



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 105608636 B

(45) 授权公告日 2021.08.31

(21) 申请号 201510947380.4

(22) 申请日 2015.12.17

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105608636 A

(43) 申请公布日 2016.05.25

(73) 专利权人 国家电网公司

地址 100017 北京市西城区西长安街86号

专利权人 国网湖北省电力公司宜昌供电公司

(72) 发明人 舒征宇 汪敬忠 胡为民 丁思未
俞翰 叶洋

(74) 专利代理机构 宜昌市三峡专利事务所
42103

代理人 成钢

(51) Int.CI.

G06Q 10/06 (2012.01)

G06Q 50/06 (2012.01)

G06F 16/2455 (2019.01)

G06F 16/2458 (2019.01)

G06N 3/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 104091243 A, 2014.10.08

CN 104166944 A, 2014.11.26

CN 103679350 A, 2014.03.26

审查员 丛磊

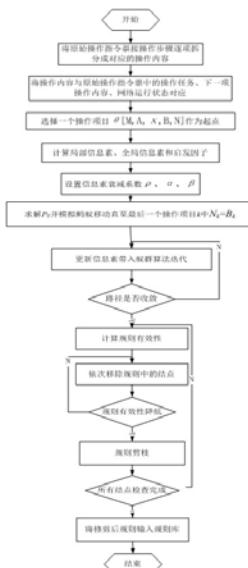
权利要求书3页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于规则挖掘的电网倒闸操作规则库
建立方法

(57) 摘要

本发明提出的一种基于规则挖掘的电网倒闸操作规则库建立方法。该方法将数据挖掘引入到电网调度领域中,在对历史存档的电网操作指令票进行预处理的前提下,采用蚁群算法搜索潜在的分类规则,并通过规则有效性指标对规则进行剪枝形成规则库。本发明所提出的方法可以适用于不同地域,有效避免了地域差异导致的规则库兼容性等问题,可以广泛应用于电网操作指令票的自动检验系统和自动生成系统。更好辅助电网操作指令票的审核,提高电网操作指令票审核效率和正确率,降低电网调度员的劳动强度,减少电网操作中的误操作、避免经济损失。



1. 一种基于规则挖掘的电网倒闸操作规则库建立方法, 其特征在于, 依次包括以下步骤:

建立电力网络状态模型;

历史操作指令票的数据预处理;

采用蚁群算法搜索;

规则修剪;

所述建立电力网络状态模型包括以下步骤:

步骤一: 建立与电网一次设备实际结构相符的网络拓扑模型, 将母线、断路器、变压器作为节点, 将输电线路等效为网络拓扑模型中的边; 增加断路器和母线、线路之间的虚拟连接并简化为网络拓扑模型中的边, 增加母线和变压器之间的虚拟连接并简化为网络拓扑模型中的边; 由此可以得到表征电网中一次设备连接关系的连接矩阵 A_0 :

$$A_0 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & i \neq j, e_{ij} \in G_0 \\ \infty & i \neq j, e_{ij} \notin G_0 \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (2)$$

式中 G_0 为电力系统的将电力网络抽象得到的简单图, e_{ij} 为节点 i 到节点 j 的边, n 为电网中母线、断路器、变压器的个数之和; 连接矩阵 A_0 描述了电网中一次设备之间的连接关系;

步骤二: 为连接矩阵 A_0 中的对角元素赋值, 形成一次设备运行状态矩阵, 上一步中得到的连接矩阵 A_0 为电网中一次设备之间的连接关系, 不能全面反映电网一次设备的运行状态, 因此对连接矩阵 A_0 中的对角元素进行赋值, 得到反映电网一次设备运行状态的网络状态矩阵 A :

$$A = \begin{pmatrix} w_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & w_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & w_{nn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$w_{ii} = \begin{cases} 0 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备处于冷备用状态} \\ 1 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备处于热备用状态} \\ 2 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备处于运行状态} \\ -1 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备处于检修状态} \end{cases} \quad (4)$$

步骤三: 建立与电网一次设备运行状态相对应的二次设备运行状态向量, 在进行电网倒闸操作时会涉及到一次与二次设备的操作; 因此, 为表征二次设备的运行状态, 建立与网络状态矩阵 A 相对应的二次设备运行状态向量, 记做 x ,

$$x = [x_1 \cdots x_i \cdots x_n]^T \quad (5)$$

$$\chi_i = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备的重合闸装置处于加用状态} \\ -1 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备的重合闸装置处于停用状态} \\ 2 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备的备自投装置处于加用状态} \\ -2 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备的备自投装置处于停用状态} \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备的保护装置处于停用状态} \end{cases} \quad (6)$$

所述历史操作指令票的数据预处理包括以下步骤：

步骤一：一张原始操作指令票包含操作任务和操作内容，其中，操作任务表示操作指令票需要达到的目的，操作内容表示具体的操作步骤，将原始操作指令票按操作步骤逐项拆分成对应的操作内容，电网操作指令票都是逐项填写，每一步只含有对一个设备的操作指令；

步骤二：将原始操作指令票的操作任务、执行当前操作的网络状态矩阵、执行当前操作的二次设备运行状态向量、当前操作项目的操作内容、下一项操作项目的操作内容五项属性组合形成标准化的数据样本，称作标准化处理后的操作项目；将电网操作指令票进行划分表示为如下形式：

$$S = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n\} \quad (7)$$

$$\theta_i = [M, A, x, B, N] \quad (8)$$

S为电网操作指令票，表示为标准化处理后的操作项目的集合， θ_i 为标准化处理后的操作项目；若电网操作指令票S由n个操作步骤完成，那么该操作指令票则可以划分为n个标准化处理后的操作项目 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n\}$ ；其中M为原始操作指令票的操作任务，A为执行当前操作的网络状态矩阵，x为执行当前操作的二次设备运行状态向量，B为当前操作项目的操作内容，N为下一项操作项目的操作内容；

