arXiv:2304.01955v1 [math.DS] 4 Apr 2023

天然气系统管存控制：在不确定性下平衡有限资源

Criston Hyett、Laurent Pagnier、Jean Alisse、Lilach Sabban、
Igal Goldshtein 和 Michael Chertkov{
cmhyett,laurentpagnier,chertkov}@math.arizona.edu,{
Jean.Alisse,Lilah.Saban,Igal.Goldshtein}@noga-iso.co.il

2023年4月5日

摘要

我们构建并测试了一个真实但经过简化的以色列天然气模型。该系统较为特殊，因为：(a) 系统由数量有限的控制点进行控制，这些控制点位于以色列地中海沿岸近海的天然气开采点或其附近；(b) 控制目标是入口处的平均通量，而非压力；(c) 内陆没有用于调节压力的压缩机；(d) 电力系统是天然气的主要用户（以色列70%的电力由分布在全国各地的燃气电厂生产）。该系统的特性表明，应特别关注由天然气消耗量快速变化所驱动的动态特性，以应对电力需求的日内变化，并考虑不确定的可再生能源发电（主要是太阳能）所发挥作用日益增大的影响。基于上述情况，我们提出并解决了一系列动态与控制问题，例如：如何安排天然气注入的爬坡增减时机，以确保日内管存充足，同时满足压力约束和天然气开采模式？我们报告了仿真结果，并利用天然气流的单调性性质，使我们的结论对边界取气量的不确定性具有鲁棒性。

1 引言

这是 NOGA（以色列电力系统运营商）与亚利桑那大学团队合作撰写的第一篇稿件。本文旨在

- 说明以色列天然气系统的具体情况，描述其最简模型，并阐述与生产和消耗量不确定性相关的主要运行挑战；资源供应有限进一步加剧了这些挑战。 [第 2] 节

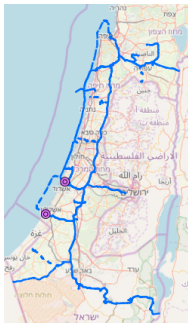
- 介绍用于研究该系统的基本建模工具，包括方程的说明以及所用软件的介绍。 [第 3] 节

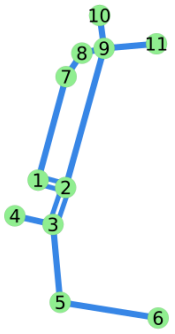
- 制定反映上述不确定性的运行场景，并介绍分析结果和控制方案。 [第 4] 节

- 进一步规划如何将已验证的方法扩展至：(a) 对以色列的天然气系统和电力系统进行联合建模与控制，从而更贴近实际；以及 (b) 提出进一步的实践和学术挑战，以便将所开发的方法推广到规模与以色列相当的其他能源系统。 [第6节。]

2 动机、数据与来源

2015年巴黎气候大会签署全球协议后，以色列设定了长期目标，致力于减少温室气体排放，参与全球应对气候变化的行动。自从在以色列海岸附近发现大型海上气田以来，天然气（NG）已成为该国发电的主要燃料。为减少以色列的碳足迹，当局决定未来关闭哈代拉和阿什凯隆的两座主要燃煤电厂，并将其改造为燃气机组。除可再生能源外，天然气将因此成为该国发电的唯一能源来源。能源部的计划旨在履行以色列在协议中承担的责任，并推动高效的绿色经济。其目标是到2030年将可再生能源发电量提高至最高30%，并有望在2050年实现最高100%的发电量来自可再生能源。然而，在此期间，可再生能源占比不断提高也带来了若干挑战，尤其是对天然气系统的影响；该系统必须平衡不可控可再生能源间歇且多变的发电量。





#	n_s	n_e	L	D
1	1	2	26	600
2	2	3	28.5	600
3	3	4	25	600
4 3 5 56				600
5 5 6 81				445
6	1	7	77	736
7 7 8 22				757
8	8	9	14	743
9 2 9 102 914				
10	9	10	34.4	766
11	9	11 34.4 914		
12	1	2	26	914
13	2	3	28.5 914	

