



第8章 矿井通风技术数字化方法

主讲人：毕林

2024年8月13日



目录

- 8.1 矿井通风网络解算原理
- 8.2 矿井通风系统数字化优化
- 思考题



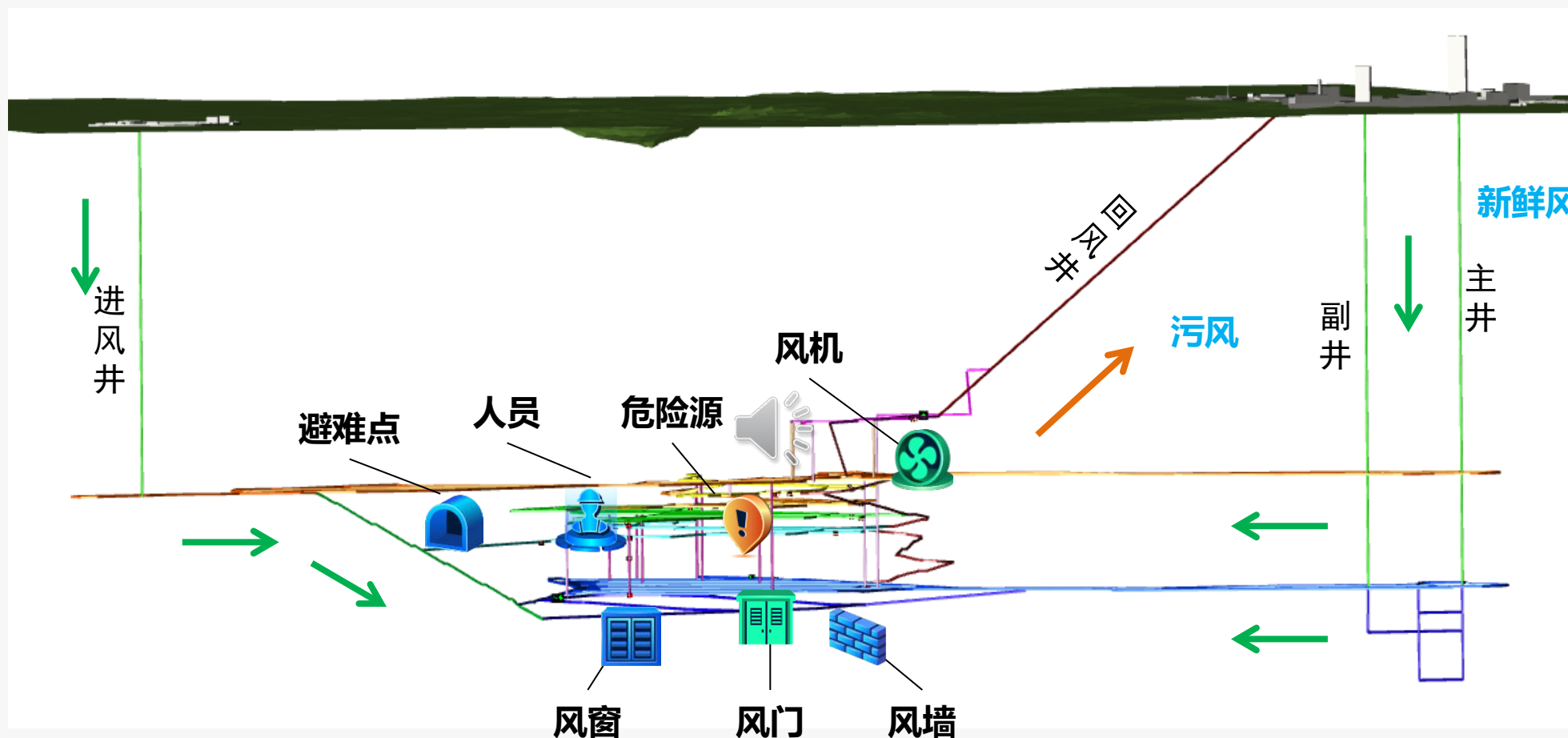
8.1

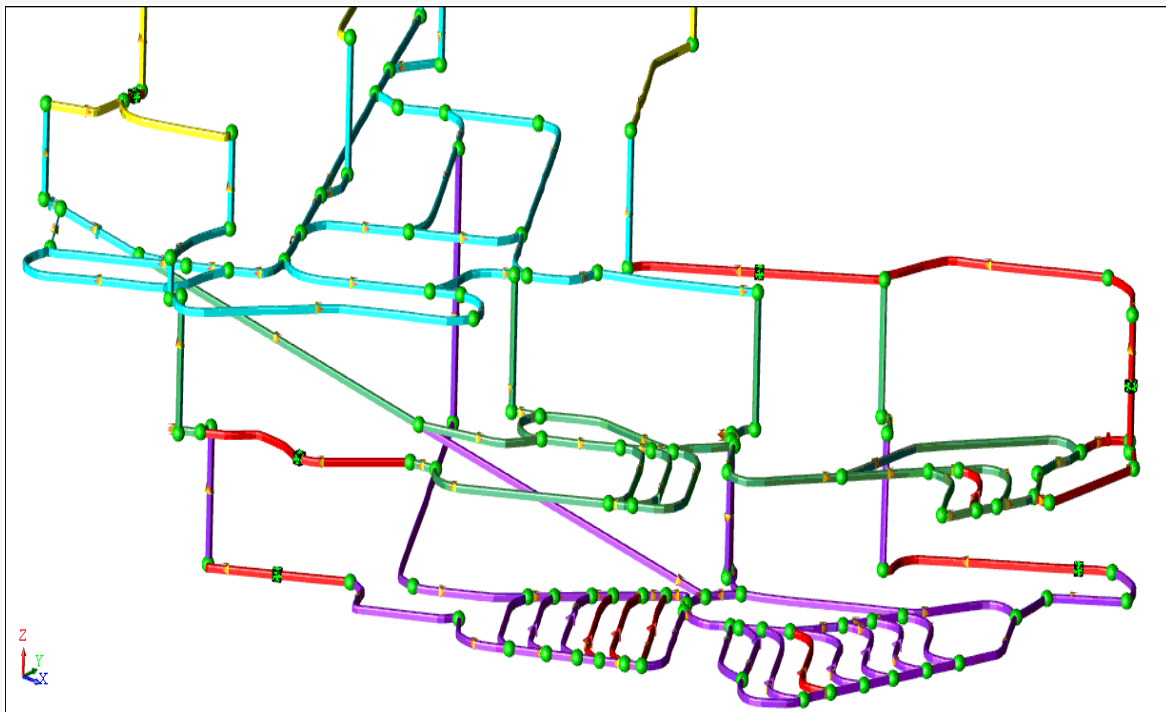
矿井通风网络解算原理

矿山开采生产与安全管理新模式的变革背景



矿井通风是指利用机械或自然风压，使得地表新鲜空气进入矿井，并在各井巷中按生产要求做定向和定量地流动，最终把污浊的空气排出矿井外的全过程。





巷道风阻

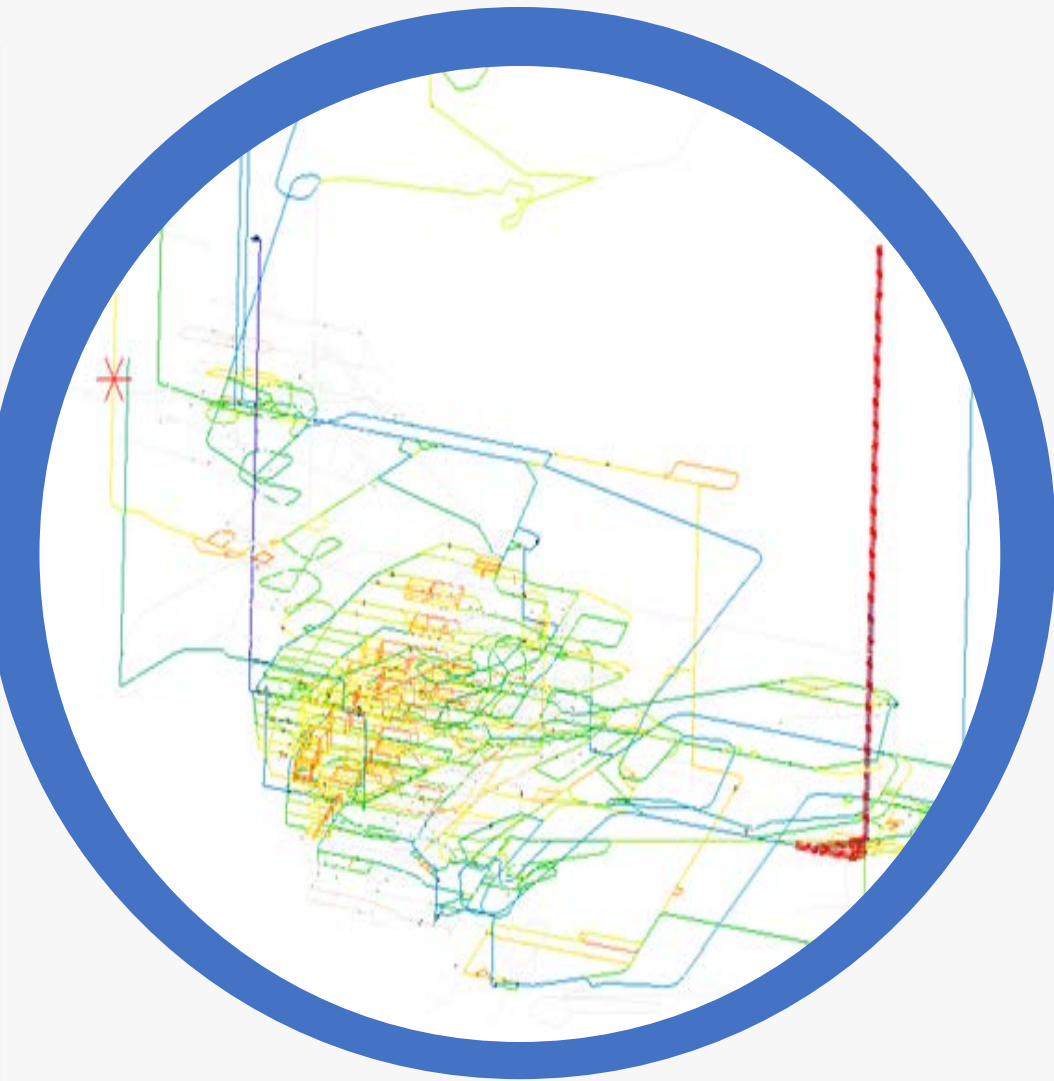
巷道摩擦风阻与局部风阻之和，是矿井通风网络解算中的重要参数。

自然风压