所述采用蚁群算法搜索包括以下步骤：

步骤一：计算局部信息素、全局信息素和启发因子，从操作项目的集合中选取一个操作项目作为起点，令局部信息素为：

$$\tau_{ij}(0) = P(N_i = B_j | B_i) = \frac{\psi|_{N_i=B_j|B_i}}{\psi|_{B_i}} \quad i, j \in S \quad (9)$$

$P(N_i = B_j | B_i)$ 为所有操作项目的集合中，操作项目 θ_i 执行后执行操作项目 θ_j 的概率；式中 $\psi|_{B_i}$ 为集合S中当前操作内容为 B_i 的操作项目个数， $\psi|_{N_i=B_j|B_i}$ 则为当前操作内容为 B_i 且下一项操作内容为 N_i 的操作项目个数，其中 $N_i = B_j$ ；

令全局信息素为：

$$\Delta\tau_{ij}(t) = X_{ij} \times Y_{ij} = \frac{\text{cov}(A_i, A_j)}{\delta_{A_i} \delta_{A_j}} \times \frac{\text{cov}(\chi_i, \chi_j)}{\chi_{A_i} \chi_{A_j}} \quad (10)$$

其中 X_{ij} , Y_{ij} 为网络状态矩阵和二次设备运行状态向量的皮尔森相关系数，分别表示操作项目 θ_i 执行前和操作项目 θ_j 执行前电网一次设备运行状态相似程度和二次设备运行状态相似程度， δ_{A_i} 和 δ_{A_j} 分别表示 A_i 和 A_j 对应的标准差；

令启发因子为：

$$\eta_j = P(B_j | M) = \frac{\phi |(B_j, M)}{\phi | M} \quad (11)$$

即所有操作任务为M的操作项目中操作内容为B_j的概率,其大小为操作任务为M且操作内容为B_j的操作项目个数除以操作任务为M的操作项目个数;

步骤二:求解P^k_{ij}并模拟蚂蚁移动直至最后一个操作项目k中N_k=B_k,表示一条完整的路径搜索完成;

步骤三:更新全局信息素带入蚁群算法迭代,直至收敛,得到一条路径,并将其输入规则库,蚁群算法的数学模型可以表示为下式:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} & j \in S \\ 0 & j \notin S \end{cases} \quad (12)$$

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \tau_{ij}(t) + \rho \Delta \tau_{ij}(t) \quad (13)$$

$$\Delta \tau_{ij}(t) = X_{ij} \times Y_{ij} = \frac{\text{cov}(A_i, A_j)}{\delta_{A_i} \delta_{A_j}} \times \frac{\text{cov}(\chi_i, \chi_j)}{\chi_{A_i} \chi_{A_j}} \quad (10)$$

式(12)表示蚂蚁k在t时刻从节点i向节点j移动的几率,即操作项目θ_i后执行操作项目θ_j的几率,S为所有操作项目的集合;τ_{ij}(t)、η_{ij}分别为t时刻的局部信息素和启发因子,即局部寻优和全局寻优的影响因子,△τ_{ij}(t)为全局信息素;设置α=0.7、β=0.3、ρ=0.5;

所述规则修剪包括以下步骤:

步骤一:计算规则有效性,规则的有效性Q可以用下式进行计算:

$$Q = \begin{cases} 1 & fp + fn + tn = 0 \\ \frac{tp}{tp + fn} & fp + tn = 0 \\ 0 & tp + fn = 0 \\ \frac{tp}{tp + fn} \cdot \frac{tn}{fp + tn} & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

tp——规则前件后件都适合的样例数;

fp——规则前件适合后件不适合的样例数;

fn——规则前件不适合后件适合的样例数;

tn——规则前件后件都不适合的样例数;

式中tp、fp、fn、tn的具体数值可以通过将挖掘得到的规则R[θ_i]在历史操作票中检验计算得出;

步骤二:规则剪枝,删除规则R[θ_i]中的结点,即规则中的操作项目,重新计算规则的有效性,若存在有效性降低的情况则恢复删除,将修剪后的规则计入规则库;若不存在有效性降低的情况则继续删除结点,直到所有结点检验完毕。

一种基于规则挖掘的电网倒闸操作规则库建立方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电网调度操作人工智能技术领域,更具体的说,涉及一种基于规则挖掘的电网倒闸操作规则库建立方法。

背景技术

[0002] 随着我国工业化进程的不断加快以及经济水平的不断提高、电网建设不断加强,电力网络则越来越复杂。与之对应电网调度倒闸操作涉及到的一次、二次设备的操作愈加复杂,要快速、准确的填写和审核电网调度操作指令票也显得越发困难。因此越来越多的研究人员试图将人工智能方面的研究成果应用于该领域,建立以人工智能为基础的电网操作规则库,从而达到提高效率,提升成票准确率的目的。

[0003] 目前,我国的电网调度采取分级管理,各级电网对应各级调度,具有责任明确、对事故响应快速等特点。然而由于各级(或各地区)电网根据地域特点和设备特点分别制定其调度规程,导致同一操作任务在国内不同地域的电网中调度操作步骤、内容以及操作指令票的填写标准存在差异(即电网倒闸操作规则存在差异)。为此,现在关于操作指令票检验相关研究中较为普遍的做法是:先让程序员理解电网调度规程,然后以程序员理解的逻辑建立相应的规则库。但是这样处理不能解决不同地域的调度规程存在差异的问题,不能广泛推广,并且通过这种方式形成的规则库的准确性受到程序员理解准确程度的制约,当调度规程修编后,规则库不能及时更正。

发明内容

[0004] 发明提出一种基于数据挖掘的电网倒闸操作规则库建立方法,以历史操作指令票为依据,采用数据挖掘的方法挖掘电网倒闸操作的操作规则,根据不同地域的历史操作指令票挖掘形成不同的操作规则库。