图1：以色列天然气系统的描述：（左）真实系统示意图。（中）本研究所采用的简化11节点系统地图。（右）简化系统中的管道列表。其起始节点（n_s）、终止节点（n_e）、长度（ L 公里）和直径（ D 毫米）。

截至2020年，以色列超过50%的电力由天然气（NG）生产。近年来，天然气的年需求量增加至超过110亿立方米（BCM）。在向2030年目标过渡期间，预计某些年份这一比例将增加至80%—85%。此外，以色列与埃及和约旦签署了两项协议，规定未来十年以色列将从利维坦气田和塔玛气田出口130 BCM的天然气。（目前，以色列天然气的非发电终端使用量较小，约为9000百万英热单位/小时（MMBTU/h），约占每小时典型流量的10%，这些数据表明，未来十年以色列天然气网络将面临诸多问题。

NOGA，即以色列独立系统运营商（IISO），是新成立的以色列电力系统运营商。其职责是确保在正常及紧急系统状态下，向所有电力用户持续供应电力，并达到要求的可靠性和质量水平，同时以竞争且公平的方式管理电力批发市场的运营。除管理日常运营外，IISO 还负责规划发电系统的发展，包括就所需发电与储能容量提出建议，并确保发电和储能设施的整合在组合、选址和时机方面达到最优。IISO 还负责制定发电系统发展规划的标准。该公司的职责还涵盖输电系统规划的许多其他方面，例如数据预测、变压器布置与特性分析，以及总体上制定输电系统多年发展规划。人们认识到，要实现所有目标，IISO 需要采用最先进的工具来建模天然气系统及其与电力网络的相互作用。

本文基于开源公共资源，介绍了以色列的简化示意性天然气模型，如图 1 所示。数据来源为以色列天然气管理局网站

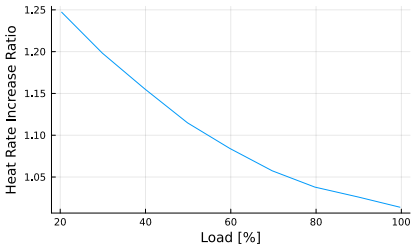


图2：典型燃气轮机效率曲线

www.ingl.co.il。为进行模拟，我们需要创建模型节点处天然气提取量的时间序列。为此，我们使用电力管理局在以下网站发布的公共数据：
https://www.gov.il/he/departments/general/hovatdivuahnetunim

数据以所有机组发电量（单位：兆瓦）的半小时序列形式给出。我们借助典型燃气轮机效率曲线（此类曲线示例见图2）将功率数据转换为燃气消耗量。

3 管道流动的动态建模

我们采用了 [1, 2, 3]中讨论的动态建模方法（另见其中的参考文献），以及 [4] 中的特定算法方案GasTranSim.jl。该方案由洛斯阿拉莫斯国家实验室团队使用Julia实现 [5]。

表示质量守恒和动量、描述单根管道中气体流动的基本方程（气体速度远小于声速）为 [1, 2]:

$$\partial_t \rho + \partial_x \phi = 0, \tag{1}$$

$$\partial_t \phi + \partial_x p = -\frac{\lambda}{2D}\frac{\phi|\phi|}{\rho}, \tag{2}$$

