(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2019 年 4 月 25 日 (25.04.2019)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2019/075871 A1

(51) 国际专利分类号:
G05B 13/04 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2017/114463

(22) 国际申请日: 2017 年 12 月 4 日 (04.12.2017)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201710957867.X 2017年10月16日 (16.10.2017) CN

(71) 申请人: 清 华 大 学 (TSINGHUA UNIVERSITY) [CN/CN]; 中 国 北 京 市 海 淀 区 清 华 园, Beijing 100084 (CN)。

(72) 发明人: 孙宏斌(SUN, Hongbin); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 郭庆来(GUO, Qinglai); 中 国 北 京 市 海 淀 区 清 华 园, Beijing 100084 (CN)。 王彬(WANG, Bin); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 盛同天(SHENG, Tongtian); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 张伯明(ZHANG, Boming); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 吴文传(WU, Wenchuan); 中 国 北 京 市 海 淀 区 清华园, Beijing 100084 (CN)。 张明晔(ZHANG, Mingye); 中 国 北 京 市 海 淀 区 清 华 园, Beijing 100084 (CN)。 董今妮(DONG, Jinni); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。

(54) **Title:** STATE ESTIMATION METHOD FOR STABLE OPERATION OF HEAT SUPPLY NETWORK BASED ON BILATERAL EQUIVALENT MODEL

(54) 发明名称: 一种基于双侧等效模型的热网稳态运行状态估计方法

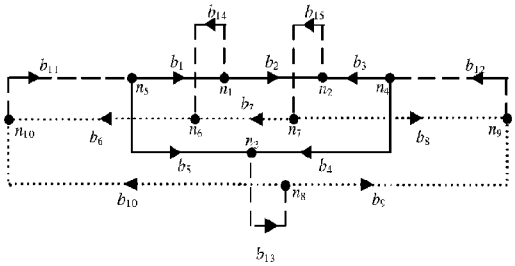


图 2

(57) **Abstract:** A state estimation method for stable operation of a heat supply network based on a bilateral equivalent model, belonging to the technical field of the operation and control of comprehensive energy systems. The method comprises: establishing a bilateral equivalent model of a heat supply network, performing state estimation of a heat supply network operating in a stable state based on the bilateral equivalent model of the heat supply network, establishing a target function of state estimation, establishing constraint conditions for stable operation of the heat supply network, performing state estimation calculation by utilizing a Lagrange multiplier method and a Newton-Raphson method and performing convergence judgment of a state estimation result. By simultaneously considering a supply and return water network, and a heat transfer process, the problem of stable state estimation of a heat supply network is efficiently solved, measurement is completed where measurement configuration is incomplete, and poor data is recognized where poor data exists.

(57) 摘要: 一种基于双侧等效模型的热网稳态运行状态估计方法，属于综合能源系统的运行和控制技术领域。该方法包括：建立热网双侧等效模型、基于热网双侧等效模型对稳态运行的热网进行状态估计、建立状态估计的目标函数、建立热网稳态运行的约束条件、利用拉格朗日乘数法和牛顿-拉夫逊法进行状态估计计算并对状态估计结果进行收敛性判断。同时考虑了供回水网络，并且考虑了传热过程，可以很好地解决热网稳态状态估计问题，在量测配置不全的情下补全量测，存在坏数据时辨识坏数据。

WO 2019/075871 A1

[见续页]

(74) 代理人：北京清亦华知识产权代理事务所（普通合伙）(**TSINGYIHUA INTELLECTUAL PROPERTY LLC**)；中国北京市海淀区清华园清华大学照澜院商业楼301室, Beijing 100084 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的国家保护)：AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的地区保护)：ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布：

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种基于双侧等效模型的热网稳态运行状态估计方法

相关申请的交叉引用

本申请要求清华大学于 2017 年 10 月 16 日提交的、发明名称为“一种基于双侧等效模型的热网稳态运行状态估计方法”的、中国专利申请号“CN201710957867.X”的优先权。

技术领域

本发明涉及一种基于双侧等效模型的热网稳态运行状态估计方法，属于综合能源系统的运行和控制技术领域。

背景技术

热网根据供热介质不同可以分为热水供热管网和蒸汽供热管网两类。目前，我国的工业供热多为中高压蒸汽供热管网，民用供热多为热水供热管网。在本发明中我们以热水供热管网进行分析，根据是否存在回水网络，可以将热网分为开口网络和闭口网络两类。

对于开口网络而言，热网只需研究供水网络，而对于闭口网络而言，需要同时研究供水网络和回水网络。通常而言，对于闭口网络，其供水网络和回水网络拓扑结构一致，目前的研究中，将其拆分后，认为供水网络和回水网络中各管道流量近似一致，仅对供水网络的水力工况进行分析，并在该基础上分析供水网络和回水网络的热力工况。然而，这种方法不能处理供水网络和回水网络不对称的情况，当供水网络或回水网络中某条线路出现故障或正在检修时，必将导致供水网络和回水网络的不对称。另一方面，状态估计的目的是监测整个网络的运行情况，如果简单地进行对称处理，就不能对回水网络的运行工况进行监测。