[0005] 为了实现上述目的,本发明的技术方案是:一种基于规则挖掘的电网倒闸操作规则库建立方法,依次包括以下步骤:

[0006] 建立电力网络状态模型;

[0007] 历史操作指令票的数据预处理;

[0008] 采用蚁群算法搜索;

[0009] 规则修剪。

[0010] 所述建立电力网络状态模型包括以下步骤:

[0011] 步骤一:建立与电网一次设备实际结构相符的网络拓扑模型,将母线、断路器、变压器作为节点,将输电线路等效为网络拓扑模型中的边;增加断路器和母线、线路之间的虚拟连接并简化为网络拓扑模型中的边,增加母线和变压器之间的虚拟连接并简化为网络拓扑模型中的边。由此可以得到表征电网中电气设备连接关系的连接矩阵 A_0 :

$$[0012] \quad A_0 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$[0013] \quad a_{ij} = \begin{cases} 1 & i \neq j, e_{ij} \in G_0 \\ \infty & i \neq j, e_{ij} \notin G_0 \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (2)$$

[0014] 式中 G_0 为电力系统的将电力网络抽象得到的简单图, e_{ij} 为节点i到节点j的边, n 为电网中母线、断路器、变压器的个数之和; 该矩阵描述了电网中一次设备之间的连接关系;

[0015] 步骤二: 为网络拓扑模型中的对角元素赋值, 形成一次设备运行状态矩阵, 上一步中得到的网络拓扑模型其实质为电网一次设备之间的连接关系, 不能全面反映电网一次设备的运行状态, 因此对连接矩阵 A_0 中的对角元素进行赋值, 得到反映电网一次设备运行状态的网络状态矩阵A:

$$[0016] \quad A = \begin{pmatrix} w_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & w_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & w_{nn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$[0017] \quad w_{ii} = \begin{cases} 0 & \text{节点}i\text{所代表设备处于冷备用状态} \\ 1 & \text{节点}i\text{所代表设备处于热备用状态} \\ 2 & \text{节点}i\text{所代表设备处于运行状态} \\ -1 & \text{节点}i\text{所代表设备处于检修状态} \end{cases} \quad (4)$$

[0018] 步骤三: 建立与电网一次设备运行状态相对应的二次设备运行状态向量, 在进行电网倒闸操作时会涉及到一次与二次设备的操作; 因此, 为表征二次设备的运行状态, 建立与一次设备运行状态矩阵相对应的二次设备运行状态向量, 记做x

$$[0019] \quad x = [x_1 \cdots x_n]^T \quad (5)$$

$$[0020] \quad \chi_i = \begin{cases} 1 & \text{节点}i\text{所代表设备的重合闸装置处于加用状态} \\ -1 & \text{节点}i\text{所代表设备的重合闸装置处于停用状态} \\ 2 & \text{节点}i\text{所代表设备的备自投装置处于加用状态} \\ -2 & \text{节点}i\text{所代表设备的备自投装置处于停用状态} \\ 0 & \text{节点}i\text{所代表设备的保护装置处于停用状态} \end{cases} \quad (6)$$

[0021] 所述历史操作指令票的数据预处理包括以下步骤:

[0022] 步骤一: 将原始操作指令票按操作步骤逐项拆分成对应的操作内容, 电网操作指令票都是逐项填写, 每一步只含有对一个设备的操作指令;

[0023] 步骤二: 将操作内容与原始操作指令票中的操作任务、下一项操作内容、网络运行状态对应, 为保障每个数据样本尽可能多的含有全局信息, 将本项操作内容、下一项操作内

容、原始操作票的操作任务、执行该操作的网络一次设备状态矩阵、执行该操作的网络二次设备状态向量五项属性组合形成标准化的数据样本,称作“操作项目”;将电网操作指令票进行划分表示为如下形式:

[0024] $S = \{\theta_1, \theta_2 \dots \theta_i \dots \theta_n\}$ (7)

[0025] $\theta = [M, A, x, B, N]$ (8)

[0026] S 为操作指令票,表示为操作项目的集合, θ 为标准化处理后的操作项目;若操作指令票 S 由 n 个操作步骤完成,那么该操作指令票则可以划分为 n 个操作项目 $\{\theta_1, \theta_2 \dots \theta_i \dots \theta_n\}$; θ 为划分后得到的操作项目,由五维向量表示,其中 M 为原操作票的操作任务, A 为进行该操作前电网的一次设备运行状态矩阵, x 为进行该操作前的电网二次设备运行状态向量, B 为该操作项目对应的操作内容, N 为原始操作指令票中下一项操作项目的操作内容。

[0027] 所述采用蚁群算法搜索包括以下步骤:

[0028] 步骤一:计算局部信息素、全局信息素和启发因子,从操作项目集合中选取一个操作项目作为起点,令局部信息素为:

[0029] $\tau_{ij}(0) = P(N_i = B_j | B_i) = \frac{\psi|_{N_i=B_j}}{\psi|_{B_i}} \quad i, j \in S$ (9)

[0030] $P(N_i = B_j | B_i)$ 为所有操作项目的集合中,操作项目 i 执行后执行操作项目 j 的概率。式中 $\psi|_{B_i}$ 为操作项目集合中本项操作内容为 B_i 的操作项目个数, $\psi|_{N_i=B_j}$ 则为本项操作内容为 B_i 且下项操作内容为 N_i 的操作项目个数,其中 $N_i = B_j$;

[0031] 令全局信息素为:

[0032] $\Delta \tau_{ij}(t) = X_{ij} \times Y_{ij} = \frac{\text{cov}(A_i, A_j)}{\delta_{A_i} \delta_{A_j}} \times \frac{\text{cov}(\chi_i, \chi_j)}{\chi_{A_i} \chi_{A_j}}$ (10)