其中， $\rho(t;x)$、 $\phi(t;x)$和 $p(t;x)$分别是在管道 x 位置、 t 时刻测得的气体密度、质量通量和压力； λ 是该管道的达西-魏斯巴赫摩擦因子（按直径计， D）。方程（1）–（2）还需结合将压力与密度联系起来的状态方程

$$p = Z(\rho, T)RT\rho \tag{3}$$

在本研究中，我们使用CGNA公式计算 Z（ρ， T），参见例如[6]。忽略重力和系统内温度变化的影响，因为这些影响较小，且我们的表示是示意性的 [1]。

单根管道的描述可扩展到管道系统。每根管道由三个参数表征：直径、长度和单位直径的摩擦因子。每个节点在所有时刻为至少一根管道的一侧规定边界条件。此外，节点与管道通过质量守恒条件相连（基尔霍夫定律，即进入连接点的质量必须等于离开连接点的质量）。按照惯例，需求节点规定随时间变化的通量提取。不过，所讨论的系统还规定了供气节点处的通量。因此，所有给定的边界条件都是关于通量的。

令 ρ_{ij}， ϕ_{ij} 表示从节点 i 到节点 j的管道上的动态变量，并令 ρ_n， ϕ_n 表示节点 n处的密度和通量，我们将

[1]只有在冬季气温低于零摄氏度的国家，温度变化才需要考虑。在以色列，情况并非如此，因此我们假设温度恒定为 15 摄氏度。只有位于死海地区的节点 #6（海拔约低于海平面 400 米）以及位于贝尔谢巴附近、海拔高于海平面 300 米的节点 # 5，才需要考虑海拔／重力的影响。鉴于忽略这一影响只会导致系统南部的压力产生相对较小的 3 至 5 巴压降，我们暂且在最简版本的模型中忽略这一影响。

待求解的完整系统写为：

$$\partial_t \rho_{ij} + \partial_x \phi_{ij} = 0 \tag{4}$$

$$\partial_t \phi_{ij} + \partial_x p_{ij} = -\frac{\lambda_{ij}}{2D} \frac{\phi_{ij}|\phi_{ij}|}{\rho_{ij}} \tag{5}$$

满足初始条件和边界条件：

$$\rho_{ij}(x,0) = \rho_{0,ij}(x) \tag{6}$$

$$\phi_{ij}(x,0) = \phi_{0,ij}(x) \tag{7}$$

$$\phi_n(t) = d_n(t) \tag{8}$$

$$\sum_{j \in \mathcal{E}} \phi_j S_{ij} + d_j = 0 \tag{9}$$

其中， S_{ij} 为管道的横截面积。系统中密度和质量通量的初始条件根据实际运行数据构建。为求解系统中质量流量和压力的动态特性，我们采用 [4] 的交错网格方法。这是一种显式、守恒的二阶有限差分格式，在满足 CFL 条件时稳定。目前，以色列系统尚不包含压缩机。

4 运行场景

我们致力于在具有挑战性的场景下实现鲁棒性。为此，我们构建了代表两种基本现象的场景：

- 需求节点处的中等不确定性，通过在消费端添加随机噪声来体现，例如，这与系统电力侧可再生能源波动时燃气发电机的响应有关。

$$d_i(t) \to X_i(t) \tag{10}$$

其中

$$dX_i(t) = \alpha(d_i(t) - X_i(t)) + \gamma dW \tag{11}$$

是一个奥恩斯坦–乌伦贝克过程，其设计使均值等于名义需求，$\mathbb{E}[X_i(t)] = d_i(t)$，且方差趋近于一个常数，且以指数速度快速收敛：

$$\mathrm{Var}(X_i(t)) = \frac{\gamma}{2\alpha}\left(1 - e^{2\alpha t}\right) \tag{12}$$

这些参数经过启发式地调整，以确保满足 α 均值，并且方差趋近于

$$\mathrm{Var}(X_i(t)) \approx 0.01\mu_i^2 \tag{13}$$

其中， μ_i 是节点i的平均提取量。每项需求的噪声彼此不相关，这是一种保守的做法，忽略了地理和气候尺度。将其应用于实际系统时，应结合数据分析和预测，以确定符合需求实际情况的噪声类型。