发明内容

本发明的目的是提出一种基于双侧等效模型的热网稳态运行状态估计方法，建立优于已有的单侧模型的热网双侧等效模型，并基于双侧等效模型的热网稳态运行的状态估计，以有效的监测热网的运行状况，在非全量测配置下补全量测，辨识坏数据。

本发明提出的基于热网双侧等效模型的热网稳态状态估计方法，包括以下步骤：

（1）建立热网双侧等效模型的节点-支路关联矩阵，包括：

在热网双侧等效模型中同时考虑热网供水支路和回水支路，并将热源和热负荷等效为

连接支路，对于由 N 个节点、B 条支路构成的热网，形成以下表示节点和支路关系的矩阵：

（1-1）一个节点-支路关联矩阵A，

节点-支路关联矩阵A表示网络中节点和支路的拓扑关系，矩阵A由 0、1、-1 三个元素组成，A中元素定义如下：

$$A_{ij}=\begin{cases}1 & \text{节点}i\text{是支路}j\text{的首端节点}\\ -1 & \text{节点}i\text{是支路}j\text{的末端节点}\\ 0 & \text{节点}i\text{不是支路}j\text{的端点}\end{cases}(i=1,2,\cdots,N;j=1,2,\cdots,B)$$

其中，i为热网中的任意一个节点，j为热网中任意一条支路；

（1-2）一个正节点-支路关联矩阵A_f：

正节点-支路关联矩阵A_f表示各支路的首端节点与支路的关系，$A_f=\{\mathrm{A}\,|\,\mathrm{A}_{ij}>0\}$，$A_f$中元素定义如下：

$$A_{fij}=\begin{cases}1 & \text{节点}i\text{是支路}j\text{的首端节点}\\ 0 & \text{节点}i\text{不是支路}j\text{的首端节点}\end{cases}(i=1,2,\cdots,N;j=1,2,\cdots,B);$$

（1-3）一个负节点-支路关联矩阵A_t：

负节点-支路关联矩阵A_t表示各支路的末端节点与支路的关系，$A_t=\{-A|A_{ij}<0\}$，A_t中元素定义如下式：

$$A_{tij}=\begin{cases}1 & \text{节点}i\text{是支路}j\text{的末端节点}\\ 0 & \text{节点}i\text{不是支路}j\text{的末端节点}\end{cases}(i=1,2,\cdots,N;j=1,2,\cdots,B);$$

（2）基于热网双侧等效模型对稳态运行的热网进行状态估计：

（2-1）设定热网状态估计的收敛精度δ和最大循环次数d，初始化时设循环次数a为 0；

（2-2）从热网的数据采集与监视控制系统中获取实时测量的t时刻热网的运行数据，包括热网中各节点压力H，任意两个节点间支路的流量m，两个节点间支路的首端温度T_f和末端温度T_t，热源和热负荷等效成的连接支路，热功率ϕ^q，其中上标 q 表示连接支路，上述运行数据构成一个测量值列向量z_h；

（2-3）将热网所有待估计的状态量构成一个列向量$\boldsymbol{x_h}$，其中包括热网中各节点压力$\hat{H}$以及任两个节点间支路的首端温度$\hat{T}_f$和末端温度$\hat{T}_t$；

（2-4）建立一个描述热网状态量与测量值之间关系的量测函数$\boldsymbol{f(x)}$，$\boldsymbol{f(x)=f(x_h)}$，$\boldsymbol{f(x_h)}$为热力系统潮流方程组，热力系统潮流方程组包括以下方程：

（2-4-1）一个支路压力损失方程：

支路压力损失方程表示一条支路两端节点的压力差，支路压力损失方程的矩阵形式如下：

$$A^T H = \Delta H - H_p$$

其中H为上述步骤（2-2）中的热网各节点压力组成的列向量，A^T为上述步骤（1-1）中节点-支路关联矩阵A的转置，H_p为支路上泵的扬程组成的列向量，$H_p = am_p^2 + bm_p + c$，a、b、c为泵参数，从泵的产品铭牌上获取，m_p为泵所在支路的流量，ΔH为热网中每条支路压力损失组成的列向量，支路压力损失ΔH通过下式计算得到：

$$\Delta H = K \cdot m \cdot |m|$$

其中，K为热网中支路的摩阻系数，取值为10～500 帕/（千克/秒）^{2}，m为热网中任一支路流量；

（2-4-2）一个连接支路热功率方程：

热功率方程表示连接支路q的首末端温度关系，表示为如下形式：

$$\phi^q = C_p m^q \left(T_f^q - T_t^q\right)$$

其中，上标 q 表示连接支路，ϕ^q为连接支路的用热功率，热负荷处的用热功率为正，热源处的用热功率为负，C_p为供热介质的比热容，由流体的物性参数表获取，m^q为连接支路流量，T_f^q为连接支路首端温度，T_t^q为连接支路末端温度；

（3）根据上述步骤（2-2）的测量值，建立一个热网稳态运行状态估计的目标函数如下：

$$\min J(\boldsymbol{x_h}) = \min\{[\mathbf{z_h} - \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x_h})]^T \boldsymbol{W} [\mathbf{z_h} - \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x_h})]\}$$

