ——网路中第 i 条风路的风压值, Pa。

4. 风路的串联特性

(1) 总风量和分风量的关系:

$$q_0 = q_1 = q_2 = \dots = q_n \quad (1-6)$$

上式表明: 串联风路的总风量等于各条风路的分风量。

(2) 总风压和分风压的关系:

$$h_0 = h_1 + h_2 + \cdots + h_n \quad (1-7)$$

上式表明：串联风路的总风压等于各条风路的分风压之和。

(3) 总风阻和分风阻的关系：

因
$$h_1 = r_1 q_1^2, \quad q_0 = q_1$$

代入式 (1-7)，则

$$r_0 = r_1 + r_2 + \cdots + r_n \quad (1-8)$$

上式表明：串联风路的总风阻等于各条风路的分风阻之和。

5. 风路的并联特性

(1) 总风量和分风量的关系：

由风量平衡定律可知：

$$q_0 = q_1 + q_2 + \cdots + q_n \quad (1-9)$$

上式表明：并联风路的总风量等于各分风量之和。

(2) 总风压和分风压的关系：

由风压平衡定律可知：

$$h_0 = h_1 = h_2 = \cdots = h_n \quad (1-10)$$

上式表明：并联风路的总风压等于各条风路的分风压。

(3) 总风阻和分风阻的关系：

因
$$q_1 = \sqrt{h_1 / r_1}, \quad h_0 = h_1$$

代入式 (1-9)，则

$$r_0 = 1 / (1 / \sqrt{r_1} + 1 / \sqrt{r_2} + \cdots + 1 / \sqrt{r_n})^2 \quad (1-11)$$

上式表明：并联风路的总风阻和各风路的分风阻之间为复杂的繁分数关系。

网络的串并联性质为我们进行通风网路图的简化、拟定初始风量等，提供了方便。

三、网路的数学模型及其几何意义

通风网路的数学模型由两部分组成:

$$\sum h_{ij} = 0 \quad (j \in i, i = 1, 2, \dots, n-m+1) \quad (1-12)$$

$$\sum q_{ij} = 0 \quad (j \in i, i = 1, 2, \dots, m-1) \quad (1-13)$$

前者是满足风压平衡定律的 $(n-m+1)$ 个风压平衡方程式, 后者是满足风量平衡定律的 $(m-1)$ 个风量平衡方程式。下面给出式 (1-12)、(1-13) 在三维空间的几何意义。

如图1-2a所示的通风网路, q_0 、 q_0' 、 q_0'' 为已知量, $m=3$, $n=3$ 。

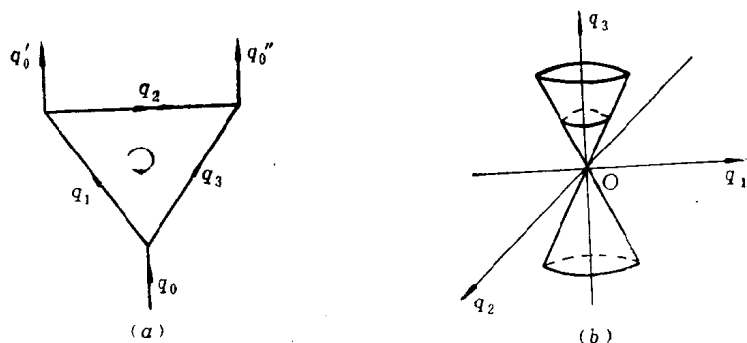


图 1-2

$$r_1 q_1^2 + r_2 q_2^2 - r_3 q_3^2 = 0 \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} q_1 + q_3 - q_0 &= 0 \\ q_1 - q_3 - q_0' &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