- 突变——我们将其称为扰动——可能由故障、天气或其他外生因素引发。我们尤其关注供给挑战。也就是说，给定一条供给曲线 $s(t)$

$$s(t) \to s(t) + \Theta(t - T)\Gamma(t) \tag{14}$$

其中， Θ 是赫维赛德函数， T 是扰动时刻， Γ是扰动幅度。例如， $\Gamma(t) = -s(t)$，模拟在时刻 T完全失去供给的情况。

除了研究不采取任何措施的“裸”场景外，我们还将分析通过控制进行缓解的效果。我们假设注入点（图 1 中节点 #1 和节点 #8 的海上开采点）以及消费点的控制均为阶跃式。就实际操作而言，由于以色列天然气开采与输送之间紧密耦合，供给侧采用阶跃式控制更为可取；而对需求节点而言，这一假设则是显著理想化的。

针对消耗量快速上升（也可能快速下降）这一最具挑战性的情况，例如冬季日落（或日出）前后，我们在本文中将分析范围限定为预设控制。这样，我们便能以直观且易于解读的方式，对各种可能方案进行测试。本研究旨在分析系统运营商如何管理管道储气中的天然气瞬态，满足一天（或数天）内不断变化的电力需求，同时不突破天然气系统压力约束。

s

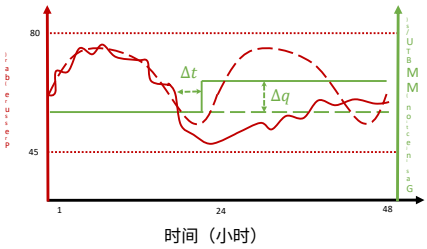


图3：示意说明系统在一个示例性48小时期间内的运行用例。图中展示了系统某个节点的压力以及某个入口点的注入量的预测（长虚线）和实际曲线（实线）；当受到扰动时，系统会对此作出控制。详情请见正文。

我们的方法示意如图（3）所示。绿色长虚线表示系统某个入口点的注入曲线。通常，该曲线为平直线，其数值（in$MMBTU/s$）根据整个系统的消耗量平衡预测以及各注入点之间的运行职责划分计算得出。红色长虚线表示系统某个节点的压力预测值。红色实线表示实际压力曲线；在典型不确定性影响下，该曲线基本遵循预测，直至 $\approx$ （小时）23:00，此时发生显著扰动，实际值与预测值的偏差开始显著增大。红色短虚线标示节点特定的压力上限和下限。绿色实线表示注入点的运行曲线；在此应用场景中，该曲线在整个48小时的观察期内均保持运行，但实际注入曲线并非平直线——它遵循预测直至 $\approx$ 23:00+Δt时，随后针对 $\approx$ 23:00发生的紧急情况，实施阶跃式控制动作。选择合适的时间延迟 Δt、控制响应及相应的幅度 Δq，构成了一项重大的运行挑战。

系统监测与预设

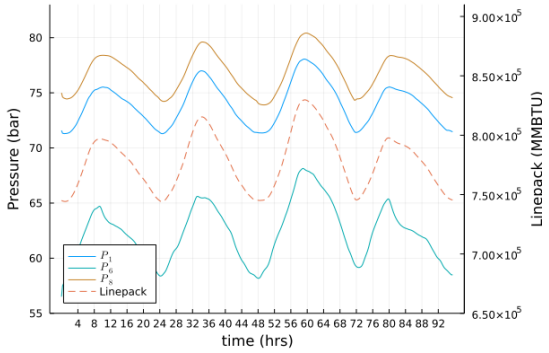


图4：八月的典型周，不确定性为零。

控制方法汇总见表1。我们展示了六种渐进式应力场景。每种场景均配有一幅图，概述相应的动态特性。（网络压力时间序列的动画，以及用于复现本文所有结果的软件和数据，均可在 https://github.com/cmhyett/FluxControlLinepack 上获取。）

