

面向能源互联网的电-气耦合网络状态估计技术

董今妮, 孙宏斌, 郭庆来, 盛同天, 乔铮

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市海淀区 100084)

State Estimation of Combined Electric-Gas Networks for Energy Internet

DONG Jinni, SUN Hongbin, GUO Qinglai, SHENG Tongtian, QIAO Zheng

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments
(Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Energy management system are widely adopted in traditional power system to ensure its security, reliability and efficiency. Similarly, energy management system also needs to be used in combined electric-gas networks. State estimation for combined electric-gas networks is the basis of their energy management system. In this paper, in aspect of state estimation for gas network, steady model for complex gas network was established, considering characteristics of compressor and regulator. State estimation considering coupling components was established for combined electric-gas networks. This paper tested accuracy and bad data identification performance for combined state estimation.

KEY WORDS: combined electric-gas networks; state estimation; bad data identification; energy internet; integrated energy system

摘要: 为保障电-气耦合网络安全可靠高效的运行, 参考电力系统能量管理系统, 可以形成电-气耦合网络能量管理系统。其中, 电-气耦合网络状态估计是电-气耦合网络能量管理的基础, 可以为后续电-气耦合网络优化调度、安全评估提供高精度的全局一致解。在考虑气网中压缩机和调节阀特性的情况下, 建立了气网稳态状态估计模型, 实现了对复杂气网的状态估计, 在此基础上进一步建立了电-气耦合状态估计模型, 并测试了其在状态估计精度和坏数据识别方面的性能。

关键词: 电-气耦合; 状态估计; 坏数据识别; 能源互联网; 综合能源系统

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2001

0 引言

近些年由于能源短缺和环境恶化带来的一系列

负面影响已越来越难以忽视。在环境方面, 2012年, 空气污染造成的损失成本占 GDP 的 3.8%; 在能源生产方面, 中国人均能源资源拥有量还不到世界平均水平的一半, 而与此同时, 大量弃风、弃光等行为造成了能源的极大浪费; 另一方面, 在能源消费上, 中国单位 GDP 的能耗是世界平均水平的 2.5 倍。能源生产的低效和能源消费的高能耗造成了环境问题、能源短缺和经济压力。因此为解决在能源和环境上的问题, 必然要提高能源生产的效率, 降低能源消费的能耗, 以及提高可再生能源的利用率。而这也是能源互联网发展的动因之一。另一方面, 国家相关政策也在大力推动能源互联网发展。2016年, 发改委发放了《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》^[1], 提出要“以‘互联网+’为手段, 以智能化为基础”, 大力推动能源互联网发展, 推进能源革命。能源互联网是由多种形式的能量流构成的网络, 包括电、热、冷、气、交通等多个网络在物理层面和信息层面的深度融合。与传统的电、热、冷、气、交通等子网络割裂运行不同, 能源互联网实现了多能类型的开放互联, 通过挖掘各网络不同的特性, 提高综合能源利用效率、促进可再生能源的高消纳。

目前国内外关于能源互联网的研究包括美国 FREEDM、德国 E-Energy、日本 Digital Grid, 以及我国新奥泛能网等, 文献[2]对这些能源互联网关键技术进行了较为详细的介绍。

为合理调度能源互联网, 与电力系统类似, 仿照电力系统中的电网能量管理系统, 形成能源互联网能量管理系统, 实现能源互联网的优化调度, 安全预警和协同控制^[3]。其中状态估计是能量管理系统的基础, 是后续能源互联网优化调度、安全评估的基础。文献[4]介绍了能量网络理论, 总结了能量网络的共性, 为建立形式统一的能源互联网能量管理系统提

基金项目: 国家自然科学基金项目(51537006); 国家自然科学基金委创新研究群体项目(51321005)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC) (51537006); the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China(NSFC)(51321005).

供了依据。目前在能源互联网中,发展得最为广泛的是电、热、气3个网络,在各自的领域,各网络的建模方法也相对比较成熟。就状态估计而言,电力系统在状态估计的研究上已经较为成熟。本人在文献[5]中提出了一种热电联合状态估计方法。

热电联合网络由于热网在传热过程中不可避免的热损,供应范围通常较小,一般在园区级,其中热网通常呈辐射状分布,与配电网类似。相比之下,电-气耦合网络由于在传输过程中产生的损耗很少,在建模中常常可以忽略不计,其供应范围通常在城市级及以上,并且为保证供气的可靠性,气网通常含有环,与输电网类似。此外,气网中的各类控制元件与热网中的控制元件在运行特性上也有所不同,因此虽然气网和热网在物理模型上有一定的相似性,但状态估计方法上还是有较大不同。在电-气耦合状态估计方面,目前研究还较为空白。文献[6-8]提出了几种基于卡尔曼滤波的气网动态状态估计方法,其分析的对象通常为管道或非常简单的网络,目前还没有针对复杂管网的稳态状态估计方法。

由于热网在传热过程中会不可避免地产生热损,因此热网难以进行远距离传输。相比之下,天然气管网在传输过程中很少产生损耗,因此天然气可以进行远距离传输,如西气东输。此外,还可以设置储气装置对天然气进行存储,显然储气的损耗也小于储热的损耗,储气装置相比储热装置还是较为普及。另一方面,天然气管道通常设置为双路,采取一用一备,这种设置使得天然气管网故障的几率较供热管网低很多。从储气装置和双路管网2个方面,天然气管网的安全性远高于热网,这些都得益于天然气管网传输与储存过程中的小损耗。因此在我国,天然气管网较热网要更为普及。

考虑到天然气管网在拓扑结构特点和控制元件特性上与热网的不同,因此迫切需要建立气网状态估计方法,与热网状态估计方法相区分。本文将建立针对复杂气网的稳态状态估计模型,并建立气网标么化体系,在此基础上,本文将考虑电-气耦合元件的特性,建立电-气耦合网络状态估计方法。本文测试了提出的气网状态估计方法在非全量测下补全量测,进行全网监控的性能,以及在非全量测下辨识多坏数据的能力。本文还测试了建立的电-气耦合状态估计方法的估计效果,证明电-气耦合状态估计相比单独状态估计的两大优势:得到满足耦合元件运行约束的状态估计结果;能够进行边界坏数据辨识,成功定位单独状态估计不能辨识的坏数据。