方程①的几何形状 (图1-2b) 是二次锥面。当考虑自然风压和通风机风压时, 方程①为双叶双曲面。

方程②是两个线性方程式, 在空间坐标中是两个平面, 且相交 (因为它们线性独立), 即式②是两个平面所相交的

一条直线，该直线上的点都满足风量平衡方程组。

联立式①与②求解，就是求直线与二次锥面（或双叶双曲面）的交点。以上的几何意义可以抽象地推广到 n 维实空间。

第二节 通风网路的拓扑关系

一、网路拓扑的基本定义

用线段和节点表示的通风系统图称为通风网路图，也称拓扑图。它与图论所研究的对象是一致的。为了便于以后分析的需要，先介绍通风网路中常用的一些图论的基本概念。

1. 边、节点

图1-3b和图1-3c中代替图1-3a中巷道的线段叫边；巷道与巷道之间的连接点叫节点。边可以是直线，也可以是连续曲线。如果考虑边的方向，则边的一个端点称之为始节点；而另一个端点则称为终节点。边的两个端点通常是由不同的

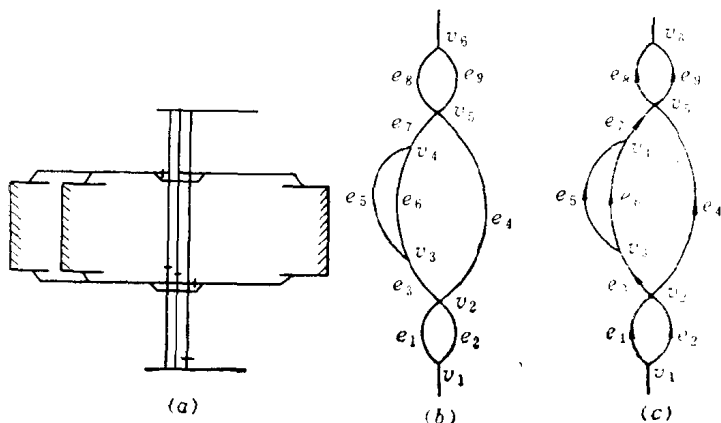


图 1-3

节点所构成的。

2. 图、有向图、无向图

通风网路相应的拓扑结构中节点和边的集合称之为图，用 G 来表示。

如果网路图 G 中的每条边都有确定的风流方向，这样的图称为有向图，如图1-3c所示；否则称为无向图，如图1-3b所示。

有向图 $G(V, E, \sigma)$ 中包含有节点的集合 V ，边的集合 E ，以及边 e 与节点 v 之间的关联关系 σ 。对于图1-3c， $G(V, E, \sigma)$ 中

$$V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6)$$

$$E = (e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8, e_9)$$

$$\sigma: e_1 = (v_1, v_2); e_2 = (v_1, v_2); e_3 = (v_2, v_3);$$

$$e_4 = (v_2, v_5); e_5 = (v_3, v_4); e_6 = (v_3, v_4);$$

$$e_7 = (v_4, v_5); e_8 = (v_5, v_6); e_9 = (v_6, v_6)。$$

这里 $e_k = (v_i, v_j)$ 表示第 k 条边以 v_i 为始节点，以 v_j 为终节点。显然， $(v_i, v_j) \neq (v_j, v_i)$ 。

无向图 $G(V, E, \phi)$ 中包含有节点的集合 V ，边的集合 E ，以及边 e 与节点 v 之间的关联关系 ϕ 。对于图1-3b， $G(V, E, \phi)$ 中

$$V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6)$$

$$E = (e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8, e_9)$$

$$\phi: e_1 = (v_1, v_2), (v_2, v_1); e_2 = (v_1, v_2), (v_2, v_1);$$

$$e_3 = (v_2, v_3), (v_3, v_2); e_4 = (v_2, v_5), (v_5, v_2);$$

$$e_5 = (v_3, v_4), (v_4, v_3); e_6 = (v_3, v_4), (v_4, v_3);$$

$$e_7 = (v_4, v_5), (v_5, v_4); e_8 = (v_5, v_6), (v_6, v_5);$$

$$e_9 = (v_6, v_6), (v_6, v_6)。$$

里这 $e_k = (v_i, v_j)$ 表示 e_k 是以 v_i 、 v_j 为端点的无向边。显然，无向边具有 $(v_i, v_j) = (v_j, v_i)$ 。