我们将节点压力低于50巴定义为压力越限。生存时间 τ 定义为扰动开始至首次发生压力越限之间的时间（任意节点均可）。请注意，由于需求存在综合随机波动，生存时间呈现为分布，例如图[8]中以中位数为中心的阴影区域所示；上方标注了发生压力越限的节点。为使图示清晰，图中仅展示了部分节点的压力越限情况，即9、1和6号节点，因为它们分别反映了网络北部、中部和南部的情况。

1. 图（4）显示了八月一个典型周内，在流量控制下的压力（虚线）和管存（实线）。这是我们的基准情形。重要的是，由于供气节点的通量恒定，网络中的压力时间变化由日内需求波动决定。

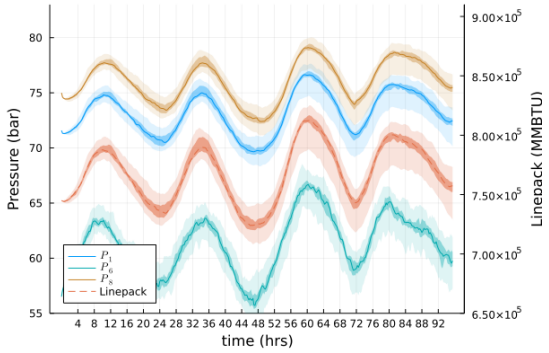


图5：八月的典型周，在需求曲线中加入经验噪声。请注意管存的漂移和压力抖动，这与 [7]中的预测一致。使用包含50次仿真的蒙特卡洛仿真，我们绘制了分别包含中间75%、25%数据以及中位数的填充区域，并采用逐渐增强的颜色强度。

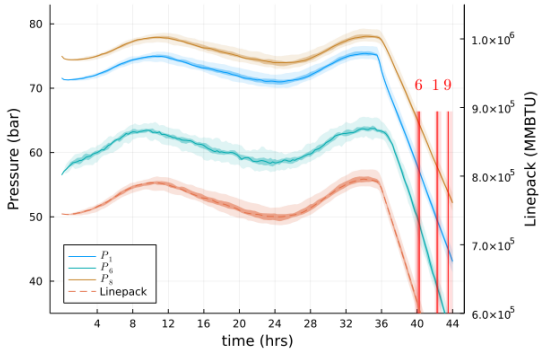


图6：场景3结果，在 $t = 36$小时管存达到峰值时施加扰动。使用包含50次仿真的蒙特卡洛仿真，我们绘制了包含中间75%、25%数据以及中位数的填充区域，并采用逐渐增强的颜色强度。

2. 图（5）在这个典型周的需求中加入了随机波动，以模拟电力需求和可再生能源发电量的不确定性。对于每个节点，我们加入均匀分布的噪声，其宽度为该节点名义需求的 5 %。这些微小扰动随时间累积，导致管存和压力显著偏离均值。

3. 图（6）引入了一种表示偏离典型运行状态或紧急情况的“扰动”。具体而言，在仿真第36小时，节点 #1（两个供气节点之一）的供气被关闭。我们继续运行仿真，以观察管存衰减速率和压力交叉的序列。该场景中的生存时间为

$$\tau = 4.13 \pm 0.38 \text{ hrs} \tag{15}$$

其中0.38为标准差。这些信息可以转化为天然气网络在时空维度上的“脆弱性”。

4. 图（7）引入了与情景 3 相同的扰动，但发生在第 48 小时而非第 36 小时。

具体而言，这对应于扰动发生在管存曲线的谷值处，而非峰值处。我们首先指出，在这种情况下，首次压力越限的时间短于生存时间

$$\tau = 3.58 \pm 0.89 \text{ hrs} \tag{16}$$

这一简单结论，即网络的存续时间取决于扰动的开始时间，是需求节点边界条件与网络拓扑之间复杂相互作用的结果。

5. 图（8）开始引入控制，试图模拟在场景4所述扰动下对网络进行“人在回路中”的控制。在此场景中，剩余供应点（节点8）的操作员在扰动开始半小时后将流量提高至最大值（$t = 48.5$小时）。这种控制在短期内稳定了管存，但未能应对接近第60小时的日常爬坡。具体而言，网络南部远离剩余供应点，包含了所有

