

综合能源系统分析的统一能路理论(一): 气路

陈彬彬, 孙宏斌, 陈瑜玮, 郭庆来, 吴文传, 乔铮

(清华大学电机系, 北京市 海淀区 100084)

Energy Circuit Theory of Integrated Energy System Analysis (I): Gaseous Circuit

CHEN Binbin, SUN Hongbin, CHEN Yuwei, GUO Qinglai, WU Wenchuan, QIAO Zheng

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The integrated energy system has been a hotspot and frontier of international research. To realize the disciplinary integration of different energy network research, an energy circuit theory was proposed based on the methodology of the deduction from “field” to “circuit” in the electric circuit theory. This paper derived a gaseous circuit model with distributed parameters in the time domain from the conservation equations of mass and momentum. Fourier transform was employed to map the gaseous circuit into the frequency domain and a two-port equivalent model with lump parameters was proposed to simplify the gaseous circuit model from partial differential equations to algebraic equations. Finally, the network matrix and network equation of the natural gas network were derived based on the gaseous circuit, having a unified mathematical form with those of the electricity network. It establishes the theoretical basis for the integrated analysis of the heterogeneous energy flows. The gaseous circuit method has less computational complexity and outperforms the conventional analysis method in terms of efficiency under the same accuracy.

KEY WORDS: integrated energy system; energy circuit; electric circuit; gaseous circuit; natural gas network

摘要: 综合能源系统已成为国内外研究的热点与前沿,为实现不同能源网络研究的学科融合,基于电路理论中“场”到“路”的推演方法论,提出统一能路理论。作为系列论文的第一部分,该文以天然气网络为对象,基于质量守恒与动量守恒方程推导了分布参数的时域气路模型,利用傅里叶变换将气路映射至频域并通过二端口等值得到集总参数模型,实现了气路模型从偏微分方程向代数方程的简化。最后基于气路模型导出了天然气网络的网络矩阵和网络方程,与电力网络的网络矩阵和网络方程在数学形式上具有高度的统一性,

从而奠定了气、电 2 种异质能流统一分析的理论基础。相比传统分析方法,气路方法具有更低的计算复杂度,算例结果表明其在计算效率上有显著优势。

关键词: 综合能源系统; 统一能路; 电路; 气路; 天然气网络

0 引言

近年来,以电、热、气为代表的多种能源网络紧密耦合,形成了多能优化互补的综合能源系统,提高了综合用能效率^[1],成为国内外研究的热点与前沿。

综合能源系统的规划和运行是以各个能源网络的建模和分析为基础的。其中电力网络的分析基于从“场”到“路”的简化,已经形成了成熟的电路理论^[2],而供热网络与天然气网络的分析尚未形成与之统一的成熟理论。以天然气网络的分析为例,文献[3-4]采用了基于 Weymouth 方程的稳态天然气潮流模型进行分析,但这无法刻画气网动态过程,不适合作为气网的一般模型。文献[5-6]使用了“管存”模型来近似刻画天然气的动态过程,但无法准确描述“管存”与管道两端压力的关系。文献[7-9]则使用了质量守恒方程和动量守恒方程组成的偏微分方程组来精确刻画天然气的动态过程,其中文献[7]采用了 Euler 差分格式进行差分化处理并求解,而文献[8-9]采用了精度更高的 Wendroff 差分格式,这类动态模型依赖于有限元数值解法,相较电力网络的“路”分析方法有以下不足: 1) 缺乏直观的物理模型,可解释性不强; 2) 气-电耦合网络的分析方法无法统一,电力和天然气这 2 个学科之间存在知识壁垒; 3) 为保证求解精度,需要引入时空 2 个维度上的大量微元,面临计算复杂度高的难题。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB091300); 国家自然科学基金项目(51537006)。

National Key R&D Program of China(2016YFB091300); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51537006)。

自然地，“电路”理论的成功，激发了将其应用于其他能源网络的想法，已有相关工作进行了有益的尝试。文献[10]对天然气网络中的元件进行了电路类比，进而推导了相应的传递函数。文献[11]在天然气网络的电路类比基础上将其映射到复频域进行分析。文献[12-13]对换热系统进行了电路类比，并成功运用电路方法分析了换热系统的运行与优化。文献[14-15]对供热网络进行了电路类比，并分别应用于端口等值和潮流分析。文献[16]将不同的能量网络抽象为能量在管路中的传递过程，并结合广义的基尔霍夫定律推导了统一的稳态能量网络方程。文献[17]基于该工作对分布式供能系统进行了分析。文献[18]将其推广到了动态能量网络的统一建模问题。