1 气网状态估计模型

1.1 气网基本特性

1.1.1 天然气稳态模型

天然气稳态模型可以用流量连续方程、压力环路方程和阻力特性方程来描述。

流量连续方程为

$$\left(\sum_{\langle i,j \rangle \in \sigma_{gi}} f_{ij}\right) + l_{gi} = 0 \quad (1)$$

压力环路方程为

$$\sum_{\langle i,j \rangle \in \theta_g} \Pi_{ij} = 0 \quad (2)$$

阻力特性方程为

$$\Pi_{ij} = K_{ij} f_{ij} |f_{ij}|^{k-1} \quad (3)$$

式中: f_{ij} 为气网从节点*i*流向节点*j*的管道流量, Nm^3/h ; l_{gi} 为气网节点*i*注出流量, Nm^3/h ; σ_{gi} 为气网以节点*i*为管道首端的管道集合; θ_g 为热网中任意一条回路中所有管道的集合; $\Pi_{ij} = \Pi_i - \Pi_j = p_i^2 - p_j^2, \text{bar}^2$; p_i 为气网节点*i*压力, bar ; K_{ij} 是与气网管道各项参数有关的一项系数,其特性与蒸汽供热管网相类似,气体的传输速度不影响该参数; k 为由气体输送压力决定的系数,其与输送压力的关系^[9]为

$$k = \begin{cases} 2 & 0 < p < 0.75 \text{ bar} \\ 1.848 & 0.75 \text{ bar} \leq p \leq 7 \text{ bar} \\ 1.854 & p > 7 \text{ bar} \end{cases} \quad (4)$$

传输气体的温度会影响该项参数,若气体温度基本保持恒定,则可以采用文献[9]所述方法计算,此时该项系数仅与管道参数有关,可以处理为恒定。若气体温度会发生变化,则可采用文献[10]中所述方法,在每一次迭代过程中都重新计算并更新。

1.1.2 压缩机与调压阀

压缩机和调压阀是气网中常见的控制元件。不同于热网受限于传输过程中的热损,只能在园区范围内供热,天然气的供应范围变化较大,大到可以跨省传输,如西气东输;小到一个园区内的天然气输送。不同的输气范围,对天然气管网的设备配置也有不同的要求。小范围输送通常只需适当配备一些阀门进行基本的控制,而大范围的输气则由于压降损耗较大,需要合理配置压缩机,在压力不够时进行升压。

压缩机根据特性不同可以分为4类^[11]:流量恒定、出口压力恒定、入口压力恒定、压缩比恒定。常用的压缩机是出口压力恒定和压缩比恒定2类,本小节仅讨论这2类压缩机。

出口压力恒定类压缩机可建模为

$$p_{\text{out}} = p_{\text{compcns}} \quad (5)$$

压缩比恒定类压缩机可建模为

$$\frac{p_{\text{out}}}{p_{\text{in}}} = r_{\text{compcns}} \quad (6)$$

式中: p_{in} 为压缩机入口压力, bar; p_{out} 为压缩机出口压力, bar; p_{compcns} 为出口压力恒定类压缩机的出口压力常数, bar; r_{compcns} 为压缩比恒定类压缩机的压缩比。

由于天然气传输到用户的压力通常远大于用户所需的压力, 因此用户侧常常会配置调压阀, 以调整天然气压力降低到用户的需求, 天然气管网中有时也会配置调压阀, 用以调整管网中的天然气流量。

调压阀的建模与压缩机类似, 在此不再赘述。唯一的不同之处在于, 压缩机通过做功可以对通过其的气体进行升压, 而调压阀只能对通过其的气体进行降压。

1.2 气网等效模型

1.1 中介绍了气网的基本特性, 为了方便分析, 需要在此基础上形成气网的等效网络模型。如图 1 所示是一个配置相对较完全的气网拓扑结构图^[11], 其中包括了 2 台压缩机、11 条输气管道、6 个用气负荷和 2 个供气源。压缩机通常建在某条远距离输气管道的中间, 在供气压力不够的时候起到升压作用。由于压缩机的特性通常与其入口和出口压力有关, 因此将气网中的压缩机和调压阀都等效为支路, 从而形成图 1 所示气网等效网络。

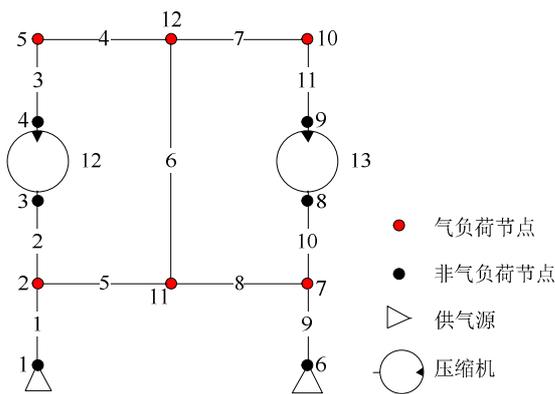


图 1 气网等效模型结构

Fig. 1 Structure of natural gas model

设本小节中讨论的气网有 N 个节点、 B 条支路, 其节点-支路关联矩阵为 A_0 , 本小节将讨论等效后的气网模型的表达式。

1.2.1 流量连续方程

流量连续方程式(1)可以写为

$$A_0 f_b + L_g = 0 \quad (7)$$

式中: $f_b = [f_{b1} \ f_{b2} \ \dots \ f_{bB}]^T$, 为气网 B 条支路流量构成的向量, Nm^3/h , 下标 b 表示支路量;