自然风压是由于风流流动引起的热交换等因素导致矿井进、出风侧产生温度差，导致平均密度不等，使两侧空气柱底部压力不等，其压差就是自然风压。

地表节点

地表节点是通风巷道的始节点或末节点，与地表大气相连。



节点压力

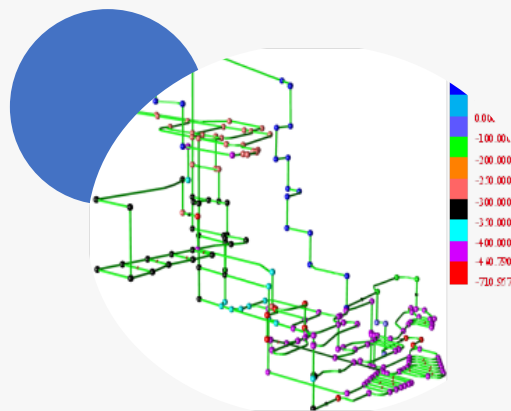
选择通风网络中某一节点为参考节点，其余每个节点与参考节点的风压差即该节点的节点压力。

解算风压

解算风压=通风阻力-风机工况风压-自然风压-固定风压-不平衡压降。

固定风压

在通风巷道上设置的固定风压值，是通风网络中的重要参数之一。



不平衡压降



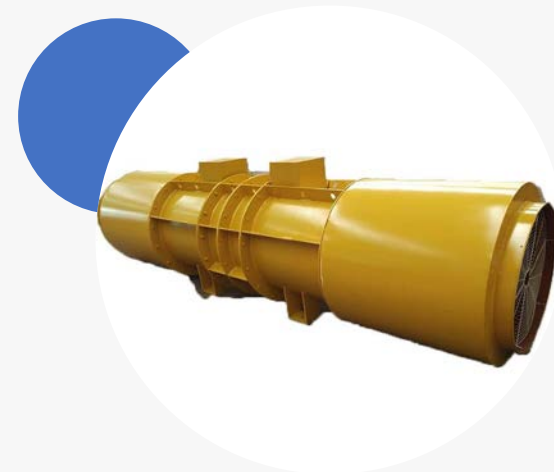
由于设置固定风量，通风网络中存在回路风压不平衡，不平衡的那一部份风压即为不平衡压降。