需要指出的是，文献[10-15]中的工作尽管赋予了其他能源网络以“路”的形式，但是尚未形成完整而统一的理论框架，模型求解难度也较大，难以进一步推广到综合能源系统规划和运行的多样化应用中去。文献[16-18]统一了不同能源网络方程的数学形式，但尚未系统地揭示异质能源网络从时域动态模型向频域稳态模型，从分布参数模型向集总参数模型化简的推演规律，动态模型的求解仍然依赖差分方法。

在上述研究基础上，本系列论文将电力网络从“场”到“路”的推演方法论，应用于指导其他能源网络的分析，提出了直观的统一能路模型，具有明确的物理意义；在数学上完成了从偏微分方程向代数方程的简化，显著降低了网络分析的计算复杂度；为异质能源网络的耦合分析建立了统一理论，有助于突破不同学科之间的知识壁垒。

本文作为系列论文的第一篇，首先简要介绍统一能路的方法论，再重点推导天然气网络的气路模型与相应的网络矩阵和网络方程，并用算例验证气路方法在计算效率上的显著优势。

1 统一能路的方法论

统一能路的方法论来源于电力网络从“电磁场”到“分布参数时域电路”，再到“分布参数频域电路”，最后到“集总参数频域电路”的推演规律。

电力网络输送的能量是电磁能量，其传播以电磁波为媒介，刻画为时间与三维空间中一组偏微分方程描述的电磁场模型。该电磁场模型过于复杂而不适合电力网络分析。为简化分析，从电磁场中抽

取出电磁能流传播方向(即坡印廷矢量方向，也即线路方向)，忽略其正交方向上的电磁过程，再由电磁场方程推导出电阻、电感、电容等元件模型，并用这些元件来刻画电磁能流的传递，形成了基础电路理论^[19]。借助该理论，电力网络被建模为分布参数时域电路，由时间与一维空间中的一组偏微分方程描述。为进一步简化交流电力网络的分析，引入相量方法将电路从时域映射到频域，从而将电力网络建模为分布参数频域电路，由一维空间中的一组常微分方程描述。最后，通过求解该常微分方程得到长传输线路的二端口等值模型，整个电力网络进一步简化为一组代数方程描述的集总参数频域电路。这极大地降低了电力网络分析的难度，从根本上推动了电力网络分析发展出潮流分析、灵敏度分析、短路电流计算和安全约束经济调度等一系列网络分析应用。

基于上述推演规律，其他能源网络也可通过类比，导出包括气路、水路、热路在内的统一能路。以气路模型的推导为例，天然气网络中的天然气流动由于管道约束也可被简化为沿管道方向的一维流动，并刻画为时间与一维空间中的一组偏微分方程。从这组偏微分方程中可抽象出气阻、气感与气容等气路元件，建立天然气网络在时域中的分布参数气路模型。然后，采用傅里叶变换将气路映射至频域进行分析，得到分布参数频域气路，数学上偏微分方程也相应变换为常微分方程。需要说明的是，气网中的激励并不像交流电网中的激励那样都是工频正弦激励，针对此问题本文采用傅里叶变换，将气网中任意形状的激励变换为不同频率的正弦激励之和，根据线性网络的叠加定理，将各分量作用下的响应叠加得到任意激励作用下的网络响应，所以时域中的气路对应一组频域中的气路。针对每个频率分量下的分布参数频域气路，通过求解其对应的空间常微分方程可得到管道的二端口等值模型，从而建立起天然气网络的集总参数频域气路，在数学上由一组代数方程刻画，这极大地简化了天然气网络的分析难度。

在建立能路模型之后，其他能源网络也可表示为一张由若干包含阻、容、感等能路元件的支路按一定拓扑关系连接而成的能路图。通过分析能路图中的支路特性与拓扑约束，可导出各能源网络的网络矩阵和网络方程，从而建立综合能源系统分析的统一能路理论。

2 天然气网络分析

2.1 天然气网络的气路模型

天然气在管道中的一维流动过程可由质量守恒方程(1)和动量守恒方程(2)描述^[20]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda \rho v^2}{2D} + \rho g \sin \theta = 0 \quad (2)$$

式中： ρ 、 v 和 p 为天然气的密度、流速和压力； λ 、 D 和 θ 为管道的摩擦系数、内径和倾角； g 为重力加速度； t 和 x 为时间和空间。

向动量守恒方程中的非线性项引入2个常用近似。一是忽略对流项，其数值在流速(工程上通常在10m/s内)远远小于声速时趋近于0^[21]：

$$\frac{\partial \rho v^2}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

二是对阻力项中的流速平方项进行增量线性化近似：

$$v^2 = (v_b + \Delta v)^2 \approx v_b^2 + 2v_b \Delta v = 2v_b v - v_b^2 \quad (4)$$