$L_g = [l_{g1} \ l_{g2} \ \dots \ l_{gN}]^T$, 为气网 N 个节点的注出流量构成的向量, Nm^3/h 。

根据支路的特性, 将支路按照真实支路(正常管道, 表示为下标 L_p), 虚拟支路(压缩机和调压阀等效支路, 表示为下标 G_p)进行排列, 得到节点-支路关联矩阵可以写作

$$A_0 = [A_{L_p} \ A_{G_p}]$$

进一步将节点按照真实节点(实际存在的节点, 表示为下标 1), 虚拟节点(实际不存在的节点, 即虚拟支路两端节点, 表示为下标 2)进行排列, 节点-支路关联矩阵可以整理为

$$A_0 = \begin{bmatrix} A_{1L_p} & \mathbf{0} \\ A_{2L_p} & A_{G_p} \end{bmatrix} \quad (8)$$

以图 1 中 3 号虚拟节点为例, 由于 2 号节点和 5 号节点之间是一条真实的管道, 因此在实际中位于管道中间的 3 号节点是不存在的, 故 3 号节点的节点注出流量为 0。从物理特性上来讲, 对所有虚拟节点而言, 其节点注出流量为 0。同时, 将式(8)代入式(7), 有

$$\begin{bmatrix} A_{1L_p} & \mathbf{0} \\ A_{2L_p} & A_{G_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{bL_p} \\ f_{bG_p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{g1} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{0}$$

整理得

$$\begin{cases} A_{1L_p} f_{bL_p} + L_{g1} = \mathbf{0} \\ A_{2L_p} f_{bL_p} + A_{G_p} f_{bG_p} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (9)$$

对于式(9)中 A_{G_p} 而言, 由于在实际中通常不存在 2 个压缩机串联的情况, 即使存在, 也可以通过等效处理将 2 个压缩机等效为一个压缩机, 因此在最后等效的网络中, 任何一个节点都不会同时与 2 个压缩机相连。由此, 可得到下述数量关系:

虚拟支路首端节点数=虚拟支路末端节点数=虚拟支路数

因此 A_{G_p} 中节点排列顺序可以按照虚拟支路首端节点(表示为下标 f)、虚拟支路末端节点(表示为下标 t)的顺序排列, 即

$$A_{G_p} = \begin{bmatrix} A_{fG_p} \\ A_{tG_p} \end{bmatrix}$$

用同样的方法处理 A_{2L_p} , 并代入式(9), 最终整理得

$$\begin{cases} A_{1L_p} f_{bL_p} + L_{g1} = \mathbf{0} \\ A_{2fL_p} f_{bL_p} + A_{fG_p} f_{bG_p} = \mathbf{0} \\ A_{2tL_p} f_{bL_p} + A_{tG_p} f_{bG_p} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (10)$$

1.2.2 压力环路方程

压力环路方程式(2)可以写作如下形式:

$$A^T \Pi = \Delta \Pi_b \quad (11)$$

式中: A 为降阶的节点-支路关联矩阵, 通常选取某一气源节点作为参考节点进行降阶; Π 为各节点压力的平方与参考节点压力平方的相对值, bar^2 ,

$$\Pi = \begin{bmatrix} \Pi_1 \\ \Pi_2 \\ \vdots \\ \Pi_{N-1} \end{bmatrix}; \Delta \Pi_b \text{ 为各支路首末端压力平方差,}$$

$$\text{bar}^2, \Delta \Pi_b = [\Delta \Pi_{b1} \quad \Delta \Pi_{b2} \quad \cdots \quad \Delta \Pi_{bb}]^T。$$

将式(11)扩展, 并整理得

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}_{1Lp}^T & A_{2Lp}^T \\ \mathbf{0} & A_{Gp}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Pi_1 \\ \Pi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \Pi_{Lp} \\ \Delta \Pi_{Gp} \end{bmatrix}$$

式中: \tilde{A}_{1Lp} 为降阶的 A_{1Lp} , 由于选取的参考节点为某一气源节点, 属于真实节点, 因此该参考节点必位于矩阵 A_{1Lp} 中。将上式整理得

$$\begin{cases} \tilde{A}_{1Lp}^T \Pi = \Delta \Pi_{Lp} \\ A_{Gp}^T \Pi_2 = \Delta \Pi_{Gp} \end{cases} \quad (12)$$

式中 \tilde{A}_{Lp} 为降阶的矩阵 A_{Lp} , $\tilde{A}_{Lp} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{1Lp} \\ A_{2Lp} \end{bmatrix}$ 。

1.2.3 阻力特性方程

对式(3)所述阻力特性方程, 记作

$$f_{ij} = \left(\frac{\Delta \Pi_{ij}}{K_{ij}}\right)^{\frac{1}{k}} = \varphi_g(\Delta \Pi_{ij}) \quad (13)$$

对于压缩机和调压阀等虚拟支路, 上述阻力特性方程不适用, 将式(12)中真实支路部分代入式(13), 有

$$f_{bLp} = \varphi_g(\Delta \Pi_{bLp}) = \varphi_g(\tilde{A}_{Lp}^T \Pi) \quad (14)$$

对于压缩机和调压阀等虚拟支路, 可将式(5)(6)写作

$$\begin{cases} \Pi_{tGpPC} = \Pi_{comp} \\ \Pi_{tGpRC} = r_{comp}^2 \Pi_{tGpRC} \end{cases} \quad (15)$$

式中: Π_{tGpPC} 为出口压力恒定类压缩机或调压阀的出口压力平方向量; Π_{tGpRC} 为压缩比恒定类压缩机或调压阀的出口压力平方向量; Π_{tGpRC} 为压缩比恒定类压缩机或调压阀的入口压力平方向量; Π_{comp} 为出口压力恒定类压缩机或调压阀的出口压力常数平方向量; 以上4个向量中各元素单位均为 bar^2 ; r_{comp} 为压缩比恒定类压缩机或调压阀的压缩比向量。

1.3 气网标么化方法

在电力系统中, 在进行潮流计算、状态估计、

优化调度之前, 需要先对电力系统进行标么化处理。为了便于电-气耦合后, 2个子网络的一致化, 故需对气网进行标么化处理。除此之外, 气网各类量测的数值相差很大, 有时甚至会产生几个数量级的差距, 为了便于统一收敛判据, 也需要对气网进行标么化处理。鉴于气网的基本特性, 气网标么化基值选取需要满足一些基本条件。