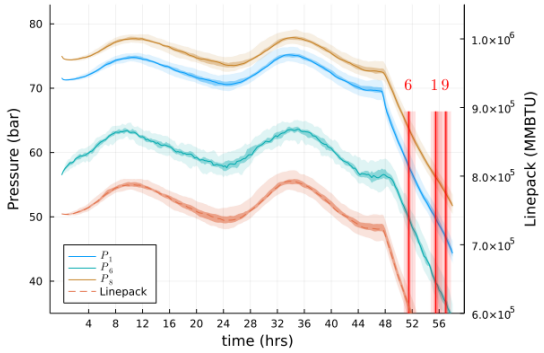


图7：场景4结果，在 $t = 48$小时管存谷值处发生扰动。采用包含50次仿真的蒙特卡洛方法，我们绘制了填充区域，分别涵盖中间75%、25%和中位数，并以逐渐加深的颜色表示。

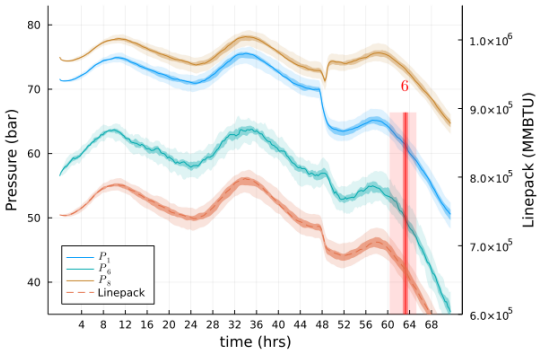


图8：场景5结果，在扰动发生半小时后（$t = 48.5$小时），节点8的供给逐步增加。

压力越限。

$$\tau = 14.17 \pm 4.07 \text{ hrs} \qquad (17)$$

6. 图（9）在场景5的基础上，进一步在扰动发生2小时后（$t = 50$小时）削减需求。这对应多种可能的措施，从高惩罚性的需求响应（如加州热浪期间所示）到天然气发电厂转用替代燃料，或利用储存的电力。

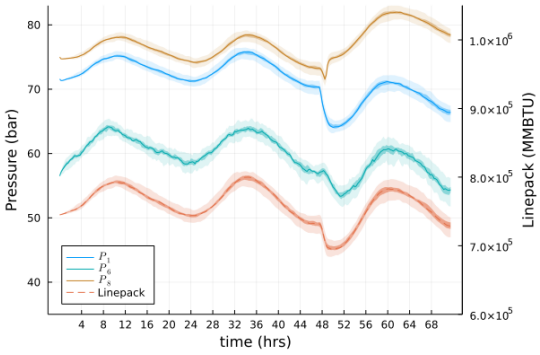


图9：场景6结果，在$t = 50$小时削减需求，以维持整个网络的最低压力。

5 单调性

在选择场景时，我们有意采用粗略的方式，倾向于选择严峻且突发的挑战，同时寻找应对这些挑战所需的最温和控制措施。这是有意为之，因为先前的工作已经为我们提供了单调性保证 [8, 9]。也就是说，对于任何不那么严峻的挑战（例如，相较于我们模拟的近乎立即关闭供气，更符合物理现实的供气缓慢下降场景），我们的压力都将不低于最严峻情况下的压力，因此

我们的生存时间估计实际上是偏低的保守下界。

对于示意性示例，我们主张采用这种方法，因为只有掌握完整的运行和程序知识，才能获得精确的估算——而这类工作本质上依赖专有数据。

还应注意，单调性也能为更常见的情形提供界限：可再生能源接入所带来的随机性会导致压力和管存漂移，这种漂移如图5所示。然而，单调性界限的推导并未考虑概率，因此未来的研究可能会收紧这些界限，从而避免高昂的仿真成本，除非