[0033] 其中 X, Y 为一次状态矩阵和二次状态向量的皮尔森相关系数,分别表示操作项目 i 执行前和操作项目 j 执行前电网一次设备运行状态相似程度和二次设备运行状态相似程度;由于每个操作项目 θ 只代表单一的操作,相邻的两次操作之间电网的设备运行状态会十分接近,以两个操作项目的电网运行状态的皮尔森相关系数作为全局信息素可以在迭代过程中快速剔除不相关的操作项目,加快迭代收敛;

[0034] 令启发因子为:

[0035] $\eta_{ij} = P(B_j | M) = \frac{\phi|_{(B_j, M)}}{\phi|_M}$ (11)

[0036] 即所有操作任务为 M 的操作项目中本项操作内容为 B_j 的概率,其大小为操作任务为 M 且操作内容为 B_j 的操作项目个数除以操作任务为 M 的操作项目个数; $\tau_{ij}(t)$ 、 η_{ij} 分别为 t 时刻的局部信息素和启发因子,即局部寻优和全局寻优的影响因子, $\Delta \tau_{ij}(t)$ 为全局信息素;设置 $\alpha=0.7$ 、 $\beta=0.3$ 、 $\rho=0.5$;

[0037] 步骤二:求解 P_{ij} 并模拟蚂蚁移动直至最后一个操作项目 k 中 $N_k = B_k$,表示一条完整的路径搜索完成;

[0038] 步骤三:更新信息素带入蚁群算法迭代,直至收敛,得到一条路径,并将其输入规则库,蚁群算法的数学模型可以表示为下式:

$$[0039] P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} & j \in S \\ 0 & j \notin S \end{cases} \quad (12)$$

$$[0040] \tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \tau_{ij}(t) + \rho \Delta \tau_{ij}(t) \quad (13)$$

$$[0041] \Delta \tau_{ij}(t) = X_{ij} \times Y_{ij} = \frac{\text{cov}(A_i, A_j)}{\delta_{A_i} \delta_{A_j}} \times \frac{\text{cov}(\chi_i, \chi_j)}{\chi_{A_i} \chi_{A_j}} \quad (14)$$

[0042] 式(12)表示蚂蚁k在t时刻从节点i向节点j移动的几率,即操作项目i后执行操作项目j的几率,S为所有操作项目的集合。

[0043] 所述规则修剪包括以下步骤:

[0044] 步骤一:计算规则有效性,规则的有效性Q可以用下式进行计算:

$$[0045] Q = \begin{cases} 1 & fp + fn + tn = 0 \\ \frac{tp}{tp + fn} & fp + tn = 0 \\ 0 & tp + fn = 0 \\ \frac{tp}{tp + fn} \cdot \frac{tn}{fp + tn} & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

[0046] tp——规则前件后件都适合的样例数;

[0047] fp——规则前件适合后件不适合的样例数;

[0048] fn——规则前件不适合后件适合的样例数;

[0049] tn——规则前件后件都不适合的样例数;

[0050] 式中tp、fp、fn、tn的具体数值可以通过将挖掘得到的规则R[θ]在历史操作票中检验计算得出;

[0051] 步骤二:规则剪枝,删除规则R[θ]中的结点,即规则中的操作项目,重新计算规则的有效性,若存在有效性降低的情况则恢复删除,将修剪后的规则计入规则库;若不存在有效性降低的情况则继续删除结点,直到所有结点检验完毕。

[0052] 从上述方法可以发现,本发明提出的一种基于规则挖掘的电网倒闸操作规则库建立方法。该方法将数据挖掘引入到电网调度领域中,在对历史存档的电网操作指令票进行预处理的前提下,采用蚁群算法搜索潜在的分类规则,并通过规则有效性指标对规则进行剪枝形成规则库。本发明所提出的方法可以适用于不同地域,有效避免了地域差异导致的规则库兼容性等问题,可以广泛应用于电网操作指令票的自动检验系统和自动生成系统。更好辅助电网操作指令票的审核,提高电网操作指令票审核效率和正确率,降低电网调度员的劳动强度,减少电网操作中的误操作、避免经济损失。

附图说明

[0053] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步说明:

[0054] 图1为本发明建立电力网络状态模型的流程图;

[0055] 图2为本发明历史操作指令票的数据预处理的流程图;

- [0056] 图3为本发明采用蚁群算法搜索的流程图；
- [0057] 图4为本发明规则修剪的流程图；
- [0058] 图5为本发明的方法流程图。

具体实施方式

- [0059] 一种基于规则挖掘的电网倒闸操作规则库建立方法,依次包括以下步骤:
- [0060] 建立电力网络状态模型;
- [0061] 历史操作指令票的数据预处理;
- [0062] 采用蚁群算法搜索;
- [0063] 规则修剪。
- [0064] 如图1所示,所述建立电力网络状态模型包括以下步骤:
- [0065] S11:建立与电网一次设备实际结构相符的网络拓扑模型,将母线、断路器、变压器作为节点,将输电线路等效为网络拓扑模型中的边;增加断路器和母线、线路之间的虚拟连接并简化为网络拓扑模型中的边,增加母线和变压器之间的虚拟连接并简化为网络拓扑模型中的边。由此可以得到表征电网中电气设备连接关系的连接矩阵 A_0 :

$$[0066] A_0 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$[0067] a_{ij} = \begin{cases} 1 & i \neq j, e_{ij} \in G_0 \\ \infty & i \neq j, e_{ij} \notin G_0 \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (2)$$

- [0068] 式中 G_0 为电力系统的将电力网络抽象得到的简单图, e_{ij} 为节点i到节点j的边,n为电网中母线、断路器、变压器的个数之和;该矩阵描述了电网中一次设备之间的连接关系;

