**智慧能源实践之路**

**智慧能源系统导论**

**能源系统建模、仿真、优化与控制**

李明涛 编撰

[mingtao@xjtu.edu.cn](mailto:mingtao@xjtu.edu.cn)

15209215157

西安交通大学 新能源科学与工程系

目录

[第一篇 综合能源系统导论 6](#_Toc73548693)

[第1章 绪论 6](#_Toc73548694)

[第2章 综合能源系统简介 6](#_Toc73548695)

[第3章 过程系统工程与能源系统工程 6](#_Toc73548696)

[第4章 本书的结构 6](#_Toc73548697)

[第二篇 综合能源系统建模 6](#_Toc73548698)

[第5章 以优化为目的的建模——代数方程模型 6](#_Toc73548699)

[第6章 以仿真为目的的建模——代数微分方程模型 6](#_Toc73548700)

[第7章 面向对象建模方法 6](#_Toc73548701)

[第三篇 综合能源系统仿真 6](#_Toc73548702)

[第8章 稳态仿真与瞬态仿真 6](#_Toc73548703)

[第9章 基于组件的仿真技术 6](#_Toc73548704)

[第10章 多领域联合仿真 6](#_Toc73548705)

[第四篇 综合能源系统优化 6](#_Toc73548706)

[第11章 最优化方法简介 7](#_Toc73548707)

[第12章 优化问题分类 7](#_Toc73548708)

[第13章 优化建模语言、优化模型与优化算法 7](#_Toc73548709)

[优化建模语言 7](#_Toc73548710)

[优化模型 7](#_Toc73548711)

[混合整数非线性规划问题的优化算法 7](#_Toc73548712)

[第14章 基于仿真的优化 7](#_Toc73548713)

[第15章 数据驱动优化 7](#_Toc73548714)

[第16章 综合能源系统最优设计 7](#_Toc73548715)

[配置优化与超结构优化 7](#_Toc73548716)

[容量设计 7](#_Toc73548717)

[第五篇 综合能源系统控制 8](#_Toc73548718)

[第17章 从PID控制到模型预测控制 8](#_Toc73548719)

[第18章 模型预测控制 8](#_Toc73548720)

[模型预测控制基本原理 8](#_Toc73548721)

[参数识别 8](#_Toc73548722)

[模型预测控制的实现 8](#_Toc73548723)

[第19章 强化学习智能控制 8](#_Toc73548724)

[第六篇 综合能源管理信息系统 8](#_Toc73548725)

[第20章 物联网、云平台 8](#_Toc73548726)

[第21章 数字化与智能化 8](#_Toc73548727)

[第22章 综合能源系统调度优化 8](#_Toc73548728)

[第七篇 附录 8](#_Toc73548729)

[第23章 国内外活跃研究组介绍 8](#_Toc73548730)

[Capd 8](#_Toc73548731)

[第24章 Modelica语言介绍 9](#_Toc73548732)

[第25章 Julia编程语言 9](#_Toc73548733)

[第26章 Plasmo.jl 9](#_Toc73548734)

[第27章 Modelingtoolkit.jl 9](#_Toc73548735)

[第28章 PiNet综合能源系统智慧管理平台 9](#_Toc73548736)

[PiNet-ME多能管理系统 9](#_Toc73548737)

[PiNet-Edge多能系统边端 9](#_Toc73548738)

[PiNet-Sim多能仿真系统 9](#_Toc73548739)

[PiNet-Mpc多能系统模型预测控制 9](#_Toc73548740)

[PiNet-PES多能系统参数识别 9](#_Toc73548741)

[第29章 其他CS相关知识 9](#_Toc73548742)

[Git及github 9](#_Toc73548743)

[参考文献 9](#_Toc73548744)

[参考文献 64](#_Toc73548745)

[E-mail 79](#_Toc73548746)

[引言 82](#_Toc73548747)

[智慧能源与能源系统优化 82](#_Toc73548748)

[第30章 大数据 82](#_Toc73548749)

[第31章 人工智能（机器学习、数据挖掘） 82](#_Toc73548750)

[第32章 运筹学方法（MINLP等） 82](#_Toc73548751)

[第33章 群体智能算法 82](#_Toc73548752)

[能源系统优化的应用领域 82](#_Toc73548753)

[第34章 多能互补系统 82](#_Toc73548754)

[第35章 天然气管网运行优化 82](#_Toc73548755)

[第36章 建筑能源管理系统 82](#_Toc73548756)

[第37章 供热管网系统 82](#_Toc73548757)

[第38章 城市能源系统 82](#_Toc73548758)

[研究人员 82](#_Toc73548759)

[组内 82](#_Toc73548760)

[第39章 组外拟合作 83](#_Toc73548761)

[第40章 相关行业学会 84](#_Toc73548762)

[运筹学会 唐立新 84](#_Toc73548763)

[能源方面呢？ 84](#_Toc73548764)

[第41章 自然科学基金代码 84](#_Toc73548765)

[存在的问题与可能突破的方向 84](#_Toc73548766)

[行业主要厂商（需求方，供应方，可能的合作方）上下游生态 84](#_Toc73548767)

[第42章 风能类公司 84](#_Toc73548768)

[第43章 光伏系统公司 84](#_Toc73548769)

[第44章 太阳能热发电公司 84](#_Toc73548770)

[第45章 储能公司 84](#_Toc73548771)

[第46章 多能互补系统公司 84](#_Toc73548772)

[第47章 电力系统公司 84](#_Toc73548773)

[第48章 天然气管道系统运行公司 84](#_Toc73548774)

[第49章 能源优化管理公司（解决方案提供方） 84](#_Toc73548775)

[第50章 优化软件、机器学习、大数据相关解决方案供应商 85](#_Toc73548776)

[国外主要研究机构 85](#_Toc73548777)

[国内主要研究机构 85](#_Toc73548778)

[相关标准汇编 85](#_Toc73548779)

[相关软件汇编 85](#_Toc73548780)

[相关评价标准汇编 85](#_Toc73548781)

[相关书籍 85](#_Toc73548782)

[相关博士论文 85](#_Toc73548783)

[关键词 85](#_Toc73548784)

[网页资料参考 86](#_Toc73548785)

[1. 综合能源服务发展背景 102](#_Toc73548786)

[1.1. 综合能源服务的基本内涵 102](#_Toc73548787)

[1.1.1. 基本概念 102](#_Toc73548788)

[1.1.2. 基本特征 102](#_Toc73548789)

[1.1.3. 服务模式 102](#_Toc73548790)

[1.1.4. 与传统能源服务模式的区别 103](#_Toc73548791)

[1.1.5. 发展综合能源服务的重要意义 103](#_Toc73548792)

[1.2. 技术层面——技术驱动 103](#_Toc73548793)

[1.3. 经济层面——万亿级市场 103](#_Toc73548794)

[1.4. 政策层面——“十四五”重头戏 103](#_Toc73548795)

[1.5. 社会层面——施利于民 104](#_Toc73548796)

[1.6. 小结 104](#_Toc73548797)

[2. 国内外行业发展现状及趋势 104](#_Toc73548798)

[1.7. 国外发展现状及趋势 104](#_Toc73548799)

[1.7.1. 欧洲 104](#_Toc73548800)

[1.7.2. 美国 105](#_Toc73548801)

[1.7.3. 日本 105](#_Toc73548802)

[1.7.4. 小结 105](#_Toc73548803)

[1.8. 国内发展现状及趋势 105](#_Toc73548804)

[1.8.1. 两大电网公司 105](#_Toc73548805)

[1.8.2. 五大发电集团 106](#_Toc73548806)

[1.8.3. 四小豪门 106](#_Toc73548807)

[1.8.4. 热力企业 107](#_Toc73548808)

[1.8.5. 油气企业 107](#_Toc73548809)

[1.8.6. 民营企业 107](#_Toc73548810)

[1.8.7. 小结 108](#_Toc73548811)

[1.9. 小结 108](#_Toc73548812)

[3. 综合能源服务框架 108](#_Toc73548813)

[2.1. 供给端 108](#_Toc73548814)

[2.1.1. 电力 108](#_Toc73548815)

[2.1.2. 热力 109](#_Toc73548816)

[2.1.3. 油气 109](#_Toc73548817)

[2.1.4. 小结 109](#_Toc73548818)

[2.2. 用户端 109](#_Toc73548819)

[2.2.1. 节能改造 109](#_Toc73548820)

[2.2.2. 负荷调控 109](#_Toc73548821)

[2.2.3. 智能设备 110](#_Toc73548822)

[2.2.4. 小结 110](#_Toc73548823)

[2.3. 输配端 110](#_Toc73548824)

[2.3.1. 虚拟电厂 110](#_Toc73548825)

[2.3.2. 信息服务与优化调控 110](#_Toc73548826)

[2.3.3. 充储服务 110](#_Toc73548827)

[2.3.4. 小结 111](#_Toc73548828)

# 综合能源系统导论

## 绪论

## 综合能源系统简介

## 过程系统工程与能源系统工程

## 本书的结构

## 综合能源系统最优设计

### 配置优化与超结构优化

### 容量设计

# 综合能源系统控制

## 从PID控制到模型预测控制

## 模型预测控制

### 模型预测控制基本原理

### 参数识别

### 模型预测控制的实现

## 强化学习智能控制

# 综合能源管理信息系统

## 物联网、云平台

## 数字化与智能化

## 综合能源系统调度优化

# 附录

## 国内外活跃研究组介绍

### Capd

过程系统工程头把交椅，卡耐基梅隆大学的capd及其他

## Modelica语言介绍

## Julia编程语言

## Plasmo.jl

## Modelingtoolkit.jl

## PiNet综合能源系统智慧管理平台

### PiNet-ME多能管理系统

### PiNet-Edge多能系统边端

### PiNet-Sim多能仿真系统

### PiNet-Mpc多能系统模型预测控制

### PiNet-PES多能系统参数识别

## 其他CS相关知识

### Git及github

# 参考文献

FUXA

gojs

react-diagram

https://gitee.com/VelsonWang/HmiFuncDesigner

https://gitee.com/mirrors/szarp

https://gitee.com/\_gen/mxgraph

http://www.usr.cn/

https://www.oschina.net/p/kaa

https://cloud.tencent.com/developer/news/467337

https://www.zhihu.com/question/266251753/answer/827948303

https://gitee.com/IoTSharp/IoTSharp

https://blog.csdn.net/jyx0902/article/details/102510793

https://www.cnblogs.com/xhload3d/p/8759227.html

http://www.scadaviewer.cn/

https://rapidscada.org/product/screenshots/

http://demo.rapidscada.net/View.aspx

https://www.zhihu.com/question/44243853?sort=created

https://www.cnblogs.com/jayhust/p/5675443.html

https://scadavis.io/

http://oscada.org/wiki/Home

https://scadagis.com/

http://demos.gisinc.com/enterpriseintegration/  ///gis与scada的集成

https://gitee.com/everpost/QStudioSCADA

https://github.com/IndeemaSoftware/QSimpleScada

https://github.com/SCADA-LTS/Scada-LTS

https://github.com/frangoteam/FUXA

https://github.com/Garens/scada

<http://svg-scada.com/>

http://archimedes.cheme.cmu.edu/

http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html

https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html

https://neos-server.org/neos/solvers/index.html

https://scip.zib.de/

https://www.minlp.org/

https://www.particleswarm.info/

http://www.minlplib.org/

http://openmdao.org/

http://www.optimization-online.org/

http://apmonitor.com/

http://www.swarmintelligence.org/

http://www.gamsworld.org/

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

http://titan.engr.tamu.edu/

http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634

ahttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1004954111600827

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965260700251X

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918316842#s0005

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418312111

http://iiesi.org/who.html

https://science.sciencemag.org/content/360/6396/eaas9793/tab-pdf

http://energyresources.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2698984

https://www.ncl.ac.uk/cesi/research/

https://gow.epsrc.ukri.org/NGBOViewGrant.aspx?GrantRef=EP/P001173/1

https://www.dur.ac.uk/dei/events/?eventno=38992

https://www.dur.ac.uk/dei/projects/cesi/

https://www.birmingham.ac.uk/facilities/esil/index.aspx

https://es.catapult.org.uk/capabilities/systems-integration/

https://gtr.ukri.org/projects?ref=EP%2FP001173%2F1

http://www.sussex.ac.uk/spru/research/projects/cesi

https://www.eera-set.eu/eera-joint-programmes-jps/list-of-jps/energy-systems-integration-2/

https://smartcities-infosystem.eu/energy/energy-system-integration

https://www.eera-set.eu/

https://ec.europa.eu/energy/en/events/energy-storage-service-evolving-energy-systems-and-renewables-integration

https://ec.europa.eu/energy/en/studies/report-first-results-h2020-projects-energy-efficiency-and-system-integration

https://www.eranet-smartenergysystems.eu/Calls/Regsys\_Calls/Focus\_Initiative\_Integrated\_Regional\_Energy\_Systems

https://www.sci.kit.edu/311.php

https://www.itas.kit.edu/english/erts\_current\_poga17\_esi.php

https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-esi.2019.0015

https://www.energy.gov/eere/wind/renewable-systems-integration

https://chinaproject.harvard.edu/event/omalley20171129

https://chinaproject.harvard.edu/renewable-electric-power-and-grid-integration

http://acep.uaf.edu/facilities/power-systems-integration-lab.aspx

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965260700251X

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1004954111600827

http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html

https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html

https://neos-server.org/neos/solvers/index.html

https://scip.zib.de/

https://www.minlp.org/

https://www.particleswarm.info/

http://www.minlplib.org/

http://www.optimization-online.org/

http://apmonitor.com/

http://www.swarmintelligence.org/

http://www.gamsworld.org/

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

http://titan.engr.tamu.edu/

http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634

<http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html>

<https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html>

<https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>

<https://scip.zib.de/>

<https://www.minlp.org/>

<https://www.particleswarm.info/>

<http://www.minlplib.org/>

<http://openmdao.org/>

<http://www.optimization-online.org/>

<http://apmonitor.com/>

<http://www.swarmintelligence.org/>

<http://www.gamsworld.org/>

<http://titan.engr.tamu.edu/>

<http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634>

(http://simulationresearch.lbl.gov/GO/)

python-zibopt

picos https://picos-api.gitlab.io/picos/

numberjack https://github.com/eomahony/Numberjack

pyscipopt

https://idaes.org/

https://china.lbl.gov/research-projects

https://buildings.lbl.gov/

https://eta.lbl.gov/research-development

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

## 关于管网的

https://github.com/samadritakarmakar/LiquiNet

https://www.epa.gov/water-research/epanet

http://epanet.de/

http://www.korf.co.uk/korf\_links.html

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Gas\_network\_datasets

https://github.com/USEPA/Water-Distribution-Network-Model

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X08000607

https://psig.org/what-we-do/

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/TransiEnt

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://github.com/OpenIPSL

https://github.com/USEPA/WNTR

https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs

https://github.com/NCBI-Hackathons/Network\_SNPs

https://github.com/casadi/casadi

http://apmonitor.com/me575/index.php/Main/BookChapters

https://flow.byu.edu/me575/resources/

http://egon.cheme.cmu.edu/index.html 以及其徒子徒孙 http://titan.princeton.edu/tree/index.php

包括princeton的Christodoulos Floudas, http://titan.princeton.edu/tree/pdf/Christodoulos%20Floudas.pdf

http://www.midaco-solver.com/

[数据驱动的进化优化](https://git.mingtaoli.cn/zhangxiaohai/Optimization\_Relative\_Knowledge/src/branch/master/%E6%95%B0%E6%8D%AE%E9%A9%B1%E5%8A%A8%E7%9A%84%E8%BF%9B%E5%8C%96%E4%BC%98%E5%8C%96)

https://oemof.org/

https://ieeexplore.ieee.org/document/8668389/authors#authors

https://www.aalborgcsp.com/business-areas/integrated-energy-systems/

https://www.nrel.gov/esif/what-is-esi.html

https://www.nrel.gov/esif/

https://www.esig.energy/planning-for-integrated-energy-systems/

Idaes pse

Genopt

Energyplus

Sam

Pyomo

modelica-openmodelica，jmodelica

参考文献

nrel

lbl

cmu

antigone

## 关于优化的

<http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html>

<https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html>

<https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>

<https://scip.zib.de/>

<https://www.minlp.org/>

<https://www.particleswarm.info/>

<http://www.minlplib.org/>

<http://openmdao.org/>

<http://www.optimization-online.org/>

<http://apmonitor.com/>

<http://www.swarmintelligence.org/>

<http://www.gamsworld.org/>

<http://titan.engr.tamu.edu/>

<http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634>

(http://simulationresearch.lbl.gov/GO/)

python-zibopt

picos https://picos-api.gitlab.io/picos/

numberjack https://github.com/eomahony/Numberjack

pyscipopt

## 关于仿真的

energyplus（nrel）

sam（nrel）

spawn of energyplus

openstudio

https://idaes.org/

https://china.lbl.gov/research-projects

https://buildings.lbl.gov/

https://eta.lbl.gov/research-development

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

## 关于管网的

https://github.com/samadritakarmakar/LiquiNet

https://www.epa.gov/water-research/epanet

http://epanet.de/

http://www.korf.co.uk/korf\_links.html

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Gas\_network\_datasets

https://github.com/USEPA/Water-Distribution-Network-Model

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X08000607

https://psig.org/what-we-do/

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/TransiEnt

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://github.com/OpenIPSL

https://github.com/USEPA/WNTR

https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs

https://github.com/NCBI-Hackathons/Network\_SNPs

https://github.com/casadi/casadi

http://apmonitor.com/me575/index.php/Main/BookChapters

https://flow.byu.edu/me575/resources/

http://egon.cheme.cmu.edu/index.html 以及其徒子徒孙 http://titan.princeton.edu/tree/index.php

包括princeton的Christodoulos Floudas, http://titan.princeton.edu/tree/pdf/Christodoulos%20Floudas.pdf

http://www.midaco-solver.com/

[数据驱动的进化优化]

(https://git.mingtaoli.cn/zhangxiaohai/Optimization\_Relative\_Knowledge/src/branch/master/%E6%95%B0%E6%8D%AE%E9%A9%B1%E5%8A%A8%E7%9A%84%E8%BF%9B%E5%8C%96%E4%BC%98%E5%8C%96)

https://oemof.org/

## 研究计划与任务分解

https://ieeexplore.ieee.org/document/8668389/authors#authors

https://www.aalborgcsp.com/business-areas/integrated-energy-systems/

https://www.nrel.gov/esif/what-is-esi.html

https://www.nrel.gov/esif/

https://www.esig.energy/planning-for-integrated-energy-systems/

https://www.claralib.com/#modal-download

https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7207236

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115013179

https://www.scientific.net/AMR.1140.449

https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7895273

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319301647

https://www.mdpi.com/2079-9292/8/2/237

https://www.nrel.gov/esif/smart-home-building-systems.html

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401219301422

https://www.nrel.gov/solar/index.html

https://www.nrel.gov/research/areas.html

## 关于优化的

<http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html>

<https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html>

<https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>

<https://scip.zib.de/>

<https://www.minlp.org/>

<https://www.particleswarm.info/>

<http://www.minlplib.org/>

<http://openmdao.org/>

<http://www.optimization-online.org/>

<http://apmonitor.com/>

<http://www.swarmintelligence.org/>

<http://www.gamsworld.org/>

<http://titan.engr.tamu.edu/>

<http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634>

(http://simulationresearch.lbl.gov/GO/)

python-zibopt

picos https://picos-api.gitlab.io/picos/

numberjack https://github.com/eomahony/Numberjack

pyscipopt

## 关于仿真的

energyplus（nrel）

sam（nrel）

spawn of energyplus

openstudio

## 关于综合能源系统的

https://idaes.org/

https://china.lbl.gov/research-projects

https://buildings.lbl.gov/

https://eta.lbl.gov/research-development

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

## 关于管网的

https://github.com/samadritakarmakar/LiquiNet

https://www.epa.gov/water-research/epanet

http://epanet.de/

http://www.korf.co.uk/korf\_links.html

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Gas\_network\_datasets

https://github.com/USEPA/Water-Distribution-Network-Model

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X08000607

https://psig.org/what-we-do/

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/TransiEnt

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://github.com/OpenIPSL

https://github.com/USEPA/WNTR

https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs

https://github.com/NCBI-Hackathons/Network\_SNPs

https://github.com/casadi/casadi

http://apmonitor.com/me575/index.php/Main/BookChapters

https://flow.byu.edu/me575/resources/

http://egon.cheme.cmu.edu/index.html 以及其徒子徒孙 http://titan.princeton.edu/tree/index.php

包括princeton的Christodoulos Floudas, http://titan.princeton.edu/tree/pdf/Christodoulos%20Floudas.pdf

http://www.midaco-solver.com/

[数据驱动的进化优化](https://git.mingtaoli.cn/zhangxiaohai/Optimization\_Relative\_Knowledge/src/branch/master/%E6%95%B0%E6%8D%AE%E9%A9%B1%E5%8A%A8%E7%9A%84%E8%BF%9B%E5%8C%96%E4%BC%98%E5%8C%96)

https://oemof.org/

## 研究计划与任务分解

2019上半年

1、归纳HRES的优化问题

对问题分类调研，突出阐明问题的难度，导向MINLP和基于仿真的优化

2、阐明现有的优化方法、软件和发展趋势，突出启发式算法，尤其是PSO算法

决定论算法（GAMS、CPLEX、SCIP等）；启发式算法

3、PSO算法的特点，优缺点，处理离散变量与约束的方法

基于Python的实现

4、PSO算法处理MINLP问题的验证与性能比较

MINLP测试集、user-defined function

2019下半年

5、典型仿真接口实现

Jmodelica，energyplus，user-function

6、处理典型的HRES优化问题

基于modelica搭建模型

7、处理天然气优化问题

https://ieeexplore.ieee.org/document/8668389/authors#authors

https://www.aalborgcsp.com/business-areas/integrated-energy-systems/

https://www.nrel.gov/esif/what-is-esi.html

https://www.nrel.gov/esif/

https://www.esig.energy/planning-for-integrated-energy-systems/

多能互补与智慧能源

根据国际能源署的研究报告，2040年全球能源需求将比2010年全球用能总量提升56%。相应地，按照当前技术水平发展，2040年全球碳排放总量将比2010年提升45.8%，由此将导致严重的全球气候及环境等问题。对此，主要有两条解决途径——提高能源效率和开发可再生能源（RE）。在可再生能源开发实践过程中，各国学者们渐渐发现单一的可再生能源系统并不能很好地适应实际能源需求，盲目建设导致了不同地区不同规模的弃风弃电等可再生能源消纳问题，造成了巨大的损失和浪费。为解决这一问题，各国大力发展多能互补系统（HES）。自本世纪起，德国先后发起ICT以及E-Energy项目，欧盟启动FINSENY项目，瑞士发起VoFEN项目，美国启动FREEDM计划，我国也紧随其后开展“互联网+”智慧能源计划。目前，HES的研究尚处于初级阶段，主要集中在以太阳能和风能为基础的电力系统上，且多研究可再生能源间的互补耦合，较少地将可再生能源与已有的传统能源进行结合。此外，将HES系统产生的电力用于制氢的“Power to Gas”（PtG）系统也在发达国家，尤其是德国，受到较大关注。

多能互补系统较单一的可再生能源系统具备更高的可靠性、更低的成本、更高的能源效率以及更少的系统储能装置容量。但是，HES系统也面临更大的技术挑战。除了单一RE系统存在的生产不连续、随机性、波动性和不可控等特点外，HES中还需考虑实际负荷与多种能源间的特性耦合问题，尤其在容量配置、能量策略和协调运行管理上存在难题。这些挑战的根源在于：其一，按当前技术发展趋势，可再生能源的诸多特性并不会随着硬件技术的升级而被改变；其二，HES涉及多种不同能源的耦合，是一个多场景、多目标、不确定的综合规划问题。此外，受于气候环境的要求，可再生能源工程建设迫在眉睫。因此迫切需要发展适应大规模计算的混合整数非线性优化方法，针对HES特性进行优化设计。根据这一思路，从上世纪末开始，学者们陆续发展了基于传统优化算法和元启发算法的线性与非线性优化设计方法。传统算法中主要有最小二乘法、线性规划法、迭代优化法等，该类方法未能充分考虑HES的实际复杂性，对系统元件进行简单建模，进而根据负荷总量对系统设计进行准稳态优化，所得结果质量较差，主要在20世纪末用于HES的研究分析工作。元启发算法是近年来学者们模拟自然界现象发展而来的一类非确定性算法，能够在没有明确数学方程的情况下凭借给定的优化目标和约束条件找到满足要求的优化解，并且具备天然的并行计算特性，适应于大规模计算。因此，面对高复杂度与大规模优化计算问题，元启发算法展现出极大的优越性，在计算难度、精度与效率上较传统算法均有极大改进。在HES的优化设计研究及工程方面，基于元启发算法的遗传算法（GA）、粒子群算法（PSO）及其混合算法等得到了广泛的应用。虽然元启发算法在HES的优化设计上已经初见成效，但是由于学者们对HES的认识不够深刻，所发展的优化算法其计算精度、计算效率与通用性较低，且优化算法研究者与能源系统研究者结合不够紧密（拥有算法研究背景的学者往往对能源系统的了解浮于表面，而研究能源系统的学者则对算法的了解不够深入），使得针对HES的优化设计还处于单目标、准稳态、模块优化水平，未能将优化算法与能源系统进行深度耦合，发挥HES应有的潜力。而随着优化方法、计算力与边缘计算的发展，多目标优化、瞬态优化与系统网络结构优化设计已变得可能，从传统的粗放式优化设计转向未来的数字化精细化优化设计已是发展趋势。

基于当前的HES优化设计研究现状与未来发展趋势，结合实验室的氢能战略与科学中心多能互补理论研究方向，本课题拟研究基于粒子群算法的多能互补体系通用优化方法，即对现有粒子群算法针对多能互补系统进行改进，研究多目标、准瞬态和系统网络结构优化方法。进一步地，利用优化算法的手段，寻找多种能源间能量传递的优化路径，为研究多能互补理论提供高效研究手段的同时发展多能互补体系建设的理论模型。

相关研究组

美国可再生能源实验室的能源系统集成与能源分析

帝国理工能源未来实验室

美国伯克利国家实验室https://buildings.lbl.gov/

https://energyanalysis.lbl.gov/

Idaes

优化工具就做gensbo

现在仿真工具使用energyplus

未来仿真工具基于modelica做

代码基于python和c++，使用pybind11写，图形界面基于pyside2做。

Modelica renewable energy library

工具介绍

Trnsys

Energyplus

Modelica

Sam

Idaes pse

西安交通大学本科生课程教学大纲

一、课程基本信息

课程名称 综合能源系统建模、仿真、优化与控制

Modeling, Simulation, Optimization and Control for Integrated Energy System (MSOC4IES)

课程编号 NEEN4000001

课程学分 2 总学时 32

学时分配 理论: 32 实验: 0 上机: 0 课外: 0 （课外学时不计入总学时）

课程类型 公共课程 通识课程

学科门类基础课 专业大类基础课

专业核心课 √专业选修课 集中实践

适用年级 1-1 1-2 2-1 2-2 √3-1 √3-2

√4-1 4-2 5-1 5-2

适用专业 能动学院各专业

先修课程 高等数学，线性代数，程序设计基础，工程热力学，流体力学，传热学

后续课程 无

教材、参考书及其他资料 [1] 左然, 施明恒, 王希麟, 徐谦. 可再生能源概论（第2版）. 北京: 机械工业出版社, 2015.

[2] 马斯特斯(Masters, Gilbert M)著, 王宾等译. 高效可再生分布式发电系统. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[3] 冯庆东编著. 能源互联网与智慧能源. 北京: 机械工业出版社, 2015.

[4]杰里米·里夫金(Rifkin, Jeremy)著, 张体伟等译.第三次工业革命——新经济模式如何改变世界. 北京: 中信出版社, 2012.

[5] Rajanna Siddaiah, R. P. Saini. A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2016，58: 376-396

[6] M. Iqbal, M. Azam, M. Naeem, et al. Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2014，39: 640-654

[7] Sunanda Sinha, S. S. Chandel. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2014，32: 192-205

[8] Samir M. Dawoud, Xiangning Lin, Merfat I. Okba. Hybrid renewable microgrid optimization techniques: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2018，82: 2039-2052

二、课程目标及学生应达到的能力

1. 通过本课程学习使学生生系统地了解和掌握太阳能、风能等可再生能源多能互补系统建模、仿真与优化的方法，包括多能互补基于组件的建模与仿真，数学问题抽象及基于仿真的优化，培养学生将所学的数学、工程基础和专业知识、计算机建模、仿真、优化知识用于解决可再生能源多能互补工程问题的能力，培养学生科学的思维方式、研究方法及创新意识。

2. 本课程系统地介绍基于组件的仿真工具Trnsys、EnergyPlus与modelica，培养学生针对复杂工程问题，开发、选择与使用恰当的技术、资源、现代工程工具和信息技术工具的能力。

3． 针对多能互补优化问题，介绍典型的数学模型、常用的优化算法与软件，并介绍新的基于计算智能的寻优方法与软件开发，培养学生针对复杂工程实际能够抽象问题，使用计算机软硬件工具，开展预测、模拟与优化获得有效结论的能力。

4. 本课程介绍综合能源系统智慧能源前沿，培养学生应用工程管理与决策方法的能力，培养学生自主学习和终身学习的意识和不断学习适应社会发展的能力。

本课程以教师讲授和学生自学并重，采取互动式教学方式，教学相长，为学生从事专业工作或科学研究等打下良好的基础。

三、教学内容简介

本课程全面介绍新能源热利用与热发电的原理、技术及工程基础知识。原理部分重点介绍热能转换与利用的基本原理、太阳能、地热能等低品位热能利用的基本知识，包括热发电循环、热电厂系统与设备、太阳几何学、辐射学、光学设计基础及太阳能集热器等；技术部分主要介绍太阳能光热转换技术、高温热动力循环发电技术，热管、热泵、吸收式、吸附式制冷及低温余热发电等低品位热能转换技术等；工程方面则重点介绍太阳能热利用与热动力发电工程、地热能热利用与热动力发电工程的设计与分析方法。

章节顺序 章节名称 知识点 Key Points 参考学时

1 可再生能源多能互补系统(HRES)简介 1.1 可再生能源多能互补系统(HRES)简介：可再生能源多能互补系统(HRES)的概念、组成、特点，HRES的节能性，典型的HRES形式，HRES发展现状与趋势 1

2 可再生能源多能互补系统(HRES)简介 1.2可再生能源多能互补系统(HRES)中的优化问题：典型HRES中的优化问题介绍，HRES优化问题分类 1

3 基于组件的建模方法 2.1基于组件的建模方法：主要电力器件建模方法；用户热电负荷建模方法；太阳能光伏发电系统建模方法等 1

4 基于组件的建模方法 2.2基于组件的仿真及其工具：Trnsys瞬态模拟软件，Modelica建模仿真软件，主要功能模块，能源相关library介绍，Energyplus建筑能耗模拟软件，主要功能模块，建筑能耗模拟方法 3

5 优化问题与求解方法 3.1混合整数非线性规划：HRES优化问题抽象，传统MINLP算法 2

6 优化问题与求解方法 3.2智能优化算法介绍:元启发优化算法（群智能优化方法，进化算法等） 4

7 典型案例分析 4.1 典型案例分析：典型可再生多能互补系统优化问题仿真案例，典型风-光-储系统优化建模仿真过程实施与分析；基于组件的建模仿真，基于仿真的优化，基于模型的预测控制等 2

8 多能互补与智慧能源 5.1多能互补与智慧能源：智慧能源系统概念，关键技术，重点领域与发展趋势 2

四、教学安排详表

序号 章节 教学内容

学时分配 教学方式

（授课、实验、上机、讨论） 课后环节（作业、自学、综合、其他） 教学要求

（知识要求及能力要求） 对课程目标的支撑关系

第一章 1.1 多能互补简介 1 授课 自学 了解多能互补系统概念及其优化问题 课程目标1

1.2 多能互补优化问题 1 授课 自学

第二章 2.1 基于组件的建模方法 1 授课 自学 了解基于组件的建模方法，掌握一种典型的建模仿真工具 课程目标2

2.2 基于组件的仿真及其工具 3 授课 自学、作业

第三章 3.1 混合整数非线性规划 2 授课 自学 了解可再生能源系统优化中的混合整数非线性优化问题、求解方法，尤其是进化算法类的智能优化算法 课程目标3

3.2 智能优化算法介绍 4 授课 自学、作业

第四章 4.1 典型案例分析 2 授课 自学、作业 了解典型可再生多能互补系统优化问题建模仿真优化全栈流程 课程目标3

第五章 5.1 多能互补与智慧能源 2 授课 自学 了解智慧能源系统概念，关键技术，重点领域与发展趋势 课程目标4

注：对课程目标的支撑关系可填写大纲中第二部分课程目标的相应序号

五、实践环节

实验编号 实验名称 实验内容 教学方法 对课程目标的支撑关系

无

注：对课程目标的支撑关系可填写大纲中第二部分课程目标的相应序号

六、课外学时分配

章节顺序 内容 参考学时 对课程目标的支撑关系

1 学习太阳能光伏发电、风力发电和常用储能方法的基本原理 2 课程目标1

2 可再生能源多能互补系统(HRES)优化建模相关综述文献阅读 2 课程目标1

3 学习HRES系统优化建模的常用工具软件 2 课程目标2

4 学习Modelica软件的构架及基本功能 2 课程目标2

5 学习Energyplus软件的构架及基本功能 2 课程目标2

6 学习混合整数非线性优化软件包，粒子群等进化优化方法的基本原理 2 课程目标3

7 学习HRES系统“基于仿真的优化”建模-仿真-优化流程 2 课程目标3

8 了解智慧能源的一般内涵、发展水平和发展趋势 2 课程目标4

注：对课程目标的支撑关系可填写大纲中第二部分课程目标的相应序号

七、考核方式及成绩构成

平时测验成绩占 0 %，平时作业占 40 %；实验（上机）成绩占 0 %；平时表现占 0 %，期中考试成绩占 0 %，期末考试成绩占 60 %。

大纲制定者：李明涛

大纲审核者：赵亮

最后修订时间： 2019 年 3 月 20 日

“新能源热利用与热发电原理及系统”课程简介

课程编码：ENPO420203

学分：2.5

学时：42 （理论学时：38 实验学时：4 上机学时：0 课外学时： 0（课外学时不计入总学时））

课程内容简介（200字以内，含实验内容）

本课程全面介绍新能源热利用与热发电的原理、技术及工程基础知识。原理部分介绍热能尤其是太阳能、地热能等低品位热能转换与利用的基本原理，包括热发电循环、热电厂系统与设备、太阳几何学、辐射学、聚光原理等；技术部分主要介绍太阳能光热转换技术、热动力循环发电技术、热泵、吸收式、吸附式制冷及低温余热发电等；工程方面则重点介绍太阳能热利用与热动力发电工程、地热能热利用与热动力发电工程的设计与分析方法。

课外实践内容（100字以内,无此项内容的课程不填）

无。

先修课（最低要求）：

大学物理，工程热力学，流体力学，传热学

课程水平：（适合年级）新能源科学与工程专业大三本科生

教学手段：多媒体授课

参考书目：

[1] John A. Duffie, William A. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes (4rd Edition). Hoboken, New Jersey: Wiley, 2013.