其中$\boldsymbol{W}$为测量值的协方差矩阵，上标 T 表示矩阵转置，$J(\boldsymbol{x_h})$表示目标函数表达式；

（4）建立热网稳态运行的约束条件$\boldsymbol{c}(\boldsymbol{x_h})$，包括：

（4-1）对所有节点建立流量连续性约束，流量连续性约束表示为如下矩阵形式：

$$AM = 0$$

其中，M为热网每条支路流量构成的列向量，将供水支路和回水支路统一等效为普通支路，用上标 p 表示，连接支路等效为特殊支路，用上标 q 表示，则M表示为：

$$M = \begin{bmatrix} M^p \\ M^q \end{bmatrix}$$

其中，M^p表示供水支路和回水支路即普通支路流量组成的子向量，M^q表示连接支路流量组成的子向量；

（4-2）对热网中的所有节点建立温度混合约束：

$$\left(\sum m_{out}\right) T_n = \sum (m_{in} T_{in})$$

其中，m_{out}为供热介质流出节点的支路流量，m_{in}为供热介质流入节点的支路流量，T_n为节点处供热介质混合后的温度，T_{in}为不同支路供热介质在节点处混合前的温度；

用不同支路末端温度T_t代替支路供热介质在节点处混合前的温度T_{in}，则节点温度混合约束表示为如下矩阵形式：

$$diag(A_f M)\boldsymbol{T}_n = A_t diag(M)\boldsymbol{T}_t$$

其中，A_f、A_t分别为上述步骤（1-2）中的正节点-支路关联矩阵和上述步骤（1-3）中的负节点-支路关联矩阵，$diag(\cdot)$表示对角阵；

（4-3）对热网中的所有普通支路建立支路温降约束，支路温降约束的矩阵形式如下：

$$\boldsymbol{T}_t^p - T_a = (\boldsymbol{T}_f^p - T_a)e^{-\frac{\lambda L}{C_p M^p}}$$

其中，T_a为环境温度，$\boldsymbol{T}_t^p$为普通支路末端温度，$\boldsymbol{T}_f^p$为普通支路首端温度，L为普通支路长度，λ为热网中普通支路的散热系数，从相应数据手册中获取，e是自然对数，C_p为供热介质的比热容，M^p表示供水支路和回水支路即普通支路流量组成的子向量，；

（5）利用拉格朗日乘数法，将上述步骤（3）的目标函数和上述步骤（4）的约束条件构成一个拉格朗日函数如下：

$$L(\boldsymbol{x_h}, \boldsymbol{\omega}) = J(\boldsymbol{x_h}) + \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{c}(\boldsymbol{x_h})$$

其中，$J(\boldsymbol{x_h})$为上述步骤（3）的目标函数，ω为拉格朗日乘子，$\boldsymbol{c}(\boldsymbol{x_h})$为上述步骤（4）建立的热网稳态运行的约束条件，上标T是矩阵转置；

利用最优化理论中的牛顿-拉夫逊法，求解上述热网稳态运行时的拉格朗日函数，得到热网稳态运行时的状态估计结果；

（6）对上述步骤5的状态估计结果进行收敛性判断：

若循环次数a达到预设循环次数d，即$a \geq d$，则将本次状态估计结果作为t时刻基于双侧等效模型的热网稳态状态估计结果；

若循环次数a未达到预设循环次数d，即$a < d$，则进一步根据热网状态估计的精度δ对状态估计结果收敛性进行判断：若最近相邻两次状态估计结果中的状态变

x_a和x_{a-1}的差值小于状态估计精度δ，即 $\max|x_a - x_{a-1}| < \delta$，则将本次状态估计结果作为$t$时刻基于双侧等效模型的热网稳态状态估计结果，若最近两次状态估计结果中的状态变量估计值x_a和x_{a-1}的差值大于或等于状态估计精度δ，即 $\max|x_a - x_{a-1}| \geq \delta$，则更新状态变量，并根据本次状态估计所得的温度值更新热网中节点压力和支路首末端温度，同时使

$a = a + 1$，并返回步骤 4，继续本次状态估计过程。

本发明提出的基于双侧等效模型的热网稳态运行状态估计方法，其优点是：

本发明方法建立了优于已有的单侧模型的热网双侧等效模型，同时考虑了供回水网络和传热过程，可以很好地解决热网稳态状态估计问题。当热力系统受调度控制而改变运行方式时，本发明能够较为精确地追踪系统温度等状态变量的变化，且有较好的收敛性。基于双侧等效模型进行热网稳态运行的状态估计，可以有效的监测热网的运行状况，在非全量测配置下补全量测，辨识坏数据，为能量管理系统和调度管理系统提供详实的数据支撑。

附图说明

图 1 是本发明方法涉及的热网的结构示意图。

图 2 是本发明方法涉及的热网元件进行等效处理后的结构示意图。

具体实施方式

本发明提出的基于热网双侧等效模型的热网稳态状态估计方法，包括以下步骤：

（1） 建立热网双侧等效模型的节点-支路关联矩阵，包括：

本发明方法涉及的热网的结构如图 1 所示，其中实线表示热网中的供水支路，点线表示热网中回水支路，在热网双侧等效模型中同时考虑热网供水支路和回水支路，并将热源和热负荷等效为图 2 所示虚线所示的连接支路，对于由 N 个节点、B 条支路构成的热网，形成以下表示节点和支路关系的矩阵：