根据式(3), 气网的基值间需满足

$$\begin{cases} \Pi_B = p_B^2 \\ \Pi_B = K_B f_B^k \\ l_{gB} = f_B \end{cases} \quad (16)$$

另一方面, 在与电网耦合时, 气网的流量和热值的基值与电网所选功率基值有关, 这将在第2.1节中进行分析。

1.4 状态估计模型

1.4.1 气网量测量与状态量

气网的量测量包括了各节点压力平方, 各支路流量, 各节点注出流量, 可写为

$$z_g = \begin{bmatrix} \Pi \\ f_b \\ L_g \end{bmatrix}$$

上述各项量测中, f_b 、 L_g 可以直接利用流量计测量得到, 而 Π 则先利用压力计测出相应压力, 再通过计算求得。因此, Π 并非量测量, 而是通过量测量计算得到的伪量测量。

对于直接通过测量得到的量测量, 其误差分布遵循高斯分布, 而通过计算得到的伪量测量, 其误差分布则不再遵循高斯分布, 现对伪量测量的误差分析如下。

对于压力的量测方程, 可表现为

$$p_z = \bar{p} + v \quad (17)$$

对式(17)两边取平方有

$$\Pi_z = p_z^2 = (\bar{p} + v)^2 = \bar{p}^2 + 2\bar{p}v + v^2 \quad (18)$$

式中: p_z 为压力量测值; \bar{p} 为压力真实值; v 为压力量测误差; Π_z 为压力平方伪量测值。

忽略式(18)中 v^2 项, 则式(3)—(17)可以近似写作

$$\Pi_z \approx \bar{\Pi} + 2\bar{p}v \quad (19)$$

式中: $\bar{\Pi}$ 为压力平方真实值; 若 $v \sim N(0, \sigma)$, 则近似地可以认为有 $\Pi_z \sim N(\bar{\Pi}, 2\bar{p}\sigma)$, 在实际工程中, 由于不知道 \bar{p} 的值, 故可以再近似地处理为

$$\Pi_z \sim N(\bar{\Pi}, 2p_z\sigma) \quad (20)$$

参考电力系统的状态量选取方法选取气网的状态量, 取气网节点压力平方作为状态量, 记作

$$\mathbf{x}_g = [\boldsymbol{\Pi}]$$

1.4.2 气网状态估计

采用电力系统中最常用的最小二乘法进行气网状态估计，可以将气网状态估计问题转化为如下优化问题。

$$\begin{cases} \min F_g(\hat{\mathbf{x}}_g) = [\mathbf{z}_g - \mathbf{g}_g(\hat{\mathbf{x}}_g)]^T \mathbf{R}_g^{-1} [\mathbf{z}_g - \mathbf{g}_g(\hat{\mathbf{x}}_g)] \\ \text{s.t. } \mathbf{c}_g(\hat{\mathbf{x}}_g) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (21)$$

式中： \mathbf{R}_g 为气网量测误差的协方差矩阵，为对角阵； $\hat{\mathbf{x}}_g$ 为气网状态量的估计值； $\mathbf{g}_g(\hat{\mathbf{x}}_g)$ 为气网量测量的估计值； $\mathbf{c}_g(\hat{\mathbf{x}}_g) = \mathbf{0}$ 为气网零等式约束。

除气网状态量外的气网量测量估计值计算方法，可以根据式(10)(14)推得，具体为

$$\begin{cases} \mathbf{f}_{bLp}(\hat{\mathbf{x}}_g) = \varphi_g(\tilde{\mathbf{A}}_{Lp}^T \hat{\boldsymbol{\Pi}}) \\ \mathbf{f}_{bGp}(\hat{\mathbf{x}}_g) = -\mathbf{A}_{Gp}^{-1} \mathbf{A}_{2Lp} \mathbf{f}_{bLp}(\hat{\mathbf{x}}_g) = -\mathbf{A}_{Gp}^{-1} \mathbf{A}_{2Lp} \varphi_g(\tilde{\mathbf{A}}_{Lp}^T \hat{\boldsymbol{\Pi}}) \\ \mathbf{L}_{g1}(\hat{\mathbf{x}}_g) = -\mathbf{A}_{Lp} \mathbf{f}_{bLp}(\hat{\mathbf{x}}_g) = -\mathbf{A}_{Lp} \varphi_g(\tilde{\mathbf{A}}_{Lp}^T \hat{\boldsymbol{\Pi}}) \end{cases}$$

式(21)中零等式约束为压缩机或调压阀支路的特性约束，整理式(15)可得

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Pi}_{GpPC} - \boldsymbol{\Pi}_{comp} = \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\Pi}_{GpRC} - \mathbf{r}_{comp}^2 \boldsymbol{\Pi}_{GpRC} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (22)$$

式(21)中所述带等式约束的优化问题在电力系统中有两种常见处理方法：将所有零约束处理为量测误差极小的伪量测，形成一个无约束优化问题，采用牛-拉法进行迭代求解；采用拉格朗日乘子法处理零约束，求解带等式约束的优化问题。

状态估计除了可以减小量测误差的影响，获得更准确的网络运行情况外，还可以起到坏数据辨识的作用。在实际工程中，各项量测值在获取过程中可能存在测量仪器故障，传输数据过程中断等问题，从而造成量测中存在坏数据。在电力系统中，最常见的处理坏数据的方法是正则化残差法，在此不具体阐述该方法，具体可参考文献[12]。在之后的算例中，将采用正则化残差法来进行坏数据辨识。

2 电-气耦合网络模型

天然气属于一次能源，它可以通过燃气轮机进行发电，燃气轮机是最常见的电-气耦合元件，图2刻画了一个常见的电-气耦合网络的能流情况。

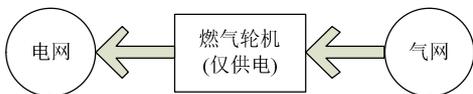


图2 电-气耦合网络能流情况

Fig. 2 Power flow for combined electricity and gas networks

由于电-气耦合网络中不会存在很多电-气耦合元件，因此电、气网络间的耦合属于弱耦合，电-气耦合网络状态估计并不能依靠耦合约束来增加多少冗余度，从而显著提升状态估计的效果。