允许风速



各通风巷道设置的风速最大值，若解算风速超过允许风速设置值，系统将自动预警。



虚拟风机



根据装机风量、实验或模型参数，拟合出一条风量-风压特性曲线，该曲线对应的风机即为虚拟风机。



风压模拟方法

依据通风网络中的各风机的特性曲线中的风压值，分为静压法、全压法与混合法。

最大通风能力

是指允许流过整个通风网络最大的风量。



出口动压损失

是指在全压法或混合法模拟下，由于回风井出口的风速引起的动压损失，
动压。

网络效率

是指摩擦损失功率与电机输入功率之比。

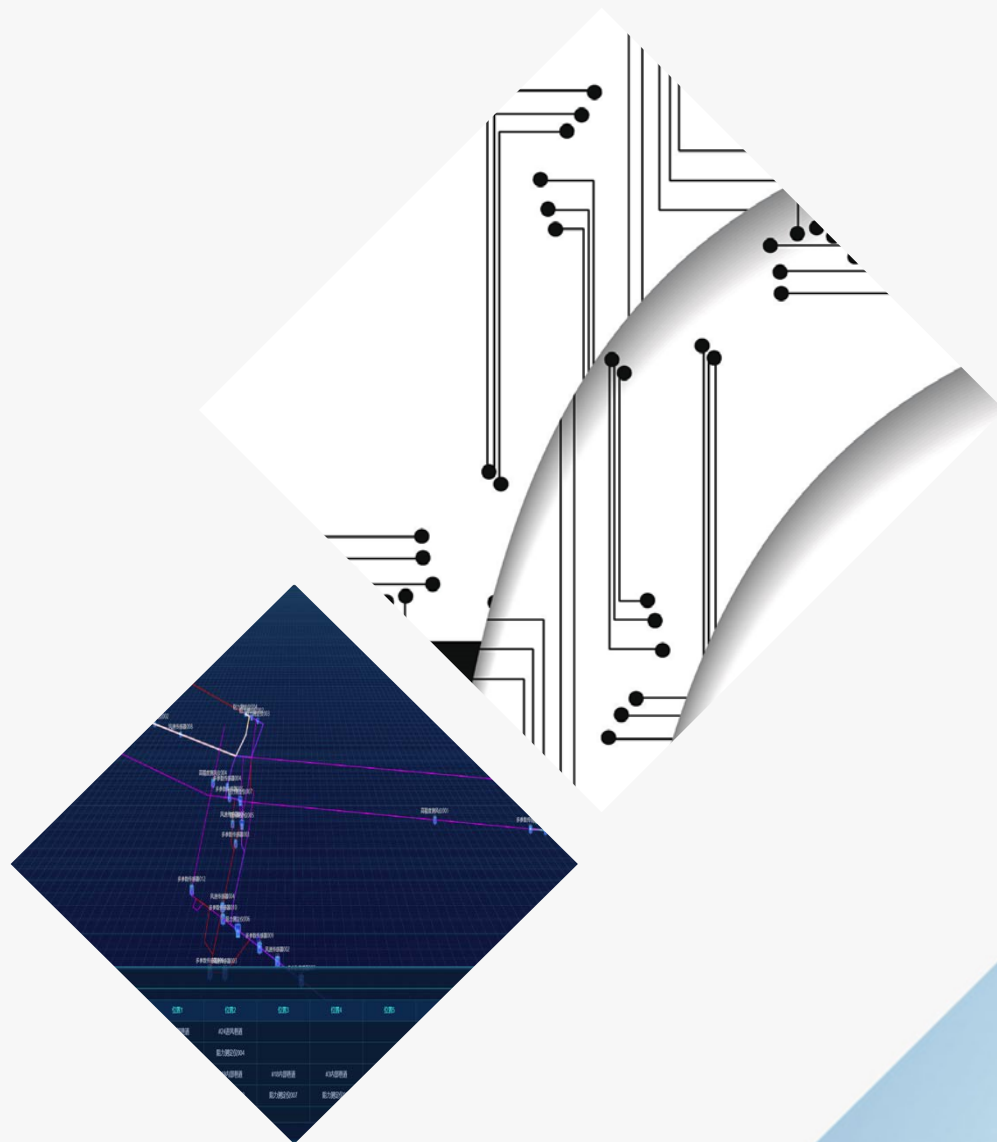


通风网络图符合复杂通风系统的内在逻辑关系

连通图中分支方向及流量必须符合流体网络三大流动规律所表现出的节点分支间制约关系，因此，通风网络图必须符合复杂通风系统的内在逻辑关系。

①、风量平衡定律

风量平衡定律是指在稳态通风条件下，单位时间流入某节点的空气质量等于流出该节点的空气质量，或者说，流入与流出某节点的各分支空气质量流量的代数和等于零。

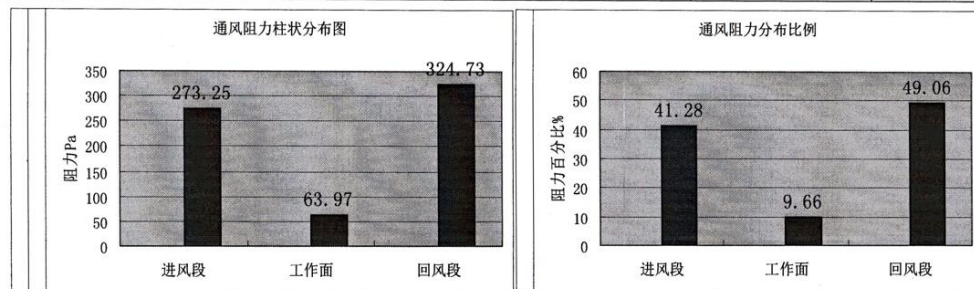




②、阻力定律

矿井通风风流在通风网络中的流动，绝大多数属于完全紊流状态，遵守阻力定律，即第*i*条分支的通风阻力为 P_a ，风阻为 R_a ，风量为 Q_a 。

区 域	测 点	长度 m	通风阻力 Pa	占全矿总阻力的百分比 %	等积孔 $A \text{ m}^2$	通风阻力等级
进风段	0—3	565	273.25	41.28	2.68	小阻力矿
11091 工作面	3—4	120	63.97	9.66		
回风段	4—7	440	324.73	49.06		
测量路线总阻力	0—7	1125	661.95	100.00		





③、能量守恒定律

- 无能量源
通风网络中无能量源的回路，回路中各分支阻力代数和为零。
- 有能量源
通风网络中有能量源的回路，回路中各分支阻力代数和等于该回路中扇风机风压与自然风压的代数和。



01

通风网络有效性分析

通风网络有效性分析是矿井通风网络解算、调控和优化等的基础。

02

核心问题

风网有效检查的核心问题是如何保证对网络结构进行检查，使得通过检查的网络均能收敛，并且在人工适当调整的情况下能使风网快速收敛。

03

检查内容

根据风网有效性分析的结构，从数据检查、风网检查和收敛性分析三个方面对通风网络进行检查。



通风网络数据检查

在进行通风网络解算之前，必须确保通风网络数据的有效性，包括节点数、分支数、巷道参数等符合实际要求。



数据异常与假收敛

无效的通风网络数据往往导致解算失败或异常，甚至产生假收敛、陷入死循环等严重问题，因此需先检查解算数据的合理性。



固定风量分支检查

在固定风量分支上设置风机或通风构筑物时，需确保巷道断面面积、周长、摩擦阻力系数等参数大于零。



违反规定

在设置过大数据时，需确保其不会较大地偏离实际数据的上限值，以免因人为疏忽导致解算发散。



数据冲突

数据冲突主要是指在缺少必要限制措施时导致数据设置矛盾，如重复设置通风构筑物、在封闭巷道或独头巷道设置固定风流或风机等。

1

连通性检查

只要是连通图都可以找出至少一棵生成树，而不连通的通风网络图无法创建生成树，隔断了风流之间的联系，无法进行解算。因此，为了保证生成树的成功创建，必须检查通风网络图的连通性。

2

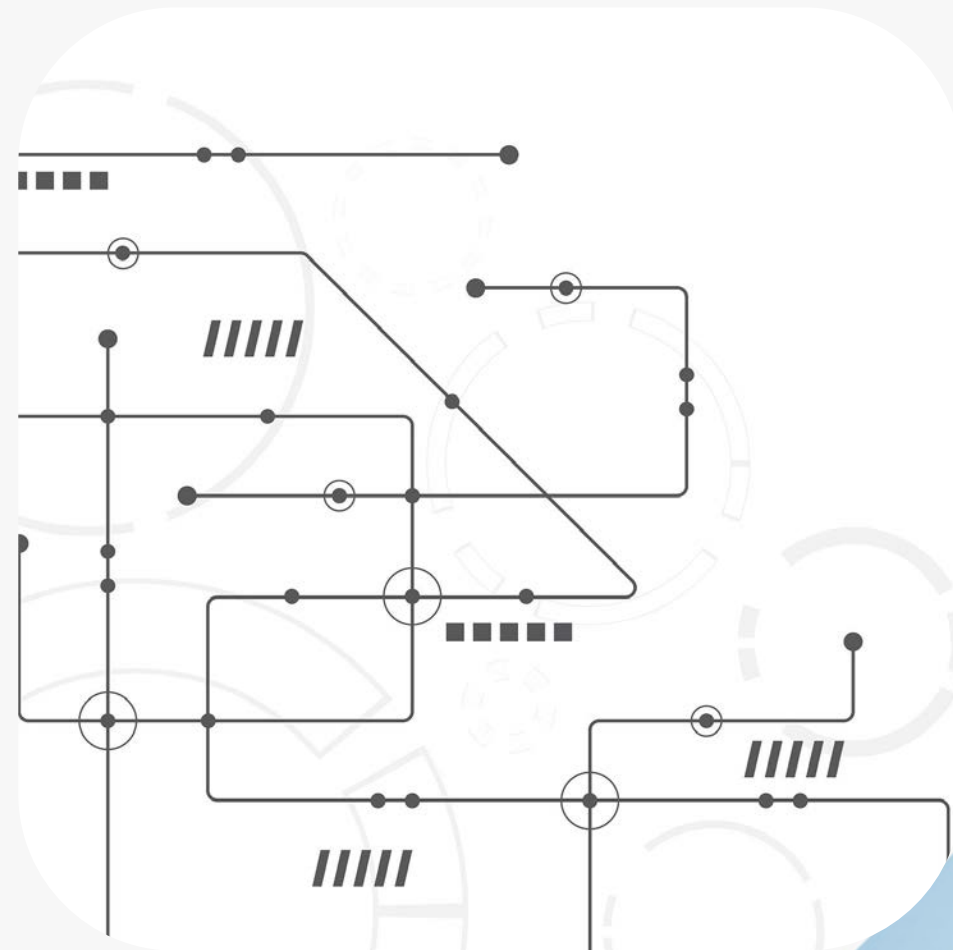
网络结构检查

特殊的网络结构如重叠巷道、独头巷道、环图（一条分支的始末节点相同）、并列分支等。

3

强连通性分析

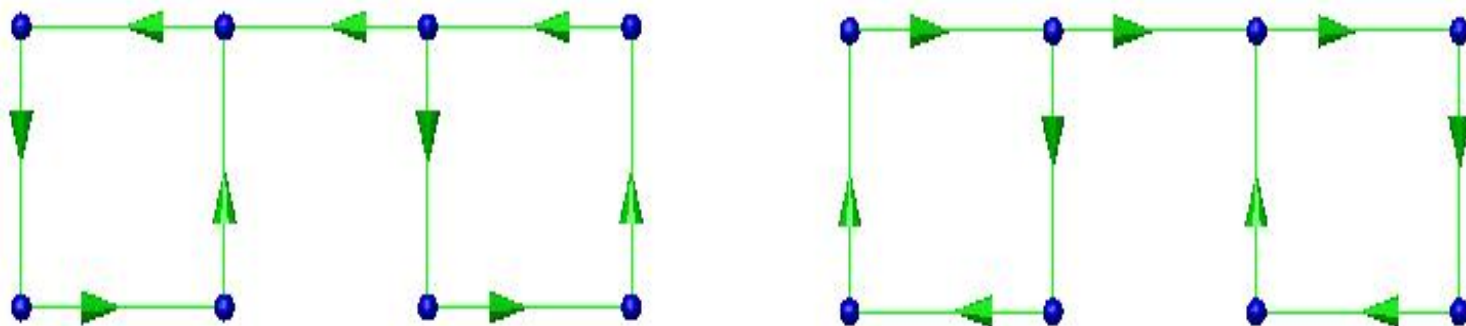
由于通风网络图实际上为一赋权有向强连通图，故为保证网络的合理性，应尽量保证网络的强连通性。