（1-1）一个节点-支路关联矩阵A，

节点-支路关联矩阵A表示网络中节点和支路的拓扑关系，矩阵A由 0、1、-1 三个元素组成，A中元素定义如下：

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点}i\text{是支路}j\text{的首端节点} \\ -1 & \text{节点}i\text{是支路}j\text{的末端节点} \\ 0 & \text{节点}i\text{不是支路}j\text{的端点} \end{cases} (i = 1,2,\cdots,N; j = 1,2,\cdots,B)$$

其中，i为热网中的任意一个节点，j为热网中任意一条支路；如图 2 中所示，其中 n 是节点，b 是支路。

（1-2）一个正节点-支路关联矩阵A_f：

正节点-支路关联矩阵A_f表示各支路的首端节点与支路的关系，$A_f = \{\mathrm{A} \,|\, \mathrm{A}_{ij} > 0\}$，$A_f$中元素定义如下：

$$A_{fij}=\begin{cases}1 & \text{节点}i\text{是支路}j\text{的首端节点}\\0 & \text{节点}i\text{不是支路}j\text{的首端节点}\end{cases}(i=1,2,\cdots,N;j=1,2,\cdots,B);$$

（1-3）一个负节点-支路关联矩阵A_t：

负节点-支路关联矩阵A_t表示各支路的末端节点与支路的关系，$A_t=\{-A|A_{ij}<0\}$，A_t中元素定义如下式：

$$A_{tij}=\begin{cases}1 & \text{节点}i\text{是支路}j\text{的末端节点}\\0 & \text{节点}i\text{不是支路}j\text{的末端节点}\end{cases}(i=1,2,\cdots,N;j=1,2,\cdots,B);$$

（2）基于热网双侧等效模型对稳态运行的热网进行状态估计：

（2-1）设定热网状态估计的收敛精度δ和最大循环次数d，初始化时设循环次数a为0；

（2-2）从热网的数据采集与监视控制系统中获取实时测量的t时刻热网的运行数据，包括热网中各节点压力H，任意两个节点间支路的流量m，两个节点间支路的首端温度T_f和末端温度T_t，热源和热负荷等效成的连接支路（如图2中的虚线所示）热功率ϕ^q，其中上标q表示连接支路，上述运行数据构成一个测量值列向量z_h；

（2-3）将热网所有待估计的状态量构成一个列向量$\boldsymbol{x_h}$，其中包括热网中各节点压力$\widehat{H}$以及任两个节点间支路的首端温度$\widehat{T_f}$和末端温度$\widehat{T_t}$；

（2-4）建立一个描述热网状态量与测量值之间关系的量测函数$\boldsymbol{f(x)}$，$\boldsymbol{f(x)=f(x_h)}$，$\boldsymbol{f(x_h)}$为热力系统潮流方程组，热力系统潮流方程组包括以下方程：

（2-4-1）一个支路压力损失方程：

支路压力损失方程表示一条支路两端节点的压力差，支路压力损失方程的矩阵形式如下：

$$A^TH=\Delta H-H_p$$

其中H为上述步骤（2-2）中的热网各节点压力组成的列向量，A^T为上述步骤（1-1）中节点-支路关联矩阵A的转置，H_p为支路上泵的扬程组成的列向量，$H_p=am_p^2+bm_p+c$，a、b、c为泵参数，可从泵的产品铭牌上查得，m_p为泵所在支路的流量，ΔH为热网中每条支路压力损失组成的列向量，支路压力损失ΔH由供热介质流过支路时支路的摩擦阻力导致的，通过下式计算得到：

$$\Delta H=K\cdot m\cdot|m|$$

其中，K为热网中支路的摩阻系数，取值为10～500帕/（千克/秒）^{2}，m为热网中任一支路流量；

（2-4-2）一个连接支路热功率方程：

热功率方程表示连接支路 q 的首末端温度关系，表示为如下形式：

$$\phi^q = C_p m^q \left(T_f^q - T_t^q\right)$$

其中，上标 q 表示连接支路，ϕ^q为连接支路的用热功率，热负荷处的用热功率为正，热源处的用热功率为负，C_p为供热介质的比热容，由流体的物性参数表获取，m^q为连接支路流量，T_f^q为连接支路首端温度，T_t^q为连接支路末端温度；

（3）根据上述步骤（2-2）的测量值，建立一个热网稳态运行状态估计的目标函数如下：

$$\min J(\boldsymbol{x_h}) = \min\{[\mathbf{z_h} - \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x_h})]^T \boldsymbol{W}[\boldsymbol{z_h} - \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x_h})]\}$$