- [0069] S12:为网络拓扑模型中的对角元素赋值,形成一次设备运行状态矩阵,上一步中得到的网络拓扑模型其实质为电网一次设备之间的连接关系,不能全面反映电网一次设备的运行状态,因此对连接矩阵 A_0 中的对角元素进行赋值,得到反映电网一次设备运行状态的网络状态矩阵A:

$$[0070] A = \begin{pmatrix} w_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & w_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & w_{nn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$[0071] \quad w_i = \begin{cases} 0 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备处于冷备用状态} \\ 1 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备处于热备用状态} \\ 2 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备处于运行状态} \\ -1 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备处于检修状态} \end{cases} \quad (4)$$

[0072] S13: 建立与电网一次设备运行状态相对应的二次设备运行状态向量, 在进行电网倒闸操作时会涉及到一次与二次设备的操作; 因此, 为表征二次设备的运行状态, 建立与一次设备运行状态矩阵相对应的二次设备运行状态向量, 记做x

$$[0073] \quad x = [x_1 \cdots x_n]^T \quad (5)$$

$$[0074] \quad \chi_i = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备的重合闸装置处于加用状态} \\ -1 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备的重合闸装置处于停用状态} \\ 2 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备的备自投装置处于加用状态} \\ -2 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备的备自投装置处于停用状态} \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 所代表设备的保护装置处于停用状态} \end{cases} \quad (6)$$

[0075] 通过上述三个步骤, 实际电网中一次设备与二次设备的运行状态以及整个电网的连接关系可以由网络状态矩阵A和二次设备运行状态向量x表示。

[0076] 如图2所示, 所述历史操作指令票的数据预处理包括以下步骤:

[0077] 一张完整的操作指令票包含两个部分: 1) 操作任务, 表示操作指令票需要达到的目的。2) 操作内容, 表示具体的操作步骤。

[0078] S21: 将原始操作指令票按操作步骤逐项拆分成对应的操作内容, 电网操作指令票都是逐项填写, 每一步只含有对一个设备的操作指令;

[0079] S22: 将操作内容与原始操作指令票中的操作任务、下一项操作内容、网络运行状态对应, 为保障每个数据样本尽可能多的含有全局信息, 将本项操作内容、下一项操作内容、原始操作票的操作任务、执行该操作的网络一次设备状态矩阵、执行该操作的网络二次设备状态向量五项属性组合形成标准化的数据样本, 称作“操作项目”; 将电网操作指令票进行划分表示为如下形式:

$$[0080] \quad S = \{\theta_1, \theta_2 \cdots \theta_i \cdots \theta_n\} \quad (7)$$

$$[0081] \quad \theta = [M, A, x, B, N] \quad (8)$$

[0082] S为操作指令票, 表示为操作项目的集合, θ 为标准化处理后的操作项目; 若操作指令票S由n个操作步骤完成, 那么该操作指令票则可以划分为n个操作项目 $\{\theta_1, \theta_2 \cdots \theta_i \cdots \theta_n\}$; θ 为划分后得到的操作项目, 由五维向量表示, 其中M为原操作票的操作任务, A为进行该操作前电网的一次设备运行状态矩阵, x为进行该操作前的电网二次设备运行状态向量, B为该操作项目对应的操作内容, N为原始操作指令票中下一项操作项目的操作内容。

[0083] 综上所述, 采用以上步骤进行预处理后的操作票可以表示为有关联关系的操作项目, 并且每个操作项目有且仅有五个属性。

[0084] 如图3所示, 所述采用蚁群算法搜索包括以下步骤:

[0085] S31: 计算局部信息素、全局信息素和启发因子, 从操作项目集合中选取一个操作项目作为起点, 令局部信息素为:

$$[0086] \quad \tau_{ij}(0) = P(N_i = B_j | B_i) = \frac{\psi|_{N_i=B_j}}{\psi|_{B_i}} \quad i, j \in S \quad (9)$$

[0087] $P(N_i = B_j | B_i)$ 为所有操作项目的集合中, 操作项目 i 执行后执行操作项目 j 的概率。式中 $\psi|_{B_i}$ 为操作项目集合中本项操作内容为 B_i 的操作项目个数, $\psi|_{N_i=B_j}$ 则为本项操作内容为 B_i 且下项操作内容为 N_i 的操作项目个数, 其中 $N_i = B_j$;

[0088] 令全局信息素为:

$$[0089] \quad \Delta \tau_{ij}(t) = X_{ij} \times Y_{ij} = \frac{\text{cov}(A_i, A_j)}{\delta_{A_i} \delta_{A_j}} \times \frac{\text{cov}(\chi_i, \chi_j)}{\chi_{A_i} \chi_{A_j}} \quad (10)$$

[0090] 其中 X, Y 为一次状态矩阵和二次状态向量的皮尔森相关系数, 分别表示操作项目 i 执行前和操作项目 j 执行前电网一次设备运行状态相似程度和二次设备运行状态相似程度; 由于每个操作项目 θ 只代表单一的操作, 相邻的两次操作之间电网的设备运行状态会十分接近, 以两个操作项目的电网运行状态的皮尔森相关系数作为全局信息素可以在迭代过程中快速剔除不相关的操作项目, 加快迭代收敛;

[0091] 令启发因子为:

$$[0092] \quad \eta_{ij} = P(B_j | M) = \frac{\phi|_{(B_j, M)}}{\phi|M} \quad (11)$$

[0093] 即所有操作任务为 M 的操作项目中本项操作内容为 B_j 的概率, 其大小为操作任务为 M 且操作内容为 B_j 的操作项目个数除以操作任务为 M 的操作项目个数; $\tau_{ij}(t)$ 、 η_{ij} 分别为 t 时刻的局部信息素和启发因子, 即局部寻优和全局寻优的影响因子, $\Delta \tau_{ij}(t)$ 为全局信息素; 设置 $\alpha=0.7$ 、 $\beta=0.3$ 、 $\rho=0.5$;

[0094] S32: 求解 P_{ij} 并模拟蚂蚁移动直至最后一个操作项目 k 中 $N_k = B_k$, 表示一条完整的路径搜索完成;