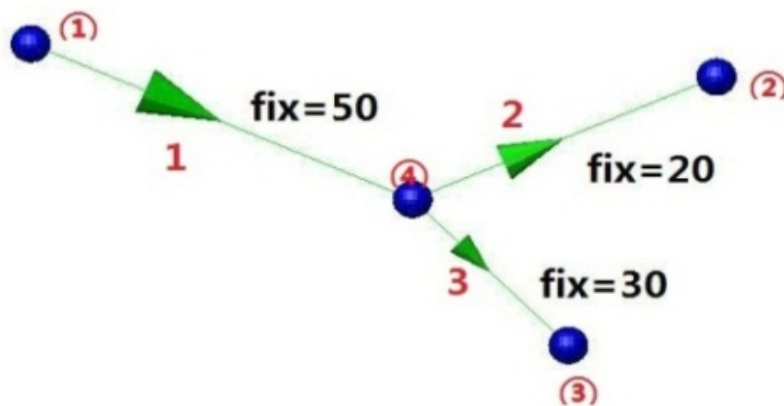


重叠巷道与并列分支：重叠巷道与并列分支有点相似，只是重叠巷道比较隐蔽，一般属于多余的未处理分支，这会影响解算与调节。

反向图



对风网固定风量设置的应尽量少，且应保证在风网拓扑结构上不重复性设置。实际上，只要保证网络移除固定风量分支后的子图仍然为连通图就不会导致生成树创建失败。



固定风量分支



收敛性分析

矿井通风网络的解算算法基本上采用 Scott-Hinsley 法，由于 Scott-Hinsley 法进行了二次简化，迭代计算的收敛速度一阶收敛的。风机优选时，若没有按要求优选合理的风机，而是人工选择某种风机，可能导致解算不收敛或超出风机合理工作范围导致迭代不收敛，需要进行收敛性分析。

独立性检查

对于构造的 M 个回路组成的矩阵，需要对其独立性进行检验，以避免假收敛的问题。网孔法作为一种特殊的回路风量法，其回路结构比较特殊，在一个网孔中可能存在多条余树分支，而且并不要求每个网孔均有一条唯一的分支。但网孔法仍然可以保证网络收敛。

网孔独立性证明

网孔是独立回路，一个网络的全部自然网孔是一组独立回路。对于一个含有 N 条分支、 J 个节点的平面风网，根据欧拉定理，存在 $M = N - J + 1$ 个网孔，作为最小的闭合环，任意一个网孔均不能由其余网孔组合而成。

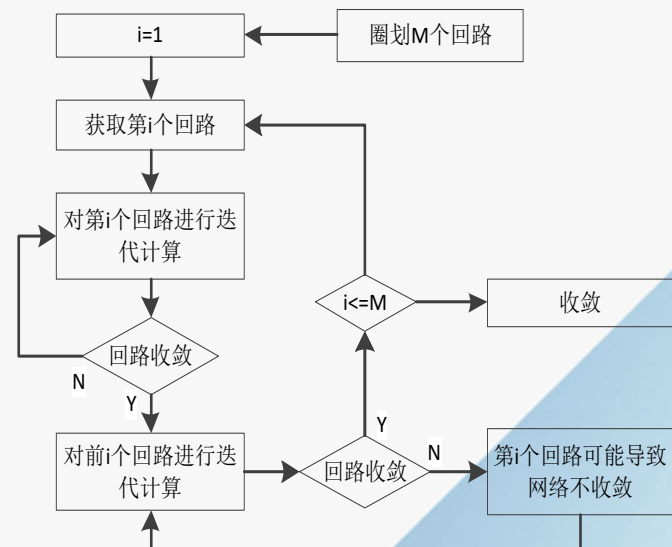


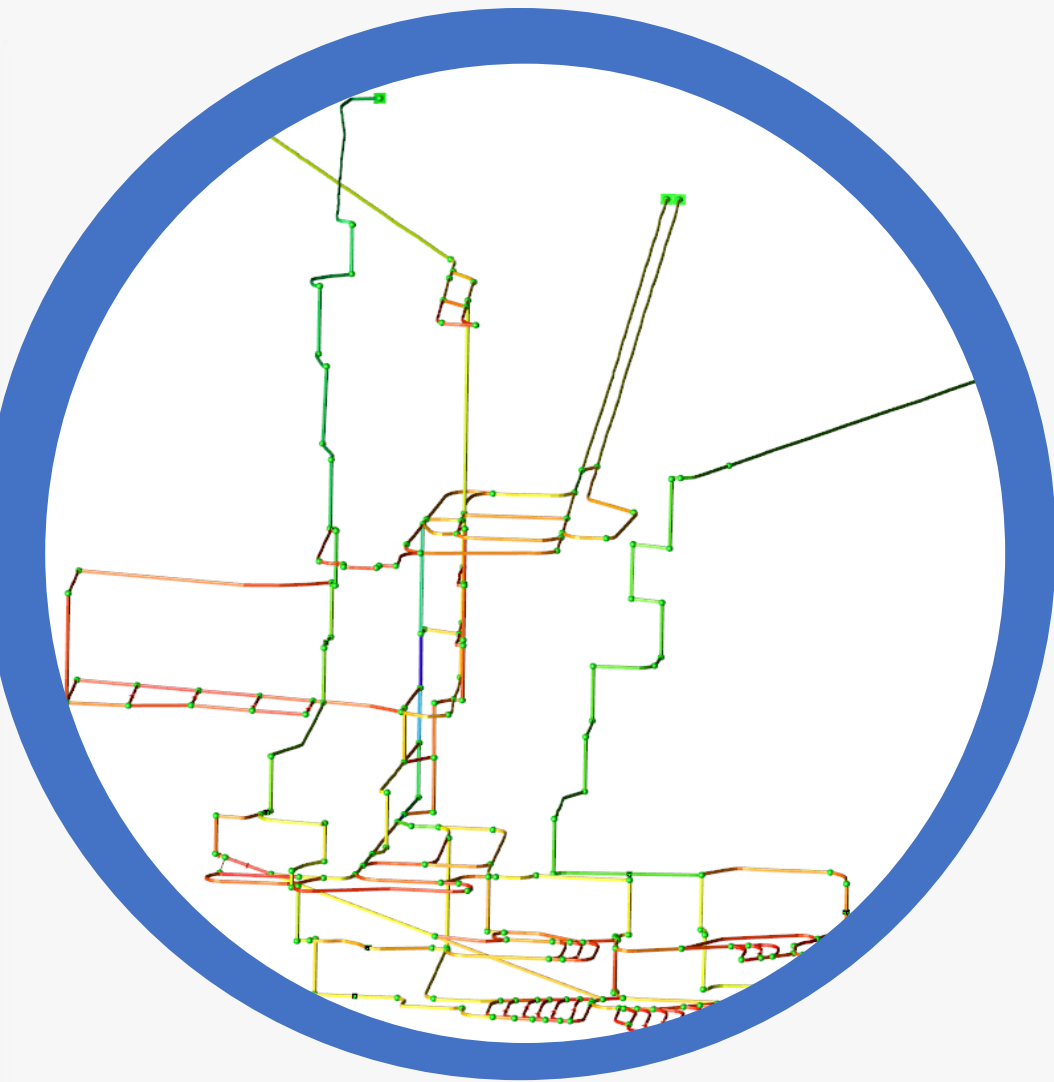
避免假收敛

由于网孔的分支数较少，对于较稠密的网络，网孔法往往具有较快的收敛速度，但对于复杂的矿井通风网络，若采用广义的网孔圈划方法以保证回路较少的分支数，经常出现重复圈划网孔的问题，因此，为避免回路假收敛对圈划的网孔进行独立性检查极其重要。