其中$\boldsymbol{W}$为测量值的协方差矩阵，上标 T 表示矩阵转置，$J(\boldsymbol{x_h})$表示目标函数表达式；

（4）建立热网稳态运行的约束条件$\boldsymbol{c}(\boldsymbol{x_h})$，包括：

（4-1）对所有节点建立流量连续性约束，流量连续性约束表示为如下矩阵形式：

$$AM = 0$$

其中，M为热网每条支路流量构成的列向量，本发明中将供水支路和回水支路统一等效为普通支路，用上标 p 表示，连接支路等效为特殊支路，用上标 q 表示，则M表示为：

$$M = \begin{bmatrix} M^p \\ M^q \end{bmatrix}$$

其中，M^p表示供水支路和回水支路即普通支路流量组成的子向量，M^q表示连接支路流量组成的子向量；

（4-2）对热网中的所有节点建立温度混合约束：

$$\left(\sum m_{out}\right) T_n = \sum (m_{in} T_{in})$$

其中，m_{out}为供热介质流出节点的支路流量，m_{in}为供热介质流入节点的支路流量，T_n为不同支路供热介质在节点处混合后的温度即节点处供热介质的温度，T_{in}为不同支路供热介质在节点处混合前的温度；

用不同支路末端温度T_t代替支路供热介质在节点处混合前的温度T_{in}，则节点温度混合约束表示为如下矩阵形式：

$$diag\left(A_f M\right)\boldsymbol{T}_n = A_t diag(M)\boldsymbol{T}_t$$

其中，A_f、A_t分别为上述步骤（1-2）中的正节点-支路关联矩阵和上述步骤（1-3）中的负节点-支路关联矩阵，$diag(\cdot)$表示对角阵；

（4-3）对热网中的所有普通支路建立支路温降约束，支路温降约束的矩阵形式如下：

$$\boldsymbol{T}_t^p - T_a = \left(\boldsymbol{T}_f^p - T_a\right)e^{-\frac{\lambda L}{C_p M^p}}$$

其中，T_a为环境温度，$\boldsymbol{T}_t^p$为普通支路末端温度，$\boldsymbol{T}_f^p$为普通支路首端温度，L为普通支路长度，λ为热网中普通支路的散热系数，不同材料散热系数不同，数值在几到几百之间，可从相应数据手册中获取，e是自然对数，C_p为供热介质的比热容，M^p表示供水支路和回水支路即普通支路流量组成的子向量，；

（5）利用拉格朗日乘数法，将上述步骤（3）的目标函数和上述步骤（4）的约束条件构成一个拉格朗日函数如下：

$$L(\boldsymbol{x_h}, \boldsymbol{\omega}) = J(\boldsymbol{x_h}) + \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{c}(\boldsymbol{x_h})$$

其中，$J(\boldsymbol{x_h})$为上述步骤（3）的目标函数，$\boldsymbol{\omega}$为拉格朗日乘子，$\boldsymbol{c}(\boldsymbol{x_h})$为上述步骤（4）建立的热网稳态运行的约束条件，上标T是矩阵转置；

利用最优化理论中的牛顿-拉夫逊法，求解上述热网稳态运行时的拉格朗日函数，得到热网稳态运行时的状态估计结果；

（6）对上述步骤5的状态估计结果进行收敛性判断：

若循环次数a达到预设循环次数d，即$a \geq d$，则将本次状态估计结果作为t时刻基于双侧等效模型的热网稳态状态估计结果；

若循环次数a未达到预设循环次数d，即$a < d$，则进一步根据热网状态估计的精度δ对状态估计结果收敛性进行判断：若最近相邻两次状态估计结果中的状态变量x_a和x_{a-1}的差值小于状态估计精度δ，即 $\max|x_a - x_{a-1}| < \delta$，则将本次状态估计结果作为$t$时刻基于双侧等效模型的热网稳态状态估计结果，若最近两次状态估计结果中的状态变量估计值x_a和x_{a-1}的差值大于或等于状态估计精度δ，即 $\max|x_a - x_{a-1}| \geq \delta$，则更新状态变量，并根据本次状态估计所得的温度值更新热网中节点压力和支路首末端温度，同时使$a = a + 1$，并返回步骤4，继续本次状态估计过程。

权利要求书

1、一种基于热网双侧等效模型的热网稳态状态估计方法，其特征在于该方法包括以下步骤：

（1）建立热网双侧等效模型的节点-支路关联矩阵，包括：

在热网双侧等效模型中同时考虑热网供水支路和回水支路，并将热源和热负荷等效为连接支路，对于由 N 个节点、B 条支路构成的热网，形成以下表示节点和支路关系的矩阵：

（1-1）一个节点-支路关联矩阵A，

节点-支路关联矩阵A表示网络中节点和支路的拓扑关系，矩阵A由 0、1、-1 三个元素组成，A中元素定义如下：

$$A_{ij}=\begin{cases}1 & \text{节点}i\text{是支路}j\text{的首端节点}\\ -1 & \text{节点}i\text{是支路}j\text{的末端节点}\\ 0 & \text{节点}i\text{不是支路}j\text{的端点}\end{cases}(i=1,2,\cdots,N;j=1,2,\cdots,B)$$

其中，i为热网中的任意一个节点，j为热网中任意一条支路；

（1-2）一个正节点-支路关联矩阵A_f：

正节点-支路关联矩阵A_f表示各支路的首端节点与支路的关系，$A_f=\{\mathrm{A}\,|\,\mathrm{A}_{ij}>0\}$，$A_f$中元素定义如下：

$$A_{fij}=\begin{cases}1 & \text{节点}i\text{是支路}j\text{的首端节点}\\ 0 & \text{节点}i\text{不是支路}j\text{的首端节点}\end{cases}(i=1,2,\cdots,N;j=1,2,\cdots,B);$$