电-气耦合网络状态估计的意义主要在于两方面：获得全局一致解，实现边界坏数据辨识。本文将在第4章通过算例来说明电-气耦合状态估计在这两方面的优势。

2.1 耦合元件简介

燃气轮机是最常见的电-气耦合元件，燃气轮机通过天然气燃烧所产生的燃气推动燃气轮机做功，以此来发电。另一方面，燃气轮机轮机排出的烟气中含有可利用热量^[13]，可以用作热网的热源，为热网供热。当燃气轮机的烟气余热被用来为热网供热时，燃气轮机可以看作一个电-热-气耦合元件。本小节仅讨论当燃气轮机作为电-气耦合元件时的特性，燃气轮机的能量转换关系刻画如下。

$$P_{gas} = \frac{1}{3600} \eta_{elec, gas} L_{g, gas} C_{V, gas} \quad (23)$$

式中： P_{gas} 为燃气轮机发电功率，MW； $\eta_{elec, gas}$ 为燃气轮机发电效率； $L_{g, gas}$ 为燃气轮机耗气量， Nm^3/h ； $C_{V, gas}$ 为天然气热值， MJ/Nm^3 。

式(23)引入了耗气量与功率间的关系，由此得到气网和电网标么化时基值选取的关系

$$P_B = C_{V, gas} l_{gB} \quad (24)$$

式中： P_B 为电功率基值，MW； $C_{V, gas}$ 为天然气热值基值， MJ/Nm^3 ； l_{gB} 为天然气流量基值， Nm^3/h 。

2.2 电-气耦合状态估计模型

与1.4节中类似，采用最小二乘法对电-气耦合网络进行状态估计，则该状态估计问题，可以转换为如下优化问题。

$$\begin{cases} \min F(\hat{\mathbf{x}}) = [\mathbf{z}_c - \mathbf{g}_c(\hat{\mathbf{x}}_c)]^T \mathbf{R}_c^{-1} [\mathbf{z}_c - \mathbf{g}_c(\hat{\mathbf{x}}_c)] + \\ [\mathbf{z}_g - \mathbf{g}_g(\hat{\mathbf{x}}_g)]^T \mathbf{R}_g^{-1} [\mathbf{z}_g - \mathbf{g}_g(\hat{\mathbf{x}}_g)] \\ \text{s.t. } \mathbf{c}(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (25)$$

式中： \mathbf{R}_c 为电网量测误差的协方差矩阵，为对角阵； $\hat{\mathbf{x}}_c$ 为电网状态量的估计值； $\mathbf{g}_c(\hat{\mathbf{x}}_c)$ 为电网量测量的估计值； $\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_c \\ \hat{\mathbf{x}}_g \end{bmatrix}$ 为整个电-气耦合网络状态量估计值； $\mathbf{c}(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{0}$ 为零等式约束，具体可以写为

$$\begin{cases} \mathbf{c}_g(\hat{\mathbf{x}}_g) = \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{L}_{g, gas}^{in} - \mathbf{P}_{gas}^{out} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (26)$$

式中： $\mathbf{L}_{g, gas}^{in}$ 为燃气轮机耗气量向量，包括电-气耦

合网络中所有燃气轮机； P_{gas}^{out} 为燃气轮机发电功率向量，包括电-气耦合网络中所有燃气轮机； Γ 为燃气轮机转换系数矩阵，为对角阵，可通过式(23)获得。

3 气网状态估计计算例分析

对图 1 所示的气网进行状态估计，网络参数的情况可以参见文献[11]，该算例在高压下输气，取式(3)中指数为 1.854，2 台压缩机均为出口压力恒定，设置出口压力为 30 bar。以文献[11]中潮流计算结果作为状态估计的真值，在此基础上叠加高斯噪声，形成状态估计的量测值。本章将在 3.1 中分析气网状态估计在全量测配置下的效果，主要展现坏数据辨识能力，状态估计的精度分析可以参见第 4 章中单独估计和耦合估计的对比分析；将在 3.2 中分析气网状态估计在非全量测配置下补全量测的效果，以及坏数据辨识能力。

3.1 全量测配置下状态估计

在全量测配置下，在生成的状态估计量测值的基础上，添加坏数据，测试在多坏数据下，气网状态估计的坏数据辨识能力，坏数据设置见表 1，分别在气源节点、气负荷节点设置流量量测坏数据，真实支路、虚拟支路设置流量量测坏数据。图 3 是坏数据辨识结果，在全量测下，气网可以同时正确辨识多个坏数据，得到正确的状态估计结果。

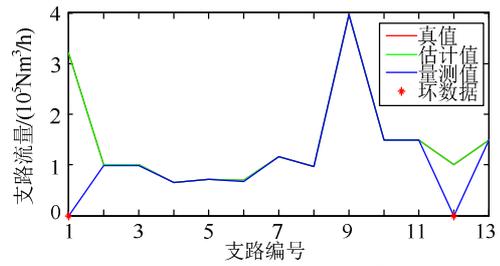
测试在该量测配置下，不同坏数据个数时，气网状态估计的坏数据辨识能力，其结果如表 2 所示。当坏数据个数不超过 11 时，气网状态估计可以正确辨识所有坏数据，当坏数据个数超过 11 时，气网状态估计不收敛，无法正确辨识所有坏数据。全量测配置下，共设置了 33 个测点，可以容忍的坏数据最多为 11 个，坏数据处理能力相对较好。

3.2 非全量测配置下状态估计

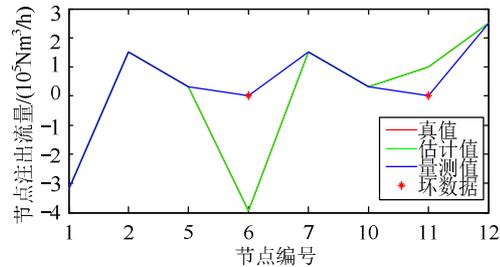
状态估计的一个重要功能就是在非全量测配置下，实现对气网全网运行状况的监控，补全气网量测。在实际气网运行中，对支路流量的监控相对较少，由于结算的需求，对用户侧和供气侧的节点注出负荷必然会配置量测，因此本小节设置算例量测配置如表 3 所示。为了验证在该量测配置下，气网状态估计的坏数据辨识能力，设置坏数据如表 4 所示。