式中： v_b 为管道中天然气流速的基值，可取设计工况中的流速； Δv 为天然气实际流速相对基值的波动量。从而阻力项改写为流速的线性函数：

$$\frac{\lambda \rho v^2}{2D} \approx \frac{\lambda \rho (2v_b v - v_b^2)}{2D} \quad (5)$$

天然气的物性变量满足状态方程：

$$p = RT\rho \quad (6)$$

式中 R 和 T 为天然气的气体常数和温度。

引入管道流量的定义

$$G = \rho v A \quad (7)$$

式中： G 为天然气质量流量； A 为管道横截面积。

整理式(1)–(7)，可导出管道中天然气流量与压力之间满足一组时空偏微分方程：

$$A \frac{\partial p}{\partial t} + RT \frac{\partial G}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda v_b G}{AD} - \frac{\lambda v_b^2 p}{2RTD} + \frac{pg \sin \theta}{RT} = 0 \quad (9)$$

从空间中取出 dx 长度的一个微元，其两端的气流差和气压降根据式(8)和(9)可表示为

$$dG = -\frac{A dx}{RT} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (10)$$

$$dp = -\frac{dx}{A} \cdot \frac{dG}{dt} - \frac{\lambda v_b dx}{AD} \cdot G - \frac{2gD \sin \theta - \lambda v_b^2}{2RTD} dx \cdot p \quad (11)$$

依托式(11)进行表1所示电路比拟，并抽象出气阻 R_g 、气感 L_g 、气容 C_g 和受控气压源 k_g 等气路元件，如式(12)–(15)所示。

表1 天然气的电路比拟

Tab. 1 Circuit-analog for natural gas				
类型	电路		气路	
势	电压	U	气压	p
流	电流	I	气流	G
阻	电阻	$U=R \cdot I$	气阻	$p=R_g \cdot G$
感	电感	$U=L \cdot dI/dt$	气感	$p=L_g \cdot dG/dt$
容	电容	$I=C \cdot dU/dt$	气容	$G=C_g \cdot dp/dt$

$$R_g = \lambda v_b / (AD) \quad (12)$$

$$L_g = 1 / A \quad (13)$$

$$C_g = A / (RT) \quad (14)$$

$$k_g = \frac{2gD \sin \theta - \lambda v_b^2}{2RTD} \quad (15)$$

上述气路元件有明确的物理意义：气阻刻画了管道对天然气流动的摩擦作用；气感刻画了天然气流动在管道中的惯性；气容刻画了天然气管道的“管存”效应，体现了天然气的可压缩性；受控气压源刻画了管道倾角与流速变化对管道摩擦的修正作用。

从而， dx 长度的管道可以表示为1段包括4个元件的气路，整个管道进而表示为1个分布参数气路，如图1所示。

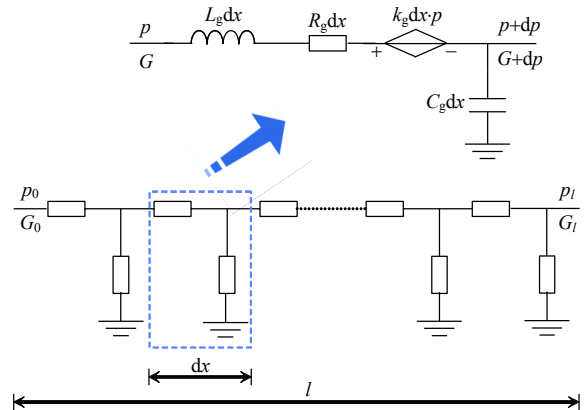


图1 天然气管道的分布参数气路

Fig. 1 Gaseous circuit of natural gas pipelines with distributed parameters

按照统一能路的方法论，第2步将上述气路通过傅里叶变换映射到频域，每1个频率分量下的分布参数频域气路可描述为1组1维空间中的常微分方程：

$$\frac{dG}{dx} = -j\omega C_g \cdot p \quad (16)$$

$$\frac{dp}{dx} = -(R_g + j\omega L_g)G - k_g p \quad (17)$$

记 $Z_g=R_g+j\omega L_g$, $Y_g=j\omega C_g$, 并附加管道首端的边界条件: $G|_{x=0}=G_0$ 和 $p|_{x=0}=p_0$, 可从式(16)和(17)中解得管道末端的气流、气压依次为式(18)和(19)。