（1-3）一个负节点-支路关联矩阵A_t：

负节点-支路关联矩阵A_t表示各支路的末端节点与支路的关系，$A_t=\{-A|A_{ij}<0\}$，A_t中元素定义如下式：

$$A_{tij}=\begin{cases}1 & \text{节点}i\text{是支路}j\text{的末端节点}\\ 0 & \text{节点}i\text{不是支路}j\text{的末端节点}\end{cases}(i=1,2,\cdots,N;j=1,2,\cdots,B);$$

（2）基于热网双侧等效模型对稳态运行的热网进行状态估计：

（2-1）设定热网状态估计的收敛精度δ和最大循环次数d，初始化时设循环次数a为 0；

（2-2）从热网的数据采集与监视控制系统中获取实时测量的t时刻热网的运行数据，包括热网中各节点压力H，任意两个节点间支路的流量m，两个节点间支路的首端温度T_f和末端温度T_t，热源和热负荷等效成的连接支路，热功率ϕ^q，其中上标 q 表示连接支路，上

述运行数据构成一个测量值列向量z_h；

（2-3）将热网所有待估计的状态量构成一个列向量$\boldsymbol{x_h}$，其中包括热网中各节点压力$\hat{H}$以及任两个节点间支路的首端温度$\hat{T_f}$和末端温度$\hat{T_t}$；

（2-4）建立一个描述热网状态量与测量值之间关系的量测函数$\boldsymbol{f(x)}$，$\boldsymbol{f(x)=f(x_h)}$，$\boldsymbol{f(x_h)}$为热力系统潮流方程组，热力系统潮流方程组包括以下方程：

（2-4-1）一个支路压力损失方程：

支路压力损失方程表示一条支路两端节点的压力差，支路压力损失方程的矩阵形式如下：

$$A^T H = \Delta H - H_p$$

其中H为上述步骤（2-2）中的热网各节点压力组成的列向量，A^T为上述步骤（1-1）中节点-支路关联矩阵A的转置，H_p为支路上泵的扬程组成的列向量，$H_p = am_p^2 + bm_p + c$，a、b、c为泵参数，从泵的产品铭牌上获取，m_p为泵所在支路的流量，ΔH为热网中每条支路压力损失组成的列向量，支路压力损失ΔH通过下式计算得到：

$$\Delta H = K \cdot m \cdot |m|$$

其中，K为热网中支路的摩阻系数，取值为10～500 帕/（千克/秒）^{2}，m为热网中任一支路流量；

（2-4-2）一个连接支路热功率方程：

热功率方程表示连接支路q的首末端温度关系，表示为如下形式：

$$\phi^q = C_p m^q \left(T_f^q - T_t^q\right)$$

其中，上标q表示连接支路，ϕ^q为连接支路的用热功率，热负荷处的用热功率为正，热源处的用热功率为负，C_p为供热介质的比热容，由流体的物性参数表获取，m^q为连接支路流量，T_f^q为连接支路首端温度，T_t^q为连接支路末端温度；

（3）根据上述步骤（2-2）的测量值，建立一个热网稳态运行状态估计的目标函数如下：

$$\min J(\boldsymbol{x_h}) = \min\{[\mathbf{z_h} - \boldsymbol{f(x_h)}]^T \boldsymbol{W} [\boldsymbol{z_h} - \boldsymbol{f(x_h)}]\}$$

其中$\boldsymbol{W}$为测量值的协方差矩阵，上标T表示矩阵转置，$J(\boldsymbol{x_h})$表示目标函数表达式；

（4）建立热网稳态运行的约束条件$\boldsymbol{c(x_h)}$，包括：

（4-1）对所有节点建立流量连续性约束，流量连续性约束表示为如下矩阵形式：

$$AM = 0$$

其中，M为热网每条支路流量构成的列向量，将供水支路和回水支路统一等效为普通

支路，用上标 p 表示，连接支路等效为特殊支路，用上标 q 表示，则M表示为：

$$M = \begin{bmatrix} M^p \\ M^q \end{bmatrix}$$

其中，M^p表示供水支路和回水支路即普通支路流量组成的子向量，M^q表示连接支路流量组成的子向量；

（4-2）对热网中的所有节点建立温度混合约束：

$$\left(\sum m_{out}\right) T_n = \sum (m_{in} T_{in})$$

其中，m_{out}为供热介质流出节点的支路流量，m_{in}为供热介质流入节点的支路流量，T_n为节点处供热介质混合后的温度，T_{in}为不同支路供热介质在节点处混合前的温度；

用不同支路末端温度T_t代替支路供热介质在节点处混合前的温度T_{in}，则节点温度混合约束表示为如下矩阵形式：

$$diag(A_f M)\boldsymbol{T}_n = A_t diag(M)\boldsymbol{T}_t$$

其中，A_f、A_t分别为上述步骤（1-2）中的正节点-支路关联矩阵和上述步骤（1-3）中的负节点-支路关联矩阵，$diag(\cdot)$表示对角阵；

（4-3）对热网中的所有普通支路建立支路温降约束，支路温降约束的矩阵形式如下：

$$\boldsymbol{T}_t^p - T_a = \left(\boldsymbol{T}_f^p - T_a\right) e^{-\frac{\lambda L}{C_p M^p}}$$