[0095] S33: 更新信息素带入蚁群算法迭代, 直至收敛, 得到一条路径, 并将其输入规则库, 蚁群算法的数学模型可以表示为下式:

$$[0096] \quad P_j^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} & j \in S \\ 0 & j \notin S \end{cases} \quad (12)$$

$$[0097] \quad \tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \tau_{ij}(t) + \rho \Delta \tau_{ij}(t) \quad (13)$$

$$[0098] \quad \Delta \tau_{ij}(t) = X_{ij} \times Y_{ij} = \frac{\text{cov}(A_i, A_j)}{\delta_{A_i} \delta_{A_j}} \times \frac{\text{cov}(\chi_i, \chi_j)}{\chi_{A_i} \chi_{A_j}} \quad (14)$$

[0099] 式 (12) 表示蚂蚁 k 在 t 时刻从节点 i 向节点 j 移动的几率, 即操作项目 i 后执行操作项目 j 的几率, S 为所有操作项目的集合。

[0100] 采用以上算法对路径进行搜索直到最新搜索到的操作项目中“下项操作内容”为空, 则停止搜索并形成一条路径。经过迭代使得路径收敛得到一条分类规则, 记做 $R[\theta]$ 。其实质为操作项目的组合序列。

[0101] 以操作项目集合 S 中的每个操作项目为起点, 采用步骤 1 的搜索方法, 可以得到对

应的分类规则 $R = [\theta_1, \theta_2 \dots \theta_i \dots \theta_n]$ 。而这样搜索得到的规则中会存在大量的重复。为此还需要对规则进行修剪;如图4所示,所述规则修剪包括以下步骤:

[0102] S41:计算规则有效性,规则的有效性Q可以用下式进行计算:

$$[0103] Q = \begin{cases} 1 & fp + fn + tn = 0 \\ \frac{tp}{tp + fn} & fp + tn = 0 \\ 0 & tp + fn = 0 \\ \frac{tp}{tp + fn} \cdot \frac{tn}{fp + tn} & else \end{cases} \quad (15)$$

[0104] tp——规则前件后件都适合的样例数;

[0105] fp——规则前件适合后件不适合的样例数;

[0106] fn——规则前件不适合后件适合的样例数;

[0107] tn——规则前件后件都不适合的样例数;

[0108] 式中tp、fp、fn、tn的具体数值可以通过将挖掘得到的规则 $R[\theta]$ 在历史操作票中检验计算得出;

[0109] S42:规则剪枝,删除规则 $R[\theta]$ 中的结点,即规则中的操作项目,重新计算规则的有效性,若存在有效性降低的情况则恢复删除,将修剪后的规则计入规则库;若不存在有效性降低的情况则继续删除结点,直到所有结点检验完毕。

[0110] 如图5所示,为本发明公开的一个实施例;本发明利用历史操作指令票为原始数据样本,采用数据挖掘的方法挖掘电网倒闸操作的操作规则,可以有效避免调度规范的地域差异造成的兼容性问题。所形成的电网操作规则库可以广泛应用于电网操作指令票的自动检验系统和自动生成系统。提高电网操作指令票审核效率和填写正确率,降低电网调度员的劳动强度,减少电网操作中的误操作、避免经济损失。