判断回路独立性

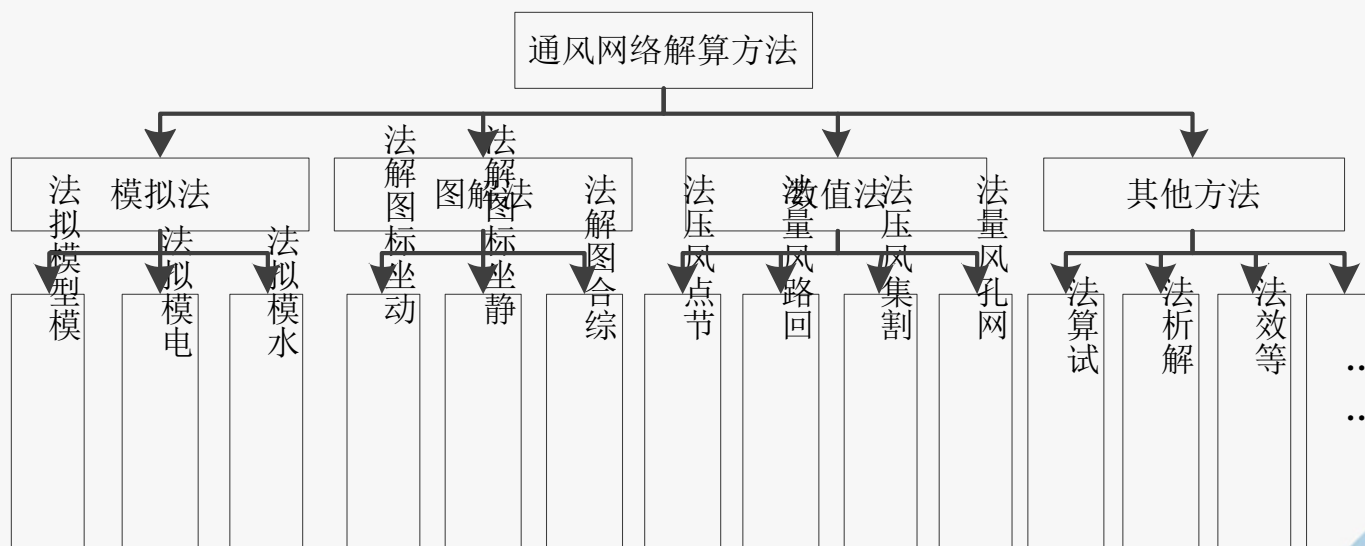
判断回路矩阵C的独立性，可以采用简单的验算方法，首先判断闭合环的个数M，若 $M=N-J+1$ ，则取出M个余树分支所在的列组成 $M \times M$ 行列式|C|，直接计算回路矩阵对应行列式|C|的值，若果|C|=0，则说明回路矩阵重复；否则，这M个回路相互独立。





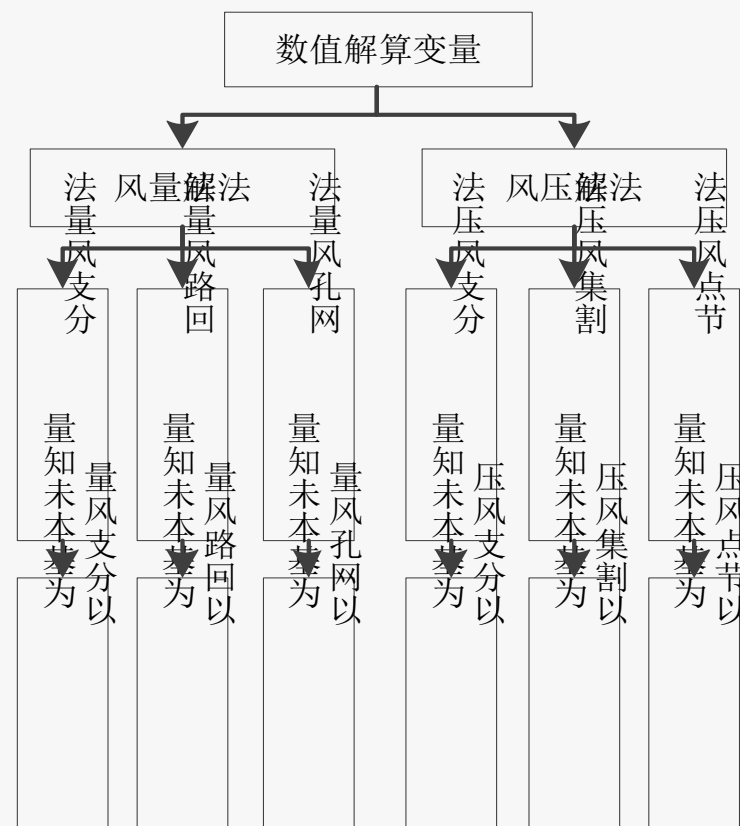
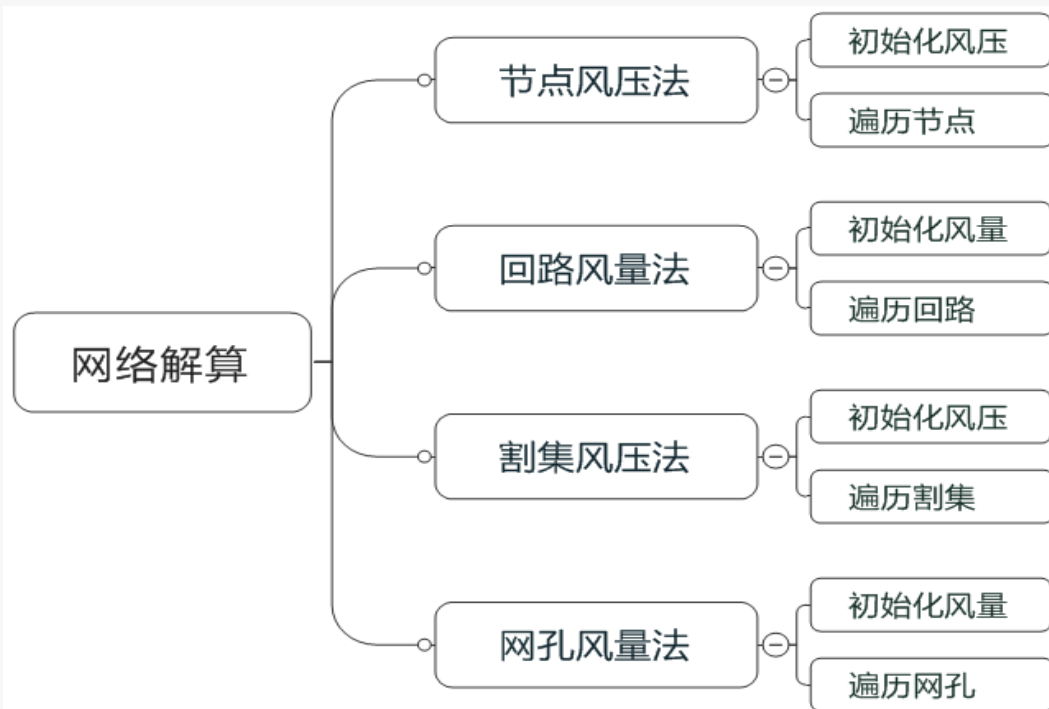
复杂风网解算的实质