其中，T_a为环境温度，$\boldsymbol{T}_t^p$为普通支路末端温度，$\boldsymbol{T}_f^p$为普通支路首端温度，L为普通支路长度，λ为热网中普通支路的散热系数，从相应数据手册中获取，e是自然对数，C_p为供热介质的比热容，M^p表示供水支路和回水支路即普通支路流量组成的子向量，；

（5）利用拉格朗日乘数法，将上述步骤（3）的目标函数和上述步骤（4）的约束条件构成一个拉格朗日函数如下：

$$L(\boldsymbol{x_h}, \boldsymbol{\omega}) = J(\boldsymbol{x_h}) + \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{c}(\boldsymbol{x_h})$$

其中，$J(\boldsymbol{x_h})$为上述步骤（3）的目标函数，ω为拉格朗日乘子，$\boldsymbol{c}(\boldsymbol{x_h})$为上述步骤（4）建立的热网稳态运行的约束条件，上标T是矩阵转置；

利用最优化理论中的牛顿-拉夫逊法，求解上述热网稳态运行时的拉格朗日函数，得到热网稳态运行时的状态估计结果；

（6）对上述步骤5的状态估计结果进行收敛性判断：

若循环次数a达到预设循环次数d，即$a \geq d$，则将本次状态估计结果作为t时刻基于双侧等效模型的热网稳态状态估计结果；

若循环次数a未达到预设循环次数d，即$a < d$，则进一步根据热网状态估计的精度δ对状态估计结果收敛性进行判断：若最近相邻两次状态估计结果中的状态变量x_a和x_{a-1}的差值小于状态估计精度δ，即 $\max|x_a - x_{a-1}| < \delta$，则将本次状态估计结果作为$t$时刻基于双侧等效模型的热网稳态状态估计结果，若最近两次状态估计结果中的状态变量估计值x_a和x_{a-1}的差值大于或等于状态估计精度δ，即 $\max|x_a - x_{a-1}| \geq \delta$，则更新状态变量，并根据本次状态估计所得的温度值更新热网中节点压力和支路首末端温度，同时使$a = a + 1$，并返回步骤 4，继续本次状态估计过程。

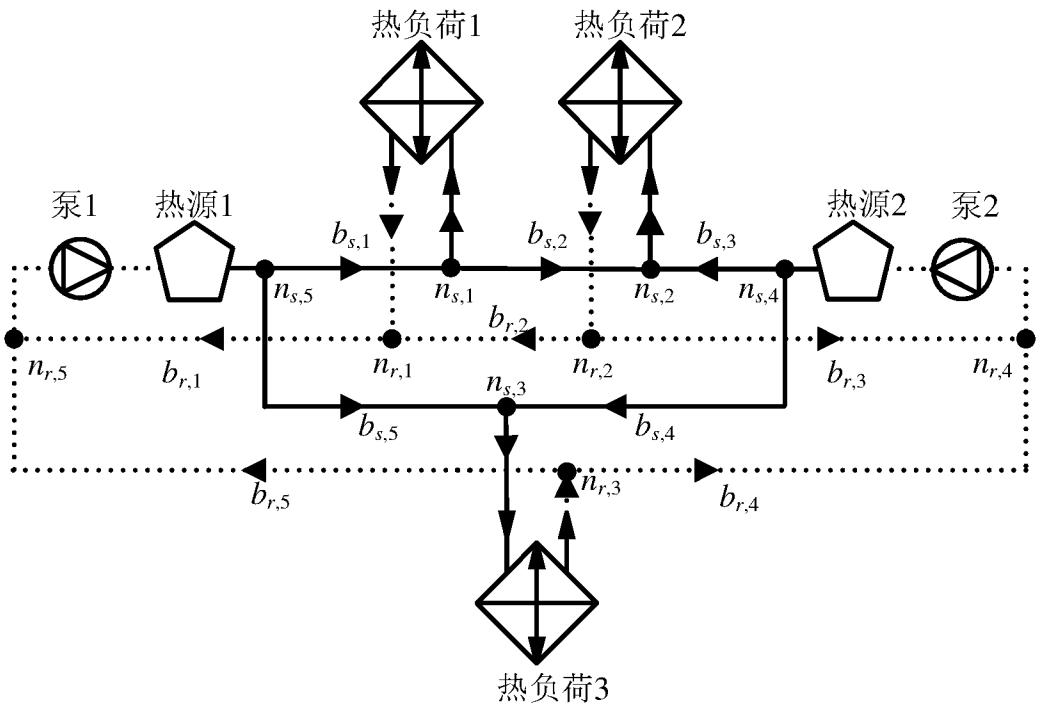

热负荷1
热负荷2
泵1
热源1
热源2
泵2
$b_{s,1}$
$b_{s,2}$
$b_{s,3}$
$n_{s,5}$
$n_{s,1}$
$n_{s,2}$
$n_{s,4}$
$b_{r,2}$
$n_{r,5}$
$b_{r,1}$
$n_{r,1}$
$n_{r,2}$
$b_{r,3}$
$n_{r,4}$
$n_{s,3}$
$b_{s,5}$
$b_{s,4}$
$b_{r,5}$
$n_{r,3}$
$b_{r,4}$
热负荷3