[2] 何梓年. 太阳能热利用. 合肥：中国科学技术大学出版社, 2009。

[3] 刘鉴民. 太阳能利用-原理.技术.工程. 北京: 电子工业出版社, 2010。

[4] 黄素逸, 黄树红. 太阳能热发电原理及技术. 北京: 中国电力出版社, 2012。

[5] 黄湘. 太阳能热发电技术. 北京: 中国电力出版社, 2013。

[6] 薛德千. 太阳能制冷技术. 北京: 化学工业出版社, 2006。

[7] 汪集旸等. 地热利用技术. 北京: 化学工业出版社, 2005。

[8] 蔡义汉. 地热直接利用技术. 天津：天津大学出版社,2004。

[9] 张军,孟祥睿，马新灵. 低品位热能利用技术. 北京: 化学工业出版社, 2012。

[10] 姚兴佳. 可再生能源及其发电技术. 北京: 科学出版社，2010。

课程组负责人 赵亮 职 称 教授 学 科 动力工程及工程热物理

单 位 能动学院 联系电话 E-mail lzhao@

mail.xjtu.edu.cn

任课教师 职称 学 科 单 位

赵 亮 教授 动力工程及工程热物理 能动学院

王跃社 教授 动力工程及工程热物理 能动学院

李明涛 副教授 动力工程及工程热物理 能动学院

智慧能源系统调研报告

（人工智能及大数据在能源领域的应用）（题目待定）

李明涛 研究组

mingtao@xjtu.edu.cn

西安交通大学

动力工程多相流国家重点实验室

目录

引言 3

智慧能源与能源系统优化 3

大数据 3

人工智能（机器学习、数据挖掘） 3

运筹学方法（MINLP等） 3

群体智能算法 3

能源系统优化的应用领域 3

多能互补系统 3

天然气管网运行优化 3

建筑能源管理系统 3

供热管网系统 3

城市能源系统 3

研究人员 3

组内 3

组外拟合作 4

相关行业学会 5

运筹学会 唐立新 5

能源方面呢？ 5

自然科学基金代码 5

存在的问题与可能突破的方向 5

行业主要厂商（需求方，供应方，可能的合作方）上下游生态 5

风能类公司 5

光伏系统公司 5

太阳能热发电公司 5

储能公司 5

多能互补系统公司 5

电力系统公司 5

天然气管道系统运行公司 5

能源优化管理公司（解决方案提供方） 5

优化软件、机器学习、大数据相关解决方案供应商 6

国外主要研究机构 6

国内主要研究机构 6

相关标准汇编 6

相关软件汇编 6

相关评价标准汇编 6

相关书籍 6

相关博士论文 6

关键词 6

涉及到的领域 7

太阳能光伏系统 7

风能系统 7

太阳能热发电系统 7

储能系统 7

混合能源系统 7

热网系统 7

水网系统 7

气网系统 7

（能源互联网）电能路由器 7

新能源并网 7

气象数据 7

预测方法 7

可靠性 7

评价方法 7

调度优化 8

网页资料参考 8

引言

智慧能源与能源系统优化

大数据

人工智能（机器学习、数据挖掘）

运筹学方法（MINLP等）

群体智能算法

能源系统优化的应用领域

多能互补系统

天然气管网运行优化

建筑能源管理系统

供热管网系统

城市能源系统

研究人员

组内

李明涛，刘亚，余佳磊，张晓海，汪龙，陈庚

组外拟合作

胡伟飞，浙大机械

杨树森，交大数学

相关行业学会

运筹学会 唐立新

能源方面呢？

自然科学基金代码

存在的问题与可能突破的方向

行业主要厂商（需求方，供应方，可能的合作方）上下游生态

风能类公司

光伏系统公司

太阳能热发电公司

储能公司

多能互补系统公司

电力系统公司

天然气管道系统运行公司

能源优化管理公司（解决方案提供方）

优化软件、机器学习、大数据相关解决方案供应商

国外主要研究机构

国内主要研究机构

相关标准汇编

相关软件汇编

规划类软件，MINLP，

系统模拟类软件，modelica，trnsys

Cfd软件

Fem软件

相关评价标准汇编

相关书籍

相关博士论文

关键词

多能互补，hybrid energy system,Multi-Energy system，decentralized energy systems，district energy system，hybrid renewable energy systems，machine learning, Polygeneration Energy Systems

涉及到的领域

太阳能光伏系统

风能系统

太阳能热发电系统

储能系统

混合能源系统

热网系统

水网系统

气网系统

（能源互联网）电能路由器

新能源并网

气象数据

预测方法

可靠性

评价方法

调度优化

网页资料参考

http://www.zib.de/optimization/energy

https://www.plan4res.eu

多能互补示范项目http://www.nea.gov.cn/2016-12/26/c\_135933772.htm

首批多能互补集成优化示范工程评选结果公示

https://blog.csiro.au/energy-pick-n-mix-hybrid-systems-next-big-thing/

https://www.th-energy.net/english/platform-renewable-energy-and-mining/database-solar-wind-power-plants/

https://link.springer.com/article/10.1007/s12351-017-0348-z

https://www.techemergence.com/artificial-intelligence-for-energy-efficiency-and-renewable-energy/

http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/ibrahima2/

https://medium.com/wepower/artificial-intelligence-and-the-future-of-energy-105ac6053de4

https://www.findaphd.com/search/projectdetails.aspx?PJID=77134

https://www.findaphd.com/search/projectdetails.aspx?PJID=94466

https://dzone.com/articles/top-4-machine-learning-use

https://www.hindawi.com/journals/ijp/2017/4194251/

http://fortune.com/2016/09/14/data-machine-learning-solar/

https://internetofthingsagenda.techtarget.com/blog/IoT-Agenda/How-machine-learning-improves-energy-consumption

https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v90y2018icp728-741.html

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-10422-5\_29

https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3120614

https://www.amazon.com/Artificial-Intelligence-Energy-Renewable-Systems/dp/1600212611

https://pratt.duke.edu/about/news/gdbx-finalist

https://www.igi-global.com/chapter/application-of-data-mining-and-analysis-techniques-for-renewable-energy-network-design-and-optimization/109974

https://medium.com/savera-ai/machine-learning-bringing-a-new-era-in-the-energy-sector-distributed-abundant-and-a-clean-world-cf06365c29ff

https://www.engerati.com/energy-management/article/energy-efficiency/machine-learning-iot-and-big-data-energy-efficiency-use

https://www.softwebsolutions.com/resources/saving-energy-using-big-data-and-machine-learning.html

https://www.cbinsights.com/research/artificial-intelligence-energy-industry/

https://ieeexplore.ieee.org/document/7424481

https://www.ibm.com/blogs/research/2018/07/reduce-energy-cooling/

https://www.datascienceweekly.org/data-scientist-interviews/machine-learning-energy-efficiency-optimum-energy-data-guild-interview

https://blog.goodaudience.com/applying-machine-learning-to-energy-demand-and-distribution-optimization-in-kaduna-electric-8fba4bafc222

https://c3iot.ai/products/c3-iot-applications/energy-management/

https://www.wiley.com/en-us/Data+Mining+and+Machine+Learning+in+Building+Energy+Analysis-p-9781848214224

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917313429

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815027988

http://cs109-energy.github.io/

https://www.oreilly.com/library/view/data-mining-and/9781848214224/c04.xhtml

https://asu.pure.elsevier.com/en/publications/machine-learning-approaches-for-estimating-commercial-building-en

https://opus4.kobv.de/opus4-ohm/frontdoor/index/index/docId/252

https://ieeexplore.ieee.org/document/5542881

https://ieeexplore.ieee.org/document/1709356

https://www.intechopen.com/books/knowledge-oriented-applications-in-data-mining/data-mining-method-for-energy-system-aplications

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116308862

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670715001067

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-88965-6\_8

https://www.minlp.org/library/instances.php

http://newton.cheme.cmu.edu/interfaces/

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217318352

http://www.or.rwth-aachen.de/minomese2015

https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01562152

https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aic.15332

http://energyresources.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1790726

http://www.inderscience.com/info/inarticle.php?artid=68436

http://nrl.northumbria.ac.uk/33720/

https://yoric.mit.edu/optimal-design-and-operation-energy-systems-under-uncertainty

https://crei.skoltech.ru/energysystems/publications-2/

http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/40/1/012026

https://www.mpi-magdeburg.mpg.de/2869665/minlp\_damping

https://www.math.hu-berlin.de/~eopt/index\_en.html

天然气管网优化调研

天然气管网优化背景

1.1我国天然气市场、行业现状及趋势

随着社会的发展进步人们对于清洁能源的需求日益增加了，而天然气是一种安全，高热值的清洁气体，这也就使其需求量得到不断增长。需求量增加的同时也带来了一些问题，首先我国天然气分布主要集中在中西部地区，但需求较大的地区却在东部。其次，通过调研我们发现我国天然气消费量在2013年就达到了1676亿立方米，而天然气的对外依存度也首次突破了30%。我国天然气消费量于2014年达到了1930亿立方米，同比增长了14.5%。我国跃居为全球第三大天然气国，而且我国的天然气对外依存度还在不断上升，进口气仍是满足需求的重要途径。由于我国天然气资源及消费分布不均，天然气管道输送成为解决区域用气不平衡的主要措施。管道系统运输天然气安全、可靠、高效的优点使其已经成为了运输天然气的主流方式。四通八达的天然气管道是使天然气得到更好利用的必要条件。

早在2004年，我国油气管道总里程还不到3万公里，远低于世界发达国家。但经过数十年的发展，截至2016年底我国已建成油气管道11.64万千米，其中天然气管道就有6.8万千米，覆盖全国的油气管网已经初步形成。“海气登陆、西气东输、就近外供”的供气格局也随之形成。

根据我国规划，四大油气进口战略通道建设将进一步加速，以应对海上油气运输可能出现的一些突发状况。中亚天然气管道二期与中哈原油管道二期正在建设当中，同时中俄天然气管道也正在规划当中；而在国内也即将建设大量管网系统，就比如西气东输、陕京线、川气东送、西气东输三线以及四线等。国家发改委、国家能源部于2017年7月12日发布的《中长期油气管网规划》中提到，到2020年为止，我国油气管网规模有希望达到16.8万千米；而到2025年时，我国油气管网规模有希望达到24万千米。

天然气具有较高的燃烧值，使用天然气的优势显著—绿色环保：天然气中几乎不含硫、粉尘及其他有害物质，对环境的污染比煤和石油小得多，其燃烧产生的温室气体极少。相对热值、效率高：与煤炭和石油相比，天然气单位热值为8000-10000 大卡，远高于煤炭；并且天然气的热效率可达70%以上，不仅高于煤炭的40%-60%，而且也高于石油的65%左右。天然气利用领域非常广泛，全球致力于环境治理是引发天然气需求增长的最大驱动力。除了能用于炊事外，广泛作为发电、石油化工、机械制造、玻璃陶瓷、汽车、集中空调的燃料或原料，属于全球三大基础能源之一。

全球能源图景中，天然气正处于发展的黄金时代，全球能源市场正经历着天然气使用量增加的历史性转变，而这一转变将为经济增长、环境改善创造新的机遇。国际能源署发布的报告在2010 年到2035 年之间，全球天然气需求量将上升50%，能源结构中所占比例将达到1/4。天然气将超过煤炭，成为仅次于石油的第二大一次能源，并且和石油不同的是，天然气税费主要增值税11%，而石油成品油消费税征收经历4次上调，最新高达汽油1.52 元/升，柴油1.2 元/升，其它国家基本上实施类似税收政策，即鼓励天然气抑制石油煤炭。

随着“煤改气”政策的大力推行，以及日益旺盛的采暖需求，各地对天然气的需求大增。2017-2018 冬季，北方煤改气拉动天然气消费量170 亿方，相当于煤改气六省冬季消费量40%。天然气在夏、冬两季的需求差别很大，2017 年的“气荒”就是最好的例证。2017 年，我国进口天然气920 亿立方米，同比增加27.2%，其中，进口LNG 约526 亿方，占当年进口天然气的57.2%；进口管道气约394 亿方，占当年进口天然气的42.8%。根据2017 年7 月发改委印发的《加快推进天然气利用的意见》，到2020 年我国天然气在一次能源消费结构中的占比力争达到10%左右，到2030 年力争将天然气在一次能源消费中的占比提高到15%左右。根据高层重要批示，要求三桶油加大国内油气勘探开发力度。我国油气缺口持续扩大，原油和天然气缺口分别近70%、40%，进口依存度高。加强油气自给能力已经上升至维护国家能源安全的角度。

1.2我国天然气行业管网优化问题

最优化技术指运用数学方法研究各种系统的优化途径及方案，为管理者提供科学决策的依据。最优化技术主要研究对象是各种有组织系统的管理问题及其生产经营活动，随着科学技术的日益进步和生产经营的发展，最优化技术已成为现代管理科学的重要理论基础和不可缺少的方法。现代国民经济或部门经济的计划，直至企业的发展规划和年度生产计划，尤其是农业规划、种植计划、能源规划和其他资源、环境和生态规划的制定，都开始应用最优化方法，其中一个重要的发展趋势是帮助管理人员进行各种优化决策。最优化技术运用得当，不仅能够得到满足需求目标的最优结果，对生产进行指导；还能够有效的降低人工成本，提高工作效率。采用最优化技术求解问题步骤如下：分析生产需求，提出最优化问题；建立数学模型，确定决策变量，列出约束条件及目标函数；分析模型，根据模型类型选择合适的最优化方法；模型求解，由于优化问题一般计算量较大，一般采用计算机编制程序求解；最优解的检验和实施，验证结果的最优性以及在实际问题中的合理性，以此为依据对数学模型进行调整。

安全和高效是管道运行中两大主题，在天然气管道运行管理中，管道水力热力计算校核、压气站负荷分配、单条输气管道运行方案优化、复杂输气管网运行方案优化等问题可以采用最优化技术解决。

天然气管网动态优化就是根据实际工况使管道在能耗最低的情况下，安全可靠地完成天然气输送和供应。天然气管网动态优化技术发展趋势很好，但由于技术本身牵扯问题比较多、比较复杂，国内外正试图寻找最优模型、方法等解决实际问题。管网仿真技术、最优化技术、稳态优化及动态优化在天然气管输中越来越广泛，天然气管网优化运行的目的是为了寻求最优的理论，然后将其运用到现场实际中去，最终降低生产成本获得一定的经济效益。

目前，我国天然气管道业务进入了快速发展阶段，“横跨东西、纵贯南北、联通海外”的全国性供气格局已经形成。2016年天然气在我国一次能源消费占比仅为6%左右，未来还有巨大的发展空间。面对大规模天然气管网的运行与管理，我国的优化运行经验却几乎为零。虽然欧美发达国家天然气管网规模巨大且运行经验丰富，但由于其管网普遍由众多管道企业组成，单个企业的管理规模有限，而且国外管道企业普遍实行运销分离，业务相对单一，因此国外管网运行管理经验的借鉴价值有限。相比之下，国内天然气管网规模庞大，与上、中、下游各环节联系紧密，管输业务涉及面广，管理难度巨大。因此，管道运营企业普遍缺少必要手段，从业务、时间和空间等多个层面对天然气管网运行进行有效管理。

天然气管网的运输销售规划（简称运销规划）主要是对天然气的宏观流向、流量进行整体规划，以指导天然气管网的实际运营。运销规划的优化工作通过采用经济学模型计算管道输送边际成本和输量的关系曲线，将管道压力、温度等工艺条件简化为约束条件，优化天然气管网的资源和市场配置方式，提出中、远期分年和近期分月的资源配置方案、市场销售方案及系统平衡方案，达到优化管网运行，提高整体效益的目的。因此，运销规划优化在天然气管网的运营管理中起着重要的作用。

目前，我国天然气运销规划工作仍主要停留在人工计算阶段。随着管网供气资源不断开拓，管道和储气库等配套设施逐渐增多，下游用户不断发展，人工进行优化计算的难度越来越大，不仅工作量大，而且效率较低。国外已经开始采用信息化手段解决天然气运销问题，如，巴西国家石油公司利用自主开发的优化软件 OLGA（全动态多相流模拟计算软件）来指导制定售气计划；IHS ENERGY（IHS 能源咨询公司）在天然气战略研究层面开发了一种涉及产运销三方面的数学模型，并编制了相应软件。但是，这些国外软件均不适用于我国天然气管网规模大、复杂，以及不同季节调峰需求量大的实际情况。因此，有必要研究一套适合我国天然气管网的信息化软件来实现天然气运销规划，使规划工作更加准确和高效。

中国天然气管网优化研究始于20世纪80年代。从管道到管网系统，研究人员通过改进数学模型和求解方法取得了较好的结果。迄今为止，已有大量的学者对管网优化进行了深入研究，并开发了一系列优化软件。然而，进入 2014 年以来，中国经济结构调整对天然气销售影响凸显，“十三五”期间天然气资源供应会更加多元和宽松，市场竞争将会更加激烈。预计我国天然气管道在一定时间内将面临低输量、低效益的局面，因此，降本增效、优化运行已成为重点工作目标。

按照国家于2014 年2 月13日下发并正式施行的《油气管网设施公平开放监管办法（试行）》，核心要点是作为油气管网运营企业的“三桶油”，尤其是中石油，应按照要求无歧视对第三方开放使用其油气管网设施输送、储存、气化、液化和压缩等相关服务。实现“厂网分开”，油气管道网络从油气生产环节中独立是油气体制改革的重点内容。根据油气管道改革方案，油气管道网络将独立于生产环节运营，并接受国家能源局的成本监督，油气管道网络作为接受国家监管的、对社会开放容量、输送能力。独立的管网运营将更多地集中力量进行管网优化建设，这将使我国天然气管网优化研究得到更多的发展机遇和资本支持。

另外管网等设施的第三方准入还是相对比较核心的问题，主要是基于一个庞大的，公用的，向任何第三方开放的管网系统，卖方在管网里面按热值方式把气输入进去销售了，买方直接从管网里面接收，按照热值计算，不存在一个复杂的点对点的问题，管道独立化已经启动。中国天然气管道里程约为9万公里，而美国的这一数据则为中国的7 倍，差距巨大。2014 年6 月国务院印发的《能源发展战略行动计划（2014-2020 年）》提出，到2020 年，主干管道里程要达到12万公里以上。其中提到，改革油气管网运营机制，提升集约输送和公平服务能力；分步推进国有大型油气企业干线管道独立，实现管输和销售分开；完善油气管网公平接入机制，油气干线管道、省内和省际管网均向第三方市场主体公平开放。根据发展规划中提到的第三方管网准入趋势，这意味着将来我国的管道系统将在主要输送干线外接入更多第三方售气管道，管网系统将更为复杂，这也为管网优化工作高效安全、经济稳定的运行目标提出更高要求以及更大的挑战。例如，在包括美国，加拿大和巴西在内的几个国家，管道系统完全私有化，即它们是私人公司所有并因此独立运营。由于80年代开始放松管制，这些管道公司不再是运输天然气的主要所有者。他们只负责运输阶段，并专注于燃气系统的有效可操作性。

根据多项研究中反复出现的结果，在可预见的未来，天然气消费，生产，储量和依赖性将继续稳步增长。这种日益增长的期望可能意味着需要更复杂的优化方法，能够在国家和国际领域处理更大和更复杂的项目。

1.3天然气管网优化重要性

国民经济综合运输的关键一环就是管道运输，同时它也是判断我国运输业与能源业发达与否的重要特征。随着我国的发展，天然气管网会越来越发达，而在天然气管道运输过程中又伴随着各类损失如：管道摩擦损失、沿途控制元件损失、转弯损失、温度变化损失等，这些损失使天然气运输成本大大上升并且会使输送量有所下降。故需要可靠高效的优化算法对管网各类未知参数如管径、站间距、进出站压力、压比进行优选以使管网输气能力提高、使用寿命增长、内部损耗降低。

在天然气管网的优化当中有一个重要的前提就是安全问题，如何既保障了输气管道的输气量又保障了用户们的用气安全是优化管网的基础，整个管网想要最大限度发挥输送能力就必须使其安全性得到足够的保障。

天然气从生产地区到消费地区的高效和有效运输需要广泛而精细的运输系统。这种系统由复杂的网络组成，包括管道，压缩机站，调节器，阀门，城门等。在许多情况下，从特定井产生的天然气必须行进很长距离才能到达其使用点，这可能意味着更大和更具挑战性的管道系统。其次天然气管网的发展趋向于多气源、多用户、大网络化。传统的优化方法已经不适用了，所以我国企业拥有并应用天然气管网优化运行技术不但可以拥有高技术自主知识产权，而且还可以运用到我国管网系统中，保证其安全、平稳、高效、运行。如此一来将产生巨大的社会效益与经济效益。

首先天然气管网优化是一项系统的工程，各种优化问题是相互渗透相互制约的。如上文中所提到的管网系统参数优化中的造价是D管径、L长度与δ壁厚所决定的，但是这三个参数的值又与管段中的各种负荷有关，当负荷没有确定时其参数也就无法确定，则其造价也就无法确定。由此可以看出管网中的布局优化与参数优化是相关的。如果在优化过程中将各个问题分开考虑，分别求其最优值则很难达到全局最优。

其次天然气管网管网优化问题是一类非线性混合整数优化问题。管网系统的设计变量中存在着连续变量、离散变量以及整数变量。而如今大多数的优化方法则是连续变量非线性优化，倘若用这些方法来对天然气管网系统进行优化，则很难达到全局最优。且由于管网优化变量和约束过多，目标函数复杂，故用传统方法优化总会早熟收敛陷入局部最优。所以我们需要一些新型的智能的优化算法。

截至2017年底，中国陆上油气管网总里程已超过13.14×104km ，其中天然气管道里程超过7.26×104km。管网系统内气源用户众多、联络线分布广泛，已形成横贯东西，纵穿南北、覆盖全国、联通海外的大型天然气管网。随着管网规模增大及运行条件复杂程度提高，对管网集中调控提出了更高的要求，单凭调度员经验做出的判断难以全面应对管道运行问题，亟需高效的优化工具辅助制定运行方案及调整日常工况。

另一方面，天然气在输送过程中由压缩机提供动力，据统计，中国天然气管道天热气耗用量占输气量的 15‰以上，而欧洲的平均水平为 3‰左右，中国仍有较大的节能降耗潜力。随着天然气管道系统变得越来越大，越来越复杂，这些设施的最佳运行和规划的重要性也在增加。管道网络的投资成本和运营费用如此之大，即使系统利用率的微小改进也可能涉及大量资金。因此，在社会节能减排、 企业降本增效的大背景下，对天然气管网进行运行管理优化意义重大。

天然气管网优化现状

2.1优化算法简介

优化算法按时间的顺序分，可以分为现代算法与传统算法，每一种算法各有其特点，下面主要的介绍几类具有代表性的算法。

（1）线性逼近法：该方法用于解决线性规划问题即约束条件与目标函数全都是线性函数的优化问题。此算法理论已经十分成熟了。并且，其在单纯形法的提出之后应用领域更加的广泛，包括：物资调运，生产计划任务分派等问题。

而线性逼近法的实现步骤也很简单，其实际上就是从开始就一直进行不断的迭代，一直迭代到满足优化要求的精度为止

在求解非线性的问题时，其基本思想是先将非线性问题先转化为一个个线性问题，再对着一系列的线性问题进行求解。但其有着缺点，就是将非线性问题转化为线性问题，可能会使得求解出来的最优解超出原来的可行域。或者是偏离原来的问题的寻优方向，使解无法达到全局最优。

（2）动态规划法：于1951年由Bellman等提出，用于求解多阶段决策问题。该方法的原理是将一个完整的问题进行分解，分解为若干个子问题，再对这些子问题进行逐一求解，以达到整个决策问题的求解目的，使整个问题达到最佳运行效果。动态规划被用来解决多阶段决策问题，这一过程包括了五个组成部分：决策、状态、状态转移规律、目标函数以及报酬函数。

动态规划法是用来解决按时间划分的优化问题的，它的优点就是可以得到全局最优解，但其缺点就是当求解问题的维数增加时，问题的解决将会变得十分困难了。

（3）遗传算法：遗传算法是通过研究生物进化机制来提出的，其包括三个步骤：选择、交叉及变异。选择是进行交叉的前提条件，其决定着被选个体产生后代的数量，该步骤分两步进行，先对相关适应度进行计算而后进行父代个体的选择；交叉的主要方法主要包括二进制交叉和实值重组；变异实质上是子代的基因按照小的概率进行扰动所带来的结果

因为遗传算法用了群体搜索的策略以及个体间信息交换，所以遗传算法可以解决传统的算法所无法解决的困难问题。但同时，由于其计算步骤复杂所以计算速度远远慢于动态规划法，而且其耗费了大量时间计算后的结果并不准确通常只是一个近似值。故计算简单的优化问题时很少用到遗传算法，对复杂的问题进行优化时才会用到遗传算法。

（4）模拟退火法：模拟退火法是一种通用的概率演算法，常被用来解决复杂组合问题，它是受到金属退火过程的启发所提出来的。对金属进行加热变成液体，分子做随机运动之后，原来停留在使得内能有局部最小值位置的原子离开原来的位置，随机移动，最终会有极大可能找到比原来能量更低的位置。现如今，模拟退火法已经成为了一种通用的优化算法。,目前其已经应用于许多的工程实际中，如控制工程、生产调度、VLSI、机器学习等领域。

模拟退火法主要分为五个步骤：1）使初始状态随机化，并且设置合理的初温、参数以及退火规律等；2）对个体位置进行随机扰动；3）判断位置更新之后的总内能是否小于原来的内能；4）重复步骤2与步骤3一直到系统状态稳定为止；5）对系统降温，再重复步骤2到步骤4，直到温度达到一定时为止。

（5）群体智能算法：群体智能算法是一类针对模拟自然界生物群体智能行为的算法，其创立于20世纪60年代的仿生学。其中包括有蚁群算法，人工鱼群算法，混合蛙跳算法以及粒子群算法等。

其中粒子群算法是群体智能算法中最先进的算法，它是受到了鸟群的群体活动的启发而提出的。在1987年时，Reynolds等人根据鸟类群体飞行的特点，提出了Bold模型。该模型主要用于模拟鸟群聚集飞行的行为，并且Reynolds等人还用了三个规则作为鸟群中个体的简单行为规则：避免碰撞、速度一致、向中心聚集。之后Kennedy与Eberhart等人又借助了鸟群行为规则和优化问题的求解之前存在的相似性，从而提出了粒子群算法。该算法求解非线性规划问题时搜索的范围宽、适应能力很强、求出的全局最优解也比较可靠，对问题的限制较少，而且计算的速度远优于前文提到的几种算法，。故本文选用粒子群算法进行管网的优化研究。

2.2天然气管网优化研究现状

随着管道互相联通，中国天然气管网实现网络化运行管理。从能耗角度来说，管网系统层级的优化空间要远远大于单条管线的优化空间，运行方案编制也更应着眼于管网系统层面。由于管网系统中存在环状结构，一方面产生了新的环内流量分配问题，增加了决策变量的维度及约束条件的个数；另一方面难以构造出按压气站顺序进行的多阶段决策问题，动态规划法将不能直接应用。因此输气管网最优运行方案的求解相比于单条管道来说增加了难度。

近年来，研究人员尝试采用多种方法求解输气管网运行方案优化问题，如 Carter 等提出了基于DP算法的非序列动态规划法（Non-sequential Dynamic Programming，NDP），通过对管网拓扑结构进行预处理，提前给定管网中各条管道的输量，NDP 算法可以对管网中的节点压力进行优化；Flores 等提出广义简约梯度法（Generalized Reduced Gradient，GRG）优化管网中的节点压力和环内流量分配；Möller对优化问题中的非线性约束进行了区域线性化处理，将原问题近似为混合整数线性规划问题； Cobos-Zaleta[19]采用外逼近法、等式约束松弛和增广罚函数法（Outer Approximation with Equality Relaxation and Augmented Penalty，OA/ER/AP）直接求解原混合整数非线性规划问题。

根据气流如何随时间变化，我们区分稳态和瞬态的系统。当表征系统中的气体流量的值与时间无关时，系统被称为处于稳定状态。在这种情况下，系统约束，特别是描述通过管道的气流的系统约束，可以使用代数非线性方程来描述。相反，瞬态分析需要使用偏微分方程（PDE）来描述这种关系。这使得从优化角度来解决问题变得更加困难。事实上，瞬态模型的优化是最具挑战性的研究领域之一。在瞬态优化的情况下，系统的变量（例如压力和流量）是时间的函数。

稳态模型

基于动态规划的方法

解决MFCP最成功的技术之一是动态规划（DP）。 DP的主要优点之一是可以保证找到全局最优，并且可以轻松处理非线性。直到最近，它的应用实际上仅限于非循环网络，例如线性（也称为枪管）或树状拓扑。众所周知，在DP计算中，时间随着状态变量向量的维数呈指数增长，通常称为维数的诅咒。

用于管道优化的DP最初应用于20世纪60年代后期的枪管系统。由于其计算行为和处理顺序系统非线性的多功能性，它一直是最有用的技术之一。 DP于1968年首次应用于线性系统，由Wong和Larson应用于线性系统，然后应用于Wong和Larson的树状结构拓扑。Lall和Percell在1990年描述了一种类似的方法，他们允许在他们的系统中有一个不同的分支。

1989年，Luongo等人发布了一种分层方法，允许任意复杂性的周期和分支。这代表了在最终解决现实世界管道配置问题方面取得的重大进展。他们的技术不再是纯粹的DP。基本上，DP用于最佳地描述以顺序方式排列的管道部分。这通常将系统简化为更小的组合问题，而没有任何递归DP解决方案的可能性。一个足够小的实例可以通过枚举精确解决；否则使用模拟退火不完全解决。这种分层方法对于某些复杂的流水线非常有效，但对于其他流水线，计算成本非常高。

基于梯度搜索的方法

1987年，Percell和Ryan应用了一种基于广义简化梯度（GRG）非线性优化技术的非循环结构的不同方法。 与DP相比，GRG的一个优点是它们可以相对较好地处理维度问题，因此可以应用于循环结构。 然而，作为基于梯度搜索的方法，不能保证全局最优解。 Villalobos-Morales和Ríos-Mercado评估了GRG的预处理技术，例如缩放，变量边界和起始溶液的选择，从而为循环和非循环结构提供了更好的结果。 Flores-Villarreal和Ríos-Mercado对循环结构上的大量实例进行了GRG方法的广泛计算评估，并取得了相对成功。

几何编程方法

最近，Misra等人提出了一种基于几何规划（GP）的MFCP新方法。 他们证明了对于非循环系统，GP方法将MFCP转化为凸优化问题，从而允许精确有效（多项式时间）解决方案。 与传统的动态规划方法相比，GP方法的显着优点源于不必将节点压力和压缩比变量离散化。 即使在具有高度分支的网络中，GP方法也可以很好地扩展。 他们在比利时的天然气网络和美国的Transco管道网络上测试了他们的方法，表明他们提出的几何编程算法在非循环系统中始终优于DP。

线性化方法

De Wolf和Smeers对问题采取了不同的观点。他们提出了一种基于非线性流压关系的分段线性近似的求解方法。近似问题通过Simplex方法的扩展来解决。解决方法在比利时天然气网络的一个实例中得到了说明，并解决了一些现实案例。他们将他们的方法与其他基于LP的方法进行了比较，称为连续线性规划（SLP）。他们发现他们提出的方法比SLP花费的时间更少。他们还发现，由于该模型通常是非凸的，因此如果限制自己只在本地解决方案或全局程序中的解决方案的上限，则选择起点至关重要。因此，他们设计了一种机制来生成初始解决方案，该解决方案凭经验证明可以将运行时间缩短50％。

Jin和Wojtanowicz提出了一项旨在优化中国大型案例研究的研究。网络的大尺寸和复杂几何形状需要将其分解为更小的组件，优化组件的本地操作，将优化的组件重新组合到网络中并在全球范围内优化网络。这个四步法采用四种不同的优化方法来解决问题：惩罚函数方法，模式搜索，枚举和非顺序动态编程。应用全局优化的结果表明，气体吞吐量的增加大大降低了成本。例如，当将燃气率从67％提高到9000万m3/d时，观察到运营成本节省从23％降低到1.2％。该研究还表明，当压缩机站以最大容量工作时，运行成本接近当前实践中的运行成本。因此，当天然气管道系统以不同于其最大额定值的任何质量流量工作时，全局优化被证明更有效，这是中国天然气网络中当前操作的典型情况。

MINLP模型的方法

Pratt和Wilson提出了一种连续的混合整数线性规划方法。 他们的算法通过线性化压降流量Eq来迭代地解决非线性优化问题，整数变量包含在压缩机单元选择的公式中，并且使用分支和边界来解决问题。

Cobos-Zaleta和Ríos-Mercado提出了一种解决方法，该方法基于具有相等松弛的外近似和用于求解混合整数非线性规划模型的增广惩罚算法OA/ER/AP，其中整数决策变量代表数字包含在每个站内运行的压缩机单元。 它们呈现出令人满意的结果，因为它们能够在许多实例中找到局部最优值。

马丁等人结合二元决策变量来决定是否使用压缩机站内的压缩机单元以及是否打开或关闭阀门。他们描述了一些用于模型非线性的分段线性逼近的技术，从而产生了大的混合整数线性程序。他们研究了连接这些分段线性近似的子多面体，并表明顶点的数量在计算上易于处理，产生精确的分离算法。它们还提供了适合分离算法的分支策略。他们在他们的工业合作伙伴E.ON Ruhrgas AG（一家德国天然气公司）提供的三个真实案例中测试了他们的方法。实例的大小范围从11到31个管道和3到15个压缩机站。他们观察到分段线性逼近足够精确以保证全局最优解。

Chebouba等提出了一种用于MFCP的蚁群优化算法（ACO），其具有压缩机站内可变数量的压缩机单元。决策过程的一部分涉及确定每个压缩机中的操作单元的数量。 ACO算法是一种相对较新的进化优化方法，用于解决不同的组合优化问题。他们在Argelia的Hassi R'mell-Arzew真实世界管道网络上测试了他们的方法，包括5个管道，6个节点，5个压缩机站和每个压缩机中的3个单元。他们还建造了三个额外的箱子，最多23个压缩机站，每个压缩机有12个压缩机组。他们将他们的方法与DP实现进行比较。他们的实证研究表明，该方法在非循环系统中具有良好的性能。

Tabkhi等提出了MFCP的计算研究，应用于法国公司Gaz de France的案例研究。作者提出了MINLP模型，其中引入了用于表示管道流动方向的二元变量。他们使用GAMS/SBB求解器求解MINLP模型，该模型调用CONOPT来解决NLP子问题。现实世界的案例有30个管道和6个压缩机站。为了使问题更容易解决问题，作者考虑了几种不同的策略来初始化一些或所有二元变量。他们还报告了敏感性分析，讨论了初始化二元变量的特定策略之一。

Wuet al提出了一种具有压缩机切换约束的混合目标模型，其旨在最大化收益和吞吐量，同时考虑加权值以解决两个优化问题。该模型通过粒子群优化（PSO）算法求解，该算法包括自适应惯性权重调整程序以克服早熟收敛问题。使用市售的模拟软件来提供满足基础模型的初始粒子。作者提出了一个基于中国天然气管道系统的案例研究，该系统具有枪管拓扑结构和四个压缩机站。与PSO算法的其他扩展相比，该算法显示出快速的收敛速度。

瞬态模型

瞬态模型更具挑战性，因为必须考虑与气体系统动力学相关的控制偏微分方程。从描述性的角度来看肯定有一些研究。 在这里，我们调查与瞬态系统优化相关的最重要的工作。

分层控制方法

优化技术也已应用于瞬态（时间相关）模型。例如，Larson和Wismer 提出了一种用于枪管管道系统的瞬态操作的分级控制（HC）方法。 Osiadacz和Bell提出了一种简化的瞬态气体输送网络优化算法，该算法基于HC方法。瞬态模型的HC方法可以在Anglard和David，Osiadacz以及Osiadacz和Swierczewski中找到。就优化压缩机站子问题而言，已经从这些方法报告了一定程度的成功。然而，这些方法在全局优化最低成本方面具有局限性。

从HC的角度来看，解决天然气管道系统中瞬态流动的最重要的早期努力之一是由于Osiadacz 开发了一种基于分层控制和网络分解的算法。使用梯度搜索技术解决了局部问题。使用目标协调方法协调子系统以找到全局最优。他为输出压力作为控制矢量的元素处理的情况制定了离散状态方程。该算法使用英国国家电网的一部分进行测试，该网格包含23个节点，13个管道，3个压缩站，2个存储供电节点和1个源。建立24小时的时间框架，时间离散化步长为2小时。结果有点类似于基于Furey的基于序列二次规划的替代算法所获得的结果。发现的最大差异大约为15％。作者指出，超过24小时的动态实例无法在合理的时间内完全解决。作者总结说，他们提出的基于分解协调的方法适用于并行计算。

数学编程方法

关于天然气管道系统瞬态优化的早期工作归功于Mantri等人他们开发了一种瞬态气体优化模型，可以最大限度地降低天然气运输成本，在这段时间内，由于供需指定的波动，线路包装和吞吐量正在发生变化。其优化引擎的主要组成部分基于GRG方法和动态编程。 Tao和Ti推导出一种在天然气管网中进行瞬态分析的方法。传统上，用于气体管道系统的瞬态分析的控制方程涉及两个偏微分方程，其通常通过复数数值方法求解。作者通过结合电阻和电容来扩展电子模拟方法，这导致了一阶常微分方程和解决瞬态问题的另一种方法。发现所提出的方法比以前的方法更有效。后来Ke和Ti 使用与电气系统相同的类比来开发新模型。经验证据表明，在这种新模型下获得的解决方案与使用以前模型的解决方案兼容。这个新模型更容易处理。Osiadacz和Chaczykowski对天然气管道系统中瞬态流动的等温和非等温模型进行了比较。

Ehrhardt和Steinbach解决了瞬态流水线优化问题。它们提供适当的空间和时间离散化以获得大规模非线性规划问题（NLP）。这个大规模的NLP通过通用NLP代码SNOPT与自动微分附加SnadiOpt相结合来解决。他们在相对较小的网络上测试他们的方法，其中三个压缩站考虑了不同的情况

Aalto 提出了一项关于瞬态条件下天然气管道实时优化的研究。他指出，即使在压缩机站（CS）关闭或启动等大型瞬变中，许多管道系统也只是轻度非线性。定义了一个动态的后退水平优化问题，其中管道的自由响应预测是从管道模拟器获得的，并且获得决策变量的最优值，解决了近似二次规划（QP）问题，其中成本函数是能量消费CS。使用离散决策变量，CS的关闭/启动命令扩展了该问题。定义了混合逻辑动态（MLD）系统，但得到的混合整数QP问题显示为非常高维。相反，定义了一系列QP问题，导致尺寸相当小的优化问题。在模拟环境中测试后退水平优化，并与来自真实天然气管道的数据进行比较，显示压缩机能耗节省5-8％。

Mahlke等提出了瞬态天然气网络优化问题的模拟退火元启发式算法。对于这个瞬态问题，它们呈现出高度复杂的混合整数非线性程序。他们通过将这些约束与适当的惩罚因子结合到目标函数中来放松描述管道中气体动力学的方程式。针对松弛问题开发了合适的邻域结构，其中时间步长以及气体的压力和流动是分离的。他们在德国天然气公司E.ON Ruhrgas AG提供的三个真实案例中测试了他们的方法。尺寸范围从11到31个管道和3到15个压缩机站。他们在极具竞争力的运行时间内获得了相当不错的结果。

2.3天然气管网优化研究主要方向

由于复杂输气管网运行优化问题的规模庞大、模型结构复杂，通用的管网优化引擎必须兼顾计算效率 及结果最优性等各方面问题，关键是针对优化问题的特点选择合适的简化方法和优化算法。

燃料成本最小优化MFCP

在气体传输网络中，系统的总体运行成本高度依赖于网络中压缩机站的运行成本。然而，压缩机站的运行成本通常通过压缩机站处消耗的燃料来测量。根据Luongo等人的说法，运行压缩机站的运营成本占公司总运营预算的25％至50％。因此，传输网络的目的是最小化压缩机站的总燃料消耗，同时满足输送终端处的指定输送流速和最小压力要求。

输量分配优化

我国天然气管网路径复杂，分布差异大，并且在未来的发展规划中还将有大量天然气管网投入运营。由于用气存在峰谷差，主要干线输气量对于输送效率至关重要，所以必须对主要的天然气管道干线的输气量根据用气量的实际情况及数据预测作出合理优化分配以提高输送效率，例如中亚天然气管道等大型主线天然气管道的输气量分配优化。

储存节点优化

如果不立即运输天然气，可以在需要时将其放入储存设施。目前，天然气的储存设施主要是地下储气库。地下储气库,就是将天然气重新注入地下可以保存气体的空间而形成的天然气气藏，是集季节调峰、事故应急供气、国家能源战略储备等功能于一身的能源基础性设施。2017 年我国地下储气库有效工作气量接近100亿m3，约占我国天然气消费量4%，远低于世界平均水平10%，距离2020 年、2025年和2030 年的目标缺口分别超过48 亿m3，200 亿m3，250 亿m3。2017 年底的“气荒”引起天然气价格的剧烈波动，充分暴露了国内天然气存储、调峰能力的严重不足的短板，国家层面已经意识到此方面的问题，2018 年来快节奏发布多项政策来刺激天然气储气工程的建设。

随着天然气产业链建设的不断完善，天然气储存节点将在天然气运销和调峰中占据重要角色，同时也将成为天然气管网中的重要一环，在天然气管网优化问题中必须将其纳入考虑范围。天然气储存节点，如地下储气库，一般都配备一定数量维持压力的压缩机，保持天然气干燥的脱水设施等大型工业设备，在日常的运行中将耗费大量能源。根据储气压力、湿度和储气量等条件不同，运行工况不同，所以可以将储气节点纳入管网优化系统中进行最佳储气量与最低能量消耗运行优化，进而节约储气环节的成本。

管存控制

管存是指管道中储存的气体量，是反映管道运行时的气体流速、管道压力、运行站场配置及运行效率的综合指标，亦是控制管道进出气体平衡的一个重要指标。管存变化对天然气管道安全性及能耗影响主要表现为：①在管存超高的情况下，由于管道平均压力较高导致系统运行风险增加；然而相对较高的管道压力可使管道内气体流速降低，进而全线的沿程磨阻降低，可节省能耗。②管存超低的情况下，各压气站入口压力较低，管道末端的压力亦较低，无法满足交气的合同压力；同时较低的管存导致管道平均压力较低，管道内气体流速较高，进而沿程磨阻较高，造成能耗增加。