复杂风网解算从数学意义上可归结为求解通风网络非线性代数方程组。



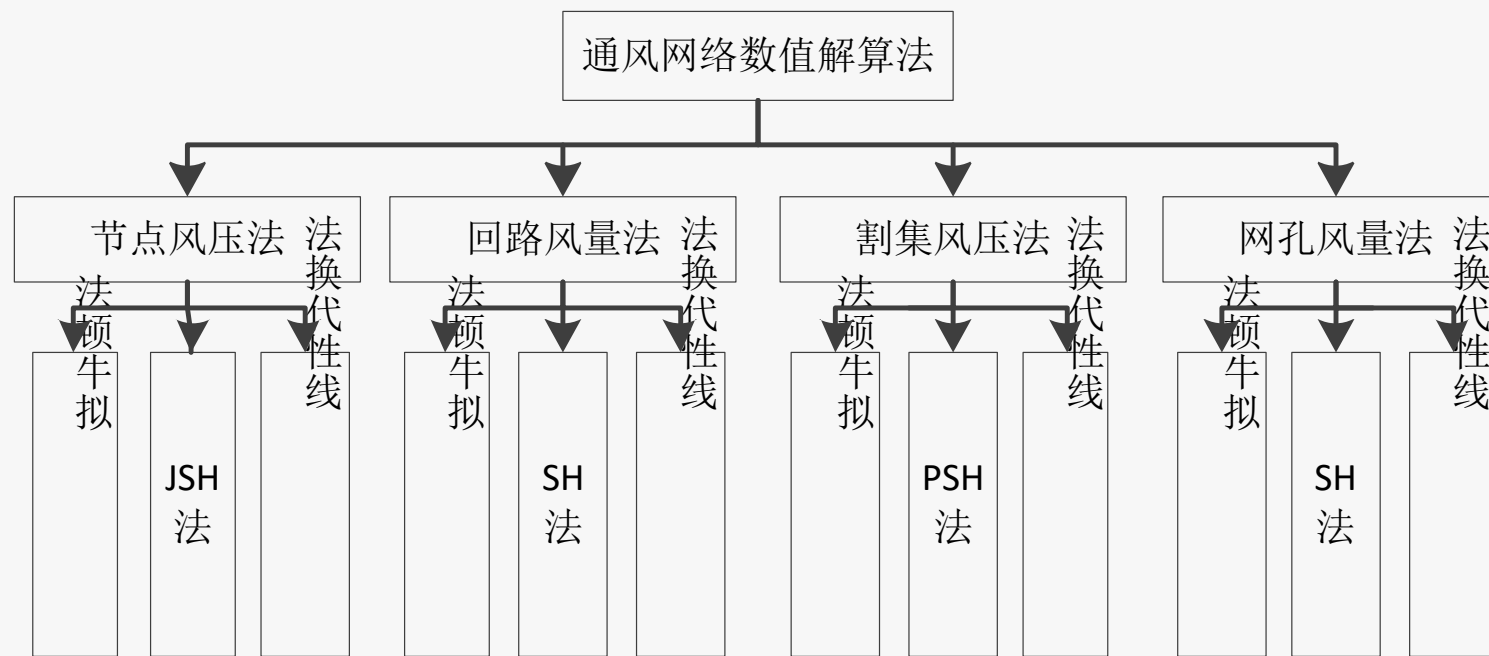


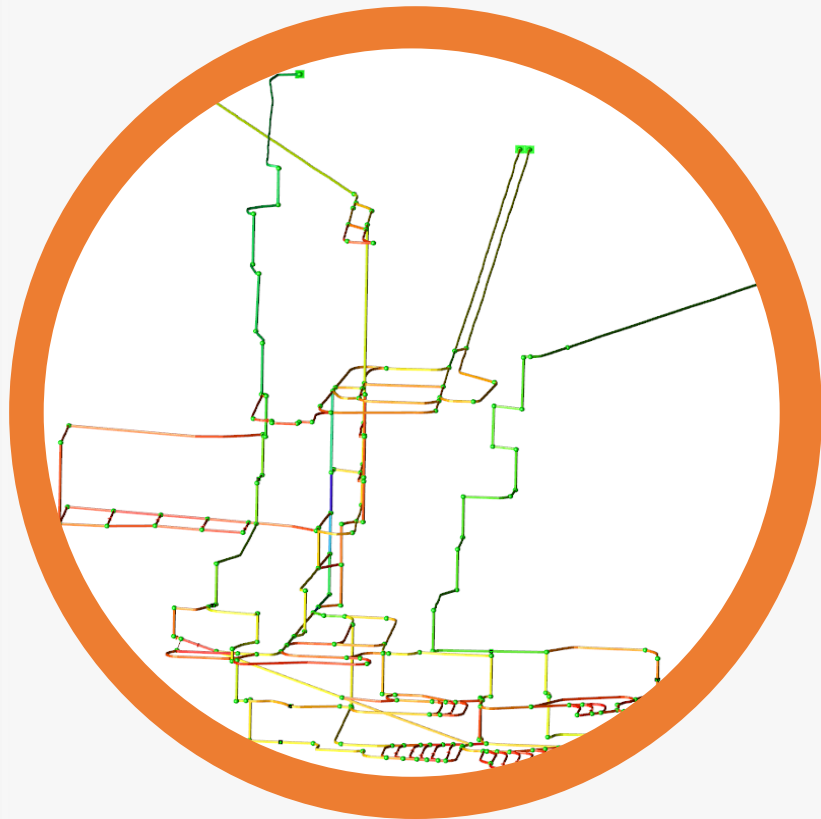
各种通风网络解算方法之间既有联系又有区别，其中数值解算法分类的主要依据是选取的基本未知量和迭代计算方法。





目前国内外采用数值法比较多，尤其是Hardy-Cross(Scot-Hinsley) 法、牛顿法、节点风压法、线性代换法等，它们又可归纳为三类：迭代法、斜量法和直接代入法。其中Scot-Hinsley法属于迭代法；拟牛顿法是近似的牛顿法，采用一阶导数来近似牛顿法的二阶导数，属于斜量法；平均风量逼近法则属于直接代入法。





基本思路

在回路风量法中，回路风量是一组完备的独立的风量变量。它是一种以回路风量（余树分支风量）为求解变量，初拟回路风量（余树分支风量），通过逐步校正回路风量来平衡回路不平衡风压。

拟牛顿法

拟牛顿法采用一阶导数来近似牛顿法，避免进行复杂的二阶导数运算，是求解非线性方程组常用的方法。先将非线性方程组化为线性方程组，再逐次迭代求解。

Hardy-Cross法

在拟牛顿法的基础上进一步简化线性方程组，使Jacobi矩阵形成主对角矩阵。



基本思路

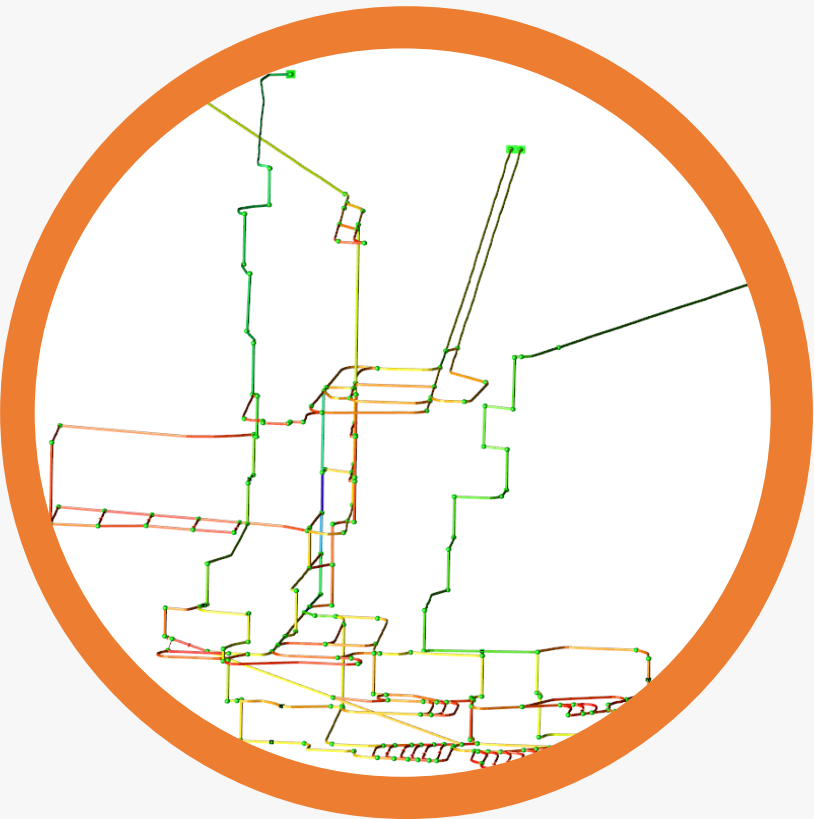
节点风压法是以一种以节点风压为求解变量，初拟节点风压，通过逐步校正节点风压来平衡节点不平衡风量的方法。