需要完整的分布知识。

6 结论

我们研究以色列天然气网络降阶模型对预设扰动和人在回路控制的时空响应，以评估鲁棒性并提出控制策略。重申一下，以色列的网络独具特点，因为其中没有压缩机，且入口指定的是通量而非压力。此外，我们开展这项研究，是着眼于天然气在未来几年日益重要的作用：随着煤炭逐步退出、可再生能源不断增长，天然气有望缓解需求随机性不断加剧的问题。

通量与压力的关系规定使网络的压力时间序列主要受日需求曲线支配，如图（4）所示，并且由于标称需求的随机波动而越来越容易受到压力漂移的影响。

此外，我们特别强调，网络的稳健性不仅要能够应对扰动，还要能够应对在任何时间发生的扰动，这促成了“系统储备”在时间和空间上具有依赖性的观点。

未来的工作将改进建模，以更全面地捕捉不确定性在网络中的传播及其对控制策略的影响和相互作用。我们设想将本文提出的预设控制（并通过单调性加以强化） [8, 9], 与为压缩机动态优化而开发的强大优化方法结合起来 [10, 11, 12, 13, 14], , 例如评估在以色列的天然气系统中增设压缩机的效益。我们还计划按照 [15, 16] 中所强调的方法，对以色列的电力与天然气系统开展全面建模与控制。

致谢

作者感谢与 Anatoly Zlotnik、Vitaliy Gyrya 和 Kaarthik Sundar 的讨论。CH 、 LP 和 MC 感
n谢亚利桑那大学以及以色列 NOGA 提供的旅行资助。CH 感谢美国国家科学基金会提供的数据驱动研究培训资助。

参考文献

[1] A. Osiadacz，“网络中瞬态气体流动的仿真”，*International Journalfor Numerical Methods in Fluids*，第4卷，第13–24页，1984年1月。[2] M. C. Steinbach，“天然气网络瞬态优化中的偏微分方程求解”，*Journalof Computationaland Applied Mathematics*，第203卷，第345–361页，2007年6月。[3] M. Chertkov、S. Backhaus 和 V. Lebedev，“相互依存的能源基础设施中的波动级联：天然气管网耦合”，*Applied Energy*，第160卷，第541–551页，2015年。[4]V. Gyrya 和 A. Zlotnik，“用于大规模天然气管道网络数值仿真的显式交错网格法”，*Applied MathematicalModelling*，第65卷，第34–51页，2019年。[5]K. Sundar，“GasTranSim Julia 软件包。”https://github.com/kaarthiksundar/GasTranSim.jl，2008年。

[6] E. S. Menon，天然气管道水力学。CRC出版社，2005年。

[7]M. Chertkov、V. Lebedev 和 S. Backhaus，《相互依存能源基础设施中的波动级联：天然气管网耦合》，2014年11月。arXiv:1411.2111[物理学]。

[8]M. Vuffray、S. Misra 和 M. Chertkov，《耗散流网络的单调性使鲁棒最大利润问题变得可解：一般分析及其在天然气流中的应用》，发表于*2015*年 第*54*届 *IEEE*决策与控制会议 *(CDC)*，第 4571–4578 页，2015年。

[9]A. Zlotnik、S. Misra、M. Vuffray 和 M. Chertkov，《耗散输运网络中受控流量的单调性》，发表于*2016*年 欧洲控制会议 *(ECC)*，（奥尔堡，丹麦），第 831–836 页，IEEE，2016年6月。

[10] H. H. Rachford, Jr. 和 R. G. Carter，“瞬态天然气流中的管道控制优化”，第 PSIG–0004 页，2000年10月。

[11]R. G. Carter 和 H. H. Rachford, Jr.，“优化管存管理以应对未来负荷不确定性”，第 PSIG–0306 页，2000年10月。

[12] H. H. Rachford, Jr.、R. G. Carter 和 T. F. Dupont，“瞬态天然气输送中的优化应用”，第 PSIG–0903 页，2009年5月。