管存控制是指管存的量和管存位置的控制，为确定合理的天然气管道管存控制范围，中亚天然气管道以全线各压气站和计量站为节点将管段分为若干段，根据站场压力控制值实现每段最优管存量的控制，进而实现全线最优管存量和管存位置的控制。管存量与季节、输气量等有关，全线的管存应如何分布能最大限度的保证运行平稳及能耗优化，则需要制定详细、合理的管存控制原则。

压力控制

压力控制是指利用压缩机组负荷分配系统实现站场压力控制，进而实现管存量和管存位置的控制。每日优化运行小组通过模拟仿真，计算出在当日工况下各站最优压力控制值，并通过调度令下达各合资公司 执行。中亚管道从投产至今，各站使用压缩机组转速控制，而转速控制无法实现全管道系统在稳态运行下的各节点控制，也就无法保证管道处于长期稳定及能耗最优状态，同时管道不稳定工况也会一定程度的造成设备金属疲劳，降低设备寿命。对国际先进的管道公司进行调研发现，已经采取压力控制的调控方式。

粒子群优化算法

3.1粒子群优化算法原理

粒子群算法是Kennedy和Eberhart等人根据鸟群的行为与优化问题之间求解的相似性提出的，在此处称为基本粒子群算法，以便于与后来提出的各算法进行区别。

粒子群算法计算初始时每个粒子都在n维空间中以一定的速度飞行搜索，X\_i=(x\_i1,x\_i2,…x\_in)是粒子i的当前位置，V\_i=(v\_i1,v\_i2,…v\_in)是粒子i的当前飞行速度。〖Pbest〗\_i=(〖Pbest〗\_i1,〖Pbest〗\_i2,…〖Pbest〗\_in)是粒子i所经历的最优位置。

将f(X)设为最小化的目标函数，则粒子i当前位置可表示如下：

pbest\_i (t+1)={█(pbest\_i (t)，若f(X\_i (t+1))≥f(〖pbest〗\_i (t))@X\_i (t+1)，若f(X\_i (t+1))<f(〖pbest〗\_i (t)))┤ （3-3）

假设群体中粒子的总数为N，所有粒子经历过的位置中最好的位置为gbest(t)，则：

gbest(t)=min⁡{f(pbest\_1 (t))，f(pbest\_2 (t))，…，f(pbest\_N (t)) （3-4）

粒子飞行位置和速度可根据个体和群体的飞行经验进行动态更新，其速度与位置更新方程可以表示如下：

v\_ij (t+1)=v\_ij (t)+c\_1 r\_1 (〖pbest〗\_ij (t)-x\_ij (t))+c\_2 r\_2 (〖gbest〗\_j (t)-x\_ij (t)) （3-5）

x\_ij (t+1)=x\_ij (t)+v\_ij (t+1) （3-6）

由上文可见有三部分组成了其速度更新公式（3-5），粒子初始的速度是其第一部分；粒子的认知部分是其第二部分，从这一部分可以看出粒子自身的经验思考使得粒子个体有了认知能力，c\_1是加速因子，它是用来调节粒子飞向自身最优位置步长的参数；粒子的社会部分是其第三部分，从这一部分可以看出粒子之间可以信息共享和相互作用，而c\_2也是加速因子，可以利用它来调节粒子飞向全局最优位置的步长。

在粒子群算法中，全局最优可以看做一个全局吸引点，各个粒子都会向着这个吸引点靠拢；同时，粒子的个体最优可以维持粒子在多个区域搜索，一定程度上克服了早熟收敛而达到局部最优。

1） 基本粒子群算法的计算流程

步骤一：将粒子群个体的速度与位置进行随机初始化，将每个粒子的初始位置设为个体最优位置pbest，将粒子群的最优位置gbest设置为粒子的全局最优位值；

步骤二：根据公式调整当前粒子的位置和速度；

步骤三：将个体更新后的位置与之前最优位置作比较，若相较来说更优则将个体的最优位置更新，否则，维持原值；

步骤四：将群体最优值与每个粒子的个体最优值进行比较，若个体最优值较优则用其替代原先的群体最优值，否则保持不变；

步骤五：检查算法是否达到了终止条件，若已经达到，则终止迭代，否则返回步骤二继续进行计算。

2）基本粒子群算法的参数设置

基本粒子群算法参数包括种群规模N，粒子最大速度V\_max加速因子c\_1和c\_2以及最大迭代次数T

种群规模：即种群中所有粒子的总数，种群规模越大则全局搜索能力越强，但同时其收敛速度也就越慢；

粒子最大速度：为了防止粒子搜索过程中超出约束空间范围，所以要对其最大速度进行限制，使粒子更新速度在[-V\_max，V\_max]之间，若粒子的速度超过限制范围则令其等于边界值。

加速因子：其代表每个粒子朝向局部最优值和全局最优值方向运动的加速权重，一般使

c\_1和c\_2相等，取值范围在[0，4]之内。

最大迭代次数：可将算法最大迭代次数作为其终止条件，取值视具体问题而定。

3）算法终止条件

粒子群算法终止条件一般可以设为满足一定的误差准则、达到最大迭代次数等。若终止条件为满足一定的误差准则则需要提前知道所求问题的最优值以及误差允许范围，当粒子群算法所求结果误差在允许范围之内时，可以认为算法已经收敛并且达到了全局最优值，此时使算法终止，否则就继续之前的计算步骤直到达到全局最优值为止。若终止条件选为达到最大迭代次数，则不论最终是否达到了全局最优值，只要达到最大迭代次数就使算法终止。

3.2粒子群优化算法优势

近年来随着国民们对天然气的需求，天然气管道的铺设也越来越多，天然气管网也越来越复杂。这就需要一种求解速度快，结果准确的新算法。而新型智能算法中粒子群算法脱颖而出，其在非线性非线性规划问题的求解上展现出了特有优势，它的搜索范围宽，对问题的限制少，找到最优解的可能性大，并且所得结果准确。

粒子群算法是一种基于计算机科学和群体智能的方法，在大多数的情况下，所有的粒子可能更快的收敛于最优解，适合于求解复杂的大规模的问题，因此粒子群算法为天然气管网优化提供了一种新的求解方法。

粒子群算法在求解多约束多目 标问题方面具有良好的求解性能和鲁棒性，为提高粒子群算法的求解性能，很多学者提出了改进方法，其中Clerc等设置压缩因子用来改进学习因子对算法的影响，Lovbjerg等将遗传算法的群体概念运用到粒子群算法，并提出子种群概念，Frans等提出协同粒子群优化算法，刘卓倩等提出三群协同粒子群算法，Liu等提出混沌粒子群算法。

运用实例

对粒子群算法进行变异改进后应用于管网算例。

综合能源服务发展背景

综合能源服务的基本内涵

基本概念

综合能源服务是一种新型的为满足终端客户多元化能源生产与消费的能源服务方式，涵盖能源规划设计、工程投资建设、多能源运营服务以及投融资服务等方面。具体而言，即在传统综合供能（电、气、热（冷）、水）基础上，整合可再生能源、氢能、储能设施及电气化交通等，通过天然气冷热电联供、分布式能源和能源智能微网等方式，结合大数据、云计算、物联网等技术，实现多能协同供应和能源综合梯级利用，从而提高能源系统效率，改善终端用户能源服务质量，降低用能成本的一种新型能源服务模式。

基本特征

综合能源服务本质上是由绿色发展、新能源技术与电子信息技术革命引发的能源产业结构重塑，从而推动的新兴业态、商业模式、服务方式不断创新，其具有综合、互联、共享、高效、友好的特点。

（1）综合是指能源供给品种、服务方式、定制解决方案等的综合化；

（2）互联是指同类能源互联、不同能源互联以及信息互联；

（3）共享是指通过互联网平台实现能源流、信息流、价值流的交换与互动；

（4）高效是指通过系统优化配置实现能源高效利用；

（5）友好是指不同供能方式之间、能源供应与用户之间友好互动。

我国的综合能源服务将依托以电力为中心的能源互联网展开，是泛在电力物联网的重要实施载体。

服务模式

综合能源服务意味着能源行业从产业链纵向延伸走向横向互联，从以产品为中心的服务模式转向以客户为中心的服务模式，这也是能源行业供给端结构性改革的本质要求。

从产业链角度可将综合能源服务大致分为四类：

（1）供给端延伸型的综合能源服务；

（2）网络传输端升级型的综合能源服务；

（3）用户端衍生型的综合能源服务；

（4）技术、装备渗透型的综合能源服务。

与传统能源服务模式的区别

传统能源服务，多是从产业链上游向下游纵向延伸的合纵模式，而综合能源服务则是围绕客户需求提供一站式服务的连横模式。新模式相对于传统模式的变化主要体现为以下两个方面：

（1）从以产品为中心的服务模式，变为以客户为中心的服务模式；

（2）从基于事物的弱互动服务模式，变为基于关系的强互动服务模式。

发展综合能源服务的重要意义

随着我国经济社会持续发展，能源生产和消费模式正在发生重大转变，能源产业肩负着提高能源效率、保障能源安全、促进新能源消纳和推动环境保护等新使命。构建综合能源服务系统的需求十分迫切。其重要意义如下：

（1）有助于打破能源子系统间的壁垒；

（2）有助于解决我国能源发展面临的挑战和难题；

（3）有助于推动我国能源战略转型。

技术层面——技术驱动

能源技术的革新为综合能源服务搭建了技术准备平台。机器学习、大数据科学、云平台与计算、分布式能源微网、多能互补系统等新技术概念与技术创新使构建以综合能源为基础，实现智慧应用的新型能源消费市场成为可能。

经济层面——万亿级市场

4月9日召开的“三型两网、世界一流”战略下的综合能源服务研讨会表示，保守估计，2020~2025年，我国综合能源服务产业进入快速成长期，市场潜力将0.5~0.6万亿元增长到0.8~1.2万亿元；2035年步入成熟期，市场潜力在1.3~1.8万亿元。

政策层面——“十四五”重头戏

为提高环境质量，促进可再生能源消纳，提高能源系统综合效率，国家密集出台了一系列相关支持政策，仅2017年综合能源服务中所有涉及的相关要素基本都已出台了最新政策，做好了政策支持框架布局，包括23个多能互补示范项目、55个能源互联网示范项目、28个新能源微网示范项目、136个生物质热电联产项目、超195个增量配电网试点项目、燃煤耦合生物质发电试点，以及微电网、并网型微电网、电力需求侧管理、储能技术、分布式发电市场化交易等辅助政策，为综合能源服务新业态的发展奠定了良好的政策基础。

在综合能源服务市场刚刚起步的情况下，国家只会加大政策扶持力度，帮助行业健康成长。

社会层面——施利于民

综合能源服务涉及能源的供给端、输配端和用户端的重大变革，旨在创新能源体系，提高能源效率，降低环境污染，降低能源成本，不仅为社会提供更高性价比的能源服务，还可为社会创造大量的就业岗位，对改善民生，建设生态文明社会大有脾益。

小结

国内外行业发展现状及趋势

国外发展现状及趋势

综合能源服务最早兴起于国外，经过多年的发展，目前在欧、美、日已成为能源电力企业的主流商业模式，也形成了较为完善的产业链。其产业模式是基于能源互联网+大数据+云计算平台，与用户进行友好互动，为用户提供以多种能源为支撑的，个性化、差异化、定制式的用能服务。

欧洲

欧洲是最早提出综合能源系统概念并最早付诸实施的地区，其投入大，发展也最为迅速。早在欧盟第五框架（FP5）中，尽管综合能源系统概念尚未被完整提出，但有关能源协同优化的研究被放在显著位置，在后续第六（FP6）和第七（FP7）框架中，能源协同优化和综合能源系统的相关研究被进一步深化，Microgridsand More Microgrids（FP6）、Trans-European Networks（FP7）、IntelligentEnergy（FP7）等一大批具有国际影响的重要项目相继实施。

根据Utilities UK集团的市场调研，欧洲已经涌现出上千家能源服务公司。对于欧洲很多国家而言，其能源系统间的耦合和互动急剧增强，德国和英国就是典型案例。

德国

德国于2008年在智能电网的基础上选择了6 个试点地区进行为期4 年的E 能源（E-Energy）技术创新促进计划，主要是以信息通信技术为基础，打造新型能源网络，开展了大规模清洁能源消纳、节能、双向互动等方面的示范工作。如哈茨可再生能源示范区项目（regenerative model region Harz，RegMode Harz），对分散风力、太阳能、生物质等可再生能源发电设备和抽水蓄能水电站进行协调，从而使得可再生能源联合循环利用率达到最优。

通过智能区域用能管理系统、智能家居、储能设备、售电网络平台等多种形式开展试点，E-Energy最大负荷和用电量均减少了10%~20%。此外，在E-Energy项目实施以后，德国政府还推进了IRENE、Peer Energy Cloud、ZESMIT和Future Energy Grid等项目。

英国

英国政府和企业长期以来一直致力于建立一个安全和可持续发展的能源系统。除了国家层面的集成电力燃气系统，社区层面的分布式综合能源系统的研究和应用在英国也得到了巨大的支持。例如英国的能源与气候变化部DECC和英国的创新代理机构Innovate UK（以前称为TSB）与企业合作资助了大量区域综合能源系统的研究和应用。2015年4月创新英国在伯明翰成立“能源系统弹射器”（Energy Systems Catapult），每年投入3千万英镑，用于支持英国的企业重点研究和开发综合能源系统。

美国

美国各类能源系统间有着较好协调配合，使得其综合能源供应商得到了较好发展，如美国太平洋煤气电力公司、爱迪生电力公司等均属于典型的综合能源供应商。

在技术上， 美国非常注重与综合能源相关理论技术的研发。美国能源部在2001年即提出了综合能源系统（Integrated Energy System，IES）发展计划，目标是提高清洁能源供应与利用比重，进一步提高社会供能系统的可靠性和经济性。2007年美国明确要求社会主要供用能环节必须开展综合能源规划（Integrated Resource Planning，IRP），并在2007~2012财年追加6.5亿美元专项经费支持IRP的研究和实施。

日本

日本的能源严重依赖进口，因此日本成为最早开展综合能源系统研究的亚洲国家。2009年9月，日本政府公布了其2020、2030和2050年温室气体的减排目标，并认为构建覆盖全国的综合能源系统，实现能源结构优化和能效提升，同时促进可再生能源规模化开发，是实现这一目标的必由之路。在日本政府的大力推动下，日本主要的能源研究机构都开展了此类研究，并形成了不同的研究方案，如由NEDO于2010年4月发起成立的JSCA（Japan Smart CommunityAlliance），主要致力于智能社区技术的研究与示范。

小结

国内发展现状及趋势

国内综合能源服务尚处于起步阶段。目前，开展能源服务的企业类型包括售电公司、服务公司和技术公司等。传统能源产业，包括：电网企业、电力企业、油气企业、设备商、ESCO（节能服务公司）、系统集成商以及专业设计院等，都在策划综合能源服务转型。国内典型的综合能源服务供应商，有南方电网旗下的南方电网综合能源有限公司、广东电网综合能源投资有限公司，以及新奥泛能网、协鑫分布式微能源网、远景能源、阿里云新能源等。

两大电网公司

新一轮的电力体制改革放开了配售电业务、公益性和调节性以外的发用电计划以及输配以外的竞争性环节电价，重塑了电力市场竞争格局，动摇了电网原有市场垄断地位，倒逼电网公司进行改革。

国家电网公司（国网）

国家电网公司已开展的综合能源服务包括节能和电能替代改造、电力需求响应、智慧车联网、风光储一体化、电动汽车充电桩服务、能效监测与诊断等。公司重点打造的苏州同里综合能源服务中心已开始示范运营。

中国南方电网有限责任公司（南网）

南网旗下南方电网综合能源有限公司于2010年12月成立，公司致力于成为国内领先、国际知名的现代能源综合服务商，目前主营“节能服务、能源综合利用、新能源和可再生能源开发、分布式能源、电动车充换电”等业务。2017年 2月，南网成立广东电网综合能源投资有限公司，增加了综合能源、增量配网建设与投资、分布式能源、电动汽车投资与运营、市场化售电、能效服务等六个新兴业务经营模块。

五大发电集团

中国华能集团公司（华能）

华能已从初期的单一燃煤发电模式发展为燃煤、燃气、可再生能源的多元化发电模式，并积极探索新型能源服务模式。华能整合在渝发电企业资源，于2016年8月全资成立华能重庆能源销售有限责任公司，在全市范围多个工业园区开展能源销售及增值服务、配网建设、分布式能源等业务，为用户提供了安全可靠和极具价格优势的电、热、水、冷等综合能源服务。

中国大唐集团公司（大唐）

大唐集团的目标是通过2~3年时间构建适应市场、统一协调、机制灵活、决策高效、体系完整的营销体系，建立“总部宏观指导、省级公司经营决策，基层发售电公司组织实施”的营销管理管控体制。目前大唐集团已经成立了17家区域性的营销公司和三家区域的售电公司，开始向综合能源服务企业挺进。

中国华电集团公司（华电）

华电以供给侧结构性改革为主线，推动公司由生产型向生产服务型转变，并于近日正式发布《中国华电集团有限公司综合能源服务业务行动计划》。这是国内同类型企业首次发布综合能源服务类行动计划，标志着中国华电迈出打造“清洁友好、多能联供、智慧高效”综合能源服务业务的实质性步伐。

国家能源投资集团有限责任公司（国能投）

国家能源投资集团有限责任公司由国电与神华合并重组而成，继承两者特点，形成强强联合、优势互补的煤电联营模式。国能投推动实施区域综合能源一体化方案，实现横向“电热冷气水”能源多品种之间，纵向“源-网-荷-储-用”能源多供应环节之间的生产协同、管廊协同、需求协同以及生产和消费间的互动。

中国电力投资集团公司（国电投）

国家电投正在大力推动综合智慧能源这方面的发展，提出“综合智慧能源服务”模���：提供能源一体化解决方案，针对新建楼宇、园区的电、水、气、热、冷等不同的管道，将不同能源进行有机的合成，使其协同发展。

四小豪门

华润电力控股有限公司（华润电力）

综合能源服务是华润集团的新兴战略业务，主要包括：电力销售、配网建设与运营、分布式能源，以及能源互联网引领下的新兴业务。早在2017年，华润电力首个综合能源示范项目福耀智慧能源项目首批18MWp分布式光伏项目便已并网发电。

国投电力控股股份有限公司（国投电力）

国投电力近年来大力发展新能源业务，紧跟光热发电、智能微网、固废发电、储能等前瞻性能源行业的新业务、新业态、新模式，着力打造“水火并举，风光互补”的大型综合能源公司。

国家能源集团国华电力公司（国华电力）

国华电力着力推动由传统能源提供者向综合清洁能源生产专家、综合能源配置专家和综合能源使用专家转变。在分布式能源方面，国华电力积极探索贴近需求侧的综合能源供应商业模式，为用户提供“以分布式能源为主导，多能互补、能源互联网的综合能源一体化解决方案”，构建“源、网、荷、储、控”协调发展、集成互补的综合能源系统。

中国广东核电集团有限公司（中广核）

中广核已在国内多地成立综合能源服务公司，围绕清洁能源开发、建设、生产、供应与利用，提供以掌握核心技术和掌控产业链关键资源为目的的相关工业产品；提供与清洁能源开发、建设、生产与供应相关的专业化服务；提供与能源利用和消费相关的能效服务；提供与清洁能源业务相关的金融、公共事业等综合服务。

热力企业

北京京能股份：推进综合能源服务业务发展，目前首个综合能源服务项目已落地。

北京热力集团：为迈向绿色发展，清洁供热进行了各种探索，正在推广的包括：分布式光伏、生活污水余热回收、浅层低温能、冷热联供、无干扰地岩热、谷电蓄热等。

东方能源：构建综合能源发展平台，努力将公司建设成为创新型、清洁型、效益型的一流现代国有综合能源企业。

油气企业

中石油：已经进军售电业务，欲开拓综合能源服务。

中石化：推出首座综合供能站融合三大能源零售体系。

中海油：积极布局分布式能源与海上风电，打造新型综合能源基地。

延长石油：明确“提高清洁综合能源和高端石化产品供应能力、建成受人尊敬的创新型现代化国际能源化工公司”的发展目标。

华润燃气：积极推进分布式能源及充电桩等新业务。

北京燃气：着力打造清洁、高效、安全的城市综合能源供应体系，深入推动“多能协同、智能耦合”的能源协作模式。

民营企业

新奥：泛能网

新奥的泛能网以及协鑫的分布式微能源网都是属于区域能源互联网形式。新奥将冷热、燃气联系起来，开发冷热电联产项目，目前已形成新奥能源、能源化工、太阳能源、智慧能源、技术工程等相关多元化产业。

协鑫：分布式微能源网

协鑫的分布式微能源网按照“六位一体”模式实施：将天然气热电冷系统、光伏发电、风能发电、储能技术、节能技术、低位热能结合为一体，提供多种能源服务。

远景能源：互联网+能源

远景通过信息化技术包括大数据、云计算和数据挖掘等手段打造“互联网+”新能源发电的模式，积极构筑智慧能源生态，目前已从单一的风机制造商成长为领先的综合能源服务提供商。

阿里云新能源

阿里能源云，是为新能源行业提供丰富的专业化云端业务与技术解决方案，帮助能源运营商、服务商快速搭建标准化或定制化商业平台，实现业务应用的灵活开发与落地，构建能源互联新生态。

小结

小结

综合能源服务框架

综合能源服务依托能源互联网展开，通过泛在电力物联网应用，充分发挥电的枢纽作用，实现多种能源系统的统筹管理和协调优化，推动多能互补，实现能源精细利用，提升社会整体能效。以下从供给端、用户端和输配端对综合能源服务的实施方向进行说明。

供给端

电力

在新增电力方面，根据目前电网结构分析，2019~2020年每年新增装机将在130~160GW，而火电、水电、核电没有大批量新增装机，加之 “三北”外送通道助力，风电、光电装机空间重新打开。

在电力生产方式上，除去规模化的集中式风电、光电生产，分布式新能源系统也将得到大力支持。此外，在现有电力结构下，实现可再生能源之间和可再生能源与传统能源间的多能互补也是当前供给端改革的重要方向。

因此，可再生能源，尤其是风电、光电的相关产业仍将持续走热。

热力

从用能结构上看，2016 年底，供暖能源以燃煤为主（占 83%），天然气、电、地热能、生物质能等合计约占 17%。取暖用煤年消耗约 4 亿吨标煤，其中散煤约 2 亿吨标煤。根据供暖清洁化的发展趋势以及经济性角度考虑，未来一段时间将主要以发展集中供暖为主，分散供暖为辅。

集中供暖清洁化主要包括三个途径：一是通过热电联产等集中供热；二是采用先进燃煤工业锅炉；三是使用天然气、电、生物质、地热等清洁燃料。分散清洁供暖主要包括用先进炉具、电取暖、天然气取暖和热泵等技术。

油气

受当前国际形势的影响，国际油价的波动性较大，而全球天然气的供应格局正在重构。2018年，美国成为世界第一大油气生产国，油气出口快速增长，对全球油气市场的影响力明显增强，美国与减产联盟博弈、中美贸易摩擦等将进一步推动国际油气秩序重构。

中国油气行业正进入深化油气体制改革意见的实施阶段，国内油气行业全产业链扩大开放，民营油气企业进一步分化发展迅速崛起；天然气保障能力建设首次提升到国家战略层面，对冬季天然气保供起到关键作用；外资进入步伐明显加快、力度明显加大。未来，化石能源清洁低碳化发展与非化石能源规模化发展将成为能源结构优化的两大驱动力。

小结

用户端

节能改造

随着互联网和大数据技术的发展，企业通过建设能源管理系统来为企业进行能源决策成为了可能。传统的节能改造方式，只解决了“谁”、“做什么”的问题，而“如何做”、“做到什么程度”（运行绩效），主要由任职者主观意愿来决定。通过能源管理系统能将节能效果数字化，有利于节能目标分解落实和考核，大大减少工作中的随意性。这也意味着节能改造的方向将由单一的降低能耗转向能源综合利用的方式。

负荷调控

传统能源模式遵循“以需定供”的原则，对供给端的能源稳定性提出极高要求，同时也造成了调峰调负的困难。而随着未来大量可再生能源的渗透，其自身能源特点带来的不稳定性对现有模式造成极大挑战。因此，借鉴国外经验，结合物联网与数据信息技术，在当前电力结构“以需定供”的基础上，发展“以供调需”的灵活模式是解决这一挑战的有力手段，由此引发的新一轮用户端革命将带来广阔的市场机会。

智能设备

智能工厂、智能家居和智能楼宇系统是能源互联网的主要末端环节，在能源互联网实践中，需要智能化改造现有的能源设备，使之成为新的互联网入口端，实现对离散化、分布式负载端的动态管理与优化，因而也迫切需要能源互联网对于接口端的标准化。

小结

输配端

虚拟电厂

售电端改革的主要目的是形成市场化多买多卖、供需调节的电力体制，从目前部分地区直购电试点与电力交易平台试点的情况来看，售电端将沿着“点对点”直购电，“点对面”全国统一的竞价交易平台；“全用户、多品种”电力批发市场；“多衍生品”电力金融市场的方向发展。

而基于互联网大数据交互后的电力交易市场，不仅提供交易服务，还提供需求、负荷动态管理，电力期货和金融交易。

信息服务与优化调控

供给端与用户端设备的智能化改造将带来海量数据流，在现有水平下，靠单一的中央服务器进行管理调度并非良策，更有效可行的方式是采用分布式管理模式，通过各级子处理中心分担中央平台的压力。由此将带来更多的区域性企业竞争机会，因而发挥行业企业优势，建立企业辖内数据分析与优化调控平台，联合互联网企业与设备商，建立平台和接口标准优势，在“数据”割据局面下得以立足是企业必须考虑的战略行为。

在数据平台基础上，实行高质量的优化调控策略则是提高综合能源系统稳定性和能源效率，获取更大利润的重要保障。

充储服务

作为综合能源系统的重要支撑，储能可以起到削峰填谷作用，提高风、光等可再生能源的消纳水平，支撑分布式电源及微网，促进能源生产消费开放共享和灵活交易、实现多能协同。电动汽车具备用电+分布式储能双重身份，是未来能源网络的重要一环。通过能源互联网与可再生能源构互相配合，在光储式充换电站、快速充电站、需求响应充电中发挥储能作用，且动力电池梯次利用将降低储能电池应用成本。目前电动车量较少，对电网冲击有限，随着电动车数量上升，对电网的影响将非常大。

能源充储站的建设以及充储设备的开发是能源互联网的重要落地基础，也是分布式能源系统的基石，未来市场前景广阔，但是当前准入资产门槛较高，

小结

小结

综合能源核心技术发展现状及趋势

综合能源服务是在新能源技术与电子信息技术协同突破创新下诞生的新型能源服务模式，本文从综合能源服务的供给端、输配端和用户端提取三大共性关键技术，分别为优化控制技术、数据信息技术和硬件技术。

优化控制技术

能源生产与转化优化

综合能源服务的目标之一是提高清洁能源的占比，而可再生能源具有众多不可控的特性，若盲目开发不仅浪费资源，还造成一系列的新问题。多能互补系统作为提高可再生能源可靠性的有效手段涉及到一系列的优化问题，如设计、控制和运行优化等。此外，根据气象进行可再生能源的预测，根据负荷进行生产计划优化，根据资源进行分布式能源供给设计等都是实现综合能源服务的重要技术基础。

作为综合能源的另一个重要方面，根据需求将电、热、气等不同种类能源生产和转化进行有效的耦合调度，真正实现以电为枢纽的新型能源网络和服务，不仅需要开发新的能源技术，还需要设计深度优化策略对其进行优化调控。

负荷管理优化

高质量的需求侧管理不仅能够节约能源，还能平抑可再生能源发电间歇性，并且在分布式能源故障情况下帮助维持系统功率平衡。有别于传统的粗放式管理，新的能源模式要求更加精细化和预先性的管理模式，实现供需之间的最大匹配，在提高服务质量的同时节约能源。

能源网络优化

能源互联网中的能源网络优化主要包括储能装置与能源生产装置的综合能量管理，终端能源网络对分布式电源、电动汽车等新型配用电设备或系统的调度管理，微网、大网的调度协调优化，不同种类能源间的转化和调度，对能源再分配和再传输优化的能量路由技术等内容。

数据信息技术

信息和通信技术

信息通信技术（ICT 技术）是电信服务、信息服务、IT 服务及应用的有机结合。发挥ICT 技术的长处，将能源的生产、运输、交易和消费等相关设备连接起来，是实现能源互联的重要技术基础。

能源大数据技术

综合能源服务将借助云平台等设备，利用获取的能源大数据信息，使用机器学习等先进的数据分析手段，形成精准的能源生产和负荷用户画像，进一步结合气象、交通、文化等信息，匹配能源生产计划与负荷调度，提供智能化终端能源服务，实现多级优化。

硬件技术

能源转化技术

在能源生产方面，无论从技术还是经济性角度，目前风能、太阳能、生物质能、地热能和海洋能等可再生能源转化为电能、热能的水平尚未达到预期水准，迫切需要从技术上对其进行创新，实现硬件设备上的升级换代，提高市场竞争力。

在不同种能源间的转化耦合方面，现有的电、热、气转化技术，如联合燃气循环（CCGT）、热电联产（CHP）、电转气（气体燃料）（P2G）、电转液（液态燃料）（P2L）以及热泵等技术并不足以满足未来综合能源服务多场景、高灵活的需要，因此需要针对典型综合能源服务场景开发新型的能源间转化技术与设备，支撑行业深度改革。

先进储能技术

储能技术在供给端、输配端和用户端都起着重要作用。先进的储能技术包括压缩空气储能、电池储能、飞轮储能、超导储能、超级电容器储能、氢存储、P2G 、P2L等。从能源发展趋势来看，亟需研究以下储能方向：

（1）不同储能方式的互补模式；

（2）大容量化学电池模块化集成系统，储能系统能量转换装置；

（3）大容量集成储能间歇性能源功率平滑调节装置。

Lider

Energyplus

Doe-2

Designbuider

Idaes pse

Genopt

Sam

Pyomo

Plasmo.jl

Ideas

Jump.jl

Blackboxopt.jl

（三）混合整数规划的人工智能方法。

针对各类混合整数规划问题，充分利用问题类别与历史数据信息，构造分支与节点选择、割平面、启发式调用等的自适应策略，设计高效的混合整数规划的人工智能方法；建立这些方法的评价与反馈机制，发展求解混合整数规划的方法与理论。

http://archimedes.cheme.cmu.edu/

http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html

https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html

https://neos-server.org/neos/solvers/index.html

https://scip.zib.de/

https://www.minlp.org/

https://www.particleswarm.info/

http://www.minlplib.org/

http://openmdao.org/

http://www.optimization-online.org/

http://apmonitor.com/

http://www.swarmintelligence.org/

http://www.gamsworld.org/

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

http://titan.engr.tamu.edu/

http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634

https://www.nature.com/articles/s41560-019-0326-1?source=post\_page---------------------------

https://www.nature.com/articles/s41893-019-0352-9

ahttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1004954111600827

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965260700251X

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918316842#s0005

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418312111

http://iiesi.org/who.html

https://science.sciencemag.org/content/360/6396/eaas9793/tab-pdf

http://energyresources.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2698984

https://www.ncl.ac.uk/cesi/research/

https://gow.epsrc.ukri.org/NGBOViewGrant.aspx?GrantRef=EP/P001173/1

https://www.dur.ac.uk/dei/events/?eventno=38992

https://www.dur.ac.uk/dei/projects/cesi/

https://www.birmingham.ac.uk/facilities/esil/index.aspx

https://es.catapult.org.uk/capabilities/systems-integration/

https://gtr.ukri.org/projects?ref=EP%2FP001173%2F1

http://www.sussex.ac.uk/spru/research/projects/cesi

https://www.eera-set.eu/eera-joint-programmes-jps/list-of-jps/energy-systems-integration-2/

https://smartcities-infosystem.eu/energy/energy-system-integration

https://www.eera-set.eu/

https://ec.europa.eu/energy/en/events/energy-storage-service-evolving-energy-systems-and-renewables-integration

https://ec.europa.eu/energy/en/studies/report-first-results-h2020-projects-energy-efficiency-and-system-integration

https://www.eranet-smartenergysystems.eu/Calls/Regsys\_Calls/Focus\_Initiative\_Integrated\_Regional\_Energy\_Systems

https://www.sci.kit.edu/311.php

https://www.itas.kit.edu/english/erts\_current\_poga17\_esi.php

https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-esi.2019.0015

https://www.energy.gov/eere/wind/renewable-systems-integration

https://chinaproject.harvard.edu/event/omalley20171129

https://chinaproject.harvard.edu/renewable-electric-power-and-grid-integration

http://acep.uaf.edu/facilities/power-systems-integration-lab.aspx

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965260700251X

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1004954111600827

http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html

https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html

https://neos-server.org/neos/solvers/index.html

https://scip.zib.de/

https://www.minlp.org/

https://www.particleswarm.info/

http://www.minlplib.org/

http://www.optimization-online.org/

http://apmonitor.com/

http://www.swarmintelligence.org/

http://www.gamsworld.org/

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

http://titan.engr.tamu.edu/

http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634

目录

[1 背景 6](#_Toc73547011)

[2 能力建设与业务抓手 7](#_Toc73547012)

[3 技术难点分析 7](#_Toc73547013)

[4 行动目标 8](#_Toc73547014)

[5 行动计划 8](#_Toc73547015)

[能源系统计算建模、仿真与优化 8](#_Toc73547016)

[Computational modeling, simulation, and optimization in energy systems 8](#_Toc73547017)

[第一篇 能源互联网与能量枢纽 8](#_Toc73547018)

[1 综合能源系统概述 8](#_Toc73547019)

[2 综合能源系统框架 16](#_Toc73547020)

[2.1 供给端 16](#_Toc73547021)

[2.2 输配端 16](#_Toc73547022)

[2.3 用户端 16](#_Toc73547023)

[3 综合能源系统核心技术发展现状及趋势 16](#_Toc73547024)

[3.1 优化控制技术 16](#_Toc73547025)

[3.2 数据信息技术 16](#_Toc73547026)

[3.3 硬件技术 16](#_Toc73547027)

[4 国内外行业发展现状及趋势 16](#_Toc73547028)

[4.1 国外发展现状及趋势 16](#_Toc73547029)

[4.2 国内发展现状及趋势 16](#_Toc73547030)

[5 综合能源系统前景分析 16](#_Toc73547031)

[第二篇 基于组件建模的联合仿真技术 16](#_Toc73547032)

[6 瞬态模拟软件Trnsys 17](#_Toc73547033)

[7 基于组件建模的Modelica语言 17](#_Toc73547034)

[8 基于FMU/FMI的联合仿真技术 17](#_Toc73547035)

[9 数字孪生简介 17](#_Toc73547036)

[第三篇 综合能源系统中的优化问题及其求解 17](#_Toc73547037)

[10 优化问题分类 17](#_Toc73547038)

[11 混合整数非线性规划问题的传统解法 17](#_Toc73547039)

[12 混合整数非线性规划问题的进化计算解法 17](#_Toc73547040)

[13 基于仿真的优化 17](#_Toc73547041)

[14 数据驱动的仿真与优化 17](#_Toc73547042)

[第四篇 模型预测控制 17](#_Toc73547043)

[15 从PID到MPC 17](#_Toc73547044)

[16 机器学习型智能控制 17](#_Toc73547045)

[第五篇 综合能源系统典型案例介绍 17](#_Toc73547046)

[第六篇 综合能源系统建模仿真优化与控制相关软件介绍 17](#_Toc73547047)

[17 建模仿真软件 24](#_Toc73547048)

[19 模型预测控制软件 24](#_Toc73547049)

[参考文献 26](#_Toc73547050)

[E-mail 45](#_Toc73547051)

[引言 48](#_Toc73547052)

[智慧能源与能源系统优化 48](#_Toc73547053)

[大数据 48](#_Toc73547054)

[人工智能（机器学习、数据挖掘） 48](#_Toc73547055)

[运筹学方法（MINLP等） 48](#_Toc73547056)

[群体智能算法 48](#_Toc73547057)

[能源系统优化的应用领域 48](#_Toc73547058)

[多能互补系统 48](#_Toc73547059)

[天然气管网运行优化 48](#_Toc73547060)

[建筑能源管理系统 48](#_Toc73547061)

[供热管网系统 48](#_Toc73547062)

[城市能源系统 48](#_Toc73547063)

[研究人员 48](#_Toc73547064)

[组内 48](#_Toc73547065)

[组外拟合作 49](#_Toc73547066)

[相关行业学会 50](#_Toc73547067)

[运筹学会 唐立新 50](#_Toc73547068)

[能源方面呢？ 50](#_Toc73547069)

[自然科学基金代码 50](#_Toc73547070)

[存在的问题与可能突破的方向 50](#_Toc73547071)

[行业主要厂商（需求方，供应方，可能的合作方）上下游生态 50](#_Toc73547072)

[风能类公司 50](#_Toc73547073)

[光伏系统公司 50](#_Toc73547074)

[太阳能热发电公司 50](#_Toc73547075)

[储能公司 50](#_Toc73547076)

[多能互补系统公司 50](#_Toc73547077)

[电力系统公司 50](#_Toc73547078)

[天然气管道系统运行公司 50](#_Toc73547079)

[能源优化管理公司（解决方案提供方） 50](#_Toc73547080)

[优化软件、机器学习、大数据相关解决方案供应商 50](#_Toc73547081)

[国外主要研究机构 51](#_Toc73547082)

[国内主要研究机构 51](#_Toc73547083)

[相关标准汇编 51](#_Toc73547084)

[相关软件汇编 51](#_Toc73547085)

[相关评价标准汇编 51](#_Toc73547086)

[相关书籍 51](#_Toc73547087)

[相关博士论文 51](#_Toc73547088)

[关键词 51](#_Toc73547089)

[涉及到的领域 52](#_Toc73547090)

[太阳能光伏系统 52](#_Toc73547091)

[风能系统 52](#_Toc73547092)

[太阳能热发电系统 52](#_Toc73547093)

[储能系统 52](#_Toc73547094)

[混合能源系统 52](#_Toc73547095)

[热网系统 52](#_Toc73547096)

[水网系统 52](#_Toc73547097)

[气网系统 52](#_Toc73547098)

[（能源互联网）电能路由器 52](#_Toc73547099)

[新能源并网 52](#_Toc73547100)

[气象数据 52](#_Toc73547101)

[预测方法 52](#_Toc73547102)

[可靠性 52](#_Toc73547103)

[评价方法 52](#_Toc73547104)

[调度优化 52](#_Toc73547105)

[网页资料参考 53](#_Toc73547106)

[1. 综合能源服务发展背景 72](#_Toc73547107)

[1.1. 综合能源服务的基本内涵 72](#_Toc73547108)

[1.1.1. 基本概念 72](#_Toc73547109)