$$G_l = [-\frac{2Y_g p_0}{\sqrt{k_g^2 + 4Z_g Y_g}} \sinh(\frac{\sqrt{k_g^2 + 4Z_g Y_g}}{2} l) + G_0 \cosh(\frac{\sqrt{k_g^2 + 4Z_g Y_g}}{2} l) + \frac{k_g G_0}{\sqrt{k_g^2 + 4Z_g Y_g}} \sinh(\frac{\sqrt{k_g^2 + 4Z_g Y_g}}{2} l)] e^{-k_g l/2} \quad (18)$$

$$p_l = [p_0 \cosh(\frac{\sqrt{k_g^2 + 4Z_g Y_g}}{2} l) - \frac{2k_g G_0}{\sqrt{k_g^2 + 4Z_g Y_g}} \sinh(\frac{\sqrt{k_g^2 + 4Z_g Y_g}}{2} l) - \frac{k_g p_0}{\sqrt{k_g^2 + 4Z_g Y_g}} \sinh(\frac{\sqrt{k_g^2 + 4Z_g Y_g}}{2} l)] e^{-k_g l/2} \quad (19)$$

式中: G_l 和 p_l 为管道末端的气流与气压; G_0 和 p_0 为管道首端的气流和气压; l 为管道长度。根据式(18)、(19), 一根天然气管道可表示成式(20)所示的一个线性二端口网络。

$$\begin{bmatrix} p_l \\ G_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ G_0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中 A 、 B 、 C 和 D 为网络参数, 其值为

$$A = [\cosh(\frac{\sqrt{k_g^2 + 4\gamma_{gc}}}{2} l) - \frac{k_g}{\sqrt{k_g^2 + 4\gamma_{gc}}} \sinh(\frac{\sqrt{k_g^2 + 4\gamma_{gc}}}{2} l)] \cdot e^{-k_g l/2} \quad (21)$$

$$B = -\frac{2}{\sqrt{k_g^2 + 4/Z_{gc}}} \sinh(\frac{\sqrt{k_g^2 + 4\gamma_{gc}}}{2} l) \cdot e^{-k_g l/2} \quad (22)$$

$$C = -\frac{2}{\sqrt{k_g^2 + 4Z_{gc}}} \sinh(\frac{\sqrt{k_g^2 + 4\gamma_{gc}}}{2} l) \cdot e^{-k_g l/2} \quad (23)$$

$$D = [\cosh(\frac{\sqrt{k_g^2 + 4\gamma_{gc}}}{2} l) + \frac{k_g}{\sqrt{k_g^2 + 4\gamma_{gc}}} \sinh(\frac{\sqrt{k_g^2 + 4\gamma_{gc}}}{2} l)] \cdot e^{-k_g l/2} \quad (24)$$

其中 $\gamma_{gc}=Z_g Y_g$ 和 $Z_{gc}=Z_g/Y_g$ 分别类比自电力传输线的

传播系数和特征阻抗, 称为天然气管道的传播系数和特征阻抗。前者刻画了管道中天然气压力随传播距离发生的衰减与相移程度, 后者刻画了天然气管道的传输能力。

式(20)表征的线性二端口网络可用图 2 所示的 π 型等值气路表示, 其中的等值参数为

$$Z = -B \quad (25)$$

$$K = 1 - AD + BC \quad (26)$$

$$Y_1 = (AD - BC - A) / B \quad (27)$$

$$Y_2 = (1 - D) / B \quad (28)$$

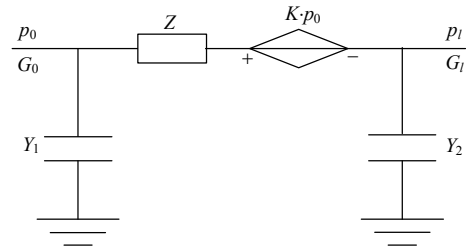


图 2 天然气管道的集总参数等值气路

Fig. 2 Equivalent gaseous circuit of natural gas pipelines with lump parameters

从而天然气网络模型完成了向集总参数频域气路的推演, 由一组代数方程刻画。

当天然气网络处于稳态时, 上述 π 型等值电路中的电容断路, 电感短路, 退化成一个仅含电阻和受控气压源的支路, 这对应于描述天然气稳态的 Weymouth 方程。

2.2 天然气网络的支路特性

除了气阻、气感、气容和受控气压源元件外, 气路中另一类常见元件是增压机对应的气压源, 其数学模型可由式(29)表示。

$$p_1 = p_2 + E_g \quad (29)$$

式中: p_1 和 p_2 为气压源两侧的气压; E_g 为气压源提供的气压增量。

对于 1 条由上述 5 种气路元件组成的一般支路, 如图 3 所示, 其支路方程可表示为

$$G_b = y_b (p_b + E_b - k_b p_f) \quad (30)$$

式中: G_b 为支路中的气流; p_b 为支路两端的气压差;