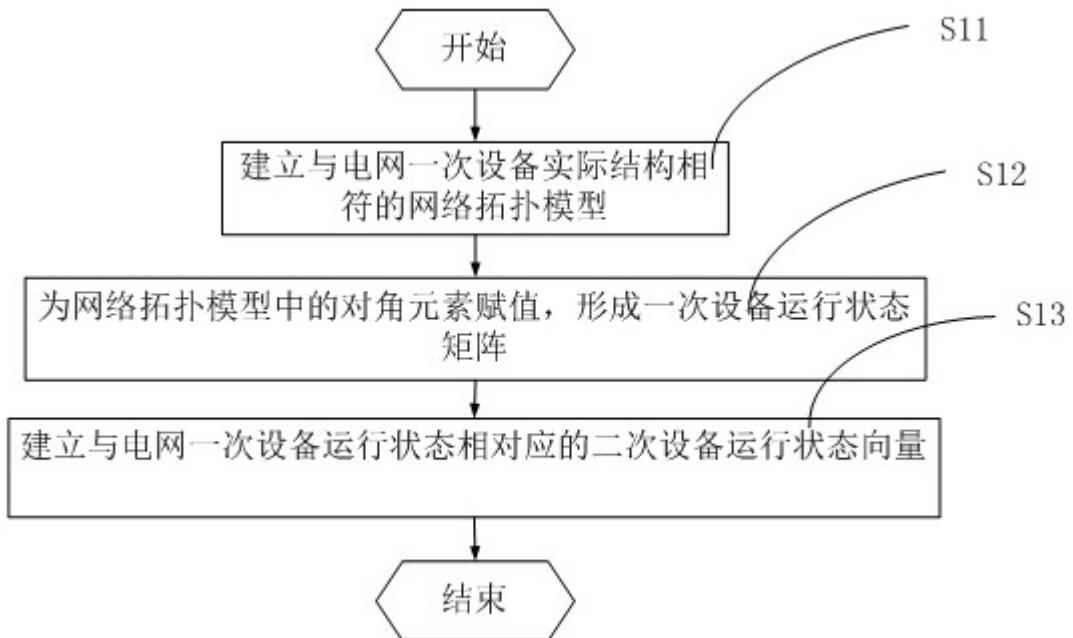


图1

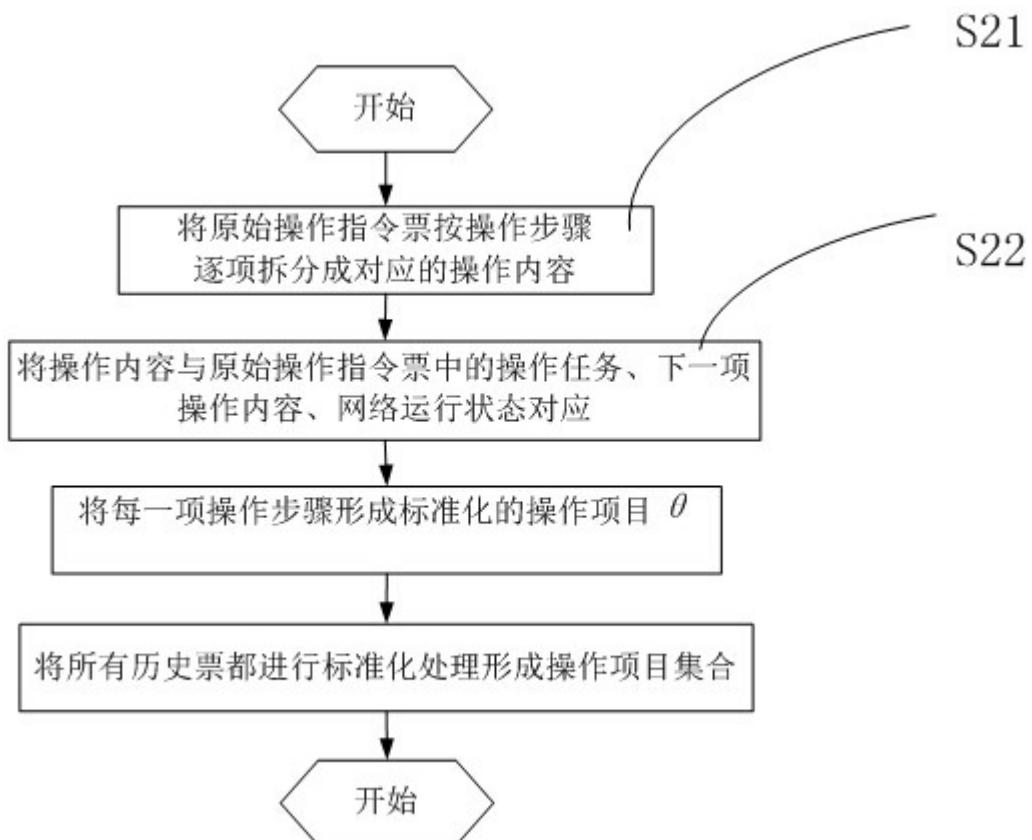


图2

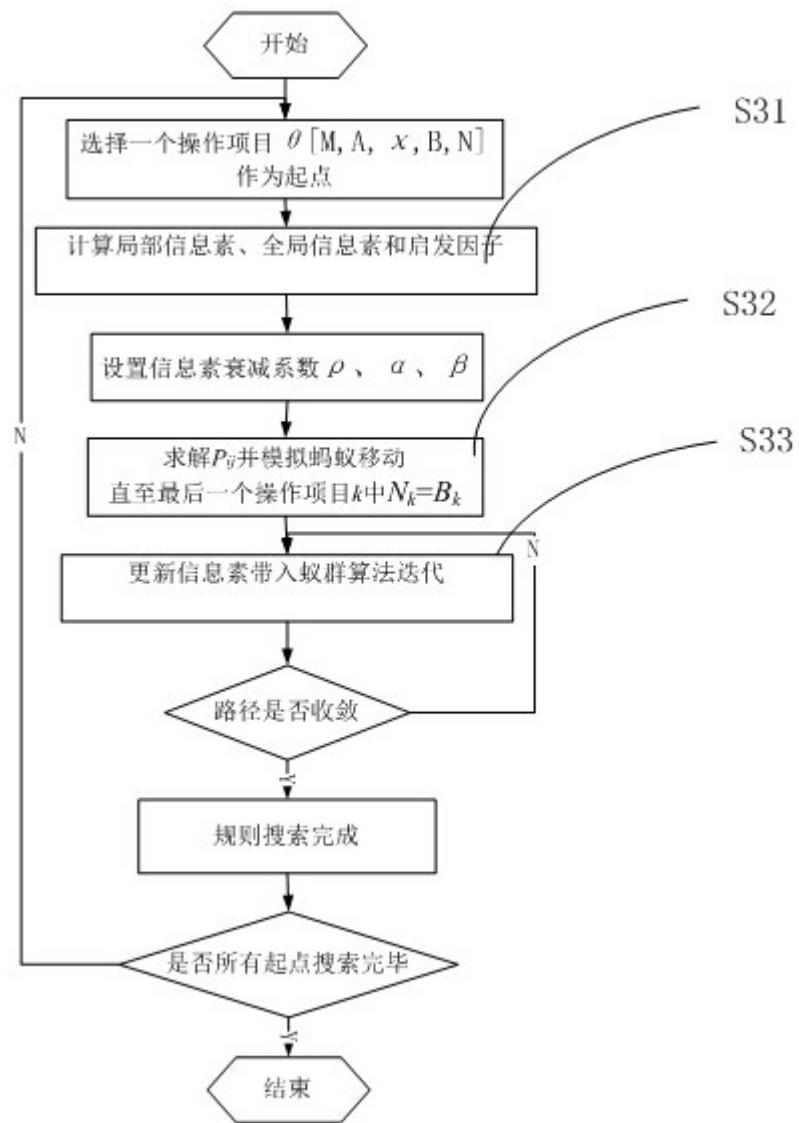