[1.1.2. 基本特征 72](#_Toc73547110)

[1.1.3. 服务模式 72](#_Toc73547111)

[1.1.4. 与传统能源服务模式的区别 73](#_Toc73547112)

[1.1.5. 发展综合能源服务的重要意义 73](#_Toc73547113)

[1.2. 技术层面——技术驱动 73](#_Toc73547114)

[1.3. 经济层面——万亿级市场 73](#_Toc73547115)

[1.4. 政策层面——“十四五”重头戏 73](#_Toc73547116)

[1.5. 社会层面——施利于民 74](#_Toc73547117)

[1.6. 小结 74](#_Toc73547118)

[2. 国内外行业发展现状及趋势 74](#_Toc73547119)

[1.7. 国外发展现状及趋势 74](#_Toc73547120)

[1.7.1. 欧洲 74](#_Toc73547121)

[1.7.2. 美国 75](#_Toc73547122)

[1.7.3. 日本 75](#_Toc73547123)

[1.7.4. 小结 76](#_Toc73547124)

[1.8. 国内发展现状及趋势 76](#_Toc73547125)

[1.8.1. 两大电网公司 76](#_Toc73547126)

[1.8.2. 五大发电集团 77](#_Toc73547127)

[1.8.3. 四小豪门 77](#_Toc73547128)

[1.8.4. 热力企业 78](#_Toc73547129)

[1.8.5. 油气企业 78](#_Toc73547130)

[1.8.6. 民营企业 79](#_Toc73547131)

[1.8.7. 小结 79](#_Toc73547132)

[1.9. 小结 79](#_Toc73547133)

[3. 综合能源服务框架 79](#_Toc73547134)

[2.1. 供给端 80](#_Toc73547135)

[2.1.1. 电力 80](#_Toc73547136)

[2.1.2. 热力 80](#_Toc73547137)

[2.1.3. 油气 80](#_Toc73547138)

[2.1.4. 小结 81](#_Toc73547139)

[2.2. 用户端 81](#_Toc73547140)

[2.2.1. 节能改造 81](#_Toc73547141)

[2.2.2. 负荷调控 81](#_Toc73547142)

[2.2.3. 智能设备 81](#_Toc73547143)

[2.2.4. 小结 82](#_Toc73547144)

[2.3. 输配端 82](#_Toc73547145)

[2.3.1. 虚拟电厂 82](#_Toc73547146)

[2.3.2. 信息服务与优化调控 82](#_Toc73547147)

[2.3.3. 充储服务 82](#_Toc73547148)

[2.3.4. 小结 83](#_Toc73547149)

[2.4. 小结 83](#_Toc73547150)

[4. 综合能源核心技术发展现状及趋势 83](#_Toc73547151)

[2.5. 优化控制技术 83](#_Toc73547152)

[2.5.1. 能源生产与转化优化 83](#_Toc73547153)

[2.5.2. 负荷管理优化 83](#_Toc73547154)

[2.5.3. 能源网络优化 83](#_Toc73547155)

[2.6. 数据信息技术 84](#_Toc73547156)

[2.6.1. 信息和通信技术 84](#_Toc73547157)

[2.6.2. 能源大数据技术 84](#_Toc73547158)

[2.7. 硬件技术 84](#_Toc73547159)

[2.7.1. 能源转化技术 84](#_Toc73547160)

[2.7.2. 先进储能技术 84](#_Toc73547161)

[----todo list---- 85](#_Toc73547162)

[能源系统计算、建模、仿真、优化研究组行动计划 85](#_Toc73547163)

[1 总体思路 85](#_Toc73547164)

[2 重点任务 86](#_Toc73547165)

[3 重点工作分解 86](#_Toc73547166)

[4 组织实施 87](#_Toc73547167)

Trnsys

energyplus

SAM

openmodelica & jmodelica

modelica库简介

https://impact.github.io/

Thermocycle-library

https://github.com/thermocycle/Thermocycle-library

优化软件

genopt

pyomo

JuMP

模型预测控制软件

相关研究机构简介

nrel

lbl

cmu

附录 知识集

最优化方法

粒子群算法

大数据

工业互联网

机器学习

过程与能源系统优化

模拟与仿真

有限体积法cfd使用入门

有限元法入门

分子动力学入门

Trnsys入门

Modelica入门

集群的基础知识

Linux基本使用-mobaxterm+Putty+filezilla

vscode

Python编程环境

C++编程环境

Java编程环境

Fortran编程环境

GPU编程

mpi

# References

## 关于优化的

<http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html>

<https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html>

<https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>

<https://scip.zib.de/>

<https://www.minlp.org/>

<https://www.particleswarm.info/>

<http://www.minlplib.org/>

<http://openmdao.org/>

<http://www.optimization-online.org/>

<http://apmonitor.com/>

<http://www.swarmintelligence.org/>

<http://www.gamsworld.org/>

<http://titan.engr.tamu.edu/>

<http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634>

(http://simulationresearch.lbl.gov/GO/)

python-zibopt

picos https://picos-api.gitlab.io/picos/

numberjack https://github.com/eomahony/Numberjack

pyscipopt

## 关于仿真的

energyplus（nrel）

sam（nrel）

spawn of energyplus

openstudio

## 关于综合能源系统的

https://idaes.org/

https://china.lbl.gov/research-projects

https://buildings.lbl.gov/

https://eta.lbl.gov/research-development

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

## 关于管网的

https://github.com/samadritakarmakar/LiquiNet

https://www.epa.gov/water-research/epanet

http://epanet.de/

http://www.korf.co.uk/korf\_links.html

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Gas\_network\_datasets

https://github.com/USEPA/Water-Distribution-Network-Model

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X08000607

https://psig.org/what-we-do/

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/TransiEnt

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://github.com/OpenIPSL

https://github.com/USEPA/WNTR

https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs

https://github.com/NCBI-Hackathons/Network\_SNPs

https://github.com/casadi/casadi

http://apmonitor.com/me575/index.php/Main/BookChapters

https://flow.byu.edu/me575/resources/

http://egon.cheme.cmu.edu/index.html 以及其徒子徒孙 http://titan.princeton.edu/tree/index.php

包括princeton的Christodoulos Floudas, http://titan.princeton.edu/tree/pdf/Christodoulos%20Floudas.pdf

http://www.midaco-solver.com/

[数据驱动的进化优化](https://git.mingtaoli.cn/zhangxiaohai/Optimization\_Relative\_Knowledge/src/branch/master/%E6%95%B0%E6%8D%AE%E9%A9%B1%E5%8A%A8%E7%9A%84%E8%BF%9B%E5%8C%96%E4%BC%98%E5%8C%96)

https://oemof.org/

## 研究计划与任务分解

2019上半年

1、归纳HRES的优化问题

对问题分类调研，突出阐明问题的难度，导向MINLP和基于仿真的优化

2、阐明现有的优化方法、软件和发展趋势，突出启发式算法，尤其是PSO算法

决定论算法（GAMS、CPLEX、SCIP等）；启发式算法

3、PSO算法的特点，优缺点，处理离散变量与约束的方法

基于Python的实现

4、PSO算法处理MINLP问题的验证与性能比较

MINLP测试集、user-defined function

2019下半年

5、典型仿真接口实现

Jmodelica，energyplus，user-function

6、处理典型的HRES优化问题

基于modelica搭建模型

7、处理天然气优化问题

https://ieeexplore.ieee.org/document/8668389/authors#authors

https://www.aalborgcsp.com/business-areas/integrated-energy-systems/

https://www.nrel.gov/esif/what-is-esi.html

https://www.nrel.gov/esif/

<https://www.esig.energy/planning-for-integrated-energy-systems/>

杨树森，种道同，刘俊，贺群武，张海涛，李燕，彭波涛，李辉

太阳能光热熔融盐发电系统分析

数据中心分析

天然气管网优化

光伏-电解-燃料电池-储气系统分析

家庭建筑节能系统分析

参考工具

Idaes pse

Genopt

Energyplus

Sam

Pyomo

modelica-openmodelica，jmodelica

根据国际能源署的研究报告，2040年全球能源需求将比2010年全球用能总量提升56%。相应地，按照当前技术水平发展，2040年全球碳排放总量将比2010年提升45.8%，由此将导致严重的全球气候及环境等问题。对此，主要有两条解决途径——提高能源效率和开发可再生能源（RE）。在可再生能源开发实践过程中，各国学者们渐渐发现单一的可再生能源系统并不能很好地适应实际能源需求，盲目建设导致了不同地区不同规模的弃风弃电等可再生能源消纳问题，造成了巨大的损失和浪费。为解决这一问题，各国大力发展多能互补系统（HES）。自本世纪起，德国先后发起ICT以及E-Energy项目，欧盟启动FINSENY项目，瑞士发起VoFEN项目，美国启动FREEDM计划，我国也紧随其后开展“互联网+”智慧能源计划。目前，HES的研究尚处于初级阶段，主要集中在以太阳能和风能为基础的电力系统上，且多研究可再生能源间的互补耦合，较少地将可再生能源与已有的传统能源进行结合。此外，将HES系统产生的电力用于制氢的“Power to Gas”（PtG）系统也在发达国家，尤其是德国，受到较大关注。

多能互补系统较单一的可再生能源系统具备更高的可靠性、更低的成本、更高的能源效率以及更少的系统储能装置容量。但是，HES系统也面临更大的技术挑战。除了单一RE系统存在的生产不连续、随机性、波动性和不可控等特点外，HES中还需考虑实际负荷与多种能源间的特性耦合问题，尤其在容量配置、能量策略和协调运行管理上存在难题。这些挑战的根源在于：其一，按当前技术发展趋势，可再生能源的诸多特性并不会随着硬件技术的升级而被改变；其二，HES涉及多种不同能源的耦合，是一个多场景、多目标、不确定的综合规划问题。此外，受于气候环境的要求，可再生能源工程建设迫在眉睫。因此迫切需要发展适应大规模计算的混合整数非线性优化方法，针对HES特性进行优化设计。根据这一思路，从上世纪末开始，学者们陆续发展了基于传统优化算法和元启发算法的线性与非线性优化设计方法。传统算法中主要有最小二乘法、线性规划法、迭代优化法等，该类方法未能充分考虑HES的实际复杂性，对系统元件进行简单建模，进而根据负荷总量对系统设计进行准稳态优化，所得结果质量较差，主要在20世纪末用于HES的研究分析工作。元启发算法是近年来学者们模拟自然界现象发展而来的一类非确定性算法，能够在没有明确数学方程的情况下凭借给定的优化目标和约束条件找到满足要求的优化解，并且具备天然的并行计算特性，适应于大规模计算。因此，面对高复杂度与大规模优化计算问题，元启发算法展现出极大的优越性，在计算难度、精度与效率上较传统算法均有极大改进。在HES的优化设计研究及工程方面，基于元启发算法的遗传算法（GA）、粒子群算法（PSO）及其混合算法等得到了广泛的应用。虽然元启发算法在HES的优化设计上已经初见成效，但是由于学者们对HES的认识不够深刻，所发展的优化算法其计算精度、计算效率与通用性较低，且优化算法研究者与能源系统研究者结合不够紧密（拥有算法研究背景的学者往往对能源系统的了解浮于表面，而研究能源系统的学者则对算法的了解不够深入），使得针对HES的优化设计还处于单目标、准稳态、模块优化水平，未能将优化算法与能源系统进行深度耦合，发挥HES应有的潜力。而随着优化方法、计算力与边缘计算的发展，多目标优化、瞬态优化与系统网络结构优化设计已变得可能，从传统的粗放式优化设计转向未来的数字化精细化优化设计已是发展趋势。

基于当前的HES优化设计研究现状与未来发展趋势，结合实验室的氢能战略与科学中心多能互补理论研究方向，本课题拟研究基于粒子群算法的多能互补体系通用优化方法，即对现有粒子群算法针对多能互补系统进行改进，研究多目标、准瞬态和系统网络结构优化方法。进一步地，利用优化算法的手段，寻找多种能源间能量传递的优化路径，为研究多能互补理论提供高效研究手段的同时发展多能互补体系建设的理论模型。

# 参考文献

nrel

lbl

cmu

antigone

## 关于优化的

<http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html>

<https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html>

<https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>

<https://scip.zib.de/>

<https://www.minlp.org/>

<https://www.particleswarm.info/>

<http://www.minlplib.org/>

<http://openmdao.org/>

<http://www.optimization-online.org/>

<http://apmonitor.com/>

<http://www.swarmintelligence.org/>

<http://www.gamsworld.org/>

<http://titan.engr.tamu.edu/>

<http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634>

(http://simulationresearch.lbl.gov/GO/)

python-zibopt

picos https://picos-api.gitlab.io/picos/

numberjack https://github.com/eomahony/Numberjack

pyscipopt

## 关于仿真的

energyplus（nrel）

sam（nrel）

spawn of energyplus

openstudio

https://idaes.org/

https://china.lbl.gov/research-projects

https://buildings.lbl.gov/

https://eta.lbl.gov/research-development

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

## 关于管网的

https://github.com/samadritakarmakar/LiquiNet

https://www.epa.gov/water-research/epanet

http://epanet.de/

http://www.korf.co.uk/korf\_links.html

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Gas\_network\_datasets

https://github.com/USEPA/Water-Distribution-Network-Model

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X08000607

https://psig.org/what-we-do/

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/TransiEnt

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://github.com/OpenIPSL

https://github.com/USEPA/WNTR

https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs

https://github.com/NCBI-Hackathons/Network\_SNPs

https://github.com/casadi/casadi

http://apmonitor.com/me575/index.php/Main/BookChapters

https://flow.byu.edu/me575/resources/

http://egon.cheme.cmu.edu/index.html 以及其徒子徒孙 http://titan.princeton.edu/tree/index.php

包括princeton的Christodoulos Floudas, http://titan.princeton.edu/tree/pdf/Christodoulos%20Floudas.pdf

http://www.midaco-solver.com/

[数据驱动的进化优化]

(https://git.mingtaoli.cn/zhangxiaohai/Optimization\_Relative\_Knowledge/src/branch/master/%E6%95%B0%E6%8D%AE%E9%A9%B1%E5%8A%A8%E7%9A%84%E8%BF%9B%E5%8C%96%E4%BC%98%E5%8C%96)

https://oemof.org/

## 研究计划与任务分解

https://ieeexplore.ieee.org/document/8668389/authors#authors

https://www.aalborgcsp.com/business-areas/integrated-energy-systems/

https://www.nrel.gov/esif/what-is-esi.html

https://www.nrel.gov/esif/

<https://www.esig.energy/planning-for-integrated-energy-systems/>

<https://www.claralib.com/#modal-download>

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7207236>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115013179>

<https://www.scientific.net/AMR.1140.449>

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7895273>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319301647>

<https://www.mdpi.com/2079-9292/8/2/237>

<https://www.nrel.gov/esif/smart-home-building-systems.html>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401219301422>

<https://www.nrel.gov/solar/index.html>

<https://www.nrel.gov/research/areas.html>

根据国际能源署的研究报告，2040年全球能源需求将比2010年全球用能总量提升56%。相应地，按照当前技术水平发展，2040年全球碳排放总量将比2010年提升45.8%，由此将导致严重的全球气候及环境等问题。对此，主要有两条解决途径——提高能源效率和开发可再生能源（RE）。在可再生能源开发实践过程中，各国学者们渐渐发现单一的可再生能源系统并不能很好地适应实际能源需求，盲目建设导致了不同地区不同规模的弃风弃电等可再生能源消纳问题，造成了巨大的损失和浪费。为解决这一问题，各国大力发展多能互补系统（HES）。自本世纪起，德国先后发起ICT以及E-Energy项目，欧盟启动FINSENY项目，瑞士发起VoFEN项目，美国启动FREEDM计划，我国也紧随其后开展“互联网+”智慧能源计划。目前，HES的研究尚处于初级阶段，主要集中在以太阳能和风能为基础的电力系统上，且多研究可再生能源间的互补耦合，较少地将可再生能源与已有的传统能源进行结合。此外，将HES系统产生的电力用于制氢的“Power to Gas”（PtG）系统也在发达国家，尤其是德国，受到较大关注。

多能互补系统较单一的可再生能源系统具备更高的可靠性、更低的成本、更高的能源效率以及更少的系统储能装置容量。但是，HES系统也面临更大的技术挑战。除了单一RE系统存在的生产不连续、随机性、波动性和不可控等特点外，HES中还需考虑实际负荷与多种能源间的特性耦合问题，尤其在容量配置、能量策略和协调运行管理上存在难题。这些挑战的根源在于：其一，按当前技术发展趋势，可再生能源的诸多特性并不会随着硬件技术的升级而被改变；其二，HES涉及多种不同能源的耦合，是一个多场景、多目标、不确定的综合规划问题。此外，受于气候环境的要求，可再生能源工程建设迫在眉睫。因此迫切需要发展适应大规模计算的混合整数非线性优化方法，针对HES特性进行优化设计。根据这一思路，从上世纪末开始，学者们陆续发展了基于传统优化算法和元启发算法的线性与非线性优化设计方法。传统算法中主要有最小二乘法、线性规划法、迭代优化法等，该类方法未能充分考虑HES的实际复杂性，对系统元件进行简单建模，进而根据负荷总量对系统设计进行准稳态优化，所得结果质量较差，主要在20世纪末用于HES的研究分析工作。元启发算法是近年来学者们模拟自然界现象发展而来的一类非确定性算法，能够在没有明确数学方程的情况下凭借给定的优化目标和约束条件找到满足要求的优化解，并且具备天然的并行计算特性，适应于大规模计算。因此，面对高复杂度与大规模优化计算问题，元启发算法展现出极大的优越性，在计算难度、精度与效率上较传统算法均有极大改进。在HES的优化设计研究及工程方面，基于元启发算法的遗传算法（GA）、粒子群算法（PSO）及其混合算法等得到了广泛的应用。虽然元启发算法在HES的优化设计上已经初见成效，但是由于学者们对HES的认识不够深刻，所发展的优化算法其计算精度、计算效率与通用性较低，且优化算法研究者与能源系统研究者结合不够紧密（拥有算法研究背景的学者往往对能源系统的了解浮于表面，而研究能源系统的学者则对算法的了解不够深入），使得针对HES的优化设计还处于单目标、准稳态、模块优化水平，未能将优化算法与能源系统进行深度耦合，发挥HES应有的潜力。而随着优化方法、计算力与边缘计算的发展，多目标优化、瞬态优化与系统网络结构优化设计已变得可能，从传统的粗放式优化设计转向未来的数字化精细化优化设计已是发展趋势。

基于当前的HES优化设计研究现状与未来发展趋势，结合实验室的氢能战略与科学中心多能互补理论研究方向，本课题拟研究基于粒子群算法的多能互补体系通用优化方法，即对现有粒子群算法针对多能互补系统进行改进，研究多目标、准瞬态和系统网络结构优化方法。进一步地，利用优化算法的手段，寻找多种能源间能量传递的优化路径，为研究多能互补理论提供高效研究手段的同时发展多能互补体系建设的理论模型。

## 关于优化的

<http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html>

<https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html>

<https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>

<https://scip.zib.de/>

<https://www.minlp.org/>

<https://www.particleswarm.info/>

<http://www.minlplib.org/>

<http://openmdao.org/>

<http://www.optimization-online.org/>

<http://apmonitor.com/>

<http://www.swarmintelligence.org/>

<http://www.gamsworld.org/>

<http://titan.engr.tamu.edu/>

<http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634>

(http://simulationresearch.lbl.gov/GO/)

python-zibopt

picos https://picos-api.gitlab.io/picos/

numberjack https://github.com/eomahony/Numberjack

pyscipopt

## 关于仿真的

energyplus（nrel）

sam（nrel）

spawn of energyplus

openstudio

## 关于综合能源系统的

https://idaes.org/

https://china.lbl.gov/research-projects

https://buildings.lbl.gov/

https://eta.lbl.gov/research-development

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

## 关于管网的

https://github.com/samadritakarmakar/LiquiNet

https://www.epa.gov/water-research/epanet

http://epanet.de/

http://www.korf.co.uk/korf\_links.html

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Gas\_network\_datasets

https://github.com/USEPA/Water-Distribution-Network-Model

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X08000607

https://psig.org/what-we-do/

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/TransiEnt

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://github.com/OpenIPSL

https://github.com/USEPA/WNTR

https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs

https://github.com/NCBI-Hackathons/Network\_SNPs

https://github.com/casadi/casadi

http://apmonitor.com/me575/index.php/Main/BookChapters

https://flow.byu.edu/me575/resources/

http://egon.cheme.cmu.edu/index.html 以及其徒子徒孙 http://titan.princeton.edu/tree/index.php

包括princeton的Christodoulos Floudas, http://titan.princeton.edu/tree/pdf/Christodoulos%20Floudas.pdf

http://www.midaco-solver.com/

[数据驱动的进化优化](https://git.mingtaoli.cn/zhangxiaohai/Optimization\_Relative\_Knowledge/src/branch/master/%E6%95%B0%E6%8D%AE%E9%A9%B1%E5%8A%A8%E7%9A%84%E8%BF%9B%E5%8C%96%E4%BC%98%E5%8C%96)

https://oemof.org/

## 研究计划与任务分解

2019上半年

1、归纳HRES的优化问题

对问题分类调研，突出阐明问题的难度，导向MINLP和基于仿真的优化

2、阐明现有的优化方法、软件和发展趋势，突出启发式算法，尤其是PSO算法

决定论算法（GAMS、CPLEX、SCIP等）；启发式算法

3、PSO算法的特点，优缺点，处理离散变量与约束的方法

基于Python的实现

4、PSO算法处理MINLP问题的验证与性能比较

MINLP测试集、user-defined function

2019下半年

5、典型仿真接口实现

Jmodelica，energyplus，user-function

6、处理典型的HRES优化问题

基于modelica搭建模型

7、处理天然气优化问题

https://ieeexplore.ieee.org/document/8668389/authors#authors

https://www.aalborgcsp.com/business-areas/integrated-energy-systems/

https://www.nrel.gov/esif/what-is-esi.html

https://www.nrel.gov/esif/

https://www.esig.energy/planning-for-integrated-energy-systems/

多能互补与智慧能源

根据国际能源署的研究报告，2040年全球能源需求将比2010年全球用能总量提升56%。相应地，按照当前技术水平发展，2040年全球碳排放总量将比2010年提升45.8%，由此将导致严重的全球气候及环境等问题。对此，主要有两条解决途径——提高能源效率和开发可再生能源（RE）。在可再生能源开发实践过程中，各国学者们渐渐发现单一的可再生能源系统并不能很好地适应实际能源需求，盲目建设导致了不同地区不同规模的弃风弃电等可再生能源消纳问题，造成了巨大的损失和浪费。为解决这一问题，各国大力发展多能互补系统（HES）。自本世纪起，德国先后发起ICT以及E-Energy项目，欧盟启动FINSENY项目，瑞士发起VoFEN项目，美国启动FREEDM计划，我国也紧随其后开展“互联网+”智慧能源计划。目前，HES的研究尚处于初级阶段，主要集中在以太阳能和风能为基础的电力系统上，且多研究可再生能源间的互补耦合，较少地将可再生能源与已有的传统能源进行结合。此外，将HES系统产生的电力用于制氢的“Power to Gas”（PtG）系统也在发达国家，尤其是德国，受到较大关注。

多能互补系统较单一的可再生能源系统具备更高的可靠性、更低的成本、更高的能源效率以及更少的系统储能装置容量。但是，HES系统也面临更大的技术挑战。除了单一RE系统存在的生产不连续、随机性、波动性和不可控等特点外，HES中还需考虑实际负荷与多种能源间的特性耦合问题，尤其在容量配置、能量策略和协调运行管理上存在难题。这些挑战的根源在于：其一，按当前技术发展趋势，可再生能源的诸多特性并不会随着硬件技术的升级而被改变；其二，HES涉及多种不同能源的耦合，是一个多场景、多目标、不确定的综合规划问题。此外，受于气候环境的要求，可再生能源工程建设迫在眉睫。因此迫切需要发展适应大规模计算的混合整数非线性优化方法，针对HES特性进行优化设计。根据这一思路，从上世纪末开始，学者们陆续发展了基于传统优化算法和元启发算法的线性与非线性优化设计方法。传统算法中主要有最小二乘法、线性规划法、迭代优化法等，该类方法未能充分考虑HES的实际复杂性，对系统元件进行简单建模，进而根据负荷总量对系统设计进行准稳态优化，所得结果质量较差，主要在20世纪末用于HES的研究分析工作。元启发算法是近年来学者们模拟自然界现象发展而来的一类非确定性算法，能够在没有明确数学方程的情况下凭借给定的优化目标和约束条件找到满足要求的优化解，并且具备天然的并行计算特性，适应于大规模计算。因此，面对高复杂度与大规模优化计算问题，元启发算法展现出极大的优越性，在计算难度、精度与效率上较传统算法均有极大改进。在HES的优化设计研究及工程方面，基于元启发算法的遗传算法（GA）、粒子群算法（PSO）及其混合算法等得到了广泛的应用。虽然元启发算法在HES的优化设计上已经初见成效，但是由于学者们对HES的认识不够深刻，所发展的优化算法其计算精度、计算效率与通用性较低，且优化算法研究者与能源系统研究者结合不够紧密（拥有算法研究背景的学者往往对能源系统的了解浮于表面，而研究能源系统的学者则对算法的了解不够深入），使得针对HES的优化设计还处于单目标、准稳态、模块优化水平，未能将优化算法与能源系统进行深度耦合，发挥HES应有的潜力。而随着优化方法、计算力与边缘计算的发展，多目标优化、瞬态优化与系统网络结构优化设计已变得可能，从传统的粗放式优化设计转向未来的数字化精细化优化设计已是发展趋势。

基于当前的HES优化设计研究现状与未来发展趋势，结合实验室的氢能战略与科学中心多能互补理论研究方向，本课题拟研究基于粒子群算法的多能互补体系通用优化方法，即对现有粒子群算法针对多能互补系统进行改进，研究多目标、准瞬态和系统网络结构优化方法。进一步地，利用优化算法的手段，寻找多种能源间能量传递的优化路径，为研究多能互补理论提供高效研究手段的同时发展多能互补体系建设的理论模型。

相关研究组

美国可再生能源实验室的能源系统集成与能源分析

帝国理工能源未来实验室

美国伯克利国家实验室<https://buildings.lbl.gov/>

<https://energyanalysis.lbl.gov/>

Idaes

优化工具就做gensbo

现在仿真工具使用energyplus

未来仿真工具基于modelica做

代码基于python和c++，使用pybind11写，图形界面基于pyside2做。

Modelica renewable energy library

工具介绍

Trnsys

Energyplus

Modelica

Sam

Idaes pse

西安交通大学本科生课程教学大纲

一、课程基本信息

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 课程名称 | 综合能源系统建模、仿真、优化与控制 | | |
| Modeling, Simulation, Optimization and Control for Integrated Energy System (MSOC4IES) | | |
| 课程编号 | NEEN4000001 | | |
| 课程学分 | 2 | 总学时 | 32 |
| 学时分配 | 理论: 32 实验: 0 上机: 0 课外: 0 （课外学时不计入总学时） | | |
| 课程类型 | 🞏公共课程 🞏通识课程  🞏学科门类基础课 🞏专业大类基础课  🞏专业核心课 √专业选修课 🞏集中实践 | | |
| 适用年级 | 🞏1-1 🞏1-2 🞏2-1 🞏2-2 √3-1 √3-2  √4-1 🞏4-2 🞏5-1 🞏5-2 | | |
| 适用专业 | 能动学院各专业 | | |
| 先修课程 | 高等数学，线性代数，程序设计基础，工程热力学，流体力学，传热学 | | |
| 后续课程 | 无 | | |
| 教材、参考书及其他资料 | [1] 左然, 施明恒, 王希麟, 徐谦. 可再生能源概论（第2版）. 北京: 机械工业出版社, 2015.  [2] 马斯特斯(Masters, Gilbert M)著, 王宾等译. 高效可再生分布式发电系统. 北京: 机械工业出版社, 2009.  [3] 冯庆东编著. 能源互联网与智慧能源. 北京: 机械工业出版社, 2015.  [4]杰里米·里夫金(Rifkin, Jeremy)著, 张体伟等译.第三次工业革命——新经济模式如何改变世界. 北京: 中信出版社, 2012.  [5] Rajanna Siddaiah, R. P. Saini. A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2016，58: 376-396  [6] M. Iqbal, M. Azam, M. Naeem, et al. Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2014，39: 640-654  [7] Sunanda Sinha, S. S. Chandel. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2014，32: 192-205  [8] Samir M. Dawoud, Xiangning Lin, Merfat I. Okba. Hybrid renewable microgrid optimization techniques: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2018，82: 2039-2052 | | |

二、课程目标及学生应达到的能力

1. 通过本课程学习使学生生系统地了解和掌握太阳能、风能等可再生能源多能互补系统建模、仿真与优化的方法，包括多能互补基于组件的建模与仿真，数学问题抽象及基于仿真的优化，培养学生将所学的数学、工程基础和专业知识、计算机建模、仿真、优化知识用于解决可再生能源多能互补工程问题的能力，培养学生科学的思维方式、研究方法及创新意识。

2. 本课程系统地介绍基于组件的仿真工具Trnsys、EnergyPlus与modelica，培养学生针对复杂工程问题，开发、选择与使用恰当的技术、资源、现代工程工具和信息技术工具的能力。

3． 针对多能互补优化问题，介绍典型的数学模型、常用的优化算法与软件，并介绍新的基于计算智能的寻优方法与软件开发，培养学生针对复杂工程实际能够抽象问题，使用计算机软硬件工具，开展预测、模拟与优化获得有效结论的能力。

4. 本课程介绍综合能源系统智慧能源前沿，培养学生应用工程管理与决策方法的能力，培养学生自主学习和终身学习的意识和不断学习适应社会发展的能力。

本课程以教师讲授和学生自学并重，采取互动式教学方式，教学相长，为学生从事专业工作或科学研究等打下良好的基础。

三、教学内容简介

本课程全面介绍新能源热利用与热发电的原理、技术及工程基础知识。原理部分重点介绍热能转换与利用的基本原理、太阳能、地热能等低品位热能利用的基本知识，包括热发电循环、热电厂系统与设备、太阳几何学、辐射学、光学设计基础及太阳能集热器等；技术部分主要介绍太阳能光热转换技术、高温热动力循环发电技术，热管、热泵、吸收式、吸附式制冷及低温余热发电等低品位热能转换技术等；工程方面则重点介绍太阳能热利用与热动力发电工程、地热能热利用与热动力发电工程的设计与分析方法。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 章节顺序 | 章节名称 | 知识点 | Key Points | 参考学时 |
| 1 | 可再生能源多能互补系统(HRES)简介 | 1.1 可再生能源多能互补系统(HRES)简介：可再生能源多能互补系统(HRES)的概念、组成、特点，HRES的节能性，典型的HRES形式，HRES发展现状与趋势 |  | 1 |
| 2 | 可再生能源多能互补系统(HRES)简介 | 1.2可再生能源多能互补系统(HRES)中的优化问题：典型HRES中的优化问题介绍，HRES优化问题分类 |  | 1 |
| 3 | 基于组件的建模方法 | 2.1基于组件的建模方法：主要电力器件建模方法；用户热电负荷建模方法；太阳能光伏发电系统建模方法等 |  | 1 |
| 4 | 基于组件的建模方法 | 2.2基于组件的仿真及其工具：Trnsys瞬态模拟软件，Modelica建模仿真软件，主要功能模块，能源相关library介绍，Energyplus建筑能耗模拟软件，主要功能模块，建筑能耗模拟方法 |  | 3 |
| 5 | 优化问题与求解方法 | 3.1混合整数非线性规划：HRES优化问题抽象，传统MINLP算法 |  | 2 |
| 6 | 优化问题与求解方法 | 3.2智能优化算法介绍:元启发优化算法（群智能优化方法，进化算法等） |  | 4 |
| 7 | 典型案例分析 | 4.1 典型案例分析：典型可再生多能互补系统优化问题仿真案例，典型风-光-储系统优化建模仿真过程实施与分析；基于组件的建模仿真，基于仿真的优化，基于模型的预测控制等 |  | 2 |
| 8 | 多能互补与智慧能源 | 5.1多能互补与智慧能源：智慧能源系统概念，关键技术，重点领域与发展趋势 |  | 2 |

四、教学安排详表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 章节 | 教学内容 | 学时分配 | 教学方式 （授课、实验、上机、讨论） | 课后环节（作业、自学、综合、其他） | 教学要求  （知识要求及能力要求） | 对课程目标的支撑关系 |
| 第一章 | 1.1 | 多能互补简介 | 1 | 授课 | 自学 | 了解多能互补系统概念及其优化问题 | 课程目标1 |
| 1.2 | 多能互补优化问题 | 1 | 授课 | 自学 |
| 第二章 | 2.1 | 基于组件的建模方法 | 1 | 授课 | 自学 | 了解基于组件的建模方法，掌握一种典型的建模仿真工具 | 课程目标2 |
| 2.2 | 基于组件的仿真及其工具 | 3 | 授课 | 自学、作业 |
| 第三章 | 3.1 | 混合整数非线性规划 | 2 | 授课 | 自学 | 了解可再生能源系统优化中的混合整数非线性优化问题、求解方法，尤其是进化算法类的智能优化算法 | 课程目标3 |
| 3.2 | 智能优化算法介绍 | 4 | 授课 | 自学、作业 |
| 第四章 | 4.1 | 典型案例分析 | 2 | 授课 | 自学、作业 | 了解典型可再生多能互补系统优化问题建模仿真优化全栈流程 | 课程目标3 |
| 第五章 | 5.1 | 多能互补与智慧能源 | 2 | 授课 | 自学 | 了解智慧能源系统概念，关键技术，重点领域与发展趋势 | 课程目标4 |

注：对课程目标的支撑关系可填写大纲中第二部分课程目标的相应序号

五、实践环节

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验编号 | 实验名称 | 实验内容 | 教学方法 | 对课程目标的支撑关系 |
| 无 |  |  |  |  |

注：对课程目标的支撑关系可填写大纲中第二部分课程目标的相应序号

六、课外学时分配

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 章节顺序 | 内容 | 参考学时 | 对课程目标的支撑关系 |
| 1 | 学习太阳能光伏发电、风力发电和常用储能方法的基本原理 | 2 | 课程目标1 |
| 2 | 可再生能源多能互补系统(HRES)优化建模相关综述文献阅读 | 2 | 课程目标1 |
| 3 | 学习HRES系统优化建模的常用工具软件 | 2 | 课程目标2 |
| 4 | 学习Modelica软件的构架及基本功能 | 2 | 课程目标2 |
| 5 | 学习Energyplus软件的构架及基本功能 | 2 | 课程目标2 |
| 6 | 学习混合整数非线性优化软件包，粒子群等进化优化方法的基本原理 | 2 | 课程目标3 |
| 7 | 学习HRES系统“基于仿真的优化”建模-仿真-优化流程 | 2 | 课程目标3 |
| 8 | 了解智慧能源的一般内涵、发展水平和发展趋势 | 2 | 课程目标4 |

注：对课程目标的支撑关系可填写大纲中第二部分课程目标的相应序号

七、考核方式及成绩构成

平时测验成绩占 0 %，平时作业占 40 %；实验（上机）成绩占 0 %；平时表现占 0 %，期中考试成绩占 0 %，期末考试成绩占 60 %。

大纲制定者：李明涛

大纲审核者：赵亮

最后修订时间： 2019 年 3 月 20 日

“新能源热利用与热发电原理及系统”课程简介

**课程编码：**ENPO420203

**学分**：2.5

**学时**：42 （理论学时：38 实验学时：4 上机学时：0 课外学时： 0（课外学时不计入总学时））

**课程内容简介**（200字以内，含实验内容）

本课程全面介绍新能源热利用与热发电的原理、技术及工程基础知识。原理部分介绍热能尤其是太阳能、地热能等低品位热能转换与利用的基本原理，包括热发电循环、热电厂系统与设备、太阳几何学、辐射学、聚光原理等；技术部分主要介绍太阳能光热转换技术、热动力循环发电技术、热泵、吸收式、吸附式制冷及低温余热发电等；工程方面则重点介绍太阳能热利用与热动力发电工程、地热能热利用与热动力发电工程的设计与分析方法。

**课外实践内容**（100字以内,无此项内容的课程不填）

无。

**先修课**（最低要求）：

大学物理，工程热力学，流体力学，传热学

**课程水平：**（适合年级）新能源科学与工程专业大三本科生

教学手段：多媒体授课

参考书目：

[1] John A. Duffie, William A. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes (4rd Edition). Hoboken, New Jersey: Wiley, 2013.