拟牛顿法

拟牛顿法采用一阶导数来近似牛顿法，避免进行复杂的二阶导数运算，是求解非线性方程组常用的方法。先将非线性方程组化为线性方程组，再逐次迭代求解。

Hardy-Cross法

在拟牛顿法的基础上进一步简化线性方程组，使Jacobi矩阵形成主对角矩阵。





8.2

矿井通风系统数字化优化

由开采生产与经营管理新模式的变革背景



01

矿井通风系统最优化

从巷道断面到整个系统，优化内容多样，严格来说，只有对整个矿井通风系统进行优化，才能得到真正的最优化，即全局最优化。

02

重要子系统的优化

在实际工程中，一项大工程往往可分成若干单项工程，一个大系统也可分为若干子系统。这些单项工程或子系统之间，往往具有相对的独立性。

03

条件改变影响优化

一个系统的优化问题，往往是在一些条件给定的前提下，求出一些未知参数的最优值。当已知条件不同时，则同一系统优化问题的内容和形式也不同。



通风网络调节优化

当网络中各分支的风阻为已知，各分支的风量都已给定或已计算出来后，如何确定通风机的最佳风压值和各调节设施的最佳位置和参数，使矿井通风总功率最小。

风量分配优化

网络中各分支的风阻为已知，主要用风地点的风量已给定后，如何求网络中其他各分支的最佳风量值，以使得矿井通风总功率为最小。

通风机的优选

当风机所需负担的风压和风量为已知，如何选择满足矿井通风要求且通风功率最小的风机。

风道断面的优化

当某井巷主要用于通风时，如何求出使该巷道的掘进费、维护费、通风电费的总和为最小的最优断面。

矿井风压的优化

在保证矿井需风量的前提下，求使巷道的掘进费、维护费和通风电费总和为最小的矿井风压值。

矿井通风系统优化设计

在矿井通风设计中，根据矿井实际条件，提出多种不同的设计方案。将这些方案用方案比较法，多目标决策法，层次分析法，模糊综合评判法等方法进行比较选择。



01

自然分风网络

自然分风网络所有分支的风量均为自然分配风量无需调节，这种类型网络的风量分配通常也称为通风网络解算。

02

控制型分风网络

控制型分风网络所有分支风量均已确定，控制型分风网络无须进行风量分配计算，但需要对检查按需分风风量的逻辑相关性。

03

混合型分风网络

混合型分风网络部分按需分风分支风量已确定，其余分支风量不定，混合型分风网络既需要考虑风量的最优分配问题。

全局通风优化法

全局通风优化法通过综合考虑风量分配优化和风量调控优化来实现整个通风网络的全局优化。全局通风优化法是通风网络优化调控的常用方法。然而，一般混合型通风网络优化调控的数学模型为非线性、非凸规划模型，涉及待求风量、调节设置位置及相应调节量等决策变量。

两步骤通风优化法

两步骤通风优化法将风量分配优化和风量调控优化作为两个独立的步骤来分别处理。两步骤通风优化法首先在按需分风条件下解算通风网络的自然分风结果，再确定自然分风条件下风量调控的优化方案。两步骤通风优化法的主要特点在于将风量变量和调节变量相互分离，并按两个步骤来分别处理，从而极大地降低了数学模型的变量规模和求解复杂度。



线性规划局限性

线性规划得到是严格满足所有约束条件的最优解，而实际通风优化问题的部分约束条件并不需要严格满足且相对于某些目标只需要获得满意解即可。

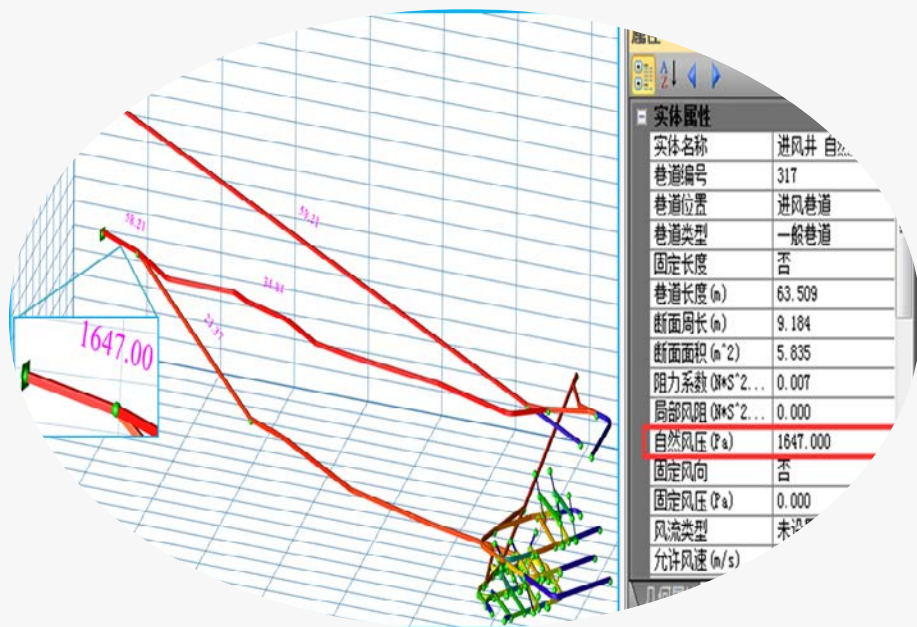
多目标规划模型

相比于多目标规划模型，线性规划模型存在以下局限性问题。

通风优化多目标规划

传统通风网络线性规划或非线性规划问题的目标函数和绝对约束可以通过引入目标值和偏差变量的方式转化为目标约束。





通风功率优化

对于纯自然分风网络，按自然分风确定风量，可以保证总功率最小。但是，对于一般按需分风网络，按自然分风确定各分支风量，就不一定能保证矿井通风总功率为最小。

风流最优分配

矿井通风网络中风流最优分配的目的，是在满足网络中按需分风分支风量的前提下，求使通风总功率为最小的其他分支的最佳风量值。

非线性规划

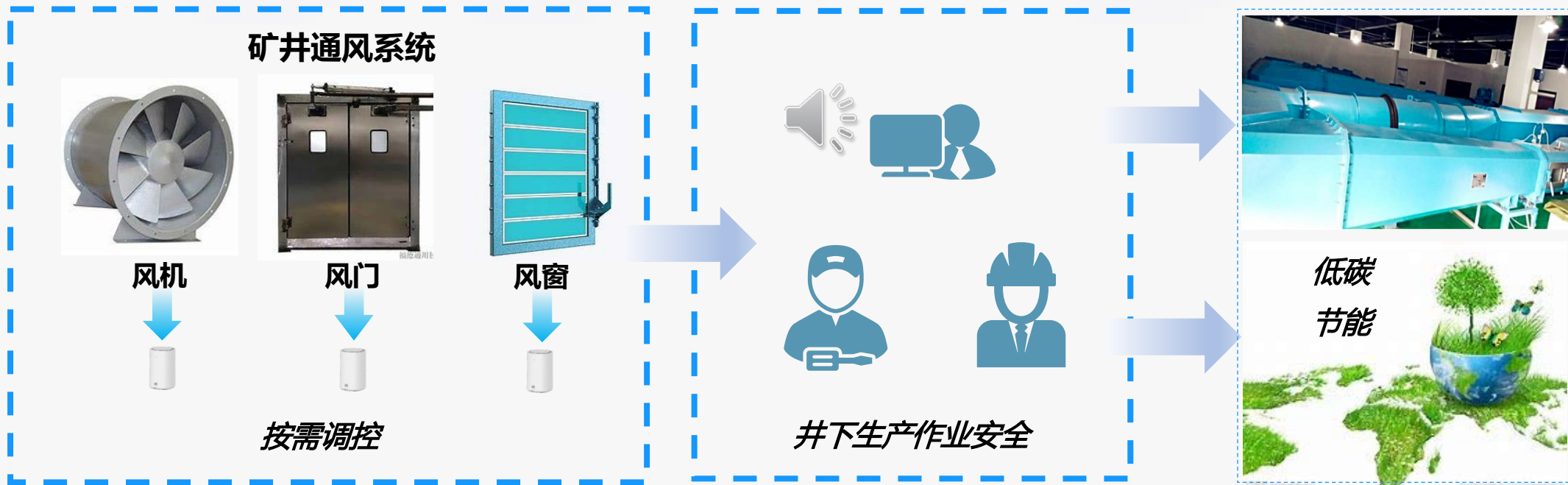
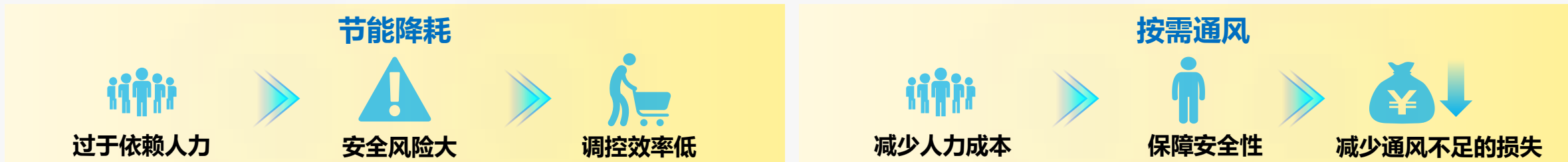
对于非线性规划问题，即使能解，其计算速度也会随着变量数目的增加而急剧降低。对于大型网络，这是不容忽视的问题。因此，欲获得一实际可行的模型和算法，应该一方面使模型凸性化，另一方面尽量减少变量数目。