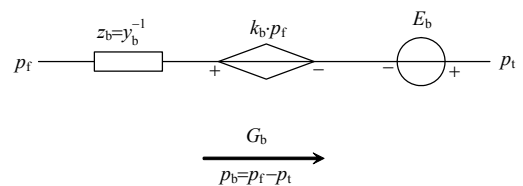


图 3 天然气网络中的一般支路

Fig. 3 General branch in the natural gas network

p_f 和 p_t 为支路首端和末端的气压; y_b 为气阻、气感和气容构成的支路导纳; k_b 和 E_b 为支路中受控气压力和气压源的元件参数。

将天然气网络中所有支路的支路方程写成矩阵形式,如式(31)。

$$\mathbf{G}_b = \mathbf{y}_b(\mathbf{p}_b + \mathbf{E}_b - \mathbf{k}_b \mathbf{p}_f) \quad (31)$$

式中: \mathbf{G}_b 、 \mathbf{p}_b 、 \mathbf{E}_b 、 \mathbf{k}_b 和 \mathbf{p}_f 为对应的支路参数与变量组成的列向量; \mathbf{y}_b 为支路导纳组成的对角矩阵。

2.3 天然气网络的拓扑约束

拓扑约束从网络拓扑的角度对网络进行分析,这里引入节点-支路关联矩阵 \mathbf{A}_g 和节点-流出支路关联矩阵 \mathbf{A}_{g+} 来表示网络拓扑。

节点-支路关联矩阵 \mathbf{A}_g 是1个 n 行 m 列的矩阵,其中 n 是节点数, m 是支路数。用 $(\mathbf{A}_g)_{ij}$ 表示其中第 i 行、第 j 列的元素,则 $(\mathbf{A}_g)_{ij}=0$ 表示支路 j 与节点 i 不相连; $(\mathbf{A}_g)_{ij}=1$ 表示支路 j 从节点 i 流出; $(\mathbf{A}_g)_{ij}=-1$ 表示支路 j 流入节点 i 。这和电力网络分析中节点-支路关联矩阵的定义是一致的^[2]。

节点-流出支路关联矩阵 \mathbf{A}_{g+} 仅保留了 \mathbf{A}_g 中的非负元素,即对于 $(\mathbf{A}_{g+})_{ij}$,若支路 j 从节点 i 流出,则该元素为1,否则为0。

天然气网络中的拓扑约束和电力网络中的基尔霍夫电流、电压定律类似,分为“流”约束和“势”约束2条。

“流”约束是指流经1个节点的气流遵循质量守恒定律,即流出质量和流入质量的差值应等于该节点上天然气注入的质量:

$$\mathbf{A}_g \mathbf{G}_b = \mathbf{G}_n \quad (32)$$

式中 \mathbf{G}_n 为每个节点上的气流注入构成的列向量。

“势”约束是指各节点上的气压遵循保守性质(由压力、重力均为保守力决定),即绕闭合回路一周产生的气压降为0,这可以表达为式(33)。另有支路首端压力由式(34)确定。

$$\mathbf{A}_g^T \mathbf{p}_n = \mathbf{p}_n \quad (33)$$

$$\mathbf{A}_{g+}^T \mathbf{p}_n = \mathbf{p}_f \quad (34)$$

2.4 天然气网络的网络矩阵与网络方程

支路特性主要刻画了网络中支路变量之间的关系,而拓扑约束则刻画了网络中支路变量与节点变量之间的关系,两者结合即可导出网络方程。将拓扑约束式(32)~(34)代入支路特性式(31),得到未约简形式的气网网络方程:

$$\mathbf{G}_n = \mathbf{A}_g \mathbf{y}_b (\mathbf{A}_g^T \mathbf{p}_n + \mathbf{E}_b - \mathbf{k}_b \mathbf{A}_{g+}^T \mathbf{p}_n) \quad (35)$$

定义包括广义节点导纳矩阵 \mathbf{Y}_g 与广义节点注入向量 \mathbf{Y}_n 在内的网络矩阵:

$$\mathbf{Y}_g' = \mathbf{A}_g \mathbf{y}_b \mathbf{A}_g^T - \mathbf{A}_g \mathbf{y}_b \mathbf{k}_b \mathbf{A}_{g+}^T \quad (36)$$

$$\mathbf{G}_n' = \mathbf{G}_n - \mathbf{A}_g \mathbf{y}_b \mathbf{E}_b \quad (37)$$