图 1

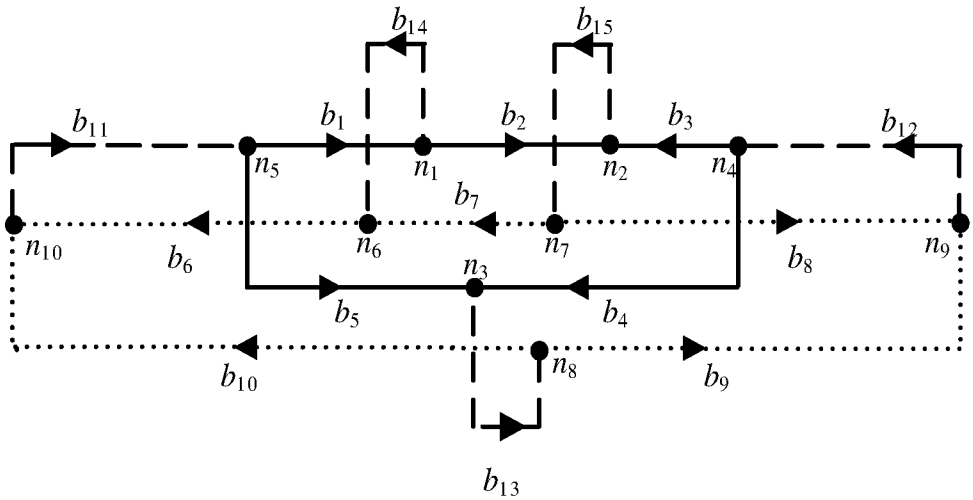

b_{14}
b_{15}
b_{11}
b_1
b_2
b_3
b_{12}
n_5
n_1
n_2
n_4
b_7
n_{10}
b_6
n_6
n_7
b_8
n_9
n_3
b_5
b_4
b_{10}
n_8
b_9
b_{13}

图 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/114463

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G05B 13/04(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G05B; G06F; H02J; G06Q

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC, IEEE: 热网, 模型, 稳态, 水, 支路, 矩阵, 负荷, heat, model, matrix, load

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 106682369 A (CHANGZHOU YINGJI POWER TECHNOLOGY CO., LTD.) 17 May 2017 (2017-05-17) description, paragraphs 0083-0186, and figures 1-3	1
A	CN 106056251 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 26 October 2016 (2016-10-26) entire document	1
A	CN 106447113 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 22 February 2017 (2017-02-22) entire document	1
A	CN 106998079 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 01 August 2017 (2017-08-01) entire document	1
A	CN 106056478 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 26 October 2016 (2016-10-26) entire document	1
A	CN 106067677 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 02 November 2016 (2016-11-02) entire document	1

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
13 February 2018	**26 February 2018**

Name and mailing address of the ISA/CN	Authorized officer
State Intellectual Property Office of the P. R. China **No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing** **100088** **China**	
Facsimile No. **(86-10)62019451**	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2017/114463

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	106682369	A	17 May 2017	None	
CN	106056251	A	26 October 2016	None	
CN	106447113	A	22 February 2017	None	
CN	106998079	A	01 August 2017	None	
CN	106056478	A	26 October 2016	None	
CN	106067677	A	02 November 2016	None	

国际检索报告

国际申请号 PCT/CN2017/114463

A. 主题的分类

G05B 13/04(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G05B; G06F; H02J; G06Q

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用）)

CNPAT,CNKI,WPI,EPODOC,IEEE: 热网，模型，稳态，水，支路，矩阵，负荷，heat，model，matrix，load

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 106682369 A (常州英集动力科技有限公司) 2017年 5月 17日 (2017-05-17) 说明书第0083-0186段、图1-3	1
A	CN 106056251 A (清华大学) 2016年 10月 26日 (2016-10-26) 全文	1
A	CN 106447113 A (东南大学) 2017年 2月 22日 (2017-02-22) 全文	1
A	CN 106998079 A (东南大学) 2017年 8月 1日 (2017-08-01) 全文	1
A	CN 106056478 A (清华大学) 2016年 10月 26日 (2016-10-26) 全文	1
A	CN 106067677 A (清华大学) 2016年 11月 2日 (2016-11-02) 全文	1

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

"A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

"E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

"L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

"O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

"P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

"T" 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

"X" 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

"Y" 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

"&" 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2018年 2月 13日	2018年 2月 26日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451	受权官员 黄勇 电话号码 (86-10)010-53961255

表 PCT/ISA/210 (第2页) (2009年7月)

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2017/114463

检索报告引用的专利文件			公布日（年/月/日）	同族专利	公布日（年/月/日）
CN	106682369	A	2017年 5月 17日	无	
CN	106056251	A	2016年 10月 26日	无	
CN	106447113	A	2017年 2月 22日	无	
CN	106998079	A	2017年 8月 1日	无	
CN	106056478	A	2016年 10月 26日	无	
CN	106067677	A	2016年 11月 2日	无	