[2] 何梓年. 太阳能热利用. 合肥：中国科学技术大学出版社, 2009。

[3] 刘鉴民. 太阳能利用-原理.技术.工程. 北京: 电子工业出版社, 2010。

[4] 黄素逸, 黄树红. 太阳能热发电原理及技术. 北京: 中国电力出版社, 2012。

[5] 黄湘. 太阳能热发电技术. 北京: 中国电力出版社, 2013。

[6] 薛德千. 太阳能制冷技术. 北京: 化学工业出版社, 2006。

[7] 汪集旸等. 地热利用技术. 北京: 化学工业出版社, 2005。

[8] 蔡义汉. 地热直接利用技术. 天津：天津大学出版社,2004。

[9] 张军,孟祥睿，马新灵. 低品位热能利用技术. 北京: 化学工业出版社, 2012。

[10] 姚兴佳. 可再生能源及其发电技术. 北京: 科学出版社，2010。

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 课程组负责人 | 赵亮 | | 职 称 | 教授 | 学 科 | 动力工程及工程热物理 |
| 单 位 | 能动学院 | | 联系电话 |  | E-mail | lzhao@ mail.xjtu.edu.cn |
| 任课教师 | 职称 | 学 科 | | | 单 位 | |
| 赵 亮 | 教授 | 动力工程及工程热物理 | | | 能动学院 | |
| 王跃社 | 教授 | 动力工程及工程热物理 | | | 能动学院 | |
| 李明涛 | 副教授 | 动力工程及工程热物理 | | | 能动学院 | |

智慧能源系统调研报告

（人工智能及大数据在能源领域的应用）（题目待定）

李明涛 研究组

[mingtao@xjtu.edu.cn](mailto:mingtao@xjtu.edu.cn)

西安交通大学

动力工程多相流国家重点实验室

目录

[引言 3](#_Toc525922885)

[智慧能源与能源系统优化 3](#_Toc525922886)

[大数据 3](#_Toc525922887)

[人工智能（机器学习、数据挖掘） 3](#_Toc525922888)

[运筹学方法（MINLP等） 3](#_Toc525922889)

[群体智能算法 3](#_Toc525922890)

[能源系统优化的应用领域 3](#_Toc525922891)

[多能互补系统 3](#_Toc525922892)

[天然气管网运行优化 3](#_Toc525922893)

[建筑能源管理系统 3](#_Toc525922894)

[供热管网系统 3](#_Toc525922895)

[城市能源系统 3](#_Toc525922896)

[研究人员 3](#_Toc525922897)

[组内 3](#_Toc525922898)

[组外拟合作 4](#_Toc525922899)

[相关行业学会 5](#_Toc525922900)

[运筹学会 唐立新 5](#_Toc525922901)

[能源方面呢？ 5](#_Toc525922902)

[自然科学基金代码 5](#_Toc525922903)

[存在的问题与可能突破的方向 5](#_Toc525922904)

[行业主要厂商（需求方，供应方，可能的合作方）上下游生态 5](#_Toc525922905)

[风能类公司 5](#_Toc525922906)

[光伏系统公司 5](#_Toc525922907)

[太阳能热发电公司 5](#_Toc525922908)

[储能公司 5](#_Toc525922909)

[多能互补系统公司 5](#_Toc525922910)

[电力系统公司 5](#_Toc525922911)

[天然气管道系统运行公司 5](#_Toc525922912)

[能源优化管理公司（解决方案提供方） 5](#_Toc525922913)

[优化软件、机器学习、大数据相关解决方案供应商 6](#_Toc525922914)

[国外主要研究机构 6](#_Toc525922915)

[国内主要研究机构 6](#_Toc525922916)

[相关标准汇编 6](#_Toc525922917)

[相关软件汇编 6](#_Toc525922918)

[相关评价标准汇编 6](#_Toc525922919)

[相关书籍 6](#_Toc525922920)

[相关博士论文 6](#_Toc525922921)

[关键词 6](#_Toc525922922)

[涉及到的领域 7](#_Toc525922923)

[太阳能光伏系统 7](#_Toc525922924)

[风能系统 7](#_Toc525922925)

[太阳能热发电系统 7](#_Toc525922926)

[储能系统 7](#_Toc525922927)

[混合能源系统 7](#_Toc525922928)

[热网系统 7](#_Toc525922929)

[水网系统 7](#_Toc525922930)

[气网系统 7](#_Toc525922931)

[（能源互联网）电能路由器 7](#_Toc525922932)

[新能源并网 7](#_Toc525922933)

[气象数据 7](#_Toc525922934)

[预测方法 7](#_Toc525922935)

[可靠性 7](#_Toc525922936)

[评价方法 7](#_Toc525922937)

[调度优化 8](#_Toc525922938)

[网页资料参考 8](#_Toc525922939)

# 引言

# 智慧能源与能源系统优化

## 大数据

## 人工智能（机器学习、数据挖掘）

## 运筹学方法（MINLP等）

## 群体智能算法

# 能源系统优化的应用领域

## 多能互补系统

## 天然气管网运行优化

## 建筑能源管理系统

## 供热管网系统

## 城市能源系统

# 研究人员

组内

李明涛，刘亚，余佳磊，张晓海，汪龙，陈庚

## 组外拟合作

胡伟飞，浙大机械

杨树森，交大数学

## 相关行业学会

### 运筹学会 唐立新

### 能源方面呢？

## 自然科学基金代码

# 存在的问题与可能突破的方向

# 行业主要厂商（需求方，供应方，可能的合作方）上下游生态

## 风能类公司

## 光伏系统公司

## 太阳能热发电公司

## 储能公司

## 多能互补系统公司

## 电力系统公司

## 天然气管道系统运行公司

## 能源优化管理公司（解决方案提供方）

## 优化软件、机器学习、大数据相关解决方案供应商

# 国外主要研究机构

# 国内主要研究机构

# 相关标准汇编

# 相关软件汇编

规划类软件，MINLP，

系统模拟类软件，modelica，trnsys

Cfd软件

Fem软件

# 相关评价标准汇编

# 相关书籍

# 相关博士论文

# 关键词

多能互补，hybrid energy system,Multi-Energy system，decentralized energy systems，district energy system，hybrid renewable energy systems，machine learning, Polygeneration Energy Systems

# 网页资料参考

<http://www.zib.de/optimization/energy>

<https://www.plan4res.eu>

多能互补示范项目<http://www.nea.gov.cn/2016-12/26/c_135933772.htm>

首批多能互补集成优化示范工程评选结果公示

<https://blog.csiro.au/energy-pick-n-mix-hybrid-systems-next-big-thing/>

<https://www.th-energy.net/english/platform-renewable-energy-and-mining/database-solar-wind-power-plants/>

<https://link.springer.com/article/10.1007/s12351-017-0348-z>

<https://www.techemergence.com/artificial-intelligence-for-energy-efficiency-and-renewable-energy/>

<http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/ibrahima2/>

<https://medium.com/wepower/artificial-intelligence-and-the-future-of-energy-105ac6053de4>

<https://www.findaphd.com/search/projectdetails.aspx?PJID=77134>

<https://www.findaphd.com/search/projectdetails.aspx?PJID=94466>

<https://dzone.com/articles/top-4-machine-learning-use>

<https://www.hindawi.com/journals/ijp/2017/4194251/>

<http://fortune.com/2016/09/14/data-machine-learning-solar/>

<https://internetofthingsagenda.techtarget.com/blog/IoT-Agenda/How-machine-learning-improves-energy-consumption>

<https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v90y2018icp728-741.html>

<https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-10422-5_29>

<https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3120614>

<https://www.amazon.com/Artificial-Intelligence-Energy-Renewable-Systems/dp/1600212611>

<https://pratt.duke.edu/about/news/gdbx-finalist>

<https://www.igi-global.com/chapter/application-of-data-mining-and-analysis-techniques-for-renewable-energy-network-design-and-optimization/109974>

<https://medium.com/savera-ai/machine-learning-bringing-a-new-era-in-the-energy-sector-distributed-abundant-and-a-clean-world-cf06365c29ff>

<https://www.engerati.com/energy-management/article/energy-efficiency/machine-learning-iot-and-big-data-energy-efficiency-use>

<https://www.softwebsolutions.com/resources/saving-energy-using-big-data-and-machine-learning.html>

<https://www.cbinsights.com/research/artificial-intelligence-energy-industry/>

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7424481>

<https://www.ibm.com/blogs/research/2018/07/reduce-energy-cooling/>

<https://www.datascienceweekly.org/data-scientist-interviews/machine-learning-energy-efficiency-optimum-energy-data-guild-interview>

<https://blog.goodaudience.com/applying-machine-learning-to-energy-demand-and-distribution-optimization-in-kaduna-electric-8fba4bafc222>

<https://c3iot.ai/products/c3-iot-applications/energy-management/>

<https://www.wiley.com/en-us/Data+Mining+and+Machine+Learning+in+Building+Energy+Analysis-p-9781848214224>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917313429>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815027988>

<http://cs109-energy.github.io/>

<https://www.oreilly.com/library/view/data-mining-and/9781848214224/c04.xhtml>

<https://asu.pure.elsevier.com/en/publications/machine-learning-approaches-for-estimating-commercial-building-en>

<https://opus4.kobv.de/opus4-ohm/frontdoor/index/index/docId/252>

<https://ieeexplore.ieee.org/document/5542881>

<https://ieeexplore.ieee.org/document/1709356>

<https://www.intechopen.com/books/knowledge-oriented-applications-in-data-mining/data-mining-method-for-energy-system-aplications>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116308862>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670715001067>

<https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-88965-6_8>

<https://www.minlp.org/library/instances.php>

<http://newton.cheme.cmu.edu/interfaces/>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217318352>

<http://www.or.rwth-aachen.de/minomese2015>

<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01562152>

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aic.15332>

<http://energyresources.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1790726>

<http://www.inderscience.com/info/inarticle.php?artid=68436>

<http://nrl.northumbria.ac.uk/33720/>

<https://yoric.mit.edu/optimal-design-and-operation-energy-systems-under-uncertainty>

<https://crei.skoltech.ru/energysystems/publications-2/>

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/40/1/012026>

<https://www.mpi-magdeburg.mpg.de/2869665/minlp_damping>

<https://www.math.hu-berlin.de/~eopt/index_en.html>

天然气管网优化调研

1. 天然气管网优化背景

1.1我国天然气市场、行业现状及趋势

随着社会的发展进步人们对于清洁能源的需求日益增加了，而天然气是一种安全，高热值的清洁气体，这也就使其需求量得到不断增长。需求量增加的同时也带来了一些问题，首先我国天然气分布主要集中在中西部地区，但需求较大的地区却在东部。其次，通过调研我们发现我国天然气消费量在2013年就达到了1676亿立方米，而天然气的对外依存度也首次突破了30%。我国天然气消费量于2014年达到了1930亿立方米，同比增长了14.5%。我国跃居为全球第三大天然气国，而且我国的天然气对外依存度还在不断上升，进口气仍是满足需求的重要途径。由于我国天然气资源及消费分布不均，天然气管道输送成为解决区域用气不平衡的主要措施。管道系统运输天然气安全、可靠、高效的优点使其已经成为了运输天然气的主流方式。四通八达的天然气管道是使天然气得到更好利用的必要条件。

早在2004年，我国油气管道总里程还不到3万公里，远低于世界发达国家。但经过数十年的发展，截至2016年底我国已建成油气管道11.64万千米，其中天然气管道就有6.8万千米，覆盖全国的油气管网已经初步形成。“海气登陆、西气东输、就近外供”的供气格局也随之形成。

根据我国规划，四大油气进口战略通道建设将进一步加速，以应对海上油气运输可能出现的一些突发状况。中亚天然气管道二期与中哈原油管道二期正在建设当中，同时中俄天然气管道也正在规划当中；而在国内也即将建设大量管网系统，就比如西气东输、陕京线、川气东送、西气东输三线以及四线等。国家发改委、国家能源部于2017年7月12日发布的《中长期油气管网规划》中提到，到2020年为止，我国油气管网规模有希望达到16.8万千米；而到2025年时，我国油气管网规模有希望达到24万千米。

天然气具有较高的燃烧值，使用天然气的优势显著—绿色环保：天然气中几乎不含硫、粉尘及其他有害物质，对环境的污染比煤和石油小得多，其燃烧产生的温室气体极少。相对热值、效率高：与煤炭和石油相比，天然气单位热值为8000-10000 大卡，远高于煤炭；并且天然气的热效率可达70%以上，不仅高于煤炭的40%-60%，而且也高于石油的65%左右。天然气利用领域非常广泛，全球致力于环境治理是引发天然气需求增长的最大驱动力。除了能用于炊事外，广泛作为发电、石油化工、机械制造、玻璃陶瓷、汽车、集中空调的燃料或原料，属于全球三大基础能源之一。

全球能源图景中，天然气正处于发展的黄金时代，全球能源市场正经历着天然气使用量增加的历史性转变，而这一转变将为经济增长、环境改善创造新的机遇。国际能源署发布的报告在2010 年到2035 年之间，全球天然气需求量将上升50%，能源结构中所占比例将达到1/4。天然气将超过煤炭，成为仅次于石油的第二大一次能源，并且和石油不同的是，天然气税费主要增值税11%，而石油成品油消费税征收经历4次上调，最新高达汽油1.52 元/升，柴油1.2 元/升，其它国家基本上实施类似税收政策，即鼓励天然气抑制石油煤炭。

随着“煤改气”政策的大力推行，以及日益旺盛的采暖需求，各地对天然气的需求大增。2017-2018 冬季，北方煤改气拉动天然气消费量170 亿方，相当于煤改气六省冬季消费量40%。天然气在夏、冬两季的需求差别很大，2017 年的“气荒”就是最好的例证。2017 年，我国进口天然气920 亿立方米，同比增加27.2%，其中，进口LNG 约526 亿方，占当年进口天然气的57.2%；进口管道气约394 亿方，占当年进口天然气的42.8%。根据2017 年7 月发改委印发的《加快推进天然气利用的意见》，到2020 年我国天然气在一次能源消费结构中的占比力争达到10%左右，到2030 年力争将天然气在一次能源消费中的占比提高到15%左右。根据高层重要批示，要求三桶油加大国内油气勘探开发力度。我国油气缺口持续扩大，原油和天然气缺口分别近70%、40%，进口依存度高。加强油气自给能力已经上升至维护国家能源安全的角度。

1.2我国天然气行业管网优化问题

最优化技术指运用数学方法研究各种系统的优化途径及方案，为管理者提供科学决策的依据。最优化技术主要研究对象是各种有组织系统的管理问题及其生产经营活动，随着科学技术的日益进步和生产经营的发展，最优化技术已成为现代管理科学的重要理论基础和不可缺少的方法。现代国民经济或部门经济的计划，直至企业的发展规划和年度生产计划，尤其是农业规划、种植计划、能源规划和其他资源、环境和生态规划的制定，都开始应用最优化方法，其中一个重要的发展趋势是帮助管理人员进行各种优化决策。最优化技术运用得当，不仅能够得到满足需求目标的最优结果，对生产进行指导；还能够有效的降低人工成本，提高工作效率。采用最优化技术求解问题步骤如下：分析生产需求，提出最优化问题；建立数学模型，确定决策变量，列出约束条件及目标函数；分析模型，根据模型类型选择合适的最优化方法；模型求解，由于优化问题一般计算量较大，一般采用计算机编制程序求解；最优解的检验和实施，验证结果的最优性以及在实际问题中的合理性，以此为依据对数学模型进行调整。

安全和高效是管道运行中两大主题，在天然气管道运行管理中，管道水力热力计算校核、压气站负荷分配、单条输气管道运行方案优化、复杂输气管网运行方案优化等问题可以采用最优化技术解决。

天然气管网动态优化就是根据实际工况使管道在能耗最低的情况下，安全可靠地完成天然气输送和供应。天然气管网动态优化技术发展趋势很好，但由于技术本身牵扯问题比较多、比较复杂，国内外正试图寻找最优模型、方法等解决实际问题。管网仿真技术、最优化技术、稳态优化及动态优化在天然气管输中越来越广泛，天然气管网优化运行的目的是为了寻求最优的理论，然后将其运用到现场实际中去，最终降低生产成本获得一定的经济效益。

目前，我国天然气管道业务进入了快速发展阶段，“横跨东西、纵贯南北、联通海外”的全国性供气格局已经形成。2016年天然气在我国一次能源消费占比仅为6%左右，未来还有巨大的发展空间。面对大规模天然气管网的运行与管理，我国的优化运行经验却几乎为零。虽然欧美发达国家天然气管网规模巨大且运行经验丰富，但由于其管网普遍由众多管道企业组成，单个企业的管理规模有限，而且国外管道企业普遍实行运销分离，业务相对单一，因此国外管网运行管理经验的借鉴价值有限。相比之下，国内天然气管网规模庞大，与上、中、下游各环节联系紧密，管输业务涉及面广，管理难度巨大。因此，管道运营企业普遍缺少必要手段，从业务、时间和空间等多个层面对天然气管网运行进行有效管理。

天然气管网的运输销售规划（简称运销规划）主要是对天然气的宏观流向、流量进行整体规划，以指导天然气管网的实际运营。运销规划的优化工作通过采用经济学模型计算管道输送边际成本和输量的关系曲线，将管道压力、温度等工艺条件简化为约束条件，优化天然气管网的资源和市场配置方式，提出中、远期分年和近期分月的资源配置方案、市场销售方案及系统平衡方案，达到优化管网运行，提高整体效益的目的。因此，运销规划优化在天然气管网的运营管理中起着重要的作用。

目前，我国天然气运销规划工作仍主要停留在人工计算阶段。随着管网供气资源不断开拓，管道和储气库等配套设施逐渐增多，下游用户不断发展，人工进行优化计算的难度越来越大，不仅工作量大，而且效率较低。国外已经开始采用信息化手段解决天然气运销问题，如，巴西国家石油公司利用自主开发的优化软件 OLGA（全动态多相流模拟计算软件）来指导制定售气计划；IHS ENERGY（IHS 能源咨询公司）在天然气战略研究层面开发了一种涉及产运销三方面的数学模型，并编制了相应软件。但是，这些国外软件均不适用于我国天然气管网规模大、复杂，以及不同季节调峰需求量大的实际情况。因此，有必要研究一套适合我国天然气管网的信息化软件来实现天然气运销规划，使规划工作更加准确和高效。

中国天然气管网优化研究始于20世纪80年代。从管道到管网系统，研究人员通过改进数学模型和求解方法取得了较好的结果。迄今为止，已有大量的学者对管网优化进行了深入研究，并开发了一系列优化软件。然而，进入 2014 年以来，中国经济结构调整对天然气销售影响凸显，“十三五”期间天然气资源供应会更加多元和宽松，市场竞争将会更加激烈。预计我国天然气管道在一定时间内将面临低输量、低效益的局面，因此，降本增效、优化运行已成为重点工作目标。

按照国家于2014 年2 月13日下发并正式施行的《油气管网设施公平开放监管办法（试行）》，核心要点是作为油气管网运营企业的“三桶油”，尤其是中石油，应按照要求无歧视对第三方开放使用其油气管网设施输送、储存、气化、液化和压缩等相关服务。实现“厂网分开”，油气管道网络从油气生产环节中独立是油气体制改革的重点内容。根据油气管道改革方案，油气管道网络将独立于生产环节运营，并接受国家能源局的成本监督，油气管道网络作为接受国家监管的、对社会开放容量、输送能力。独立的管网运营将更多地集中力量进行管网优化建设，这将使我国天然气管网优化研究得到更多的发展机遇和资本支持。

另外管网等设施的第三方准入还是相对比较核心的问题，主要是基于一个庞大的，公用的，向任何第三方开放的管网系统，卖方在管网里面按热值方式把气输入进去销售了，买方直接从管网里面接收，按照热值计算，不存在一个复杂的点对点的问题，管道独立化已经启动。中国天然气管道里程约为9万公里，而美国的这一数据则为中国的7 倍，差距巨大。2014 年6 月国务院印发的《能源发展战略行动计划（2014-2020 年）》提出，到2020 年，主干管道里程要达到12万公里以上。其中提到，改革油气管网运营机制，提升集约输送和公平服务能力；分步推进国有大型油气企业干线管道独立，实现管输和销售分开；完善油气管网公平接入机制，油气干线管道、省内和省际管网均向第三方市场主体公平开放。根据发展规划中提到的第三方管网准入趋势，这意味着将来我国的管道系统将在主要输送干线外接入更多第三方售气管道，管网系统将更为复杂，这也为管网优化工作高效安全、经济稳定的运行目标提出更高要求以及更大的挑战。例如，在包括美国，加拿大和巴西在内的几个国家，管道系统完全私有化，即它们是私人公司所有并因此独立运营。由于80年代开始放松管制，这些管道公司不再是运输天然气的主要所有者。他们只负责运输阶段，并专注于燃气系统的有效可操作性。

根据多项研究中反复出现的结果，在可预见的未来，天然气消费，生产，储量和依赖性将继续稳步增长。这种日益增长的期望可能意味着需要更复杂的优化方法，能够在国家和国际领域处理更大和更复杂的项目。

1.3天然气管网优化重要性

国民经济综合运输的关键一环就是管道运输，同时它也是判断我国运输业与能源业发达与否的重要特征。随着我国的发展，天然气管网会越来越发达，而在天然气管道运输过程中又伴随着各类损失如：管道摩擦损失、沿途控制元件损失、转弯损失、温度变化损失等，这些损失使天然气运输成本大大上升并且会使输送量有所下降。故需要可靠高效的优化算法对管网各类未知参数如管径、站间距、进出站压力、压比进行优选以使管网输气能力提高、使用寿命增长、内部损耗降低。

在天然气管网的优化当中有一个重要的前提就是安全问题，如何既保障了输气管道的输气量又保障了用户们的用气安全是优化管网的基础，整个管网想要最大限度发挥输送能力就必须使其安全性得到足够的保障。

天然气从生产地区到消费地区的高效和有效运输需要广泛而精细的运输系统。这种系统由复杂的网络组成，包括管道，压缩机站，调节器，阀门，城门等。在许多情况下，从特定井产生的天然气必须行进很长距离才能到达其使用点，这可能意味着更大和更具挑战性的管道系统。其次天然气管网的发展趋向于多气源、多用户、大网络化。传统的优化方法已经不适用了，所以我国企业拥有并应用天然气管网优化运行技术不但可以拥有高技术自主知识产权，而且还可以运用到我国管网系统中，保证其安全、平稳、高效、运行。如此一来将产生巨大的社会效益与经济效益。

首先天然气管网优化是一项系统的工程，各种优化问题是相互渗透相互制约的。如上文中所提到的管网系统参数优化中的造价是D管径、L长度与壁厚所决定的，但是这三个参数的值又与管段中的各种负荷有关，当负荷没有确定时其参数也就无法确定，则其造价也就无法确定。由此可以看出管网中的布局优化与参数优化是相关的。如果在优化过程中将各个问题分开考虑，分别求其最优值则很难达到全局最优。

其次天然气管网管网优化问题是一类非线性混合整数优化问题。管网系统的设计变量中存在着连续变量、离散变量以及整数变量。而如今大多数的优化方法则是连续变量非线性优化，倘若用这些方法来对天然气管网系统进行优化，则很难达到全局最优。且由于管网优化变量和约束过多，目标函数复杂，故用传统方法优化总会早熟收敛陷入局部最优。所以我们需要一些新型的智能的优化算法。

截至2017年底，中国陆上油气管网总里程已超过13.14×104km ，其中天然气管道里程超过7.26×104km。管网系统内气源用户众多、联络线分布广泛，已形成横贯东西，纵穿南北、覆盖全国、联通海外的大型天然气管网。随着管网规模增大及运行条件复杂程度提高，对管网集中调控提出了更高的要求，单凭调度员经验做出的判断难以全面应对管道运行问题，亟需高效的优化工具辅助制定运行方案及调整日常工况。

另一方面，天然气在输送过程中由压缩机提供动力，据统计，中国天然气管道天热气耗用量占输气量的 15‰以上，而欧洲的平均水平为 3‰左右，中国仍有较大的节能降耗潜力。随着天然气管道系统变得越来越大，越来越复杂，这些设施的最佳运行和规划的重要性也在增加。管道网络的投资成本和运营费用如此之大，即使系统利用率的微小改进也可能涉及大量资金。因此，在社会节能减排、 企业降本增效的大背景下，对天然气管网进行运行管理优化意义重大。

1. 天然气管网优化现状

2.1优化算法简介

优化算法按时间的顺序分，可以分为现代算法与传统算法，每一种算法各有其特点，下面主要的介绍几类具有代表性的算法。

（1）线性逼近法：该方法用于解决线性规划问题即约束条件与目标函数全都是线性函数的优化问题。此算法理论已经十分成熟了。并且，其在单纯形法的提出之后应用领域更加的广泛，包括：物资调运，生产计划任务分派等问题。

而线性逼近法的实现步骤也很简单，其实际上就是从开始就一直进行不断的迭代，一直迭代到满足优化要求的精度为止

在求解非线性的问题时，其基本思想是先将非线性问题先转化为一个个线性问题，再对着一系列的线性问题进行求解。但其有着缺点，就是将非线性问题转化为线性问题，可能会使得求解出来的最优解超出原来的可行域。或者是偏离原来的问题的寻优方向，使解无法达到全局最优。

（2）动态规划法：于1951年由Bellman等提出，用于求解多阶段决策问题。该方法的原理是将一个完整的问题进行分解，分解为若干个子问题，再对这些子问题进行逐一求解，以达到整个决策问题的求解目的，使整个问题达到最佳运行效果。动态规划被用来解决多阶段决策问题，这一过程包括了五个组成部分：决策、状态、状态转移规律、目标函数以及报酬函数。

动态规划法是用来解决按时间划分的优化问题的，它的优点就是可以得到全局最优解，但其缺点就是当求解问题的维数增加时，问题的解决将会变得十分困难了。

（3）遗传算法：遗传算法是通过研究生物进化机制来提出的，其包括三个步骤：选择、交叉及变异。选择是进行交叉的前提条件，其决定着被选个体产生后代的数量，该步骤分两步进行，先对相关适应度进行计算而后进行父代个体的选择；交叉的主要方法主要包括二进制交叉和实值重组；变异实质上是子代的基因按照小的概率进行扰动所带来的结果

因为遗传算法用了群体搜索的策略以及个体间信息交换，所以遗传算法可以解决传统的算法所无法解决的困难问题。但同时，由于其计算步骤复杂所以计算速度远远慢于动态规划法，而且其耗费了大量时间计算后的结果并不准确通常只是一个近似值。故计算简单的优化问题时很少用到遗传算法，对复杂的问题进行优化时才会用到遗传算法。

（4）模拟退火法：模拟退火法是一种通用的概率演算法，常被用来解决复杂组合问题，它是受到金属退火过程的启发所提出来的。对金属进行加热变成液体，分子做随机运动之后，原来停留在使得内能有局部最小值位置的原子离开原来的位置，随机移动，最终会有极大可能找到比原来能量更低的位置。现如今，模拟退火法已经成为了一种通用的优化算法。,目前其已经应用于许多的工程实际中，如控制工程、生产调度、VLSI、机器学习等领域。

模拟退火法主要分为五个步骤：1）使初始状态随机化，并且设置合理的初温、参数以及退火规律等；2）对个体位置进行随机扰动；3）判断位置更新之后的总内能是否小于原来的内能；4）重复步骤2与步骤3一直到系统状态稳定为止；5）对系统降温，再重复步骤2到步骤4，直到温度达到一定时为止。

（5）群体智能算法：群体智能算法是一类针对模拟自然界生物群体智能行为的算法，其创立于20世纪60年代的仿生学。其中包括有蚁群算法，人工鱼群算法，混合蛙跳算法以及粒子群算法等。

其中粒子群算法是群体智能算法中最先进的算法，它是受到了鸟群的群体活动的启发而提出的。在1987年时，Reynolds等人根据鸟类群体飞行的特点，提出了Bold模型。该模型主要用于模拟鸟群聚集飞行的行为，并且Reynolds等人还用了三个规则作为鸟群中个体的简单行为规则：避免碰撞、速度一致、向中心聚集。之后Kennedy与Eberhart等人又借助了鸟群行为规则和优化问题的求解之前存在的相似性，从而提出了粒子群算法。该算法求解非线性规划问题时搜索的范围宽、适应能力很强、求出的全局最优解也比较可靠，对问题的限制较少，而且计算的速度远优于前文提到的几种算法，。故本文选用粒子群算法进行管网的优化研究。

2.2天然气管网优化研究现状

随着管道互相联通，中国天然气管网实现网络化运行管理。从能耗角度来说，管网系统层级的优化空间要远远大于单条管线的优化空间，运行方案编制也更应着眼于管网系统层面。由于管网系统中存在环状结构，一方面产生了新的环内流量分配问题，增加了决策变量的维度及约束条件的个数；另一方面难以构造出按压气站顺序进行的多阶段决策问题，动态规划法将不能直接应用。因此输气管网最优运行方案的求解相比于单条管道来说增加了难度。

近年来，研究人员尝试采用多种方法求解输气管网运行方案优化问题，如 Carter 等提出了基于DP算法的非序列动态规划法（Non-sequential Dynamic Programming，NDP），通过对管网拓扑结构进行预处理，提前给定管网中各条管道的输量，NDP 算法可以对管网中的节点压力进行优化；Flores 等提出广义简约梯度法（Generalized Reduced Gradient，GRG）优化管网中的节点压力和环内流量分配；Möller对优化问题中的非线性约束进行了区域线性化处理，将原问题近似为混合整数线性规划问题； Cobos-Zaleta[19]采用外逼近法、等式约束松弛和增广罚函数法（Outer Approximation with Equality Relaxation and Augmented Penalty，OA/ER/AP）直接求解原混合整数非线性规划问题。

根据气流如何随时间变化，我们区分稳态和瞬态的系统。当表征系统中的气体流量的值与时间无关时，系统被称为处于稳定状态。在这种情况下，系统约束，特别是描述通过管道的气流的系统约束，可以使用代数非线性方程来描述。相反，瞬态分析需要使用偏微分方程（PDE）来描述这种关系。这使得从优化角度来解决问题变得更加困难。事实上，瞬态模型的优化是最具挑战性的研究领域之一。在瞬态优化的情况下，系统的变量（例如压力和流量）是时间的函数。

稳态模型

基于动态规划的方法

解决MFCP最成功的技术之一是动态规划（DP）。 DP的主要优点之一是可以保证找到全局最优，并且可以轻松处理非线性。直到最近，它的应用实际上仅限于非循环网络，例如线性（也称为枪管）或树状拓扑。众所周知，在DP计算中，时间随着状态变量向量的维数呈指数增长，通常称为维数的诅咒。

用于管道优化的DP最初应用于20世纪60年代后期的枪管系统。由于其计算行为和处理顺序系统非线性的多功能性，它一直是最有用的技术之一。 DP于1968年首次应用于线性系统，由Wong和Larson应用于线性系统，然后应用于Wong和Larson的树状结构拓扑。Lall和Percell在1990年描述了一种类似的方法，他们允许在他们的系统中有一个不同的分支。

1989年，Luongo等人发布了一种分层方法，允许任意复杂性的周期和分支。这代表了在最终解决现实世界管道配置问题方面取得的重大进展。他们的技术不再是纯粹的DP。基本上，DP用于最佳地描述以顺序方式排列的管道部分。这通常将系统简化为更小的组合问题，而没有任何递归DP解决方案的可能性。一个足够小的实例可以通过枚举精确解决；否则使用模拟退火不完全解决。这种分层方法对于某些复杂的流水线非常有效，但对于其他流水线，计算成本非常高。

基于梯度搜索的方法

1987年，Percell和Ryan应用了一种基于广义简化梯度（GRG）非线性优化技术的非循环结构的不同方法。 与DP相比，GRG的一个优点是它们可以相对较好地处理维度问题，因此可以应用于循环结构。 然而，作为基于梯度搜索的方法，不能保证全局最优解。 Villalobos-Morales和Ríos-Mercado评估了GRG的预处理技术，例如缩放，变量边界和起始溶液的选择，从而为循环和非循环结构提供了更好的结果。 Flores-Villarreal和Ríos-Mercado对循环结构上的大量实例进行了GRG方法的广泛计算评估，并取得了相对成功。

几何编程方法

最近，Misra等人提出了一种基于几何规划（GP）的MFCP新方法。 他们证明了对于非循环系统，GP方法将MFCP转化为凸优化问题，从而允许精确有效（多项式时间）解决方案。 与传统的动态规划方法相比，GP方法的显着优点源于不必将节点压力和压缩比变量离散化。 即使在具有高度分支的网络中，GP方法也可以很好地扩展。 他们在比利时的天然气网络和美国的Transco管道网络上测试了他们的方法，表明他们提出的几何编程算法在非循环系统中始终优于DP。

线性化方法

De Wolf和Smeers对问题采取了不同的观点。他们提出了一种基于非线性流压关系的分段线性近似的求解方法。近似问题通过Simplex方法的扩展来解决。解决方法在比利时天然气网络的一个实例中得到了说明，并解决了一些现实案例。他们将他们的方法与其他基于LP的方法进行了比较，称为连续线性规划（SLP）。他们发现他们提出的方法比SLP花费的时间更少。他们还发现，由于该模型通常是非凸的，因此如果限制自己只在本地解决方案或全局程序中的解决方案的上限，则选择起点至关重要。因此，他们设计了一种机制来生成初始解决方案，该解决方案凭经验证明可以将运行时间缩短50％。

Jin和Wojtanowicz提出了一项旨在优化中国大型案例研究的研究。网络的大尺寸和复杂几何形状需要将其分解为更小的组件，优化组件的本地操作，将优化的组件重新组合到网络中并在全球范围内优化网络。这个四步法采用四种不同的优化方法来解决问题：惩罚函数方法，模式搜索，枚举和非顺序动态编程。应用全局优化的结果表明，气体吞吐量的增加大大降低了成本。例如，当将燃气率从67％提高到9000万m3/d时，观察到运营成本节省从23％降低到1.2％。该研究还表明，当压缩机站以最大容量工作时，运行成本接近当前实践中的运行成本。因此，当天然气管道系统以不同于其最大额定值的任何质量流量工作时，全局优化被证明更有效，这是中国天然气网络中当前操作的典型情况。

MINLP模型的方法

Pratt和Wilson提出了一种连续的混合整数线性规划方法。 他们的算法通过线性化压降流量Eq来迭代地解决非线性优化问题，整数变量包含在压缩机单元选择的公式中，并且使用分支和边界来解决问题。

Cobos-Zaleta和Ríos-Mercado提出了一种解决方法，该方法基于具有相等松弛的外近似和用于求解混合整数非线性规划模型的增广惩罚算法OA/ER/AP，其中整数决策变量代表数字包含在每个站内运行的压缩机单元。 它们呈现出令人满意的结果，因为它们能够在许多实例中找到局部最优值。

马丁等人结合二元决策变量来决定是否使用压缩机站内的压缩机单元以及是否打开或关闭阀门。他们描述了一些用于模型非线性的分段线性逼近的技术，从而产生了大的混合整数线性程序。他们研究了连接这些分段线性近似的子多面体，并表明顶点的数量在计算上易于处理，产生精确的分离算法。它们还提供了适合分离算法的分支策略。他们在他们的工业合作伙伴E.​​ON Ruhrgas AG（一家德国天然气公司）提供的三个真实案例中测试了他们的方法。实例的大小范围从11到31个管道和3到15个压缩机站。他们观察到分段线性逼近足够精确以保证全局最优解。

Chebouba等提出了一种用于MFCP的蚁群优化算法（ACO），其具有压缩机站内可变数量的压缩机单元。决策过程的一部分涉及确定每个压缩机中的操作单元的数量。 ACO算法是一种相对较新的进化优化方法，用于解决不同的组合优化问题。他们在Argelia的Hassi R'mell-Arzew真实世界管道网络上测试了他们的方法，包括5个管道，6个节点，5个压缩机站和每个压缩机中的3个单元。他们还建造了三个额外的箱子，最多23个压缩机站，每个压缩机有12个压缩机组。他们将他们的方法与DP实现进行比较。他们的实证研究表明，该方法在非循环系统中具有良好的性能。

Tabkhi等提出了MFCP的计算研究，应用于法国公司Gaz de France的案例研究。作者提出了MINLP模型，其中引入了用于表示管道流动方向的二元变量。他们使用GAMS/SBB求解器求解MINLP模型，该模型调用CONOPT来解决NLP子问题。现实世界的案例有30个管道和6个压缩机站。为了使问题更容易解决问题，作者考虑了几种不同的策略来初始化一些或所有二元变量。他们还报告了敏感性分析，讨论了初始化二元变量的特定策略之一。

Wuet al提出了一种具有压缩机切换约束的混合目标模型，其旨在最大化收益和吞吐量，同时考虑加权值以解决两个优化问题。该模型通过粒子群优化（PSO）算法求解，该算法包括自适应惯性权重调整程序以克服早熟收敛问题。使用市售的模拟软件来提供满足基础模型的初始粒子。作者提出了一个基于中国天然气管道系统的案例研究，该系统具有枪管拓扑结构和四个压缩机站。与PSO算法的其他扩展相比，该算法显示出快速的收敛速度。

瞬态模型

瞬态模型更具挑战性，因为必须考虑与气体系统动力学相关的控制偏微分方程。从描述性的角度来看肯定有一些研究。 在这里，我们调查与瞬态系统优化相关的最重要的工作。

分层控制方法

优化技术也已应用于瞬态（时间相关）模型。例如，Larson和Wismer 提出了一种用于枪管管道系统的瞬态操作的分级控制（HC）方法。 Osiadacz和Bell提出了一种简化的瞬态气体输送网络优化算法，该算法基于HC方法。瞬态模型的HC方法可以在Anglard和David，Osiadacz以及Osiadacz和Swierczewski中找到。就优化压缩机站子问题而言，已经从这些方法报告了一定程度的成功。然而，这些方法在全局优化最低成本方面具有局限性。

从HC的角度来看，解决天然气管道系统中瞬态流动的最重要的早期努力之一是由于Osiadacz 开发了一种基于分层控制和网络分解的算法。使用梯度搜索技术解决了局部问题。使用目标协调方法协调子系统以找到全局最优。他为输出压力作为控制矢量的元素处理的情况制定了离散状态方程。该算法使用英国国家电网的一部分进行测试，该网格包含23个节点，13个管道，3个压缩站，2个存储供电节点和1个源。建立24小时的时间框架，时间离散化步长为2小时。结果有点类似于基于Furey的基于序列二次规划的替代算法所获得的结果。发现的最大差异大约为15％。作者指出，超过24小时的动态实例无法在合理的时间内完全解决。作者总结说，他们提出的基于分解协调的方法适用于并行计算。

数学编程方法

关于天然气管道系统瞬态优化的早期工作归功于Mantri等人他们开发了一种瞬态气体优化模型，可以最大限度地降低天然气运输成本，在这段时间内，由于供需指定的波动，线路包装和吞吐量正在发生变化。其优化引擎的主要组成部分基于GRG方法和动态编程。 Tao和Ti推导出一种在天然气管网中进行瞬态分析的方法。传统上，用于气体管道系统的瞬态分析的控制方程涉及两个偏微分方程，其通常通过复数数值方法求解。作者通过结合电阻和电容来扩展电子模拟方法，这导致了一阶常微分方程和解决瞬态问题的另一种方法。发现所提出的方法比以前的方法更有效。后来Ke和Ti 使用与电气系统相同的类比来开发新模型。经验证据表明，在这种新模型下获得的解决方案与使用以前模型的解决方案兼容。这个新模型更容易处理。Osiadacz和Chaczykowski对天然气管道系统中瞬态流动的等温和非等温模型进行了比较。

Ehrhardt和Steinbach解决了瞬态流水线优化问题。它们提供适当的空间和时间离散化以获得大规模非线性规划问题（NLP）。这个大规模的NLP通过通用NLP代码SNOPT与自动微分附加SnadiOpt相结合来解决。他们在相对较小的网络上测试他们的方法，其中三个压缩站考虑了不同的情况

Aalto 提出了一项关于瞬态条件下天然气管道实时优化的研究。他指出，即使在压缩机站（CS）关闭或启动等大型瞬变中，许多管道系统也只是轻度非线性。定义了一个动态的后退水平优化问题，其中管道的自由响应预测是从管道模拟器获得的，并且获得决策变量的最优值，解决了近似二次规划（QP）问题，其中成本函数是能量消费CS。使用离散决策变量，CS的关闭/启动命令扩展了该问题。定义了混合逻辑动态（MLD）系统，但得到的混合整数QP问题显示为非常高维。相反，定义了一系列QP问题，导致尺寸相当小的优化问题。在模拟环境中测试后退水平优化，并与来自真实天然气管道的数据进行比较，显示压缩机能耗节省5-8％。

Mahlke等提出了瞬态天然气网络优化问题的模拟退火元启发式算法。对于这个瞬态问题，它们呈现出高度复杂的混合整数非线性程序。他们通过将这些约束与适当的惩罚因子结合到目标函数中来放松描述管道中气体动力学的方程式。针对松弛问题开发了合适​​的邻域结构，其中时间步长以及气体的压力和流动是分离的。他们在德国天然气公司E.ON Ruhrgas AG提供的三个真实案例中测试了他们的方法。尺寸范围从11到31个管道和3到15个压缩机站。他们在极具竞争力的运行时间内获得了相当不错的结果。