从而天然气网络具有形如式(38)的网络方程,和电力网络的网络方程在数学形式上相统一。

$$\mathbf{Y}_g' \mathbf{p}_n = \mathbf{G}_n' \quad (38)$$

广义节点导纳矩阵中的第1项反映了支路中阻、感、容元件构成的支路导纳,这和电力网络的节点导纳矩阵是一致的;第2项来源于支路中的受控气压源元件,反映了管道倾角与实际流速变化对支路气压的修正。广义节点注入向量中的第1项是各节点的实际气流注入,和电力网络的节点电流注入一致;第2项来源于支路中的气压源元件,其物理意义是将其等效为并联在原支路两侧节点之间的气流源,再把这个气流源拆分为2个节点上的注入和注出。

3 算例分析

3.1 算例数据

选取1个单管道构成的最小天然气系统来验证所提出的气路方法,其参数为管道长度60km,内径0.5m,摩擦系数0.05,首端给定压力0.3MPa,末端给定流量并按50min为间隔跃变,求解管道首端的气流与末端的气压。相应示意图如图4所示。

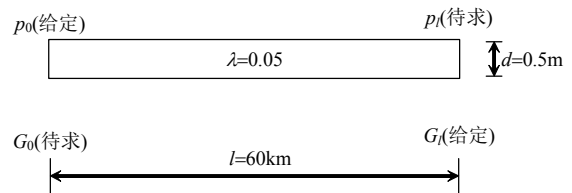


图4 单管算例示意图

Fig. 4 Schematic diagram for the case of a single pipeline

在使用提出的气路方法求解之前,先用步长足够小(空间步长1.5km,时间步长1s)的有限元方法获取首端气流与末端气压的基准值,如图5所示。其中的响应过程可用气路进行直观的物理解释:当末端气流发生改变时,由于气容的存在,末端气压表现出标准的一阶响应过程,气流减小则气压按负指数曲线上升,为充气过程,气流增大则气压按负指数曲线下降,为放气过程;又由于气感的存在,首端的气流呈现出明显的时滞效应,当末端气流增大/减小时,首端气流要经过约10min方出现相应的变化。

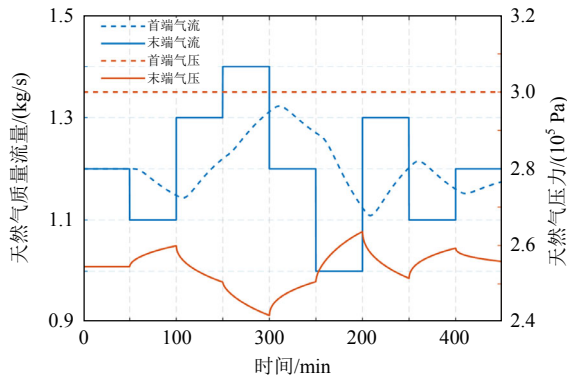


图 5 管道两端的气流与气压

Fig. 5 Gas flow and pressure on the both sides of the pipeline

3.2 基于统一能路理论的求解

给定首端气压和末端气流，相当于在图 2 所示的气路首端接入 1 个恒定气压源，末端接入 1 个时变气流源。首先对时变气流源进行傅里叶变换，得到若干不同频率的正弦交变气流源，各频率分量的幅值如图 6 所示。可以观察到，随着频率增加，各分量幅值快速衰减，在第 50 个分量处幅值已衰减到峰值的 10%以内，在第 100 个分量处幅值已衰减到峰值的 5%以内，所以截取前 100 个分量已能够保证较小的截断误差。基于幅值最大的前 100 个频率分量恢复的末端气流源信号也在图 6 中给出，观察到 100 个正弦交变气流源已经足够逼近原来的跃变气流源。

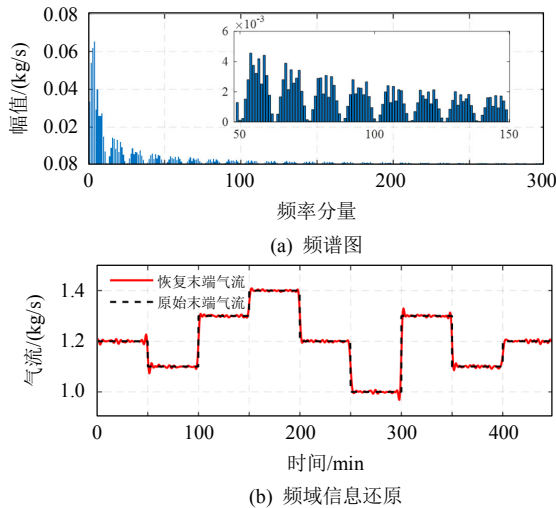


图 6 管道末端气流的傅里叶分解与还原

Fig. 6 Fourier transform and recover of the gas flow on the end of the pipeline

傅里叶变换之后，基于叠加定理将 100 个不同频率的气流源拆分到 100 个单频率气路中，如图 7 所示。对于每 1 个单频气路，都可以按照第 3 节中的方法计算各元件参数(速度基值 v_b 取初始稳态时管道中天然气的平均流速，为 2.55m/s)，形成三阶