表 1 气网坏数据设置情况
Tab. 1 Bad data setting for natural gas network

坏数据设置(编号)	说明	坏数据设置值
支路流量(1)	真实支路坏数据	0
支路流量(12)	虚拟支路坏数据	0
节点注出量(6)	气源节点坏数据	0
节点注出量(11)	气负荷节点坏数据	0



(a) 状态估计前后支路流量



(b) 状态估计前后节点注出流量

图 3 全量测下气网状态估计坏数据辨识情况

Fig. 3 Bad data identification for natural gas network under full measurements

表 2 气网状态估计不同数量坏数据辨识结果

Tab. 2 Bad data identification for natural gas network under different quantity

坏数据个数	正确辨识坏数据个数	是否正确辨识全部坏数据
9	9	是
10	10	是
11	11	是
12	不收敛	不收敛

表 3 气网量测配置情况

Tab. 3 Measurements configuration for natural gas network

量测类型	配置情况	配置量测数/总量测数
节点压力	全配置	12/12
支路流量	不配置	0/13
真实节点注出流量	全配置	8/8

表 4 非全量测配置下气网坏数据设置

Tab. 4 Bad data setting for natural gas network under nonfull measurements

坏数据设置(编号)	说明	坏数据设置值
节点注出量(6)	气源节点坏数据	0
节点注出量(11)	气负荷节点坏数据	0

状态估计的结果如图 4 所示。图 4(a)为支路流量状态估计情况，可以发现，在状态估计前，并没有对支路流量进行量测，无法监控支路流量情况，并及时判断是否满足安全运行的条件，而状态估计后，支路流量的估计值与真值非常接近，通过状态估计很好地了解气网各支路的运行情况。图 4(b)为真实节点注出流量的状态估计结果，状态估计成功辨识出了 6 号节点和 11 号节点处的坏数据，并剔除了坏数据对状态估计的影响，得到了正确的状态估计结果。

测试在该量测配置下，不同坏数据个数时，气

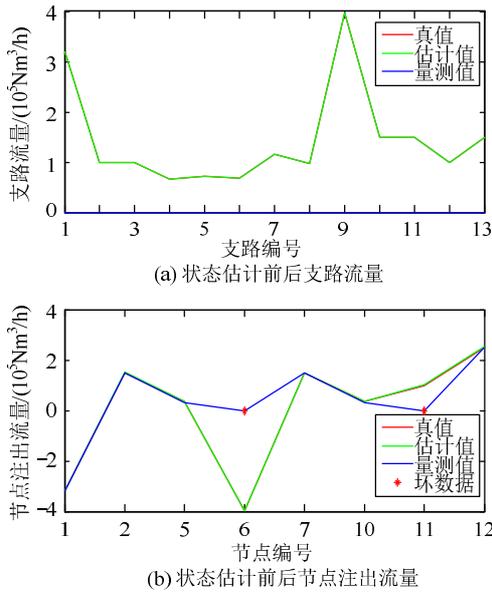


图 4 非全量测配置下气网状态估计结果

Fig. 4 State estimation for natural gas network under nonfull measurements

网状态估计的坏数据辨识能力,其结果如表 5 所示。当坏数据个数不超过 7 时,可以正确辨识所有坏数据,当坏数据个数超过 7 时,则状态估计不收敛。在该量测配置下,共设有 20 个测点,可以容忍的坏数据最多为 7 个,与全量测配置时气网状态估计的比例相似,坏数据处理能力相对较好。

表 5 非全量测下气网状态估计不同数量坏数据辨识结果
Tab. 5 Bad data identification for natural gas network under nonfull measurements with different quantity

坏数据个数	正确辨识坏数据个数	是否正确辨识全部坏数据
5	5	是
6	6	是
7	7	是
8	不收敛	不收敛

4 电-气耦合状态估计算例分析

电-气耦合的情况通常发生在城市级及以上范围的供电供气中,对图 5 所示电-气耦合网络^[11]进行状态估计,该网络各项参数,以及潮流真值可以参见文献[11]。

在该算例中,电网节点 1 与大电网相连,电网节点 2 和 4 配有 2 台燃气轮机,燃气轮机仅作发电使用,不进行热电联供。燃气轮机发电量为 200MW,效率取 55%。

4.1 单独估计与耦合估计比较

比较电-气耦合状态估计与单独状态估计的效果,通过在真值上叠加高斯噪声,进行 5000 次蒙特卡洛仿真实验。表 6 为电网单独状态估计和电-气耦合状态估计电网部分统计数据的结果,表 7 为气网单独状态估计和电-气耦合状态估计气网部分

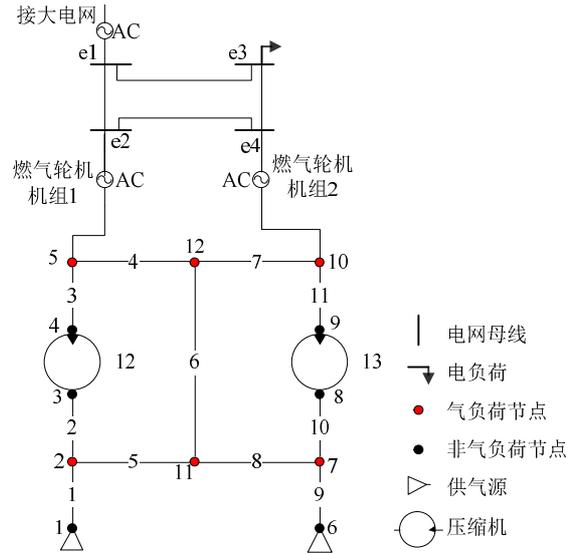


图 5 电-气耦合网络结构图

Fig. 5 Structure of combined electricity and gas networks

表 6 电网单独状态估计与电-气耦合估计效果比较

Tab. 6 Comparison between separate state estimation and combined state estimation for electricity network