图3

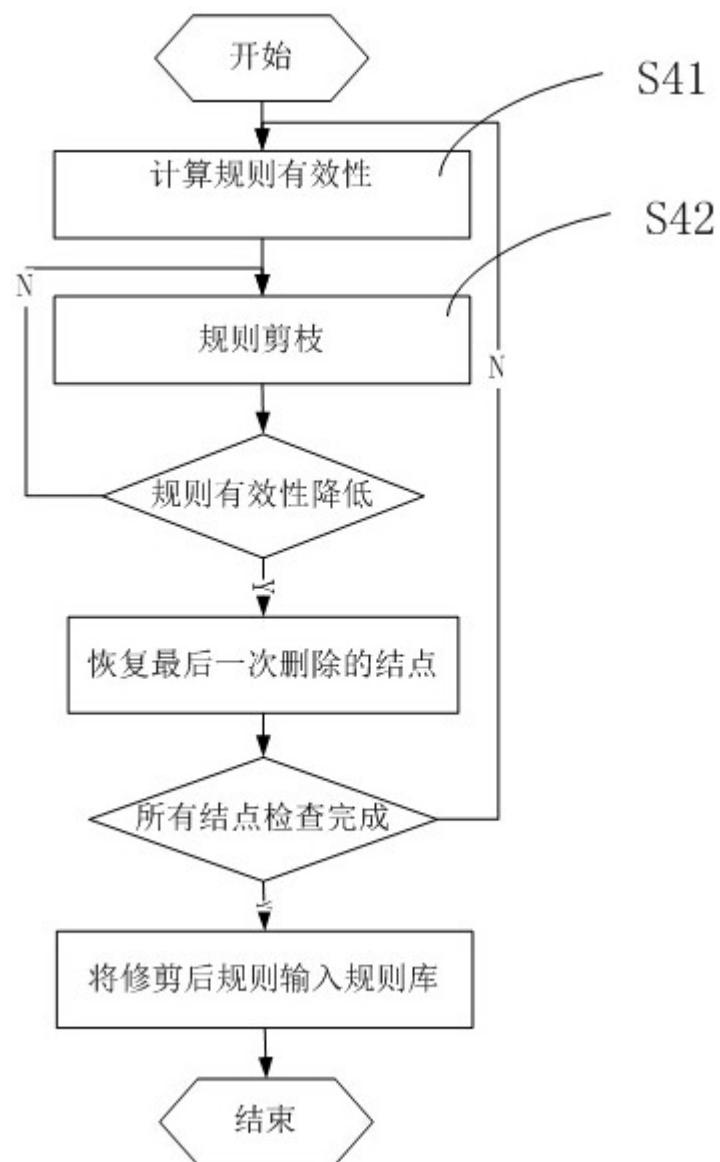


图4

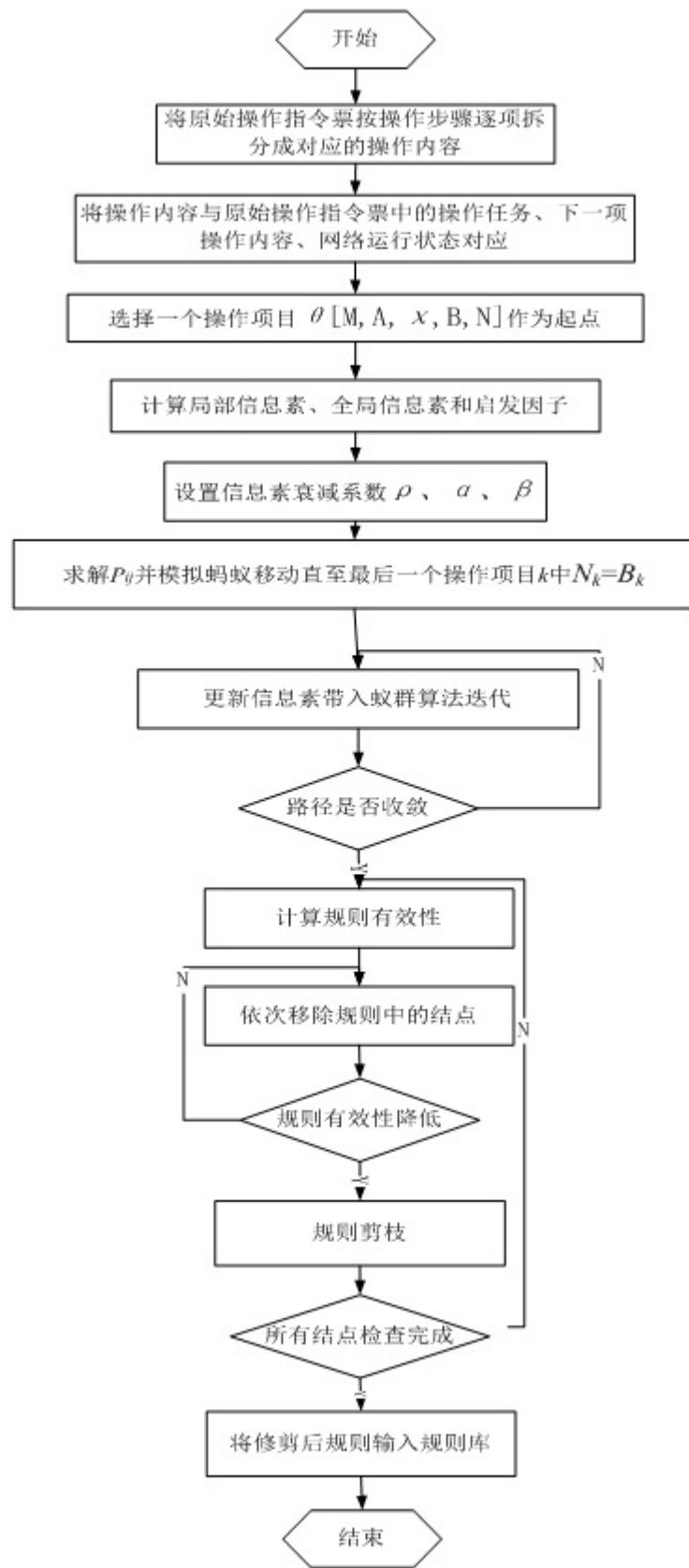


图5