3. 路径、回路、通路

在网路图 G 中一个有限条边的序列 $(e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{ik})$ ，其中 $e_{i,j-1}$ 的终点正好是 e_{ij} 的始点，这里 $2 \leq j \leq k$ ，且在此序列中没有一条边出现的次数超过一次，就称此序列为一条路径。在图1-3c中，节点 v_1, v_3 之间的 (e_1, e_3) 、 (e_2, e_3) 均为路径。

当某条路径首尾相接时，就形成一个回路。在图1-3c中， (e_1, e_2) 、 (e_3, e_5, e_7, e_4) 均为回路。

当某条路径的始点为 v_i 、终点为 v_m 时，就形成一条通路。在图1-3c中， (e_2, e_4, e_6) 、 $(e_2, e_3, e_5, e_7, e_9)$ 均为通路。

4. 连通图、非连通图、子图

在网路图 G 中，若任意两节点之间至少存在一条路径时，则此图就叫连通图；否则叫非连通图。图1-3b、c 即为连通图，图1-4a为非连通图。

图1-4a中的 I、II、III 就称为子图。非连通图一般由若干个子图所构成。

对于通风网路图还有平面图与立体图之区别。矿井通风网路多属于有向的、连通的、立体的网路图。

5. 树、余树

树是网路图 G 中的一个子图 G' ，若 G' 是连通图，且包含图 G 中的所有节点，但又不形成回路，则称 G' 为 G 的一个生成树，简称为树。

对于同一个网路图 G ，其树的形式不是唯一的。如图1-4b所示，均为图1-3c的树，也均满足树的定义。

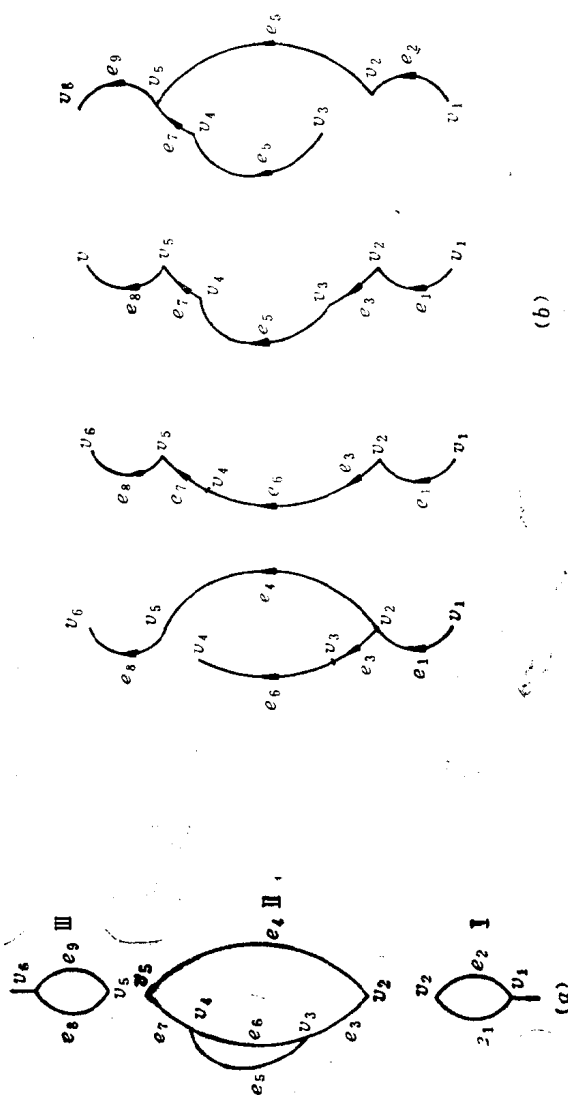


图 1-1