统计类型	计算时间/s	迭代次数	S_M	S_H	$S_H/S_M \times 100\%$
电网单独估计	0.0206	5.036	0.99	0.480	48.49%
电-气耦合估计	0.0791	7.437	0.99	0.408	41.23%

表 7 气网单独状态估计与电-气耦合估计效果比较

Tab. 7 Comparison between separate state estimation and combined state estimation for natural gas network

统计类型	计算时间/s	迭代次数	S_M	S_H	$S_H/S_M \times 100\%$
气网单独估计	0.0293	6.663	0.991	0.535	53.97%
电-气耦合估计	0.0791	7.437	0.991	0.528	53.23%

统计数据的结果。

采取的统计分析量有量测误差统计值和估计误差统计值。

量测误差统计值^[12]

$$S_M = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_{gi,t} - g_{gi}(\bar{x}_g)}{\sigma_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

估计误差统计值^[12]

$$S_H = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{g_{gi}(\hat{x}_{gt}) - g_{gi}(\bar{x}_g)}{\sigma_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中: T 为蒙特卡洛实验次数; m 为量测量个数; σ_i 为第 i 项量测量标准差; $z_{gi,t}$ 为第 i 项量测量第 t 次量测值; $g_{gi}(\hat{x}_{gt})$ 为第 i 项量测量第 t 次估计值; $g_{gi}(\bar{x}_g)$ 为第 i 项量测量真值。

通常用 S_H/S_M 来表示状态估计的效果, S_H/S_M 值越小,状态估计效果越好, $S_H/S_M < 1$ 则说明状态估计的结果优于量测结果。

从表 6 可以看出电-气耦合状态估计对电网的估计效果,相比电网单独估计而言,有相对明显的提升,在本算例中,主要原因是电网规模较小,气

网的冗余度相对要多一些，电-气耦合状态估计可以利用气网较多的冗余度，来提高电网状态估计的效果。但由于计算规模的扩大，电-气耦合状态估计所用的时间大约是电网单独状态估计的 4 倍。

从表 7 可以看出，电-气耦合状态估计对气网的估计效果，相比气网单独估计而言，几乎没有提升。而相反的，由于计算规模的增大，电-气耦合状态估计所用的时间大约是气网单独状态估计的 3 倍。因此从提高气网状态估计精度的角度来看，电-气耦合状态估计并不优于气网单独状态估计。

综上所述，电-气耦合状态估计的主要意义不在于估计精度的提升，这一点与电-热耦合状态估计相似。电-气耦合状态估计的主要意义在于得到全局一致解，并实现边界坏数据辨识，这两点将会分别在 4.2、4.3 小节中进行说明。

4.2 全局一致解与耦合端口精度分析

对于电-气耦合状态估计，由于考虑了电-气耦合元件约束，因此，电-气耦合状态估计的结果必然满足电-气耦合元件约束式(23)。当电网、气网单独进行状态估计时，其状态估计的结果未必能契合式(23)。与电-热耦合状态估计类似，为了分析电网、气网单独状态估计的结果，与电-气耦合元件的契合度，取统计分析量 S_2 为

$$S_2 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T | \Gamma L_{g, gas}^{in} - P_{gas}^{out} | \quad (27)$$

S_2 值越小，则端口契合度越好。分别取耦合元件端口精度为 0.002 pu 和 0.1 pu，进行电网、气网单独状态估计，共 5000 次蒙特卡洛仿真实验，其结果如表 8 所示。由于本算例中，2 台燃气轮机机组的发电量为 200 MW，因此当端口数据精度较高时，端口数据的不匹配值仅占端口数据实际值的 0.1%左右，此时可以近似看作全局一致解。而当端口数据精度不够时，电-气耦合元件端口契合度相对较低，此时若对端口契合度有较高要求，则有进行电-气耦合状态估计的必要性。

表 8 电-气耦合元件端口精度不同时单独状态估计端口契合度
Tab. 8 Comparison between separate state estimation and combined state estimation for different coupling component accuracy

统计算例	燃气轮机机组 1 S_2 /MW	燃气轮机机组 2 S_2 /MW
端口数据精度高	0.266	0.367
端口数据精度低	1.600	1.570

4.3 边界坏数据辨识能力分析

对于电网而言，其节点上可能会存在多个注入，尤其对发电机节点而言，其也可能接有负荷。如对图 5 所示电-气耦合网络而言，节点 2 和 4 除

了接燃气轮机外，同时可能接有负荷，此时电-气耦合网络如图 6 所示。

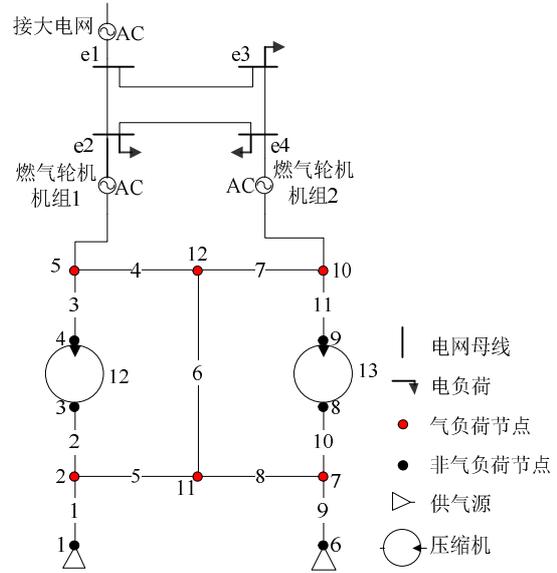


图 6 电网节点多注入的电-气耦合网络结构
Fig. 6 Structure of combined electricity and gas networks with multi-injection for electricity network

对于图 6 中所示的电-气耦合网络，在进行电网状态估计时，是将各节点注入注出求和，再进行状态估计。若节点注入量中存在坏数据，则电网状态估计只能定位到相应节点，但不能正确找出究竟是该节点的哪项注入出现了坏数据，而电-气耦合状态估计则可以利用电-气耦合元件约束，找出坏数据具体出在哪里。在图 6 所示算例中，在节点 2 设置 270 MW 有功负荷，节点 4 设置 80 MW 有功负荷。