的广义节点导纳矩阵，并固定地节点的气压为 0、首端节点的气压为气压源数值、末端节点的注入为气流源数值的相反数，最终得到单频气路的网络方程。求解网络方程得到该频率下的首端气流和末端气压在频域的相量，反变换回时域后，叠加各频率分量的响应即得到原跃变注入激励下的管道首末端状态变量的响应情况。求解结果如图 8 所示。需要注意的是，气路方法中无法显式给定初始条件，可通过在时域增加一段 0 时刻之前的边界条件来等效。

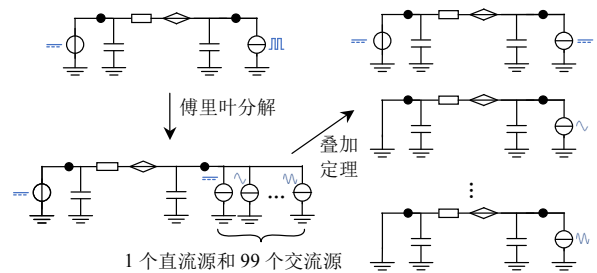


图 7 非正弦气流源的处理

Fig. 7 Process of non-sinusoidal gas flow source

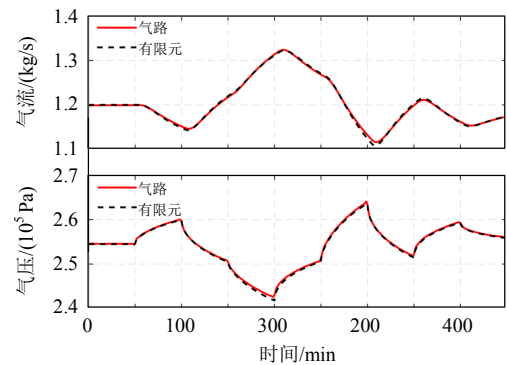


图 8 气路方法求解的管道首端气流与末端气压

Fig. 8 Gas flow on the head and gas pressure on the end of the pipeline solved by the gaseous circuit

以有限元方法为基准，采用 100 个频率分量的气路方法求解得到的首端气流与末端气压的误差仅为 0.08%和 0.16%，基本可以认为实现了相同精度，但是后者的时间仅 0.06s，而前者需要 5.06s。近百倍的效率提升说明了气路方法在求解计算量上的优势，这是“路”方法在数学本质上对方程形式的简化带来的。更重要的是，对于更大的系统，气路方法仅增加网络方程中各矩阵的规模，变量数是线性增加的；对于更长的时间尺度，气路方法几乎不增加计算量(FFT 的时间几乎可忽略不计)，而以往的差分方法则需要同时增加空间微元数与时间微元数，变量数以平方复杂度增长。这决定了在大规模系统长时间尺度分析上气路方法将具有更大的优势。

4 结论

本文基于电路理论提出了统一能路的概念及其方法论,并以天然气网络为对象推导了统一能路理论中的气路模型,使得其数学模型逐步从高维的偏微分方程简化至代数方程,最后基于气路模型刻画了天然气网络的支路特性与拓扑约束,并导出了相应的网络矩阵和网络方程。相关结论如下:

1) 基于气路的天然气网络分析具有和电力网络分析高度统一的数学形式,为气、电2种异质能流的统一分析奠定了理论基础。

2) 天然气网络的气路描述具有明确的物理意义,网络元件、网络矩阵和相关结论的可解释性较强。

3) 天然气网络分析的气路方法相较传统的有限元差分方法具有更低的计算复杂度,在实现同等精度的情况下可极大减少计算量。

4) 气路理论为气-电耦合系统,特别为大规模气-电耦合系统的建模、分析和优化提供了统一理论和高效方法,在综合能源系统的规划、运行和市场中具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 艾芊,郝然.多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J].电力系统自动化,2018,42(4):2-10.
Ai Qian, Hao Ran. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 2-10(in Chinese).
- [2] 张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析[M].北京:清华大学出版社,2007:1-22.
Zhang Boming, Chen Shousun. Advanced electricity network analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 1-22(in Chinese).
- [3] Wen Y, Qu X, Li W, et al. Synergistic operation of electricity and natural gas networks via ADMM[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(5): 4555-4565.
- [4] He Y, Yan M, Shahidehpour M, et al. Decentralized optimization of multi-area electricity-natural gas flows based on cone reformulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(4): 4531-4542.
- [5] He C, Wu L, Liu T, et al. Robust co-optimization scheduling of electricity and natural gas systems via ADMM[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 8(2): 658-670.
- [6] 苏洁莹,林楷东,张勇军,等.基于统一潮流建模及灵敏度分析的电-气网络相互作用机理[J/OL].电力系统自动化,2019. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20191115.0948.020.html>.
- [7] Su Jieying, Lin Kaidong, Zhang Yongjun, et al. Interaction mechanism of electricity-gas network based on unified power flow modeling and sensitivity analysis[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2019. [http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20191115.0948.020.html\(in Chinese\)](http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20191115.0948.020.html(in Chinese)).
- [8] Yang J, Zhang N, Kang C, et al. Effect of natural gas flow dynamics in robust generation scheduling under wind uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(2): 2087-2097.
- [9] Fang J, Zeng Q, Ai X, et al. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 9(1): 188-198.
- [10] Qi F, Shahidehpour M, Wen F, et al. Decentralized privacy-preserving operation of multi-area integrated electricity and natural gas systems with renewable energy resources[J/OL]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8828087>.
- [11] Whalley R, Abdul-Ameer A. Energy-efficient gas pipeline transportation[J]. Systems Science & Control Engineering, 2014, 2(1): 527-540.
- [12] Yang J, Zhang N, Botterud A, et al. Situation awareness of electricity-gas coupled systems with a multi-port equivalent gas network model[J]. Applied Energy, 2020(258): 114029.
- [13] Chen Q, Fu R, Xu Y. Electrical circuit analogy for heat transfer analysis and optimization in heat exchanger networks[J]. Applied Energy, 2015(139): 81-92.
- [14] Chen Q, Hao J, Zhao T. An alternative energy flow model for analysis and optimization of heat transfer systems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017(108): 712-720.
- [15] Yang J, Zhang N, Botterud A, et al. On an equivalent representation of the dynamics in district heating networks for combined electricity-heat operation[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8805174>.
- [16] Lan T, Strunz K. Modeling of the enthalpy transfer using electric circuit equivalents: theory and application to transients of multi-carrier energy systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 1720-1730.

- [16] 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).
- [17] 葛海麟, 陈皓勇, 文俊中, 等. 基于能量网络理论的分布式供能系统分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 34-40.
Ge Hailin, Chen Haoyong, Wen Junzhong, et al. Distributed energy system analysis based on energy network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 34-40(in Chinese).
- [18] 陈皓勇, 李明, 邱明, 等. 时变能量网络建模与分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(3): 243-254.
Chen Haoyong, Li Ming, Qiu Ming, et al. Modeling and analysis of time-varying energy network[J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(3): 243-254(in Chinese).
- [19] 倪光正, 崔翔. 工程电磁场原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 92-98, 158-166, 211-216.
Ni Guangzheng, Cui Xiang. Principles for engineering electromagnetic field[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 92-98, 158-166, 211-216(in Chinese).
- [20] Mokhatab S, Poe W. Handbook of natural gas transmission and processing[M]. TX, USA: Gulf, 2012: 49-59.
- [21] Pambour K A. Modelling, simulation and analysis of security of supply scenarios in integrated gas and

electricity transmission networks[D]. Netherlands: University of Groningen, 2018.



陈彬彬

收稿日期: 2020-01-06。

作者简介:

陈彬彬(1996), 男, 博士研究生, 研究方向为多能流系统的综合能量管理, cbb18@mails.tsinghua.edu.cn;

孙宏斌(1969), 男, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE Fellow, 教育部长江学者, 研究方向为多能流系统的综合能量管理、电力系统信息论和无功电压优化控制, shb@tsinghua.edu.cn;

陈瑜玮(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为多能流系统的综合能量管理, chenyw16@mails.tsinghua.edu.cn;

郭庆来(1979), 男, 博士, 副教授, 研究方向为信息物理系统和无功电压优化控制, guoqinglai@tsinghua.edu.cn;

吴文传(1973), 男, 博士, 教授, 研究方向为主动配电网规划运行和无功电压优化控制, wuwench@tsinghua.edu.cn;

乔铮(1994), 女, 博士研究生, 研究方向为电-气耦合系统建模、优化与安全分析, qiaomuzi@163.com。

(责任编辑 乔宝榆)