2.3天然气管网优化研究主要方向

由于复杂输气管网运行优化问题的规模庞大、模型结构复杂，通用的管网优化引擎必须兼顾计算效率 及结果最优性等各方面问题，关键是针对优化问题的特点选择合适的简化方法和优化算法。

燃料成本最小优化MFCP

在气体传输网络中，系统的总体运行成本高度依赖于网络中压缩机站的运行成本。然而，压缩机站的运行成本通常通过压缩机站处消耗的燃料来测量。根据Luongo等人的说法，运行压缩机站的运营成本占公司总运营预算的25％至50％。因此，传输网络的目的是最小化压缩机站的总燃料消耗，同时满足输送终端处的指定输送流速和最小压力要求。

输量分配优化

我国天然气管网路径复杂，分布差异大，并且在未来的发展规划中还将有大量天然气管网投入运营。由于用气存在峰谷差，主要干线输气量对于输送效率至关重要，所以必须对主要的天然气管道干线的输气量根据用气量的实际情况及数据预测作出合理优化分配以提高输送效率，例如中亚天然气管道等大型主线天然气管道的输气量分配优化。

储存节点优化

如果不立即运输天然气，可以在需要时将其放入储存设施。目前，天然气的储存设施主要是地下储气库。地下储气库,就是将天然气重新注入地下可以保存气体的空间而形成的天然气气藏，是集季节调峰、事故应急供气、国家能源战略储备等功能于一身的能源基础性设施。2017 年我国地下储气库有效工作气量接近100亿m3，约占我国天然气消费量4%，远低于世界平均水平10%，距离2020 年、2025年和2030 年的目标缺口分别超过48 亿m3，200 亿m3，250 亿m3。2017 年底的“气荒”引起天然气价格的剧烈波动，充分暴露了国内天然气存储、调峰能力的严重不足的短板，国家层面已经意识到此方面的问题，2018 年来快节奏发布多项政策来刺激天然气储气工程的建设。

随着天然气产业链建设的不断完善，天然气储存节点将在天然气运销和调峰中占据重要角色，同时也将成为天然气管网中的重要一环，在天然气管网优化问题中必须将其纳入考虑范围。天然气储存节点，如地下储气库，一般都配备一定数量维持压力的压缩机，保持天然气干燥的脱水设施等大型工业设备，在日常的运行中将耗费大量能源。根据储气压力、湿度和储气量等条件不同，运行工况不同，所以可以将储气节点纳入管网优化系统中进行最佳储气量与最低能量消耗运行优化，进而节约储气环节的成本。

管存控制

管存是指管道中储存的气体量，是反映管道运行时的气体流速、管道压力、运行站场配置及运行效率的综合指标，亦是控制管道进出气体平衡的一个重要指标。管存变化对天然气管道安全性及能耗影响主要表现为：①在管存超高的情况下，由于管道平均压力较高导致系统运行风险增加；然而相对较高的管道压力可使管道内气体流速降低，进而全线的沿程磨阻降低，可节省能耗。②管存超低的情况下，各压气站入口压力较低，管道末端的压力亦较低，无法满足交气的合同压力；同时较低的管存导致管道平均压力较低，管道内气体流速较高，进而沿程磨阻较高，造成能耗增加。

管存控制是指管存的量和管存位置的控制，为确定合理的天然气管道管存控制范围，中亚天然气管道以全线各压气站和计量站为节点将管段分为若干段，根据站场压力控制值实现每段最优管存量的控制，进而实现全线最优管存量和管存位置的控制。管存量与季节、输气量等有关，全线的管存应如何分布能最大限度的保证运行平稳及能耗优化，则需要制定详细、合理的管存控制原则。

压力控制

压力控制是指利用压缩机组负荷分配系统实现站场压力控制，进而实现管存量和管存位置的控制。每日优化运行小组通过模拟仿真，计算出在当日工况下各站最优压力控制值，并通过调度令下达各合资公司 执行。中亚管道从投产至今，各站使用压缩机组转速控制，而转速控制无法实现全管道系统在稳态运行下的各节点控制，也就无法保证管道处于长期稳定及能耗最优状态，同时管道不稳定工况也会一定程度的造成设备金属疲劳，降低设备寿命。对国际先进的管道公司进行调研发现，已经采取压力控制的调控方式。

1. 粒子群优化算法

3.1粒子群优化算法原理

粒子群算法是Kennedy和Eberhart等人根据鸟群的行为与优化问题之间求解的相似性提出的，在此处称为基本粒子群算法，以便于与后来提出的各算法进行区别。

粒子群算法计算初始时每个粒子都在n维空间中以一定的速度飞行搜索，是粒子i的当前位置，是粒子i的当前飞行速度。是粒子i所经历的最优位置。

将f(X)设为最小化的目标函数，则粒子i当前位置可表示如下：

（3-3）

假设群体中粒子的总数为N，所有粒子经历过的位置中最好的位置为gbest(t)，则：

（3-4）

粒子飞行位置和速度可根据个体和群体的飞行经验进行动态更新，其速度与位置更新方程可以表示如下：

（3-5）

（3-6）

由上文可见有三部分组成了其速度更新公式（3-5），粒子初始的速度是其第一部分；粒子的认知部分是其第二部分，从这一部分可以看出粒子自身的经验思考使得粒子个体有了认知能力，是加速因子，它是用来调节粒子飞向自身最优位置步长的参数；粒子的社会部分是其第三部分，从这一部分可以看出粒子之间可以信息共享和相互作用，而也是加速因子，可以利用它来调节粒子飞向全局最优位置的步长。

在粒子群算法中，全局最优可以看做一个全局吸引点，各个粒子都会向着这个吸引点靠拢；同时，粒子的个体最优可以维持粒子在多个区域搜索，一定程度上克服了早熟收敛而达到局部最优。

1） 基本粒子群算法的计算流程

步骤一：将粒子群个体的速度与位置进行随机初始化，将每个粒子的初始位置设为个体最优位置pbest，将粒子群的最优位置gbest设置为粒子的全局最优位值；

步骤二：根据公式调整当前粒子的位置和速度；

步骤三：将个体更新后的位置与之前最优位置作比较，若相较来说更优则将个体的最优位置更新，否则，维持原值；

步骤四：将群体最优值与每个粒子的个体最优值进行比较，若个体最优值较优则用其替代原先的群体最优值，否则保持不变；

步骤五：检查算法是否达到了终止条件，若已经达到，则终止迭代，否则返回步骤二继续进行计算。

2）基本粒子群算法的参数设置

基本粒子群算法参数包括种群规模N，粒子最大速度加速因子和以及最大迭代次数T

种群规模：即种群中所有粒子的总数，种群规模越大则全局搜索能力越强，但同时其收敛速度也就越慢；

粒子最大速度：为了防止粒子搜索过程中超出约束空间范围，所以要对其最大速度进行限制，使粒子更新速度在[-，]之间，若粒子的速度超过限制范围则令其等于边界值。

加速因子：其代表每个粒子朝向局部最优值和全局最优值方向运动的加速权重，一般使

和相等，取值范围在[0，4]之内。

最大迭代次数：可将算法最大迭代次数作为其终止条件，取值视具体问题而定。

3）算法终止条件

粒子群算法终止条件一般可以设为满足一定的误差准则、达到最大迭代次数等。若终止条件为满足一定的误差准则则需要提前知道所求问题的最优值以及误差允许范围，当粒子群算法所求结果误差在允许范围之内时，可以认为算法已经收敛并且达到了全局最优值，此时使算法终止，否则就继续之前的计算步骤直到达到全局最优值为止。若终止条件选为达到最大迭代次数，则不论最终是否达到了全局最优值，只要达到最大迭代次数就使算法终止。

3.2粒子群优化算法优势

近年来随着国民们对天然气的需求，天然气管道的铺设也越来越多，天然气管网也越来越复杂。这就需要一种求解速度快，结果准确的新算法。而新型智能算法中粒子群算法脱颖而出，其在非线性非线性规划问题的求解上展现出了特有优势，它的搜索范围宽，对问题的限制少，找到最优解的可能性大，并且所得结果准确。

粒子群算法是一种基于计算机科学和群体智能的方法，在大多数的情况下，所有的粒子可能更快的收敛于最优解，适合于求解复杂的大规模的问题，因此粒子群算法为天然气管网优化提供了一种新的求解方法。

粒子群算法在求解多约束多目 标问题方面具有良好的求解性能和鲁棒性，为提高粒子群算法的求解性能，很多学者提出了改进方法，其中Clerc等设置压缩因子用来改进学习因子对算法的影响，Lovbjerg等将遗传算法的群体概念运用到粒子群算法，并提出子种群概念，Frans等提出协同粒子群优化算法，刘卓倩等提出三群协同粒子群算法，Liu等提出混沌粒子群算法。

1. 运用实例

对粒子群算法进行变异改进后应用于管网算例。

# 综合能源服务发展背景

## 综合能源服务的基本内涵

### 基本概念

综合能源服务是一种新型的为满足终端客户多元化能源生产与消费的能源服务方式，涵盖能源规划设计、工程投资建设、多能源运营服务以及投融资服务等方面。具体而言，即在传统综合供能（电、气、热（冷）、水）基础上，整合可再生能源、氢能、储能设施及电气化交通等，通过天然气冷热电联供、分布式能源和能源智能微网等方式，结合大数据、云计算、物联网等技术，实现多能协同供应和能源综合梯级利用，从而提高能源系统效率，改善终端用户能源服务质量，降低用能成本的一种新型能源服务模式。

### 基本特征

综合能源服务本质上是由绿色发展、新能源技术与电子信息技术革命引发的能源产业结构重塑，从而推动的新兴业态、商业模式、服务方式不断创新，其具有综合、互联、共享、高效、友好的特点。

（1）综合是指能源供给品种、服务方式、定制解决方案等的综合化；

（2）互联是指同类能源互联、不同能源互联以及信息互联；

（3）共享是指通过互联网平台实现能源流、信息流、价值流的交换与互动；

（4）高效是指通过系统优化配置实现能源高效利用；

（5）友好是指不同供能方式之间、能源供应与用户之间友好互动。

我国的综合能源服务将依托以电力为中心的能源互联网展开，是泛在电力物联网的重要实施载体。

### 服务模式

综合能源服务意味着能源行业从产业链纵向延伸走向横向互联，从以产品为中心的服务模式转向以客户为中心的服务模式，这也是能源行业供给端结构性改革的本质要求。

从产业链角度可将综合能源服务大致分为四类：

（1）供给端延伸型的综合能源服务；

（2）网络传输端升级型的综合能源服务；

（3）用户端衍生型的综合能源服务；

（4）技术、装备渗透型的综合能源服务。

### 与传统能源服务模式的区别

传统能源服务，多是从产业链上游向下游纵向延伸的合纵模式，而综合能源服务则是围绕客户需求提供一站式服务的连横模式。新模式相对于传统模式的变化主要体现为以下两个方面：

（1）从以产品为中心的服务模式，变为以客户为中心的服务模式；

（2）从基于事物的弱互动服务模式，变为基于关系的强互动服务模式。

### 发展综合能源服务的重要意义

随着我国经济社会持续发展，能源生产和消费模式正在发生重大转变，能源产业肩负着提高能源效率、保障能源安全、促进新能源消纳和推动环境保护等新使命。构建综合能源服务系统的需求十分迫切。其重要意义如下：

（1）有助于打破能源子系统间的壁垒；

（2）有助于解决我国能源发展面临的挑战和难题；

（3）有助于推动我国能源战略转型。

## 技术层面——技术驱动

能源技术的革新为综合能源服务搭建了技术准备平台。机器学习、大数据科学、云平台与计算、分布式能源微网、多能互补系统等新技术概念与技术创新使构建以综合能源为基础，实现智慧应用的新型能源消费市场成为可能。

## 经济层面——万亿级市场

4月9日召开的“三型两网、世界一流”战略下的综合能源服务研讨会表示，保守估计，2020~2025年，我国综合能源服务产业进入快速成长期，市场潜力将0.5~0.6万亿元增长到0.8~1.2万亿元；2035年步入成熟期，市场潜力在1.3~1.8万亿元。

## 政策层面——“十四五”重头戏

为提高环境质量，促进可再生能源消纳，提高能源系统综合效率，国家密集出台了一系列相关支持政策，仅2017年综合能源服务中所有涉及的相关要素基本都已出台了最新政策，做好了政策支持框架布局，包括23个多能互补示范项目、55个能源互联网示范项目、28个新能源微网示范项目、136个生物质热电联产项目、超195个增量配电网试点项目、燃煤耦合生物质发电试点，以及微电网、并网型微电网、电力需求侧管理、储能技术、分布式发电市场化交易等辅助政策，为综合能源服务新业态的发展奠定了良好的政策基础。

在综合能源服务市场刚刚起步的情况下，国家只会加大政策扶持力度，帮助行业健康成长。

## 社会层面——施利于民

综合能源服务涉及能源的供给端、输配端和用户端的重大变革，旨在创新能源体系，提高能源效率，降低环境污染，降低能源成本，不仅为社会提供更高性价比的能源服务，还可为社会创造大量的就业岗位，对改善民生，建设生态文明社会大有脾益。

## 小结

# 国内外行业发展现状及趋势

## 国外发展现状及趋势

综合能源服务最早兴起于国外，经过多年的发展，目前在欧、美、日已成为能源电力企业的主流商业模式，也形成了较为完善的产业链。其产业模式是基于能源互联网+大数据+云计算平台，与用户进行友好互动，为用户提供以多种能源为支撑的，个性化、差异化、定制式的用能服务。

### 欧洲

欧洲是最早提出综合能源系统概念并最早付诸实施的地区，其投入大，发展也最为迅速。早在欧盟第五框架（FP5）中，尽管综合能源系统概念尚未被完整提出，但有关能源协同优化的研究被放在显著位置，在后续第六（FP6）和第七（FP7）框架中，能源协同优化和综合能源系统的相关研究被进一步深化，Microgridsand More Microgrids（FP6）、Trans-European Networks（FP7）、IntelligentEnergy（FP7）等一大批具有国际影响的重要项目相继实施。

根据Utilities UK集团的市场调研，欧洲已经涌现出上千家能源服务公司。对于欧洲很多国家而言，其能源系统间的耦合和互动急剧增强，德国和英国就是典型案例。

1. 德国

德国于2008年在智能电网的基础上选择了6 个试点地区进行为期4 年的E 能源（E-Energy）技术创新促进计划，主要是以信息通信技术为基础，打造新型能源网络，开展了大规模清洁能源消纳、节能、双向互动等方面的示范工作。如哈茨可再生能源示范区项目（regenerative model region Harz，RegMode Harz），对分散风力、太阳能、生物质等可再生能源发电设备和抽水蓄能水电站进行协调，从而使得可再生能源联合循环利用率达到最优。

通过智能区域用能管理系统、智能家居、储能设备、售电网络平台等多种形式开展试点，E-Energy最大负荷和用电量均减少了10%~20%。此外，在E-Energy项目实施以后，德国政府还推进了IRENE、Peer Energy Cloud、ZESMIT和Future Energy Grid等项目。

1. 英国

英国政府和企业长期以来一直致力于建立一个安全和可持续发展的能源系统。除了国家层面的集成电力燃气系统，社区层面的分布式综合能源系统的研究和应用在英国也得到了巨大的支持。例如英国的能源与气候变化部DECC和英国的创新代理机构Innovate UK（以前称为TSB）与企业合作资助了大量区域综合能源系统的研究和应用。2015年4月创新英国在伯明翰成立“能源系统弹射器”（Energy Systems Catapult），每年投入3千万英镑，用于支持英国的企业重点研究和开发综合能源系统。

### 美国

美国各类能源系统间有着较好协调配合，使得其综合能源供应商得到了较好发展，如美国太平洋煤气电力公司、爱迪生电力公司等均属于典型的综合能源供应商。

在技术上， 美国非常注重与综合能源相关理论技术的研发。美国能源部在2001年即提出了综合能源系统（Integrated Energy System，IES）发展计划，目标是提高清洁能源供应与利用比重，进一步提高社会供能系统的可靠性和经济性。2007年美国明确要求社会主要供用能环节必须开展综合能源规划（Integrated Resource Planning，IRP），并在2007~2012财年追加6.5亿美元专项经费支持IRP的研究和实施。

### 日本

日本的能源严重依赖进口，因此日本成为最早开展综合能源系统研究的亚洲国家。2009年9月，日本政府公布了其2020、2030和2050年温室气体的减排目标，并认为构建覆盖全国的综合能源系统，实现能源结构优化和能效提升，同时促进可再生能源规模化开发，是实现这一目标的必由之路。在日本政府的大力推动下，日本主要的能源研究机构都开展了此类研究，并形成了不同的研究方案，如由NEDO于2010年4月发起成立的JSCA（Japan Smart CommunityAlliance），主要致力于智能社区技术的研究与示范。

### 小结

## 国内发展现状及趋势

国内综合能源服务尚处于起步阶段。目前，开展能源服务的企业类型包括售电公司、服务公司和技术公司等。传统能源产业，包括：电网企业、电力企业、油气企业、设备商、ESCO（节能服务公司）、系统集成商以及专业设计院等，都在策划综合能源服务转型。国内典型的综合能源服务供应商，有南方电网旗下的南方电网综合能源有限公司、广东电网综合能源投资有限公司，以及新奥泛能网、协鑫分布式微能源网、远景能源、阿里云新能源等。

### 两大电网公司

新一轮的电力体制改革放开了配售电业务、公益性和调节性以外的发用电计划以及输配以外的竞争性环节电价，重塑了电力市场竞争格局，动摇了电网原有市场垄断地位，倒逼电网公司进行改革。

1. 国家电网公司（国网）

国家电网公司已开展的综合能源服务包括节能和电能替代改造、电力需求响应、智慧车联网、风光储一体化、电动汽车充电桩服务、能效监测与诊断等。公司重点打造的苏州同里综合能源服务中心已开始示范运营。

1. 中国南方电网有限责任公司（南网）

南网旗下南方电网综合能源有限公司于2010年12月成立，公司致力于成为国内领先、国际知名的现代能源综合服务商，目前主营“节能服务、能源综合利用、新能源和可再生能源开发、分布式能源、电动车充换电”等业务。2017年 2月，南网成立广东电网综合能源投资有限公司，增加了综合能源、增量配网建设与投资、分布式能源、电动汽车投资与运营、市场化售电、能效服务等六个新兴业务经营模块。

### 五大发电集团

1. 中国华能集团公司（华能）

华能已从初期的单一燃煤发电模式发展为燃煤、燃气、可再生能源的多元化发电模式，并积极探索新型能源服务模式。华能整合在渝发电企业资源，于2016年8月全资成立华能重庆能源销售有限责任公司，在全市范围多个工业园区开展能源销售及增值服务、配网建设、分布式能源等业务，为用户提供了安全可靠和极具价格优势的电、热、水、冷等综合能源服务。

1. 中国大唐集团公司（大唐）

大唐集团的目标是通过2~3年时间构建适应市场、统一协调、机制灵活、决策高效、体系完整的营销体系，建立“总部宏观指导、省级公司经营决策，基层发售电公司组织实施”的营销管理管控体制。目前大唐集团已经成立了17家区域性的营销公司和三家区域的售电公司，开始向综合能源服务企业挺进。

1. 中国华电集团公司（华电）

华电以供给侧结构性改革为主线，推动公司由生产型向生产服务型转变，并于近日正式发布《中国华电集团有限公司综合能源服务业务行动计划》。这是国内同类型企业首次发布综合能源服务类行动计划，标志着中国华电迈出打造“清洁友好、多能联供、智慧高效”综合能源服务业务的实质性步伐。

1. 国家能源投资集团有限责任公司（国能投）

国家能源投资集团有限责任公司由国电与神华合并重组而成，继承两者特点，形成强强联合、优势互补的煤电联营模式。国能投推动实施区域综合能源一体化方案，实现横向“电热冷气水”能源多品种之间，纵向“源-网-荷-储-用”能源多供应环节之间的生产协同、管廊协同、需求协同以及生产和消费间的互动。

1. 中国电力投资集团公司（国电投）

国家电投正在大力推动综合智慧能源这方面的发展，提出“综合智慧能源服务”模式：提供能源一体化解决方案，针对新建楼宇、园区的电、水、气、热、冷等不同的管道，将不同能源进行有机的合成，使其协同发展。

### 四小豪门

1. 华润电力控股有限公司（华润电力）

综合能源服务是华润集团的新兴战略业务，主要包括：电力销售、配网建设与运营、分布式能源，以及能源互联网引领下的新兴业务。早在2017年，华润电力首个综合能源示范项目福耀智慧能源项目首批18MWp分布式光伏项目便已并网发电。

1. 国投电力控股股份有限公司（国投电力）

国投电力近年来大力发展新能源业务，紧跟光热发电、智能微网、固废发电、储能等前瞻性能源行业的新业务、新业态、新模式，着力打造“水火并举，风光互补”的大型综合能源公司。

1. 国家能源集团国华电力公司（国华电力）

国华电力着力推动由传统能源提供者向综合清洁能源生产专家、综合能源配置专家和综合能源使用专家转变。在分布式能源方面，国华电力积极探索贴近需求侧的综合能源供应商业模式，为用户提供“以分布式能源为主导，多能互补、能源互联网的综合能源一体化解决方案”，构建“源、网、荷、储、控”协调发展、集成互补的综合能源系统。

1. 中国广东核电集团有限公司（中广核）

中广核已在国内多地成立综合能源服务公司，围绕清洁能源开发、建设、生产、供应与利用，提供以掌握核心技术和掌控产业链关键资源为目的的相关工业产品；提供与清洁能源开发、建设、生产与供应相关的专业化服务；提供与能源利用和消费相关的能效服务；提供与清洁能源业务相关的金融、公共事业等综合服务。

### 热力企业

1. 北京京能股份：推进综合能源服务业务发展，目前首个综合能源服务项目已落地。
2. 北京热力集团：为迈向绿色发展，清洁供热进行了各种探索，正在推广的包括：分布式光伏、生活污水余热回收、浅层低温能、冷热联供、无干扰地岩热、谷电蓄热等。
3. 东方能源：构建综合能源发展平台，努力将公司建设成为创新型、清洁型、效益型的一流现代国有综合能源企业。

### 油气企业

1. 中石油：已经进军售电业务，欲开拓综合能源服务。
2. 中石化：推出首座综合供能站融合三大能源零售体系。
3. 中海油：积极布局分布式能源与海上风电，打造新型综合能源基地。
4. 延长石油：明确“提高清洁综合能源和高端石化产品供应能力、建成受人尊敬的创新型现代化国际能源化工公司”的发展目标。
5. 华润燃气：积极推进分布式能源及充电桩等新业务。
6. 北京燃气：着力打造清洁、高效、安全的城市综合能源供应体系，深入推动“多能协同、智能耦合”的能源协作模式。

### 民营企业

1. 新奥：泛能网

新奥的泛能网以及协鑫的分布式微能源网都是属于区域能源互联网形式。新奥将冷热、燃气联系起来，开发冷热电联产项目，目前已形成新奥能源、能源化工、太阳能源、智慧能源、技术工程等相关多元化产业。

1. 协鑫：分布式微能源网

协鑫的分布式微能源网按照“六位一体”模式实施：将天然气热电冷系统、光伏发电、风能发电、储能技术、节能技术、低位热能结合为一体，提供多种能源服务。

1. 远景能源：互联网+能源

远景通过信息化技术包括大数据、云计算和数据挖掘等手段打造“互联网+”新能源发电的模式，积极构筑智慧能源生态，目前已从单一的风机制造商成长为领先的综合能源服务提供商。

1. 阿里云新能源

阿里能源云，是为新能源行业提供丰富的专业化云端业务与技术解决方案，帮助能源运营商、服务商快速搭建标准化或定制化商业平台，实现业务应用的灵活开发与落地，构建能源互联新生态。

### 小结

## 小结

# 综合能源服务框架

综合能源服务依托能源互联网展开，通过泛在电力物联网应用，充分发挥电的枢纽作用，实现多种能源系统的统筹管理和协调优化，推动多能互补，实现能源精细利用，提升社会整体能效。以下从供给端、用户端和输配端对综合能源服务的实施方向进行说明。

## 供给端

### 电力

在新增电力方面，根据目前电网结构分析，2019~2020年每年新增装机将在130~160GW，而火电、水电、核电没有大批量新增装机，加之 “三北”外送通道助力，风电、光电装机空间重新打开。

在电力生产方式上，除去规模化的集中式风电、光电生产，分布式新能源系统也将得到大力支持。此外，在现有电力结构下，实现可再生能源之间和可再生能源与传统能源间的多能互补也是当前供给端改革的重要方向。

因此，可再生能源，尤其是风电、光电的相关产业仍将持续走热。

### 热力

从用能结构上看，2016 年底，供暖能源以燃煤为主（占 83%），天然气、电、地热能、生物质能等合计约占 17%。取暖用煤年消耗约 4 亿吨标煤，其中散煤约 2 亿吨标煤。根据供暖清洁化的发展趋势以及经济性角度考虑，未来一段时间将主要以发展集中供暖为主，分散供暖为辅。

集中供暖清洁化主要包括三个途径：一是通过热电联产等集中供热；二是采用先进燃煤工业锅炉；三是使用天然气、电、生物质、地热等清洁燃料。分散清洁供暖主要包括用先进炉具、电取暖、天然气取暖和热泵等技术。

### 油气

受当前国际形势的影响，国际油价的波动性较大，而全球天然气的供应格局正在重构。2018年，美国成为世界第一大油气生产国，油气出口快速增长，对全球油气市场的影响力明显增强，美国与减产联盟博弈、中美贸易摩擦等将进一步推动国际油气秩序重构。

中国油气行业正进入深化油气体制改革意见的实施阶段，国内油气行业全产业链扩大开放，民营油气企业进一步分化发展迅速崛起；天然气保障能力建设首次提升到国家战略层面，对冬季天然气保供起到关键作用；外资进入步伐明显加快、力度明显加大。未来，化石能源清洁低碳化发展与非化石能源规模化发展将成为能源结构优化的两大驱动力。

### 小结

## 用户端

### 节能改造

随着互联网和大数据技术的发展，企业通过建设能源管理系统来为企业进行能源决策成为了可能。传统的节能改造方式，只解决了“谁”、“做什么”的问题，而“如何做”、“做到什么程度”（运行绩效），主要由任职者主观意愿来决定。通过能源管理系统能将节能效果数字化，有利于节能目标分解落实和考核，大大减少工作中的随意性。这也意味着节能改造的方向将由单一的降低能耗转向能源综合利用的方式。

### 负荷调控

传统能源模式遵循“以需定供”的原则，对供给端的能源稳定性提出极高要求，同时也造成了调峰调负的困难。而随着未来大量可再生能源的渗透，其自身能源特点带来的不稳定性对现有模式造成极大挑战。因此，借鉴国外经验，结合物联网与数据信息技术，在当前电力结构“以需定供”的基础上，发展“以供调需”的灵活模式是解决这一挑战的有力手段，由此引发的新一轮用户端革命将带来广阔的市场机会。

### 智能设备

智能工厂、智能家居和智能楼宇系统是能源互联网的主要末端环节，在能源互联网实践中，需要智能化改造现有的能源设备，使之成为新的互联网入口端，实现对离散化、分布式负载端的动态管理与优化，因而也迫切需要能源互联网对于接口端的标准化。

### 小结

## 输配端

### 虚拟电厂

售电端改革的主要目的是形成市场化多买多卖、供需调节的电力体制，从目前部分地区直购电试点与电力交易平台试点的情况来看，售电端将沿着“点对点”直购电，“点对面”全国统一的竞价交易平台；“全用户、多品种”电力批发市场；“多衍生品”电力金融市场的方向发展。

而基于互联网大数据交互后的电力交易市场，不仅提供交易服务，还提供需求、负荷动态管理，电力期货和金融交易。

### 信息服务与优化调控

供给端与用户端设备的智能化改造将带来海量数据流，在现有水平下，靠单一的中央服务器进行管理调度并非良策，更有效可行的方式是采用分布式管理模式，通过各级子处理中心分担中央平台的压力。由此将带来更多的区域性企业竞争机会，因而发挥行业企业优势，建立企业辖内数据分析与优化调控平台，联合互联网企业与设备商，建立平台和接口标准优势，在“数据”割据局面下得以立足是企业必须考虑的战略行为。

在数据平台基础上，实行高质量的优化调控策略则是提高综合能源系统稳定性和能源效率，获取更大利润的重要保障。

### 充储服务

作为综合能源系统的重要支撑，储能可以起到削峰填谷作用，提高风、光等可再生能源的消纳水平，支撑分布式电源及微网，促进能源生产消费开放共享和灵活交易、实现多能协同。电动汽车具备用电+分布式储能双重身份，是未来能源网络的重要一环。通过能源互联网与可再生能源构互相配合，在光储式充换电站、快速充电站、需求响应充电中发挥储能作用，且动力电池梯次利用将降低储能电池应用成本。目前电动车量较少，对电网冲击有限，随着电动车数量上升，对电网的影响将非常大。

能源充储站的建设以及充储设备的开发是能源互联网的重要落地基础，也是分布式能源系统的基石，未来市场前景广阔，但是当前准入资产门槛较高，

### 小结

* Lider
* Energyplus
* Doe-2
* Designbuider
* Idaes pse
* Genopt
* Sam
* Pyomo

大数据与机器学习于综合能源系统

Plasmo.jl

Ideas

Jump.jl

Blackboxopt.jl

http://archimedes.cheme.cmu.edu/

http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html

https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html

https://neos-server.org/neos/solvers/index.html

https://scip.zib.de/

https://www.minlp.org/

https://www.particleswarm.info/

http://www.minlplib.org/

http://openmdao.org/

http://www.optimization-online.org/

http://apmonitor.com/

http://www.swarmintelligence.org/

http://www.gamsworld.org/

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

http://titan.engr.tamu.edu/

http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634

<https://www.nature.com/articles/s41560-019-0326-1?source=post_page--------------------------->

https://www.nature.com/articles/s41893-019-0352-9

ahttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1004954111600827

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965260700251X

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918316842#s0005

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418312111

http://iiesi.org/who.html

https://science.sciencemag.org/content/360/6396/eaas9793/tab-pdf

http://energyresources.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2698984

https://www.ncl.ac.uk/cesi/research/

https://gow.epsrc.ukri.org/NGBOViewGrant.aspx?GrantRef=EP/P001173/1

https://www.dur.ac.uk/dei/events/?eventno=38992

https://www.dur.ac.uk/dei/projects/cesi/

https://www.birmingham.ac.uk/facilities/esil/index.aspx

https://es.catapult.org.uk/capabilities/systems-integration/

https://gtr.ukri.org/projects?ref=EP%2FP001173%2F1

http://www.sussex.ac.uk/spru/research/projects/cesi

https://www.eera-set.eu/eera-joint-programmes-jps/list-of-jps/energy-systems-integration-2/

https://smartcities-infosystem.eu/energy/energy-system-integration

https://www.eera-set.eu/

https://ec.europa.eu/energy/en/events/energy-storage-service-evolving-energy-systems-and-renewables-integration

https://ec.europa.eu/energy/en/studies/report-first-results-h2020-projects-energy-efficiency-and-system-integration

https://www.eranet-smartenergysystems.eu/Calls/Regsys\_Calls/Focus\_Initiative\_Integrated\_Regional\_Energy\_Systems

https://www.sci.kit.edu/311.php

https://www.itas.kit.edu/english/erts\_current\_poga17\_esi.php

https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-esi.2019.0015

https://www.energy.gov/eere/wind/renewable-systems-integration

https://chinaproject.harvard.edu/event/omalley20171129

https://chinaproject.harvard.edu/renewable-electric-power-and-grid-integration

http://acep.uaf.edu/facilities/power-systems-integration-lab.aspx

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965260700251X

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1004954111600827

http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html

https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html

https://neos-server.org/neos/solvers/index.html

https://scip.zib.de/

https://www.minlp.org/

https://www.particleswarm.info/

http://www.minlplib.org/

http://www.optimization-online.org/

http://apmonitor.com/

http://www.swarmintelligence.org/

http://www.gamsworld.org/

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

http://titan.engr.tamu.edu/

史玉回粒子群算法

# 绪论篇

## 第1章 绪论

伴随着物联网、云平台、大数据、人工智能和移动互联网的发展，在节能、降耗、减排政策要求和集约化、高效管理需求驱动下，传统工业领域数字化、智能化已经成为第四次工业革命的重要方向之一，这也是中国制造2025的主攻方向。眼下，“智慧”产业风潮扑面而来，如智慧城市、智慧能源、智慧医疗、智慧教育、智慧政务、智慧家居、智慧社区、智慧养老、智慧校园、智慧农业……

“数字化”、“智慧化”、“数字孪生”、“新基建”、“新工科”等俨然已成为当下最为流行和时尚的词语。“互联网+”、工业4.0、中国制造2025等，充分说明传统工业领域数字化、智能化已经是第四次工业革命的重要方向之一。

那么，什么是智慧能源呢？你想象中的智慧能源是什么样子的？

事实上，智慧化不是今天才忽然冒出的内容，人们已经在能源系统智慧化方面做出了不懈的努力，并取得了丰硕的成果。另一方面，智慧化仍然是发展中的事物。未来到底怎么样，需要我们去塑造。而这个过程中对其的认识，有如盲人摸象，行动就是了，没有明眼人能够看清全貌，等我们摸得足够多了、互相交流的多了，象是什么样子，慢慢才明晰起来。

但是，我们可以想象，随着物联网、云平台、大数据、人工智能和移动互联网的发展，未来是万物互联、数字孪生、端边云协同的时代。从数字化到智能化是一个过程，而智能化是整个框架的核心。目前，尽管我国一些企业已经在一些领域进行了相关探索和尝试，但从目前建设和应用情况来看，更侧重于智能信息集成展示以及智慧管理等层面。而在生产过程中实现智能化应用的则较少，对节能降耗、提质增效的作用不强，偏离了智能生产的初衷。因此，亟需在数字孪生建模、信息物理融合进行深入探索，在智能决策层构建符合智慧化要求的模型，实现生产过程协同优化和科学决策。

随着世界经济和人口的增长，全球能源消费急剧增长，生态环境也出现加速恶化态势。满足不断增长的能源需求，同时减少温室气体排放，可以说是21世纪工程师、科学家、经济学家和政府人员面临的最大挑战之一。

未来的能源生产、转化和输送系统不仅应该帮助我们满足不断增长的能源需求和经济可行性，也应该（i）减少温室气体排放和环境污染，（ii）增加节约能源，同时减少资源使用，（iii）从基于化石燃料的技术转向更大份额的可再生资源。这些问题普遍存在于各种能源领域，如电力和发电，交通运输，重工业以及住宅和商业。此外，由于所有这些能源系统在某种程度上相互联系，因此一个部门的运营会影响其他部门。过去，这些能源系统中的每一个都由自己的技术团体或政治团体单独处理；然而，由于利用不同能源系统之间的相似性，相互联系和协同作用的可能性增大，整体解决方案策略最近变得越来越流行。

随着集成系统复杂性的增加，传统的能源系统设计方法（例如使用依赖于经验法则的启发法）对决策者来说作用明显变小。虽然启发法与经验结合通常可以得到相当不错的快速解决方案，但其并没有提供提升方案质量的方法。此外，相互冲突的目标或问题中替代方案的比较可能需要随机决策。作为替代方案，专注于达到热力学限制的高效目标方法可以降低能耗，但其大多数时候都忽略了成本。这可能还需要更深入的重复试验和观察。与这两种方法相比，基于数学优化的方法依赖于算法并同时考虑系统中的物理，化学，生物学和经济学，无疑是更有前景的工具，可以帮助决策者为集成系统生成设计和操作策略。先前提到的方法可以找到针对难题的良好解决点且接近最优的解决方案。另一方面，优化方法旨在通过量化解决方案的“最优点”来找到问题的最佳解决方案。在处理具有高自由度的系统时，优化方法会蓬勃发展。由于整合意味着自由度的增加，这为能源系统提供了更大的改进空间。严格的优化方法不依赖于重复试验；相反，它们建立在系统的已有的方案数据库上。

能源系统工程方法旨在提供一个通用框架，以实现复杂的能源和环境问题的现实综合解决方案。能源系统工程以数学优化为核心，对能量系统的设计和运行决策进行系统和定量分析，范围从纳秒级到兆秒级，时间范围从几毫秒到几个月或几年。能源系统工程已成功应用于优化各个领域的设计和运营，如燃料和化学品生产和分销，传统和非常规的石油生产，生物燃料和生物精炼和城市能源系统。

然而能源系统工程覆盖面非常广泛。我们从哪里开始呢？

## 第2章 能源系统工程概述

### 2.1 能源系统工程概述

1最早是仅考虑经济性目标的最优化。

2然后是考虑环境因素之后，带来多目标优化的需求，环境也作为一个目标函数。

3进一步单纯的把环境作为目标考虑，会有问题，因此带来了生命周期分析，结合多目标优化成为全面的多准则分析方法。此外还有不确定性条件下的优化。

4然而以上这些还不够，能源系统还涉及到最优运行。在最优运行的时候，不可避免的要考虑到系统的动态特性。因此产生了仿真的需求。然而仿真模型的校准需要用到最优化思想（参数估计）。并且最优控制也需要用到最优化思想（模型预测控制）。另一方面，仿真也能对故障诊断有帮助。

由此产生了建模、仿真、优化与控制，本书四个方面的主题。

逻辑关系是怎么样的？

### 2.2 建模、仿真、优化与控制的逻辑关系

### 2.3 本书的结构

# 能源系统工程研究

能源系统工程研究

李明涛

电话：15209215157

mingtao@xjtu.edu.cn

## 背景

能源是人类社会发展的重要基础，是世界经济运行的动力。能源科技创新是我国在全球科技竞争中掌握先机、发挥引领作用的重要突破口。《十九大报告》指出，我国能源发展的长期目标是“推进能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效的能源体系”。分析国家能源局《能源技术创新“十三五”规划》和国家发改委《能源技术革命创新行动计划（2016-2030年）》，分析针对不同的能源技术领域的规划，我们可以看出如下几点共性趋势：

利用先进IT技术的数字化趋势

能源互联网（多能互联互通互补）趋势

基于系统工程的智能化趋势（包括设计规划与运行优化）

例如国家能源局在发布的《能源技术创新“十三五”规划》中指出，可再生能源发电与现代电网的融合是世界能源可持续转型的核心，能源互联网和大规模储能技术是世界能源科技创新的主要方向之一，新能源电力系统技术作为我国未来能源技术发展的重要目标之一，重点攻克高比例可再生能源分布式并网和大规模外送技术、大规模供需互动、多能源互补综合利用、分布式供能、智能配电网与微电网等技术。又如国家发改委在《能源技术革命创新行动计划（2016-2030年）》中明确指出能源互联网是一种互联网与能源生产、传输、存储、消费以及能源市场深度融合的能源产业发展新业态。推动能源智能生产技术创新，加强能源智能传输技术创新，促进能源智能消费技术创新，推动智慧能源管理与监管手段创新，加强能源互联网综合集成技术创新，引领世界能源互联网技术创新。还如国家发改委在《能源技术革命创新行动计划（2016-2030年）》中“加强现代化工业节能技术创新”部分，“…基于先进信息技术的工业系统节能等技术并开展工程示范…加强能源梯级利用等全局优化系统节能技术创新…”