若节点 2 和 4 的发电机有功功率均出现坏数据，测试电-气耦合状态估计能否在非全量测配置下正确辨识坏数据，由于电网拓扑较为简单，为了保证坏数据的正确辨识，适当增加了量测配置，以提高冗余度。表 9 和表 10 分别为电网、气网量测配置情况。

当电网 2 号节点和 4 号节点发电机有功功率均出现坏数据时，由于电网各节点不止一个注入量，故将电网坏数据辨识的结果整理为表 11。

表 11 显示，当电网多注入节点存在坏数据时，

表 9 电-气耦合坏数据辨识电网量测配置
Tab. 9 Bad data setting for electricity network in combined electricity and gas networks

量测类型	配置情况	配置量测数/总量测数
节点电压幅值	全配置	4/4
节点有功注入功率	全配置	4/4
节点无功注入功率	全配置	4/4
支路正向有功功率	全配置	4/4
支路正向无功功率	全配置	4/4
支路反向有功功率	不配置	0/4
支路反向无功功率	不配置	0/4

表 10 电-气耦合坏数据辨识气网量测配置
Tab. 10 Bad data setting for natural gas network in combined electricity and gas networks

量测类型	配置情况	配置量测数/总量测数
节点压力	全配置	12/12
支路流量	不配置	0/13
真实节点注出流量	全配置	8/8

表 11 多注入电功率节点电-气耦合状态估计坏数据辨识结果
Tab. 11 Bad data identification for combined electricity and gas networks with multi-injection

节点编号 (源/荷)	量测值 (以注入为 正)/MW	估计值 (以注入为 正)/MW	是否 坏数据	是否 正确辨识
2(源)	0	199.38	是	是
2(荷)	-271.32	-270.47	否	—
4(源)	0	200.32	是	是
4(荷)	-84.88	-80.12	否	—

电-气耦合状态估计能够通过电气耦合约束，正确辨识出坏数据，而电网单独状态估计则无法正确定位坏数据。

5 结论

电-气耦合网络由于在传输过程中几乎没有损耗，其供应范围通常在城市级及以上，并且为保证供气的可靠性，气网通常含有环，与输电网类似。相比之下，热电联合网络由于热网在传热过程中不可避免的热损，供应范围通常较小，一般在园区级，其中热网通常呈辐射状分布，与配电网类似。因此电-气耦合网络状态与热电联合状态估计存在很多不同，需要独立于热电联合状态估计方法，建立电-气耦合状态估计方法。

本文第一次提出了适用于复杂气网的稳态状态估计方法。根据压缩机和调压阀的特性，建立了适用于复杂气网的稳态状态估计方法。通过算例，证实了该方法可以实现非全量测下的多坏数据辨识，符合实际工程对状态估计的需求。

在此基础上，本文建立了电-气耦合网络状态估计方法，其状态估计结果满足电-气耦合元件运行约束。单就状态估计结果的精度而言，电-气耦合估计的结果较单独估计并没有明显提升。但是由于电-气耦合状态估计考虑了电-气耦合元件的约束，因此满足电-气耦合元件的运行约束，而单独状态估计的结果往往不能契合电-气耦合元件的运行约束。此外，当电-气耦合网络边界出现多注入时，电-气耦合网络状态估计可以利用电-气耦合元件约束，辨识单独状态估计不能辨识的坏数据。同时电-气耦合网络状态估计方法也为电-气耦合网络能量管理系统后续的研究打下了基础。

参考文献

- [1] 国家发展改革委，国家能源局，工业和信息化部. 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[J]. 城市燃气, 2016(4): 4-9.
- [2] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网: 驱动力、评述与展望[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3005-3013.
Sun Hongbin, Guo Qinglai, Pan Zhaoguang, et al. Energy internet: driving force, review and outlook[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3005-3013(in Chinese).
- [3] 孙宏斌, 潘昭光, 郭庆来. 多能流能量管理研究: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 1-8.
Sun Hongbin, Pan Zhaoguang, Guo Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8(in Chinese).
- [4] 陈皓勇, 文俊中, 王增煜, 等. 能量网络的传递规律与网络方程[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(10): 66-76.
Chen Haoyong, Wen Junzhong, Wang Zengyu, et al. Transfer laws and equations of energy networks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(10): 66-76(in Chinese).
- [5] 董今妮, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 热电联合网络状态估计[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1635-1641.
Dong Jinni, Sun Hongbin, Guo Qinglai, et al. State estimation for combined electricity and heat networks[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1635-1641(in Chinese).
- [6] Behrooz A, Boozarjomehry R B H. Distributed and decentralized state estimation in gas networks as distributed parameter systems[J]. ISA Transactions, 2015(58): 552-566.
- [7] Behrooz A, Boozarjomehry H R B. Modeling and state estimation for gas transmission networks[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015(22): 551-570.
- [8] Durgut İ, Leblebicioğlu M K. State estimation of transient flow in gas pipelines by a Kalman filter-based estimator[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2016(35): 189-196.
- [9] Liu X, Mancarella P. Modelling, assessment and sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems[J]. Applied Energy, 2016(167): 336-352.
- [10] Martinez-Mares A, Fuerte-Esquivel C R. A unified gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2156-2166.
- [11] 张义斌. 天然气-电力混合系统分析方法研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [12] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 57-72.
- [13] 陆伟, 张士杰, 肖云汉. 燃气轮机与燃气内燃机在联供系统中的应用比较[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(6): 905-910.
Lu Wei, Zhang Shijie, Xiao Yunhan. Comparison of the application in CCHP between gas turbine and gas engine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(6): 905-910(in Chinese).



董今妮

收稿日期: 2017-08-17.

作者简介:

董今妮(1993), 女, 硕士研究生, 研究方向为多能流网络能量管理, 现就职于国网浙江电力公司检修分公司, E-mail: dongjinni@126.com;

孙宏斌(1969), 男, 博士, 教授, IET Fellow, IEEE Fellow, 通信作者, 从事调度自动化和配电自动化的研究、教学和开发工作, E-mail: shb@tsinghua.edu.cn.

(责任编辑 徐梅)