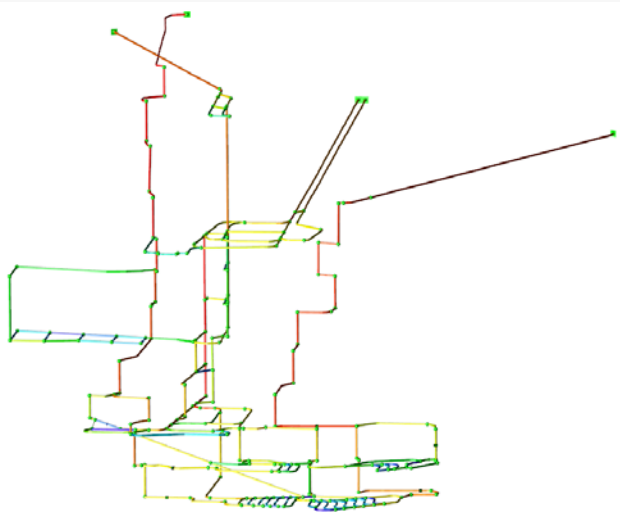


风量优化分析



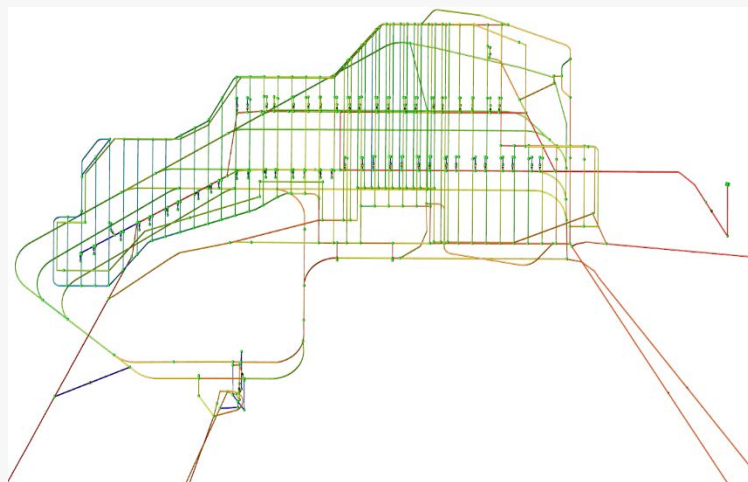
中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY





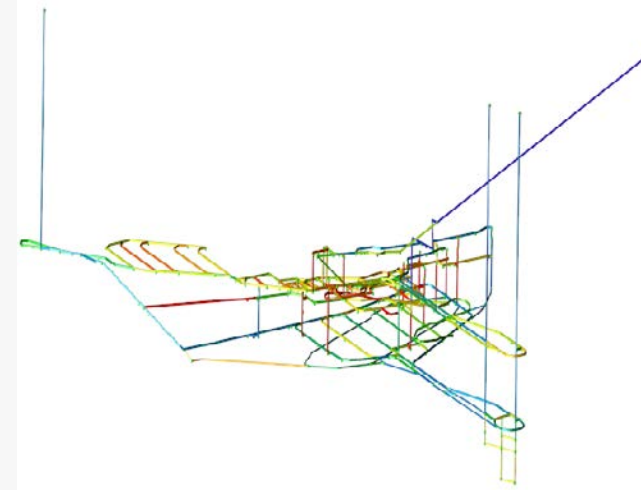
优化目标

实现矿井通风系统的高效、稳定和安全，满足矿井生产的需求。



优化内容

对矿井通风系统的网络结构、运行参数和设备性能进行优化，提高整体运行效率。



优化方案

无论网络中有多少种调节方案，都可分成以下三类：不可行方案、可行方案、最优方案。

矿井通风网络风流的调节

矿井通风网络风流的调节是一个复杂的问题，调节方案的多样性使得网络中存在无数种可能的调节方案。

调节方案的分类

在理论上，网络中有多少棵生成树，就可以构成多少个调节方案。无论网络中有多少种调节方案，都可分成以下三类。

不可行方案

方案中至少有一个调节点的调节方式无法实现，例如计算出某分支需降阻调节，而该分支无法降阻时，这个方案就是不可行方案。



通风网络调节问题

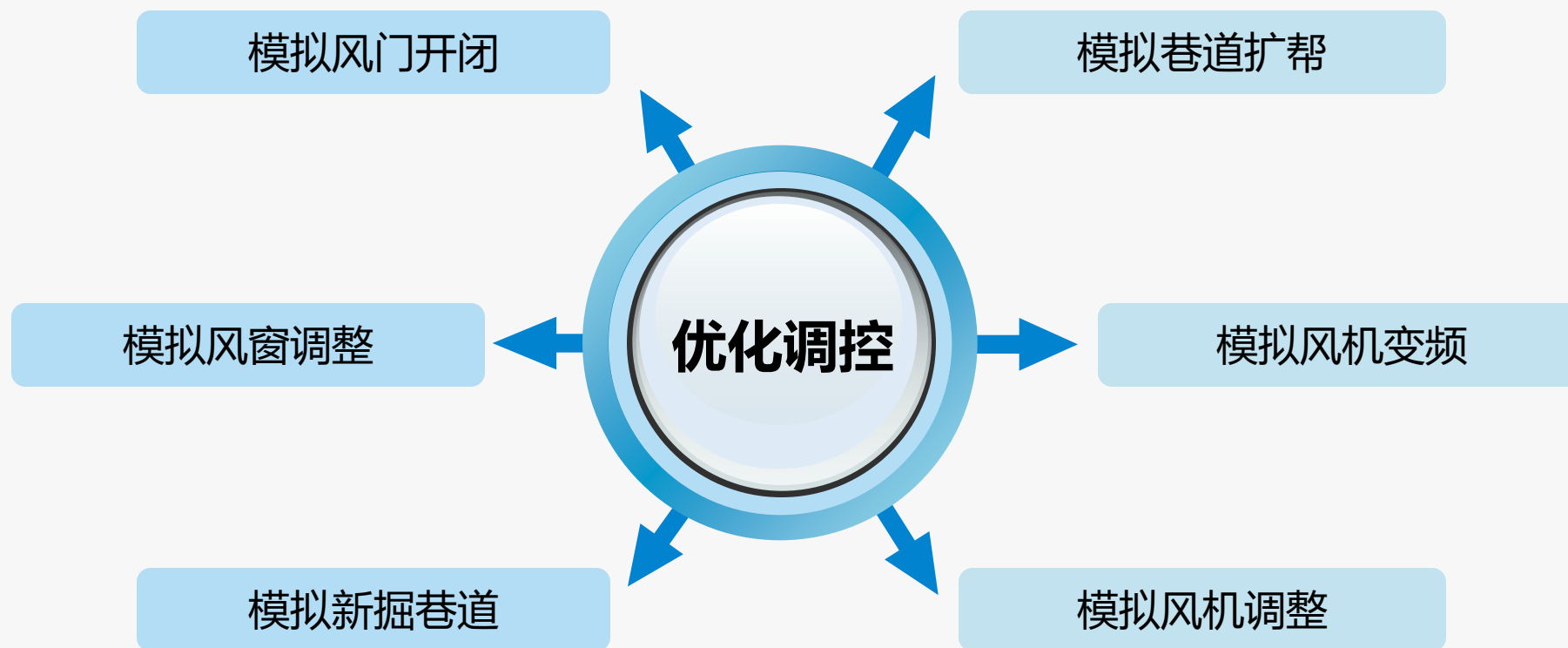
对于通风网络调节问题，可以取矿井通风总费用作为优化指标，由于通风电费在通风总费用中所占比重很大，也可取通风总功率作为优化指标。

调节方案的优化

在一个网络的众多调节方案中，必有多种方案是等效的，只需得到一个可行方案，就可实现通风网络的有效调节和控制，若得到一个最优方案，则可最经济地实现网络的调节。

数学模型建立

矿井通风系统最终经济指标为通风成本，建立数学模型优化目标使总经济费用最小，约束条件是满足安全生产技术条件。选取通风成本作为优化目标，通常有两种做法。





8.3

思考题

—— 在开采生产与经营管理新模式的变革背景



- 什么是矿井通风网络解算？矿井通风网络解算有什么意义？
- 请简要说明通风网络的三大流动规律。
- 矿井通风网络解算包括哪些计算方法？请简要说明其中一种方法的计算流程。
- 矿井通风网络根据按需分风的情况可以分为哪几种类型的网络？
- 矿井通风系统的优化包括哪些方面的优化？
- 请简要说明全局通风优化法和两步骤通风优化法的区别。
- 请列出通风网络风量分配优化的数学模型，并说明该模型的特点。
- 请列出通风网络调节优化的数学模型，并说明该模型的特点。



中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



Q&A