能源系统数字化、智能化趋势

随着物联网的兴起，数字化已成为当下各行各业发展的前沿热门之一。数字孪生、智慧电厂、智慧能源、“互联网+”等等耳熟能详，以及工业4.0、中国制造2025等等，充分说明传统工业领域数字化、智能化已经是第四次工业革命的重要方向之一。

能源互联网（多能互联互通互补）趋势

能源互联网力图将新能源技术（包括可再生能源发电和分布式储能）、多能源智能管理技术以及互联网信息技术进行有机整合，促进电力网络、天然气网络、石油网络，热、氢等多种能源网络系统相互融合，推动清洁可再生能源的大规模开发和利用，最终实现能源转型与经济社会的可持续发展。

针对新型能源系统面临的一系列问题，借助信息与通信技术（ICT）构建能源互联网，联接能源需求端和不同类型的能源供给端，形成多能源供求系统，协同运行多种形式能源，发挥不同能源的优势和潜能，有利于实现供需资源的优化配置和可再生能源的最大化利用。

能源互联网是以能量枢纽为节点，信息流为媒介，多能源相贯相通和紧密耦合，达到能源在大范围的优化生产、传输及利用，进而实现能源利用效率的最大化和科学化，能源生产及消费的可持续化和环保化。能源互联网具有以可再生能源为主要一次能源，兼容大规模分布式发电系统和储能系统，充分应用大数据、云计算、物联网、人工智能等先进信息技术等特点，是以电力网为能源转换核心，耦合交通网、电力网、天然气网乃至热网等系统的综合互联庞大复杂网络。

通过建设多能互补的能源互联网，有望从根本上改变人类社会长久以来严重依赖化石能源的传统发展模式。对于当今全球正处于能源互联网的探索阶段，能源互联网的核心技术难题，如运行优化、信息安全、能源转换存储及实时调度等仍是亟待攻关的科学高地。

能源系统设计规划与运行优化趋势

能源互联网核心之一的运行优化问题，主要面临建模方法、数学模型、模型求解方法和通信与数据这四大研究难题。事实上，这些正是能源系统工程的重要内容，本质上是运筹学在能源系统领域的应用，也是从物联网-大数据的必然要求。换言之，只有实现智能化，物联网-大数据的价值才能真正体现。

2 能力建设与业务抓手

2.1 能源系统建模、仿真、优化与控制

站在系统层面角度，针对不同尺度的能源系统的建模、仿真、优化与控制是重要的共性问题。美国能源部(DOE)、美国可再生能源国家实验室(NREL)、美国能源技术国家实验室(NETL)、美国劳伦斯伯克利国家实验室(LBL)等等都在系统集成层面有良好的布局，并开展了系统的研究，形成了一系列的方法和软件。卡耐基梅隆大学先进过程决策中心(CAPD)和帝国理工大学过程系统工程中心(CPSE)是系统工程研究的领域高地。多能互补的能源互联网络高效运行的核心就是要进行系统优化。

2.2 核心竞争力形成与壁垒

分析我们的现状，我们在设备层面、关键技术层面有很多的积累和优势。但是在系统层面，略显不够。在互联互通互补的能源系统综合技术，IT技术方面我们无法形成竞争力与优势，但是基于我们在设备、系统方面的深刻认识，以及我校在电力系统方面的强大实力，我们有可能在多能互补能源系统的建模、仿真与优化方面形成优势。这样也有利于连接需求，整合不同的能源转化利用技术，形成有机整体。

3 技术难点分析

3.1 基于图论的能源网络系统认识

3.2 以优化为目的的建模

3.3 以仿真为目的的建模

3.4 仿真引擎与联合仿真

3.5 系统优化问题与优化求解器

3.6 基于数据驱动的代理模型

3.7 相关IT技术说明

4 行动目标

能力进步

业务结果

技术影响力

5 行动计划

4.1 核心研究目标确定

4.2 业务价值实现

4.3 连接-生产-服务-传播体系

4.4 人

4.5 在线化模式

能源系统计算建模、仿真与优化

Computational modeling, simulation, and optimization in energy systems

https://cmso.ircre.org

能源互联网与能量枢纽

1 综合能源系统概述

下面对能源互联网优化运行的建模方法、数学模型、模型求解方法和通信与数据四大方面的研究现状与发展趋势进行简要介绍。

（1）能源互联网优化运行的建模方法

目前对能源互联网优化运行的建模主要基于能量枢纽展开。能量枢纽由苏黎世联邦理工学院于2007 年首次提出[8]，是一种用于描述能源互联网中转化元件输入与输出之间能量耦合关系的数学模型。能量枢纽属于一种外部描述，利用耦合矩阵简要表示电、热、气等多种能量形式之间的转化、存储、传输关系，在综合能源系统的运行研究中发挥重要作用。

多能系统通过能量枢纽建模计算优化各种形式能源的分配转化关系，在满足相应用能需求和设备运行约束的情况下，达到总运行成本最低、碳排放量最小、或新能源消纳最大等目标[9]。文献[10]对居民的各种用电设备进行能量枢纽建模，建立居民的电热冷供应系统，在考虑用户的舒适度和偏好的同时，使其能源消耗总和（包括电力和天然气）最小。文献[11]研究含储氢的多能源系统，实现了能源平衡和利润最大化。

能量枢纽对多能源系统的建模范围具有更高的灵活性，可将整个系统拆解为多个能量枢纽进行建模分析，便于精细化考虑内部的约束条件。文献[12]研究了能量枢纽的鲁棒优化问题，以解决能源互联网中的不确定性调度问题。文献[13]对配电网络进行了能量枢纽建模，从电力运营商的角度使日前调度达到运行最佳。

然而，当前对基于能量枢纽的相关研究多采用简单的功率代数分配形式，缺乏对能量枢纽内部真实物理结构建模以及模型背后的机理解释。特别地，现有研究对能量枢纽建模中如何体现基尔霍夫定律、朗肯循环以及卡诺循环等尚未阐明，因此还需要深入研究。此外，基于能源大数据，使用机器学习进行数据建模的方法也极具潜力[14, 15]，但需要结合具体应用场景进行深度耦合研究。

（2）能源互联网优化运行的数学模型

理想的能源互联网应当实现分布式多种能源的即插即用，允许用户根据情况选择不同能源的使用。但不同能源系统具有不同的非线性随机特征和多尺度动态特征[16]。因此为了更好地描述多种能源、负荷间耦合关系，为能源互联网运行调度提供坚实依据，必须构建适宜的能源互联网运行优化数学模型[9]。鉴于目前能源互联网仍处于研究发展阶段，尚没有成熟的优化运行模型，本部分总结了一些通用的运行优化建模理念，并提出了当前研究的难点问题。

（a）能源互联网多时间尺度数学模型

能源互联网耦合了多种能源系统，而不同能源系统的特性存在差异，这使得系统的全局耦合优化非常复杂[17]。多时间尺度优化模型按照时间尺度将能源互联网运行模型分为多个阶段，每一阶段中根据该时间尺度下系统特点及运行要求确定模型优化目标及约束条件，较长时间尺度模型结果由较短时间尺度模型进行修正。多时间尺度优化模型通过不同时间尺度的逐级优化，减少偏差，最终得到与实际需求匹配度较高的运行计划。目前多时间尺度优化在电力系统中已有较为成熟的研究。文献[18]提出一种包含日前计划（日级）、滚动计划（30-60 min 级）、实时计划（5-15 min级）和AGC（秒级）的运行模型及调度方式，有效地提高系统运行效率，并在多个省级电网投入运行；文献[19]提出一种包含日前24 h、日内1 h、日内15 min 和实时负荷调度的运行模型，充分利用不同时间尺度上的负荷资源，有效地平衡风电预测功率不确定性引起的功率不平衡。

然而，针对能源互联网，由于不同能源系统具有不同惯性时间常数，例如电力系统相比热网系统和气网系统的惯性时间常数小很多，这种快慢系统的耦合无疑增加了控制系统的刚性。文献[20]构建了可再生能源与热电联供混合微网的多时间尺度模型，基于各典型分布式能源的功率响应特性分析，得到具有有效性及可行性的多时间尺度的系统优化运行策略。文献[21]构建了考虑多时间尺度的不确定性能源互联网模型，在长时间尺度对风电、光伏发电等进行预测，在短时间尺度生成多个场景进行优化求解，借助模型分析了包含风力发电机组及热电联产的微电网系统，有效降低了微观时间波动对能源互联网运行产生的负面影响。基于当前研究成果，进一步地研究能源互联网中各能源系统的多时间尺度特性及其差异，构建适用于能源互联网运行特征的多时间尺度优化模型，是当前国际研究的热点和难点[16]。

（b）能源互联网出力随机匹配数学模型

根据国家发改委发布的《可再生能源发展“十三五”规划》，我国正大力发展利用可再生能源。然而与传统电力系统出力特性相比，新能源系统的主要区别表现在其随机性、波动性和不确定性。随着分布式可再生能源的大规模并网，显著增加了多能源系统出力的随机性。而在能源需求侧，用户对不同能源的使用存在随机性。同时，能源形式的多样化更增加了能源需求的不确定性。供需双侧的不匹配问题将严重影响能源互联网的安全稳定运行[22]。因此，在能源互联网中考虑多能系统的运行时，必须充分考虑供需双侧的随机匹配问题。文献[23]提出，在能源互联网背景下，能源分散模块可控性更强，在其实现自平衡的基础上，与能源集中模块的能源供应协调互补，可降低新能源发电侧出力的随机性。在“源–网–荷–储”的协调优化模式中，最终使用户的负荷曲线主动追踪分散式能源模块与集中式能源模块的发电出力，实现供需双侧的复杂适应。文献[24]提出了一种基于非补燃压缩空气储能的清洁能源处理器架构，根据实时信息反馈，快速调节系统运行模式，实现了多种可再生能源的高效储存、转换和供给。当前阶段下，加快能源互联网建设的主要动力来自于更多地消纳可再生能源电力，实现社会的可持续发展。因此，解决多能源系统出力随机匹配问题，降低大规模分布式可再生能源并网风险是当下的研究重点之一。

（3）能源互联网优化运行的模型求解方法

在确立了适宜的能源互联网优化运行模型后必须根据模型特点选择合适的求解方法，从而提高求解效率与精度。能源互联网具有明显的非线性特征，如设备转化效率非线性，电力系统潮流约束非线性，热管道、气管道能量传输约束非线性等[25, 26]，这使得建立的优化模型通常具有非凸性与非线性[27]。目前使用的求解方法主要有传统的非线性算法[28]和启发式算法[29, 30]。传统的非线性数学优化算法，如广义既约梯度、序列二次规划算法等，多为局部搜索算法，无法保证非凸优化模型的全局最优性。为了在寻优中跳出局部最优性，可以采用启发式算法，如遗传算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法、神经网络算法等。文献[31, 32]采用基于模拟退火的粒子群算法求解多能耦合系统动态运行模型。文献[33, 34]采用遗传算法在较短的时间内求解考虑电价不确定性的综合能源网络模型。然而，启发式算法是一种基于直观或经验的构造的算法，只能给出一个近似最优解，无法保证求得最优解。

为了克服以上方法的不足，当下有两种流行算法。其一是对能源互联网运行模型中非线性部分进行线性近似或分段线性近似，再利用线性规划求解算法求解。如文献[28]通过方程分段线性化将模型求解转化为混合整数线性规划问题求解。这种研究方法使得复杂的问题转化为相对简单的问题，求解相对简便，适用于模型的初步优化及对精度要求不高的应用场合。另一种方法是凸松弛，将优化模型中的非凸部分进行凸松弛，将非凸非线性优化松弛成非线性凸优化，从而采用传统非线性优化算法保证全局最优性[35]。该方法是当前研究热点，但松弛模型得到的解只是一个近似优化解，因此如何保证该近似优化解的可行性是当前研究的难点。

（4）能源互联网优化运行中的通信与数据

在万物互联的大环境下，能源在供给和消费的各个环节都会与互联网信息技术相融合。为了实现能源互联网的安全高效优化运行，必须重视系统的通信与数据问题[36]。下表列出了信息互联网和能源互联网的内容对比。

表 1 1 信息互联网与能源互联网对比[37]

维度 信息互联网 能源互联网

网络功能 实现一个通信、传输和信息共享的基础平台 采用信息-物理融合技术，保证电能能源的按需传输和交换共享。

容易接入分布式可再生能源

实现人与人，人与机器之间的通信 实现人与物，物与物之间的通信

网络结构 广域网:信息互联网的广泛接入 大区域输电网(特高压，超高压，高压)

城域网：信息互联网在城市内的接入 城市配电网(中压)

局域网：包含个域网，实现信息互联网的区域性接入 小区电网和微网(低压)

网络协议 OSI协议。

基于TCP/IP协议栈 暂无

网络服务 信息接入、信息结算、信息消费 电力接入、电力结算、电力消费

通过www（基于DNS）进行内容查找；

通过SNS进行社交活动；

通过E-mail交换信息 通过用户标识、设备标识和IP地址进行查找；

通过信息手段进行沟通

网络设备 网络交换机：局域网内部数据交换 能源交换机：微网，小区内部电力交换

网络路由器：广域网数据交互 能源路由器：不同微网间能量传输控制与交换

网络安全 防火墙、入侵检测设备、隔离设备 设备保护装置，继电保护和自动化设备；

数据防火墙

服务对象 信息提供者 能量提供者

信息消费者 能量消费者

本文将从信息物理系统出发，分析能源互联网优化运行中的数据处理与信息安全和范式化建模等问题。

（a）数据处理与信息安全

能源互联网是信息流与能量流紧密结合的系统，并表现为信息通信基础设施与能源电力基础设施一体化的特性。在能源系统的信息化方面，当前对信息获取与处理的研究主要有：1）基于物联网的信息采集与传输[38]；2）基于云计算架构的能源信息处理[39]；3）基于大数据技术的信息挖掘[40]。这些研究涉及通信网络技术，如光纤、无线、可见光、电力线载波和卫星等物理层通信技术，下一代互联网、SDX等网络技术；高效计算技术，如流计算、内存计算、并行计算和以此为基础的云平台计算；分布式与集中式相结合的数据存储与处理技术，以及数据库技术、大数据平台和地理信息等。

国外相关技术与业务发展集中在数据存储、处理和分析等核心领域，已形成一系列较为成熟的开源/商业框架及产品[41, 42]，拥有相对完善的生态圈，在智能电网配用电领域的分布式能源接入、需求侧响应、实时电价管理等方面均有成熟应用案例[43]。国内相关技术研发以互联网企业为主，也集中在数据存储、处理和分析等核心领域。能源互联网中信息伴随能源流动，形成广域分布的全领域数据应用环境，面对海量数据层层汇集、高速交换所带来的挑战，运用大数据技术可增强信息跨域集成、数据多级计算以及智能化分析能力，满足能源互联网多层次异构及协同数据处理和复杂关联分析的需求。

此外，在研究中还应注意能源信息安全保护与数据同步化的问题[44]。基础而言，防范利用安全漏洞发送错误能源调配指令的入侵行为，在错误发生后防止影响扩大化，以及对用户用能隐私信息的防护都是能源互联网系统安全的必须要求。在此方面，区块链技术展现出了巨大潜力。如文献[45]提出将区块链技术融合进能源互联网系统中，为解决用户隐私信息安全等问题提供了可靠思路。但目前的区块链技术仍存在数据吞吐量小等内生性短板。因此在庞杂的数据中如何获取有效信息，并保障信息的快速处理和私密安全是未来研究需要进一步探索的。此外，在能源互联网中，不同系统之间数据同步化问题也亟待解决。其具体表现在两个方面：1）网络中测量数据信息不在同一时间节点上；2）不同能源设备对控制命令的响应速度不同即调节时间长短不一。

（b）信息物理融合范式化建模

信息物理系统（cyber physical system，CPS）是将计算与物理资源紧密结合在一起所形成的系统，主要包括计算系统、大规模通信系统、大规模传感器网络、控制系统和物理系统。与传统控制系统相比，CPS 能够对物理系统进行实时监控、信息采集与传递、控制，使物理系统与信息系统交互作用、协同工作，具有互联共享、平等开放、高度智能和双向互动的技术特征[46]。

信息与物理系统的融合作为能源互联网的重要特征之一，有利于物理系统的实时态势感知与快速决策，能有效提升能源系统的运行效率[47]。在此思路指导下，文献[48]建立了描述近地风场动态特性及其风电转换过程的随机系统模型。文献[49]建立了光储协调控制的信息物理融合模型。文献[50]阐述了电网信息物理系统的概念及研究现状。目前对信息物理融合建模技术的应用有了一定研究，但在范式化建模方面的工作较少。能源互联网的信息物理融合范式化建模，能有效提高系统建模和求解效率，并且能较好地处理巨大的网络节点数，因此能有效提高能源互联网优化运行的效率和精准度。在之后研究中需要进一步考虑如何协调网络建模的准确性与大规模系统计算问题，以实现高效化、准确化、范式化的模型。

推进能源互联网建设，加强智能配电与用电网络建设，促进分布式能源和多能互补式发电项目在微网中的利用，开展能源互联系统运营交易技术研究能源互联系统运营交易关键技术研究

研究目标：建立能源流与信息流融合的协同控制技术，建立多元化能源商品交易平台。研究内容：研究多能融合能源系统的整体建模及分析技术，研究面向电网、气网、热网等的多物理量信息归一化处理技术，研究多能源形态能量的量测、计算、预测及控制技术，研究多能融合能源系统中支持虚拟电厂及需求响应的动态平衡技术；研发支持多元交易主体、多元能源商品复杂交易类型的能源交易平台，研究支持分布式、并发式交互响应的实时交易方式和能源期货交易模式，研究互联网虚拟能源货币认证、定价、流通、交易与结算等关键技术。

能源互联网示范工程

研究目标：建设以智能电网为基础，与热力管网、天然气管网、交通网络等互联互通，电、热、冷、氢多种能源形态互相转化的能源互联网试验示范工程。

研究内容：建设高灵活性的柔性能源网络，接纳高比例可再生能源、促进灵活互动用能行为和支持分布式能源交易；研究标准化、模块化的不同能源网络接口设备，支持多种能源形态灵活转化、高效存储；研究电网、气网、热网等智能网络的协同控制调度技术；研究电、热、冷、氢等不同能源形态的量化评价方法，构建不同形式能源的能量品位统一量化模型，提出多能互补系统能量优化方法；研发气、热、电多物理量智能终端高级量测系统；研究多能互补综合能源网络内不同类型储电、储热、储冷、储氢装置的优化协调控制方法，研发适用于多能源输入和输出的能源互联网能量管理系统

通常包括以下几个部分，供能网络（如供电、供气、供冷／热等网络）、能源交换环节（微燃机、电炉、燃气锅炉、溴冷机，空调等）、能源存储环节（电储能、热储能、储冷罐等）、终端用能设备（电动汽车、家用电器设备等）。

多网融合（习近平和普京天然气战略）

我们将要面临的是可再生能源和化石能源互补的“混合能源时代”。

在可再生能源方面，全球范围内的水能、风能和太阳能等资源非常丰富，然而能源分布却十分不平衡。清洁能源富积的地区大多地广人稀，远离人类的生产生活中心，而化石能源的生产和消费具有明显的逆向分布特征，因此全球能源互联网的概念应运而生，越来越成为各学者关注的重点。综合能源系统是能源互联网的重要物理载体，是在规划、设计、建设和运行等过程中，通过对能源的产生、传输、分配、转换、存储及消费等环节进行有机协调与优化后，形成的能源产供销一体化系统，系统中含多种能源形式，且能源之间通过分布式电源进行耦合。

通过多能协同的综合能源系统协调调度，一方面可以利用各个能源系统在时空上的耦合机制，实现多能互补、能源梯级利用；另一方面，可以挖掘与利用用户参与综合需求响应的能力，使用户拥有更大容量的“虚拟能量单元”，响应上级电网调峰辅助服务需求，显著提升能源资产利用率。因此，综合能源系统的建设是破解中国能源困局的重要战略之一。

2 综合能源系统框架

2.1 供给端

2.2 输配端

2.3 用户端

3 综合能源系统核心技术发展现状及趋势

3.1 优化控制技术

3.2 数据信息技术

3.3 硬件技术

4 国内外行业发展现状及趋势

4.1 国外发展现状及趋势

4.2 国内发展现状及趋势

5 综合能源系统前景分析

第二篇 基于组件建模的联合仿真技术

6 瞬态模拟软件Trnsys

7 基于组件建模的Modelica语言

8 基于FMU/FMI的联合仿真技术

9 数字孪生简介

第三篇 综合能源系统中的优化问题及其求解

10 优化问题分类

11 混合整数非线性规划问题的传统解法

12 混合整数非线性规划问题的进化计算解法

13 基于仿真的优化

14 数据驱动的仿真与优化

第四篇 模型预测控制

15 从PID到MPC

16 机器学习型智能控制

第五篇 综合能源系统典型案例介绍

第六篇 综合能源系统建模仿真优化与控制相关软件介绍

建模软件

Trnsys

energyplus

SAM

openmodelica & jmodelica

modelica库简介

https://impact.github.io/

Thermocycle-library

https://github.com/thermocycle/Thermocycle-library

优化软件

genopt

pyomo

JuMP

模型预测控制软件

相关研究机构简介

nrel

lbl

cmu

附录 知识集

最优化方法

粒子群算法

大数据

工业互联网

机器学习

过程与能源系统优化

模拟与仿真

有限体积法cfd使用入门

有限元法入门

分子动力学入门

Trnsys入门

Modelica入门

集群的基础知识

Linux基本使用-mobaxterm+Putty+filezilla

vscode

Python编程环境

C++编程环境

Java编程环境

Fortran编程环境

GPU编程

mpi

# References

## 关于优化的

<http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html>

<https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html>

<https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>

<https://scip.zib.de/>

<https://www.minlp.org/>

<https://www.particleswarm.info/>

<http://www.minlplib.org/>

<http://openmdao.org/>

<http://www.optimization-online.org/>

<http://apmonitor.com/>

<http://www.swarmintelligence.org/>

<http://www.gamsworld.org/>

<http://titan.engr.tamu.edu/>

<http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634>

(http://simulationresearch.lbl.gov/GO/)

python-zibopt

picos https://picos-api.gitlab.io/picos/

numberjack https://github.com/eomahony/Numberjack

pyscipopt

## 关于仿真的

energyplus（nrel）

sam（nrel）

spawn of energyplus

openstudio

## 关于综合能源系统的

https://idaes.org/

https://china.lbl.gov/research-projects

https://buildings.lbl.gov/

https://eta.lbl.gov/research-development

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

## 关于管网的

https://github.com/samadritakarmakar/LiquiNet

https://www.epa.gov/water-research/epanet

http://epanet.de/

http://www.korf.co.uk/korf\_links.html

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Gas\_network\_datasets

https://github.com/USEPA/Water-Distribution-Network-Model

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X08000607

https://psig.org/what-we-do/

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/TransiEnt

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://github.com/OpenIPSL

https://github.com/USEPA/WNTR

https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs

https://github.com/NCBI-Hackathons/Network\_SNPs

https://github.com/casadi/casadi

http://apmonitor.com/me575/index.php/Main/BookChapters

https://flow.byu.edu/me575/resources/

http://egon.cheme.cmu.edu/index.html 以及其徒子徒孙 http://titan.princeton.edu/tree/index.php

包括princeton的Christodoulos Floudas, http://titan.princeton.edu/tree/pdf/Christodoulos%20Floudas.pdf

http://www.midaco-solver.com/

[数据驱动的进化优化](https://git.mingtaoli.cn/zhangxiaohai/Optimization\_Relative\_Knowledge/src/branch/master/%E6%95%B0%E6%8D%AE%E9%A9%B1%E5%8A%A8%E7%9A%84%E8%BF%9B%E5%8C%96%E4%BC%98%E5%8C%96)

https://oemof.org/

## 研究计划与任务分解

2019上半年

1、归纳HRES的优化问题

对问题分类调研，突出阐明问题的难度，导向MINLP和基于仿真的优化

2、阐明现有的优化方法、软件和发展趋势，突出启发式算法，尤其是PSO算法

决定论算法（GAMS、CPLEX、SCIP等）；启发式算法

3、PSO算法的特点，优缺点，处理离散变量与约束的方法

基于Python的实现

4、PSO算法处理MINLP问题的验证与性能比较

MINLP测试集、user-defined function

2019下半年

5、典型仿真接口实现

Jmodelica，energyplus，user-function

6、处理典型的HRES优化问题

基于modelica搭建模型

7、处理天然气优化问题

https://ieeexplore.ieee.org/document/8668389/authors#authors

https://www.aalborgcsp.com/business-areas/integrated-energy-systems/

https://www.nrel.gov/esif/what-is-esi.html

https://www.nrel.gov/esif/

https://www.esig.energy/planning-for-integrated-energy-systems/

杨树森，种道同，刘俊，贺群武，张海涛，李燕，彭波涛，李辉

太阳能光热熔融盐发电系统分析

数据中心分析

天然气管网优化

光伏-电解-燃料电池-储气系统分析

家庭建筑节能系统分析

参考工具

Idaes pse

Genopt

Energyplus

Sam

Pyomo

modelica-openmodelica，jmodelica

雄起计划

首先是定位，计算建模仿真优化及设计

1. 发表一系列高质量的文章

2. 申请一系列课题

2. 发展一系列工具

3. 撰写一系列的书籍

4. 写博客，“做网红”

5. 开一系列研讨会

6. 培养一系列的人才

7. 支持合作者开办公司，服务社会

近期拟申报的课题

科研方面申报课题的途径，西安交通大学校级项目、陕西省科技厅、深圳市、江苏省、苏州市，自然科学基金委、科技部，管道局，重点实验室开放课题，知名企业浪潮集团、曙光集团、并行科技、延长石油、炙耘信息、量子力能源、中石油管道、拓普索尔、暖舍节能、电建、西北有色院。

1、 教学项目申请-基于modelica的教学实践

2、 科研项目申请

（1） 天然气管网优化

（2） 数据中心能源节能方案

（3） 过程系统工程智能方案

（4） 可再生能源建筑零能建筑

17 建模仿真软件

19 模型预测控制软件

根据国际能源署的研究报告，2040年全球能源需求将比2010年全球用能总量提升56%。相应地，按照当前技术水平发展，2040年全球碳排放总量将比2010年提升45.8%，由此将导致严重的全球气候及环境等问题。对此，主要有两条解决途径——提高能源效率和开发可再生能源（RE）。在可再生能源开发实践过程中，各国学者们渐渐发现单一的可再生能源系统并不能很好地适应实际能源需求，盲目建设导致了不同地区不同规模的弃风弃电等可再生能源消纳问题，造成了巨大的损失和浪费。为解决这一问题，各国大力发展多能互补系统（HES）。自本世纪起，德国先后发起ICT以及E-Energy项目，欧盟启动FINSENY项目，瑞士发起VoFEN项目，美国启动FREEDM计划，我国也紧随其后开展“互联网+”智慧能源计划。目前，HES的研究尚处于初级阶段，主要集中在以太阳能和风能为基础的电力系统上，且多研究可再生能源间的互补耦合，较少地将可再生能源与已有的传统能源进行结合。此外，将HES系统产生的电力用于制氢的“Power to Gas”（PtG）系统也在发达国家，尤其是德国，受到较大关注。

多能互补系统较单一的可再生能源系统具备更高的可靠性、更低的成本、更高的能源效率以及更少的系统储能装置容量。但是，HES系统也面临更大的技术挑战。除了单一RE系统存在的生产不连续、随机性、波动性和不可控等特点外，HES中还需考虑实际负荷与多种能源间的特性耦合问题，尤其在容量配置、能量策略和协调运行管理上存在难题。这些挑战的根源在于：其一，按当前技术发展趋势，可再生能源的诸多特性并不会随着硬件技术的升级而被改变；其二，HES涉及多种不同能源的耦合，是一个多场景、多目标、不确定的综合规划问题。此外，受于气候环境的要求，可再生能源工程建设迫在眉睫。因此迫切需要发展适应大规模计算的混合整数非线性优化方法，针对HES特性进行优化设计。根据这一思路，从上世纪末开始，学者们陆续发展了基于传统优化算法和元启发算法的线性与非线性优化设计方法。传统算法中主要有最小二乘法、线性规划法、迭代优化法等，该类方法未能充分考虑HES的实际复杂性，对系统元件进行简单建模，进而根据负荷总量对系统设计进行准稳态优化，所得结果质量较差，主要在20世纪末用于HES的研究分析工作。元启发算法是近年来学者们模拟自然界现象发展而来的一类非确定性算法，能够在没有明确数学方程的情况下凭借给定的优化目标和约束条件找到满足要求的优化解，并且具备天然的并行计算特性，适应于大规模计算。因此，面对高复杂度与大规模优化计算问题，元启发算法展现出极大的优越性，在计算难度、精度与效率上较传统算法均有极大改进。在HES的优化设计研究及工程方面，基于元启发算法的遗传算法（GA）、粒子群算法（PSO）及其混合算法等得到了广泛的应用。虽然元启发算法在HES的优化设计上已经初见成效，但是由于学者们对HES的认识不够深刻，所发展的优化算法其计算精度、计算效率与通用性较低，且优化算法研究者与能源系统研究者结合不够紧密（拥有算法研究背景的学者往往对能源系统的了解浮于表面，而研究能源系统的学者则对算法的了解不够深入），使得针对HES的优化设计还处于单目标、准稳态、模块优化水平，未能将优化算法与能源系统进行深度耦合，发挥HES应有的潜力。而随着优化方法、计算力与边缘计算的发展，多目标优化、瞬态优化与系统网络结构优化设计已变得可能，从传统的粗放式优化设计转向未来的数字化精细化优化设计已是发展趋势。

基于当前的HES优化设计研究现状与未来发展趋势，结合实验室的氢能战略与科学中心多能互补理论研究方向，本课题拟研究基于粒子群算法的多能互补体系通用优化方法，即对现有粒子群算法针对多能互补系统进行改进，研究多目标、准瞬态和系统网络结构优化方法。进一步地，利用优化算法的手段，寻找多种能源间能量传递的优化路径，为研究多能互补理论提供高效研究手段的同时发展多能互补体系建设的理论模型。

参考文献

nrel

lbl

cmu

antigone

## 关于优化的

<http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html>

<https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html>

<https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>

<https://scip.zib.de/>

<https://www.minlp.org/>

<https://www.particleswarm.info/>

<http://www.minlplib.org/>

<http://openmdao.org/>

<http://www.optimization-online.org/>

<http://apmonitor.com/>

<http://www.swarmintelligence.org/>

<http://www.gamsworld.org/>

<http://titan.engr.tamu.edu/>

<http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634>

(http://simulationresearch.lbl.gov/GO/)

python-zibopt

picos https://picos-api.gitlab.io/picos/

numberjack https://github.com/eomahony/Numberjack

pyscipopt

## 关于仿真的

energyplus（nrel）

sam（nrel）

spawn of energyplus

openstudio

https://idaes.org/

https://china.lbl.gov/research-projects

https://buildings.lbl.gov/

https://eta.lbl.gov/research-development

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

## 关于管网的

https://github.com/samadritakarmakar/LiquiNet

https://www.epa.gov/water-research/epanet

http://epanet.de/

http://www.korf.co.uk/korf\_links.html

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Gas\_network\_datasets

https://github.com/USEPA/Water-Distribution-Network-Model

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X08000607

https://psig.org/what-we-do/

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/TransiEnt

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://github.com/OpenIPSL

https://github.com/USEPA/WNTR

https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs

https://github.com/NCBI-Hackathons/Network\_SNPs

https://github.com/casadi/casadi

http://apmonitor.com/me575/index.php/Main/BookChapters

https://flow.byu.edu/me575/resources/

http://egon.cheme.cmu.edu/index.html 以及其徒子徒孙 http://titan.princeton.edu/tree/index.php

包括princeton的Christodoulos Floudas, http://titan.princeton.edu/tree/pdf/Christodoulos%20Floudas.pdf

http://www.midaco-solver.com/

[数据驱动的进化优化]

(https://git.mingtaoli.cn/zhangxiaohai/Optimization\_Relative\_Knowledge/src/branch/master/%E6%95%B0%E6%8D%AE%E9%A9%B1%E5%8A%A8%E7%9A%84%E8%BF%9B%E5%8C%96%E4%BC%98%E5%8C%96)

https://oemof.org/

## 研究计划与任务分解

https://ieeexplore.ieee.org/document/8668389/authors#authors

https://www.aalborgcsp.com/business-areas/integrated-energy-systems/

https://www.nrel.gov/esif/what-is-esi.html

https://www.nrel.gov/esif/

https://www.esig.energy/planning-for-integrated-energy-systems/

https://www.claralib.com/#modal-download

https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7207236

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115013179

https://www.scientific.net/AMR.1140.449

https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7895273

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319301647

https://www.mdpi.com/2079-9292/8/2/237

https://www.nrel.gov/esif/smart-home-building-systems.html

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401219301422

https://www.nrel.gov/solar/index.html

https://www.nrel.gov/research/areas.html

根据国际能源署的研究报告，2040年全球能源需求将比2010年全球用能总量提升56%。相应地，按照当前技术水平发展，2040年全球碳排放总量将比2010年提升45.8%，由此将导致严重的全球气候及环境等问题。对此，主要有两条解决途径——提高能源效率和开发可再生能源（RE）。在可再生能源开发实践过程中，各国学者们渐渐发现单一的可再生能源系统并不能很好地适应实际能源需求，盲目建设导致了不同地区不同规模的弃风弃电等可再生能源消纳问题，造成了巨大的损失和浪费。为解决这一问题，各国大力发展多能互补系统（HES）。自本世纪起，德国先后发起ICT以及E-Energy项目，欧盟启动FINSENY项目，瑞士发起VoFEN项目，美国启动FREEDM计划，我国也紧随其后开展“互联网+”智慧能源计划。目前，HES的研究尚处于初级阶段，主要集中在以太阳能和风能为基础的电力系统上，且多研究可再生能源间的互补耦合，较少地将可再生能源与已有的传统能源进行结合。此外，将HES系统产生的电力用于制氢的“Power to Gas”（PtG）系统也在发达国家，尤其是德国，受到较大关注。

多能互补系统较单一的可再生能源系统具备更高的可靠性、更低的成本、更高的能源效率以及更少的系统储能装置容量。但是，HES系统也面临更大的技术挑战。除了单一RE系统存在的生产不连续、随机性、波动性和不可控等特点外，HES中还需考虑实际负荷与多种能源间的特性耦合问题，尤其在容量配置、能量策略和协调运行管理上存在难题。这些挑战的根源在于：其一，按当前技术发展趋势，可再生能源的诸多特性并不会随着硬件技术的升级而被改变；其二，HES涉及多种不同能源的耦合，是一个多场景、多目标、不确定的综合规划问题。此外，受于气候环境的要求，可再生能源工程建设迫在眉睫。因此迫切需要发展适应大规模计算的混合整数非线性优化方法，针对HES特性进行优化设计。根据这一思路，从上世纪末开始，学者们陆续发展了基于传统优化算法和元启发算法的线性与非线性优化设计方法。传统算法中主要有最小二乘法、线性规划法、迭代优化法等，该类方法未能充分考虑HES的实际复杂性，对系统元件进行简单建模，进而根据负荷总量对系统设计进行准稳态优化，所得结果质量较差，主要在20世纪末用于HES的研究分析工作。元启发算法是近年来学者们模拟自然界现象发展而来的一类非确定性算法，能够在没有明确数学方程的情况下凭借给定的优化目标和约束条件找到满足要求的优化解，并且具备天然的并行计算特性，适应于大规模计算。因此，面对高复杂度与大规模优化计算问题，元启发算法展现出极大的优越性，在计算难度、精度与效率上较传统算法均有极大改进。在HES的优化设计研究及工程方面，基于元启发算法的遗传算法（GA）、粒子群算法（PSO）及其混合算法等得到了广泛的应用。虽然元启发算法在HES的优化设计上已经初见成效，但是由于学者们对HES的认识不够深刻，所发展的优化算法其计算精度、计算效率与通用性较低，且优化算法研究者与能源系统研究者结合不够紧密（拥有算法研究背景的学者往往对能源系统的了解浮于表面，而研究能源系统的学者则对算法的了解不够深入），使得针对HES的优化设计还处于单目标、准稳态、模块优化水平，未能将优化算法与能源系统进行深度耦合，发挥HES应有的潜力。而随着优化方法、计算力与边缘计算的发展，多目标优化、瞬态优化与系统网络结构优化设计已变得可能，从传统的粗放式优化设计转向未来的数字化精细化优化设计已是发展趋势。

基于当前的HES优化设计研究现状与未来发展趋势，结合实验室的氢能战略与科学中心多能互补理论研究方向，本课题拟研究基于粒子群算法的多能互补体系通用优化方法，即对现有粒子群算法针对多能互补系统进行改进，研究多目标、准瞬态和系统网络结构优化方法。进一步地，利用优化算法的手段，寻找多种能源间能量传递的优化路径，为研究多能互补理论提供高效研究手段的同时发展多能互补体系建设的理论模型。

## 关于优化的

<http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html>

<https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html>

<https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>

<https://scip.zib.de/>

<https://www.minlp.org/>

<https://www.particleswarm.info/>

<http://www.minlplib.org/>

<http://openmdao.org/>

<http://www.optimization-online.org/>

<http://apmonitor.com/>

<http://www.swarmintelligence.org/>

<http://www.gamsworld.org/>

<http://titan.engr.tamu.edu/>

<http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634>

(http://simulationresearch.lbl.gov/GO/)

python-zibopt

picos https://picos-api.gitlab.io/picos/

numberjack https://github.com/eomahony/Numberjack

pyscipopt

## 关于仿真的

energyplus（nrel）

sam（nrel）

spawn of energyplus

openstudio

## 关于综合能源系统的

https://idaes.org/

https://china.lbl.gov/research-projects

https://buildings.lbl.gov/

https://eta.lbl.gov/research-development

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

## 关于管网的

https://github.com/samadritakarmakar/LiquiNet

https://www.epa.gov/water-research/epanet

http://epanet.de/

http://www.korf.co.uk/korf\_links.html

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Gas\_network\_datasets

https://github.com/USEPA/Water-Distribution-Network-Model

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X08000607

https://psig.org/what-we-do/

https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/TransiEnt

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://www.tuhh.de/transient-ee/en/download.html

https://github.com/OpenIPSL

https://github.com/USEPA/WNTR

https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs

https://github.com/NCBI-Hackathons/Network\_SNPs

https://github.com/casadi/casadi

http://apmonitor.com/me575/index.php/Main/BookChapters

https://flow.byu.edu/me575/resources/

http://egon.cheme.cmu.edu/index.html 以及其徒子徒孙 http://titan.princeton.edu/tree/index.php