[13] A. Zlotnik、M. Chertkov 和 S. Backhaus，“天然气网络中瞬态流的最优控制”，载于 *2015*年第*54*届 *IEEE* 决策与控制会议（*CDC*），（大阪），第 4563–4570 页，IEEE，2015年12月。

[14] A. Zlotnik、M.Chertkov、R.Carter、A. Hol- lis、A. Daniels 和 S. Backhaus，《在天然气管道动态优化中使用电网调度计划》，第 PSIG–1612 页，2016年5月。

[15] 监管变化对协调天然气管道与电力系统的影响，全天，*PSIG*年会，2016年5月。PSIG-1611。

[16]A. Zlotnik、L. Roald、S. Backhaus、M. Chertkov 和 G. Andersson，《互相依存的电力与天然气基础设施的协调调度》，*IEEE* 电力系统汇刊，第 32 卷第 1 期，第 600–610 页，2017年。

附录

作者简介

Criston Hyett - 是亚利桑那大学应用数学专业的博士生，导师为 Misha Chertkov。他的研究兴趣包括数据增强的动力系统建模，涵盖物理信息机器学习、降阶建模和不确定性量化。

Laurent Pagnier- 是亚利桑那大学的访问助理教授。他的主要研究兴趣是将机器学习技术应用于大型基础设施的运行。他尤其关注如何提升机器学习方法的可解释性和可信度；这对于提高从业者对这些方法的接受度和使用率至关重要。

Jean Alisse - 于1999年获得巴黎大学物理学博士学位。他曾在以色列电力公司的规划与调度部门工作11年，并在那里领导一个专注于计算流体力学问题和天然气动力学的建模组。自NOGA（以色列独立系统运营商）成立以来，他一直从事同类工作，重点开发用于气体动力学模拟和气体-电力系统的模型。

Lilach Sabban - 获得了以色列理工学院的博士学位。Lilach 是一名专攻流体动力学的机械工程师。她是 Noga（以色列独立系统运营商）的研究员，参与了多个

场景 #	描述	特征
1	八月的参考周。	压力 变化 in 流量控制 制度
2	加入经验噪声的场景 #1 需求曲线，供应量不变。	使用时的管存和压力漂移 不确定需求下的流量控制时的管存和压力漂移。
3	在节点 1 发生扰动的场景 #2。	引入生存时间的概念， 并设定不采取任何控制措施的基线。
4	场景 #3 中，扰动时间变更为 管存时间序列的谷值。	说明生存时间会发生变化 以及扰动时机。
5	场景 #4 中，供应量从 节点 # 8 开始逐步增加。	生存时间延长， 但变得 不那么确定。
6	采用分步削减 需求的场景 #5。	未发现低压越限。 节点 # 8 处的高压表明 需要进行精细控制。

表1：场景描述。

可再生能源项目，并一直在研究天然气动态特性。

Igal Goldshtein- 毕业于以色列理工学院，获理学学士学位。他在以色列电力公司工作了12年，其中7年担任系统操作员控制中心的燃气轮机调度员。过去两年，他在以色列独立系统运营商 NOGA 负责操作员培训系统（OTS）。他还研究以色列电力系统在各种压力条件下的运行情况。

Michael (Misha) Chertkov ——自2019年起担任亚利桑那大学数学教授，并主持应用数学跨学科研究生项目。他的研究聚焦于数学和统计学的基础问题及其在物理系统中的应用，尤其是流体力学，以及能源电网等工程系统和一些生物社会系统。Chertkov博士于1996年获得魏茨曼科学研究所物理学博士学位，随后在普林斯顿大学物理系担任R.H. Dicke研究员三年，并于1999年加入洛斯阿拉莫斯国家实验室，最初担任J.R. Oppenheimer研究员，之后成为理论部技术人员。他已发表250多篇论文，是美国科学促进会和美国物理学会会士，也是IEEE高级会员。