包括princeton的Christodoulos Floudas, http://titan.princeton.edu/tree/pdf/Christodoulos%20Floudas.pdf

http://www.midaco-solver.com/

[数据驱动的进化优化](https://git.mingtaoli.cn/zhangxiaohai/Optimization\_Relative\_Knowledge/src/branch/master/%E6%95%B0%E6%8D%AE%E9%A9%B1%E5%8A%A8%E7%9A%84%E8%BF%9B%E5%8C%96%E4%BC%98%E5%8C%96)

https://oemof.org/

## 研究计划与任务分解

2019上半年

1、归纳HRES的优化问题

对问题分类调研，突出阐明问题的难度，导向MINLP和基于仿真的优化

2、阐明现有的优化方法、软件和发展趋势，突出启发式算法，尤其是PSO算法

决定论算法（GAMS、CPLEX、SCIP等）；启发式算法

3、PSO算法的特点，优缺点，处理离散变量与约束的方法

基于Python的实现

4、PSO算法处理MINLP问题的验证与性能比较

MINLP测试集、user-defined function

2019下半年

5、典型仿真接口实现

Jmodelica，energyplus，user-function

6、处理典型的HRES优化问题

基于modelica搭建模型

7、处理天然气优化问题

https://ieeexplore.ieee.org/document/8668389/authors#authors

https://www.aalborgcsp.com/business-areas/integrated-energy-systems/

https://www.nrel.gov/esif/what-is-esi.html

https://www.nrel.gov/esif/

https://www.esig.energy/planning-for-integrated-energy-systems/

多能互补与智慧能源

根据国际能源署的研究报告，2040年全球能源需求将比2010年全球用能总量提升56%。相应地，按照当前技术水平发展，2040年全球碳排放总量将比2010年提升45.8%，由此将导致严重的全球气候及环境等问题。对此，主要有两条解决途径——提高能源效率和开发可再生能源（RE）。在可再生能源开发实践过程中，各国学者们渐渐发现单一的可再生能源系统并不能很好地适应实际能源需求，盲目建设导致了不同地区不同规模的弃风弃电等可再生能源消纳问题，造成了巨大的损失和浪费。为解决这一问题，各国大力发展多能互补系统（HES）。自本世纪起，德国先后发起ICT以及E-Energy项目，欧盟启动FINSENY项目，瑞士发起VoFEN项目，美国启动FREEDM计划，我国也紧随其后开展“互联网+”智慧能源计划。目前，HES的研究尚处于初级阶段，主要集中在以太阳能和风能为基础的电力系统上，且多研究可再生能源间的互补耦合，较少地将可再生能源与已有的传统能源进行结合。此外，将HES系统产生的电力用于制氢的“Power to Gas”（PtG）系统也在发达国家，尤其是德国，受到较大关注。

多能互补系统较单一的可再生能源系统具备更高的可靠性、更低的成本、更高的能源效率以及更少的系统储能装置容量。但是，HES系统也面临更大的技术挑战。除了单一RE系统存在的生产不连续、随机性、波动性和不可控等特点外，HES中还需考虑实际负荷与多种能源间的特性耦合问题，尤其在容量配置、能量策略和协调运行管理上存在难题。这些挑战的根源在于：其一，按当前技术发展趋势，可再生能源的诸多特性并不会随着硬件技术的升级而被改变；其二，HES涉及多种不同能源的耦合，是一个多场景、多目标、不确定的综合规划问题。此外，受于气候环境的要求，可再生能源工程建设迫在眉睫。因此迫切需要发展适应大规模计算的混合整数非线性优化方法，针对HES特性进行优化设计。根据这一思路，从上世纪末开始，学者们陆续发展了基于传统优化算法和元启发算法的线性与非线性优化设计方法。传统算法中主要有最小二乘法、线性规划法、迭代优化法等，该类方法未能充分考虑HES的实际复杂性，对系统元件进行简单建模，进而根据负荷总量对系统设计进行准稳态优化，所得结果质量较差，主要在20世纪末用于HES的研究分析工作。元启发算法是近年来学者们模拟自然界现象发展而来的一类非确定性算法，能够在没有明确数学方程的情况下凭借给定的优化目标和约束条件找到满足要求的优化解，并且具备天然的并行计算特性，适应于大规模计算。因此，面对高复杂度与大规模优化计算问题，元启发算法展现出极大的优越性，在计算难度、精度与效率上较传统算法均有极大改进。在HES的优化设计研究及工程方面，基于元启发算法的遗传算法（GA）、粒子群算法（PSO）及其混合算法等得到了广泛的应用。虽然元启发算法在HES的优化设计上已经初见成效，但是由于学者们对HES的认识不够深刻，所发展的优化算法其计算精度、计算效率与通用性较低，且优化算法研究者与能源系统研究者结合不够紧密（拥有算法研究背景的学者往往对能源系统的了解浮于表面，而研究能源系统的学者则对算法的了解不够深入），使得针对HES的优化设计还处于单目标、准稳态、模块优化水平，未能将优化算法与能源系统进行深度耦合，发挥HES应有的潜力。而随着优化方法、计算力与边缘计算的发展，多目标优化、瞬态优化与系统网络结构优化设计已变得可能，从传统的粗放式优化设计转向未来的数字化精细化优化设计已是发展趋势。

基于当前的HES优化设计研究现状与未来发展趋势，结合实验室的氢能战略与科学中心多能互补理论研究方向，本课题拟研究基于粒子群算法的多能互补体系通用优化方法，即对现有粒子群算法针对多能互补系统进行改进，研究多目标、准瞬态和系统网络结构优化方法。进一步地，利用优化算法的手段，寻找多种能源间能量传递的优化路径，为研究多能互补理论提供高效研究手段的同时发展多能互补体系建设的理论模型。

相关研究组

美国可再生能源实验室的能源系统集成与能源分析

帝国理工能源未来实验室

美国伯克利国家实验室https://buildings.lbl.gov/

https://energyanalysis.lbl.gov/

Idaes

优化工具就做gensbo

现在仿真工具使用energyplus

未来仿真工具基于modelica做

代码基于python和c++，使用pybind11写，图形界面基于pyside2做。

Modelica renewable energy library

工具介绍

Trnsys

Energyplus

Modelica

Sam

Idaes pse

西安交通大学本科生课程教学大纲

一、课程基本信息

课程名称 综合能源系统建模、仿真、优化与控制

Modeling, Simulation, Optimization and Control for Integrated Energy System (MSOC4IES)

课程编号 NEEN4000001

课程学分 2 总学时 32

学时分配 理论: 32 实验: 0 上机: 0 课外: 0 （课外学时不计入总学时）

课程类型 公共课程 通识课程

学科门类基础课 专业大类基础课

专业核心课 √专业选修课 集中实践

适用年级 1-1 1-2 2-1 2-2 √3-1 √3-2

√4-1 4-2 5-1 5-2

适用专业 能动学院各专业

先修课程 高等数学，线性代数，程序设计基础，工程热力学，流体力学，传热学

后续课程 无

教材、参考书及其他资料 [1] 左然, 施明恒, 王希麟, 徐谦. 可再生能源概论（第2版）. 北京: 机械工业出版社, 2015.

[2] 马斯特斯(Masters, Gilbert M)著, 王宾等译. 高效可再生分布式发电系统. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[3] 冯庆东编著. 能源互联网与智慧能源. 北京: 机械工业出版社, 2015.

[4]杰里米·里夫金(Rifkin, Jeremy)著, 张体伟等译.第三次工业革命——新经济模式如何改变世界. 北京: 中信出版社, 2012.

[5] Rajanna Siddaiah, R. P. Saini. A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2016，58: 376-396

[6] M. Iqbal, M. Azam, M. Naeem, et al. Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2014，39: 640-654

[7] Sunanda Sinha, S. S. Chandel. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2014，32: 192-205

[8] Samir M. Dawoud, Xiangning Lin, Merfat I. Okba. Hybrid renewable microgrid optimization techniques: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2018，82: 2039-2052

二、课程目标及学生应达到的能力

1. 通过本课程学习使学生生系统地了解和掌握太阳能、风能等可再生能源多能互补系统建模、仿真与优化的方法，包括多能互补基于组件的建模与仿真，数学问题抽象及基于仿真的优化，培养学生将所学的数学、工程基础和专业知识、计算机建模、仿真、优化知识用于解决可再生能源多能互补工程问题的能力，培养学生科学的思维方式、研究方法及创新意识。

2. 本课程系统地介绍基于组件的仿真工具Trnsys、EnergyPlus与modelica，培养学生针对复杂工程问题，开发、选择与使用恰当的技术、资源、现代工程工具和信息技术工具的能力。

3． 针对多能互补优化问题，介绍典型的数学模型、常用的优化算法与软件，并介绍新的基于计算智能的寻优方法与软件开发，培养学生针对复杂工程实际能够抽象问题，使用计算机软硬件工具，开展预测、模拟与优化获得有效结论的能力。

4. 本课程介绍综合能源系统智慧能源前沿，培养学生应用工程管理与决策方法的能力，培养学生自主学习和终身学习的意识和不断学习适应社会发展的能力。

本课程以教师讲授和学生自学并重，采取互动式教学方式，教学相长，为学生从事专业工作或科学研究等打下良好的基础。

三、教学内容简介

本课程全面介绍新能源热利用与热发电的原理、技术及工程基础知识。原理部分重点介绍热能转换与利用的基本原理、太阳能、地热能等低品位热能利用的基本知识，包括热发电循环、热电厂系统与设备、太阳几何学、辐射学、光学设计基础及太阳能集热器等；技术部分主要介绍太阳能光热转换技术、高温热动力循环发电技术，热管、热泵、吸收式、吸附式制冷及低温余热发电等低品位热能转换技术等；工程方面则重点介绍太阳能热利用与热动力发电工程、地热能热利用与热动力发电工程的设计与分析方法。

章节顺序 章节名称 知识点 Key Points 参考学时

1 可再生能源多能互补系统(HRES)简介 1.1 可再生能源多能互补系统(HRES)简介：可再生能源多能互补系统(HRES)的概念、组成、特点，HRES的节能性，典型的HRES形式，HRES发展现状与趋势 1

2 可再生能源多能互补系统(HRES)简介 1.2可再生能源多能互补系统(HRES)中的优化问题：典型HRES中的优化问题介绍，HRES优化问题分类 1

3 基于组件的建模方法 2.1基于组件的建模方法：主要电力器件建模方法；用户热电负荷建模方法；太阳能光伏发电系统建模方法等 1

4 基于组件的建模方法 2.2基于组件的仿真及其工具：Trnsys瞬态模拟软件，Modelica建模仿真软件，主要功能模块，能源相关library介绍，Energyplus建筑能耗模拟软件，主要功能模块，建筑能耗模拟方法 3

5 优化问题与求解方法 3.1混合整数非线性规划：HRES优化问题抽象，传统MINLP算法 2

6 优化问题与求解方法 3.2智能优化算法介绍:元启发优化算法（群智能优化方法，进化算法等） 4

7 典型案例分析 4.1 典型案例分析：典型可再生多能互补系统优化问题仿真案例，典型风-光-储系统优化建模仿真过程实施与分析；基于组件的建模仿真，基于仿真的优化，基于模型的预测控制等 2

8 多能互补与智慧能源 5.1多能互补与智慧能源：智慧能源系统概念，关键技术，重点领域与发展趋势 2

四、教学安排详表

序号 章节 教学内容

学时分配 教学方式

（授课、实验、上机、讨论） 课后环节（作业、自学、综合、其他） 教学要求

（知识要求及能力要求） 对课程目标的支撑关系

第一章 1.1 多能互补简介 1 授课 自学 了解多能互补系统概念及其优化问题 课程目标1

1.2 多能互补优化问题 1 授课 自学

第二章 2.1 基于组件的建模方法 1 授课 自学 了解基于组件的建模方法，掌握一种典型的建模仿真工具 课程目标2

2.2 基于组件的仿真及其工具 3 授课 自学、作业

第三章 3.1 混合整数非线性规划 2 授课 自学 了解可再生能源系统优化中的混合整数非线性优化问题、求解方法，尤其是进化算法类的智能优化算法 课程目标3

3.2 智能优化算法介绍 4 授课 自学、作业

第四章 4.1 典型案例分析 2 授课 自学、作业 了解典型可再生多能互补系统优化问题建模仿真优化全栈流程 课程目标3

第五章 5.1 多能互补与智慧能源 2 授课 自学 了解智慧能源系统概念，关键技术，重点领域与发展趋势 课程目标4

注：对课程目标的支撑关系可填写大纲中第二部分课程目标的相应序号

五、实践环节

实验编号 实验名称 实验内容 教学方法 对课程目标的支撑关系

无

注：对课程目标的支撑关系可填写大纲中第二部分课程目标的相应序号

六、课外学时分配

章节顺序 内容 参考学时 对课程目标的支撑关系

1 学习太阳能光伏发电、风力发电和常用储能方法的基本原理 2 课程目标1

2 可再生能源多能互补系统(HRES)优化建模相关综述文献阅读 2 课程目标1

3 学习HRES系统优化建模的常用工具软件 2 课程目标2

4 学习Modelica软件的构架及基本功能 2 课程目标2

5 学习Energyplus软件的构架及基本功能 2 课程目标2

6 学习混合整数非线性优化软件包，粒子群等进化优化方法的基本原理 2 课程目标3

7 学习HRES系统“基于仿真的优化”建模-仿真-优化流程 2 课程目标3

8 了解智慧能源的一般内涵、发展水平和发展趋势 2 课程目标4

注：对课程目标的支撑关系可填写大纲中第二部分课程目标的相应序号

七、考核方式及成绩构成

平时测验成绩占 0 %，平时作业占 40 %；实验（上机）成绩占 0 %；平时表现占 0 %，期中考试成绩占 0 %，期末考试成绩占 60 %。

大纲制定者：李明涛

大纲审核者：赵亮

最后修订时间： 2019 年 3 月 20 日

“新能源热利用与热发电原理及系统”课程简介

课程编码：ENPO420203

学分：2.5

学时：42 （理论学时：38 实验学时：4 上机学时：0 课外学时： 0（课外学时不计入总学时））

课程内容简介（200字以内，含实验内容）

本课程全面介绍新能源热利用与热发电的原理、技术及工程基础知识。原理部分介绍热能尤其是太阳能、地热能等低品位热能转换与利用的基本原理，包括热发电循环、热电厂系统与设备、太阳几何学、辐射学、聚光原理等；技术部分主要介绍太阳能光热转换技术、热动力循环发电技术、热泵、吸收式、吸附式制冷及低温余热发电等；工程方面则重点介绍太阳能热利用与热动力发电工程、地热能热利用与热动力发电工程的设计与分析方法。

课外实践内容（100字以内,无此项内容的课程不填）

无。

先修课（最低要求）：

大学物理，工程热力学，流体力学，传热学

课程水平：（适合年级）新能源科学与工程专业大三本科生

教学手段：多媒体授课

参考书目：

[1] John A. Duffie, William A. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes (4rd Edition). Hoboken, New Jersey: Wiley, 2013.

[2] 何梓年. 太阳能热利用. 合肥：中国科学技术大学出版社, 2009。

[3] 刘鉴民. 太阳能利用-原理.技术.工程. 北京: 电子工业出版社, 2010。

[4] 黄素逸, 黄树红. 太阳能热发电原理及技术. 北京: 中国电力出版社, 2012。

[5] 黄湘. 太阳能热发电技术. 北京: 中国电力出版社, 2013。

[6] 薛德千. 太阳能制冷技术. 北京: 化学工业出版社, 2006。

[7] 汪集旸等. 地热利用技术. 北京: 化学工业出版社, 2005。

[8] 蔡义汉. 地热直接利用技术. 天津：天津大学出版社,2004。

[9] 张军,孟祥睿，马新灵. 低品位热能利用技术. 北京: 化学工业出版社, 2012。

[10] 姚兴佳. 可再生能源及其发电技术. 北京: 科学出版社，2010。

课程组负责人 赵亮 职 称 教授 学 科 动力工程及工程热物理

单 位 能动学院 联系电话 E-mail lzhao@

mail.xjtu.edu.cn

任课教师 职称 学 科 单 位

赵 亮 教授 动力工程及工程热物理 能动学院

王跃社 教授 动力工程及工程热物理 能动学院

李明涛 副教授 动力工程及工程热物理 能动学院

智慧能源系统调研报告

（人工智能及大数据在能源领域的应用）（题目待定）

李明涛 研究组

mingtao@xjtu.edu.cn

西安交通大学

动力工程多相流国家重点实验室

目录

引言 3

智慧能源与能源系统优化 3

大数据 3

人工智能（机器学习、数据挖掘） 3

运筹学方法（MINLP等） 3

群体智能算法 3

能源系统优化的应用领域 3

多能互补系统 3

天然气管网运行优化 3

建筑能源管理系统 3

供热管网系统 3

城市能源系统 3

研究人员 3

组内 3

组外拟合作 4

相关行业学会 5

运筹学会 唐立新 5

能源方面呢？ 5

自然科学基金代码 5

存在的问题与可能突破的方向 5

行业主要厂商（需求方，供应方，可能的合作方）上下游生态 5

风能类公司 5

光伏系统公司 5

太阳能热发电公司 5

储能公司 5

多能互补系统公司 5

电力系统公司 5

天然气管道系统运行公司 5

能源优化管理公司（解决方案提供方） 5

优化软件、机器学习、大数据相关解决方案供应商 6

国外主要研究机构 6

国内主要研究机构 6

相关标准汇编 6

相关软件汇编 6

相关评价标准汇编 6

相关书籍 6

相关博士论文 6

关键词 6

涉及到的领域 7

太阳能光伏系统 7

风能系统 7

太阳能热发电系统 7

储能系统 7

混合能源系统 7

热网系统 7

水网系统 7

气网系统 7

（能源互联网）电能路由器 7

新能源并网 7

气象数据 7

预测方法 7

可靠性 7

评价方法 7

调度优化 8

网页资料参考 8

引言

智慧能源与能源系统优化

大数据

人工智能（机器学习、数据挖掘）

运筹学方法（MINLP等）

群体智能算法

能源系统优化的应用领域

多能互补系统

天然气管网运行优化

建筑能源管理系统

供热管网系统

城市能源系统

研究人员

组内

李明涛，刘亚，余佳磊，张晓海，汪龙，陈庚

组外拟合作

胡伟飞，浙大机械

杨树森，交大数学

相关行业学会

运筹学会 唐立新

能源方面呢？

自然科学基金代码

存在的问题与可能突破的方向

行业主要厂商（需求方，供应方，可能的合作方）上下游生态

风能类公司

光伏系统公司

太阳能热发电公司

储能公司

多能互补系统公司

电力系统公司

天然气管道系统运行公司

能源优化管理公司（解决方案提供方）

优化软件、机器学习、大数据相关解决方案供应商

国外主要研究机构

国内主要研究机构

相关标准汇编

相关软件汇编

规划类软件，MINLP，

系统模拟类软件，modelica，trnsys

Cfd软件

Fem软件

相关评价标准汇编

相关书籍

相关博士论文

关键词

多能互补，hybrid energy system,Multi-Energy system，decentralized energy systems，district energy system，hybrid renewable energy systems，machine learning, Polygeneration Energy Systems

涉及到的领域

太阳能光伏系统

风能系统

太阳能热发电系统

储能系统

混合能源系统

热网系统

水网系统

气网系统

（能源互联网）电能路由器

新能源并网

气象数据

预测方法

可靠性

评价方法

调度优化

网页资料参考

http://www.zib.de/optimization/energy

https://www.plan4res.eu

多能互补示范项目http://www.nea.gov.cn/2016-12/26/c\_135933772.htm

首批多能互补集成优化示范工程评选结果公示

https://blog.csiro.au/energy-pick-n-mix-hybrid-systems-next-big-thing/

https://www.th-energy.net/english/platform-renewable-energy-and-mining/database-solar-wind-power-plants/

https://link.springer.com/article/10.1007/s12351-017-0348-z

https://www.techemergence.com/artificial-intelligence-for-energy-efficiency-and-renewable-energy/

http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/ibrahima2/

https://medium.com/wepower/artificial-intelligence-and-the-future-of-energy-105ac6053de4

https://www.findaphd.com/search/projectdetails.aspx?PJID=77134

https://www.findaphd.com/search/projectdetails.aspx?PJID=94466

https://dzone.com/articles/top-4-machine-learning-use

https://www.hindawi.com/journals/ijp/2017/4194251/

http://fortune.com/2016/09/14/data-machine-learning-solar/

https://internetofthingsagenda.techtarget.com/blog/IoT-Agenda/How-machine-learning-improves-energy-consumption

https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v90y2018icp728-741.html

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-10422-5\_29

https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3120614

https://www.amazon.com/Artificial-Intelligence-Energy-Renewable-Systems/dp/1600212611

https://pratt.duke.edu/about/news/gdbx-finalist

https://www.igi-global.com/chapter/application-of-data-mining-and-analysis-techniques-for-renewable-energy-network-design-and-optimization/109974

https://medium.com/savera-ai/machine-learning-bringing-a-new-era-in-the-energy-sector-distributed-abundant-and-a-clean-world-cf06365c29ff

https://www.engerati.com/energy-management/article/energy-efficiency/machine-learning-iot-and-big-data-energy-efficiency-use

https://www.softwebsolutions.com/resources/saving-energy-using-big-data-and-machine-learning.html

https://www.cbinsights.com/research/artificial-intelligence-energy-industry/

https://ieeexplore.ieee.org/document/7424481

https://www.ibm.com/blogs/research/2018/07/reduce-energy-cooling/

https://www.datascienceweekly.org/data-scientist-interviews/machine-learning-energy-efficiency-optimum-energy-data-guild-interview

https://blog.goodaudience.com/applying-machine-learning-to-energy-demand-and-distribution-optimization-in-kaduna-electric-8fba4bafc222

https://c3iot.ai/products/c3-iot-applications/energy-management/

https://www.wiley.com/en-us/Data+Mining+and+Machine+Learning+in+Building+Energy+Analysis-p-9781848214224

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917313429

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815027988

http://cs109-energy.github.io/

https://www.oreilly.com/library/view/data-mining-and/9781848214224/c04.xhtml

https://asu.pure.elsevier.com/en/publications/machine-learning-approaches-for-estimating-commercial-building-en

https://opus4.kobv.de/opus4-ohm/frontdoor/index/index/docId/252

https://ieeexplore.ieee.org/document/5542881

https://ieeexplore.ieee.org/document/1709356

https://www.intechopen.com/books/knowledge-oriented-applications-in-data-mining/data-mining-method-for-energy-system-aplications

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116308862

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670715001067

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-88965-6\_8

https://www.minlp.org/library/instances.php

http://newton.cheme.cmu.edu/interfaces/

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217318352

http://www.or.rwth-aachen.de/minomese2015

https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01562152

https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aic.15332

http://energyresources.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1790726

http://www.inderscience.com/info/inarticle.php?artid=68436

http://nrl.northumbria.ac.uk/33720/

https://yoric.mit.edu/optimal-design-and-operation-energy-systems-under-uncertainty

https://crei.skoltech.ru/energysystems/publications-2/

http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/40/1/012026

https://www.mpi-magdeburg.mpg.de/2869665/minlp\_damping

https://www.math.hu-berlin.de/~eopt/index\_en.html

天然气管网优化调研

天然气管网优化背景

1.1我国天然气市场、行业现状及趋势

随着社会的发展进步人们对于清洁能源的需求日益增加了，而天然气是一种安全，高热值的清洁气体，这也就使其需求量得到不断增长。需求量增加的同时也带来了一些问题，首先我国天然气分布主要集中在中西部地区，但需求较大的地区却在东部。其次，通过调研我们发现我国天然气消费量在2013年就达到了1676亿立方米，而天然气的对外依存度也首次突破了30%。我国天然气消费量于2014年达到了1930亿立方米，同比增长了14.5%。我国跃居为全球第三大天然气国，而且我国的天然气对外依存度还在不断上升，进口气仍是满足需求的重要途径。由于我国天然气资源及消费分布不均，天然气管道输送成为解决区域用气不平衡的主要措施。管道系统运输天然气安全、可靠、高效的优点使其已经成为了运输天然气的主流方式。四通八达的天然气管道是使天然气得到更好利用的必要条件。

早在2004年，我国油气管道总里程还不到3万公里，远低于世界发达国家。但经过数十年的发展，截至2016年底我国已建成油气管道11.64万千米，其中天然气管道就有6.8万千米，覆盖全国的油气管网已经初步形成。“海气登陆、西气东输、就近外供”的供气格局也随之形成。

根据我国规划，四大油气进口战略通道建设将进一步加速，以应对海上油气运输可能出现的一些突发状况。中亚天然气管道二期与中哈原油管道二期正在建设当中，同时中俄天然气管道也正在规划当中；而在国内也即将建设大量管网系统，就比如西气东输、陕京线、川气东送、西气东输三线以及四线等。国家发改委、国家能源部于2017年7月12日发布的《中长期油气管网规划》中提到，到2020年为止，我国油气管网规模有希望达到16.8万千米；而到2025年时，我国油气管网规模有希望达到24万千米。

天然气具有较高的燃烧值，使用天然气的优势显著—绿色环保：天然气中几乎不含硫、粉尘及其他有害物质，对环境的污染比煤和石油小得多，其燃烧产生的温室气体极少。相对热值、效率高：与煤炭和石油相比，天然气单位热值为8000-10000 大卡，远高于煤炭；并且天然气的热效率可达70%以上，不仅高于煤炭的40%-60%，而且也高于石油的65%左右。天然气利用领域非常广泛，全球致力于环境治理是引发天然气需求增长的最大驱动力。除了能用于炊事外，广泛作为发电、石油化工、机械制造、玻璃陶瓷、汽车、集中空调的燃料或原料，属于全球三大基础能源之一。

全球能源图景中，天然气正处于发展的黄金时代，全球能源市场正经历着天然气使用量增加的历史性转变，而这一转变将为经济增长、环境改善创造新的机遇。国际能源署发布的报告在2010 年到2035 年之间，全球天然气需求量将上升50%，能源结构中所占比例将达到1/4。天然气将超过煤炭，成为仅次于石油的第二大一次能源，并且和石油不同的是，天然气税费主要增值税11%，而石油成品油消费税征收经历4次上调，最新高达汽油1.52 元/升，柴油1.2 元/升，其它国家基本上实施类似税收政策，即鼓励天然气抑制石油煤炭。

随着“煤改气”政策的大力推行，以及日益旺盛的采暖需求，各地对天然气的需求大增。2017-2018 冬季，北方煤改气拉动天然气消费量170 亿方，相当于煤改气六省冬季消费量40%。天然气在夏、冬两季的需求差别很大，2017 年的“气荒”就是最好的例证。2017 年，我国进口天然气920 亿立方米，同比增加27.2%，其中，进口LNG 约526 亿方，占当年进口天然气的57.2%；进口管道气约394 亿方，占当年进口天然气的42.8%。根据2017 年7 月发改委印发的《加快推进天然气利用的意见》，到2020 年我国天然气在一次能源消费结构中的占比力争达到10%左右，到2030 年力争将天然气在一次能源消费中的占比提高到15%左右。根据高层重要批示，要求三桶油加大国内油气勘探开发力度。我国油气缺口持续扩大，原油和天然气缺口分别近70%、40%，进口依存度高。加强油气自给能力已经上升至维护国家能源安全的角度。

1.2我国天然气行业管网优化问题

最优化技术指运用数学方法研究各种系统的优化途径及方案，为管理者提供科学决策的依据。最优化技术主要研究对象是各种有组织系统的管理问题及其生产经营活动，随着科学技术的日益进步和生产经营的发展，最优化技术已成为现代管理科学的重要理论基础和不可缺少的方法。现代国民经济或部门经济的计划，直至企业的发展规划和年度生产计划，尤其是农业规划、种植计划、能源规划和其他资源、环境和生态规划的制定，都开始应用最优化方法，其中一个重要的发展趋势是帮助管理人员进行各种优化决策。最优化技术运用得当，不仅能够得到满足需求目标的最优结果，对生产进行指导；还能够有效的降低人工成本，提高工作效率。采用最优化技术求解问题步骤如下：分析生产需求，提出最优化问题；建立数学模型，确定决策变量，列出约束条件及目标函数；分析模型，根据模型类型选择合适的最优化方法；模型求解，由于优化问题一般计算量较大，一般采用计算机编制程序求解；最优解的检验和实施，验证结果的最优性以及在实际问题中的合理性，以此为依据对数学模型进行调整。

安全和高效是管道运行中两大主题，在天然气管道运行管理中，管道水力热力计算校核、压气站负荷分配、单条输气管道运行方案优化、复杂输气管网运行方案优化等问题可以采用最优化技术解决。

天然气管网动态优化就是根据实际工况使管道在能耗最低的情况下，安全可靠地完成天然气输送和供应。天然气管网动态优化技术发展趋势很好，但由于技术本身牵扯问题比较多、比较复杂，国内外正试图寻找最优模型、方法等解决实际问题。管网仿真技术、最优化技术、稳态优化及动态优化在天然气管输中越来越广泛，天然气管网优化运行的目的是为了寻求最优的理论，然后将其运用到现场实际中去，最终降低生产成本获得一定的经济效益。

目前，我国天然气管道业务进入了快速发展阶段，“横跨东西、纵贯南北、联通海外”的全国性供气格局已经形成。2016年天然气在我国一次能源消费占比仅为6%左右，未来还有巨大的发展空间。面对大规模天然气管网的运行与管理，我国的优化运行经验却几乎为零。虽然欧美发达国家天然气管网规模巨大且运行经验丰富，但由于其管网普遍由众多管道企业组成，单个企业的管理规模有限，而且国外管道企业普遍实行运销分离，业务相对单一，因此国外管网运行管理经验的借鉴价值有限。相比之下，国内天然气管网规模庞大，与上、中、下游各环节联系紧密，管输业务涉及面广，管理难度巨大。因此，管道运营企业普遍缺少必要手段，从业务、时间和空间等多个层面对天然气管网运行进行有效管理。

天然气管网的运输销售规划（简称运销规划）主要是对天然气的宏观流向、流量进行整体规划，以指导天然气管网的实际运营。运销规划的优化工作通过采用经济学模型计算管道输送边际成本和输量的关系曲线，将管道压力、温度等工艺条件简化为约束条件，优化天然气管网的资源和市场配置方式，提出中、远期分年和近期分月的资源配置方案、市场销售方案及系统平衡方案，达到优化管网运行，提高整体效益的目的。因此，运销规划优化在天然气管网的运营管理中起着重要的作用。

目前，我国天然气运销规划工作仍主要停留在人工计算阶段。随着管网供气资源不断开拓，管道和储气库等配套设施逐渐增多，下游用户不断发展，人工进行优化计算的难度越来越大，不仅工作量大，而且效率较低。国外已经开始采用信息化手段解决天然气运销问题，如，巴西国家石油公司利用自主开发的优化软件 OLGA（全动态多相流模拟计算软件）来指导制定售气计划；IHS ENERGY（IHS 能源咨询公司）在天然气战略研究层面开发了一种涉及产运销三方面的数学模型，并编制了相应软件。但是，这些国外软件均不适用于我国天然气管网规模大、复杂，以及不同季节调峰需求量大的实际情况。因此，有必要研究一套适合我国天然气管网的信息化软件来实现天然气运销规划，使规划工作更加准确和高效。

中国天然气管网优化研究始于20世纪80年代。从管道到管网系统，研究人员通过改进数学模型和求解方法取得了较好的结果。迄今为止，已有大量的学者对管网优化进行了深入研究，并开发了一系列优化软件。然而，进入 2014 年以来，中国经济结构调整对天然气销售影响凸显，“十三五”期间天然气资源供应会更加多元和宽松，市场竞争将会更加激烈。预计我国天然气管道在一定时间内将面临低输量、低效益的局面，因此，降本增效、优化运行已成为重点工作目标。

按照国家于2014 年2 月13日下发并正式施行的《油气管网设施公平开放监管办法（试行）》，核心要点是作为油气管网运营企业的“三桶油”，尤其是中石油，应按照要求无歧视对第三方开放使用其油气管网设施输送、储存、气化、液化和压缩等相关服务。实现“厂网分开”，油气管道网络从油气生产环节中独立是油气体制改革的重点内容。根据油气管道改革方案，油气管道网络将独立于生产环节运营，并接受国家能源局的成本监督，油气管道网络作为接受国家监管的、对社会开放容量、输送能力。独立的管网运营将更多地集中力量进行管网优化建设，这将使我国天然气管网优化研究得到更多的发展机遇和资本支持。

另外管网等设施的第三方准入还是相对比较核心的问题，主要是基于一个庞大的，公用的，向任何第三方开放的管网系统，卖方在管网里面按热值方式把气输入进去销售了，买方直接从管网里面接收，按照热值计算，不存在一个复杂的点对点的问题，管道独立化已经启动。中国天然气管道里程约为9万公里，而美国的这一数据则为中国的7 倍，差距巨大。2014 年6 月国务院印发的《能源发展战略行动计划（2014-2020 年）》提出，到2020 年，主干管道里程要达到12万公里以上。其中提到，改革油气管网运营机制，提升集约输送和公平服务能力；分步推进国有大型油气企业干线管道独立，实现管输和销售分开；完善油气管网公平接入机制，油气干线管道、省内和省际管网均向第三方市场主体公平开放。根据发展规划中提到的第三方管网准入趋势，这意味着将来我国的管道系统将在主要输送干线外接入更多第三方售气管道，管网系统将更为复杂，这也为管网优化工作高效安全、经济稳定的运行目标提出更高要求以及更大的挑战。例如，在包括美国，加拿大和巴西在内的几个国家，管道系统完全私有化，即它们是私人公司所有并因此独立运营。由于80年代开始放松管制，这些管道公司不再是运输天然气的主要所有者。他们只负责运输阶段，并专注于燃气系统的有效可操作性。

根据多项研究中反复出现的结果，在可预见的未来，天然气消费，生产，储量和依赖性将继续稳步增长。这种日益增长的期望可能意味着需要更复杂的优化方法，能够在国家和国际领域处理更大和更复杂的项目。

1.3天然气管网优化重要性

国民经济综合运输的关键一环就是管道运输，同时它也是判断我国运输业与能源业发达与否的重要特征。随着我国的发展，天然气管网会越来越发达，而在天然气管道运输过程中又伴随着各类损失如：管道摩擦损失、沿途控制元件损失、转弯损失、温度变化损失等，这些损失使天然气运输成本大大上升并且会使输送量有所下降。故需要可靠高效的优化算法对管网各类未知参数如管径、站间距、进出站压力、压比进行优选以使管网输气能力提高、使用寿命增长、内部损耗降低。

在天然气管网的优化当中有一个重要的前提就是安全问题，如何既保障了输气管道的输气量又保障了用户们的用气安全是优化管网的基础，整个管网想要最大限度发挥输送能力就必须使其安全性得到足够的保障。

天然气从生产地区到消费地区的高效和有效运输需要广泛而精细的运输系统。这种系统由复杂的网络组成，包括管道，压缩机站，调节器，阀门，城门等。在许多情况下，从特定井产生的天然气必须行进很长距离才能到达其使用点，这可能意味着更大和更具挑战性的管道系统。其次天然气管网的发展趋向于多气源、多用户、大网络化。传统的优化方法已经不适用了，所以我国企业拥有并应用天然气管网优化运行技术不但可以拥有高技术自主知识产权，而且还可以运用到我国管网系统中，保证其安全、平稳、高效、运行。如此一来将产生巨大的社会效益与经济效益。

首先天然气管网优化是一项系统的工程，各种优化问题是相互渗透相互制约的。如上文中所提到的管网系统参数优化中的造价是D管径、L长度与δ壁厚所决定的，但是这三个参数的值又与管段中的各种负荷有关，当负荷没有确定时其参数也就无法确定，则其造价也就无法确定。由此可以看出管网中的布局优化与参数优化是相关的。如果在优化过程中将各个问题分开考虑，分别求其最优值则很难达到全局最优。

其次天然气管网管网优化问题是一类非线性混合整数优化问题。管网系统的设计变量中存在着连续变量、离散变量以及整数变量。而如今大多数的优化方法则是连续变量非线性优化，倘若用这些方法来对天然气管网系统进行优化，则很难达到全局最优。且由于管网优化变量和约束过多，目标函数复杂，故用传统方法优化总会早熟收敛陷入局部最优。所以我们需要一些新型的智能的优化算法。

截至2017年底，中国陆上油气管网总里程已超过13.14×104km ，其中天然气管道里程超过7.26×104km。管网系统内气源用户众多、联络线分布广泛，已形成横贯东西，纵穿南北、覆盖全国、联通海外的大型天然气管网。随着管网规模增大及运行条件复杂程度提高，对管网集中调控提出了更高的要求，单凭调度员经验做出的判断难以全面应对管道运行问题，亟需高效的优化工具辅助制定运行方案及调整日常工况。

另一方面，天然气在输送过程中由压缩机提供动力，据统计，中国天然气管道天热气耗用量占输气量的 15‰以上，而欧洲的平均水平为 3‰左右，中国仍有较大的节能降耗潜力。随着天然气管道系统变得越来越大，越来越复杂，这些设施的最佳运行和规划的重要性也在增加。管道网络的投资成本和运营费用如此之大，即使系统利用率的微小改进也可能涉及大量资金。因此，在社会节能减排、 企业降本增效的大背景下，对天然气管网进行运行管理优化意义重大。

天然气管网优化现状

2.1优化算法简介

优化算法按时间的顺序分，可以分为现代算法与传统算法，每一种算法各有其特点，下面主要的介绍几类具有代表性的算法。

（1）线性逼近法：该方法用于解决线性规划问题即约束条件与目标函数全都是线性函数的优化问题。此算法理论已经十分成熟了。并且，其在单纯形法的提出之后应用领域更加的广泛，包括：物资调运，生产计划任务分派等问题。

而线性逼近法的实现步骤也很简单，其实际上就是从开始就一直进行不断的迭代，一直迭代到满足优化要求的精度为止

在求解非线性的问题时，其基本思想是先将非线性问题先转化为一个个线性问题，再对着一系列的线性问题进行求解。但其有着缺点，就是将非线性问题转化为线性问题，可能会使得求解出来的最优解超出原来的可行域。或者是偏离原来的问题的寻优方向，使解无法达到全局最优。

（2）动态规划法：于1951年由Bellman等提出，用于求解多阶段决策问题。该方法的原理是将一个完整的问题进行分解，分解为若干个子问题，再对这些子问题进行逐一求解，以达到整个决策问题的求解目的，使整个问题达到最佳运行效果。动态规划被用来解决多阶段决策问题，这一过程包括了五个组成部分：决策、状态、状态转移规律、目标函数以及报酬函数。

动态规划法是用来解决按时间划分的优化问题的，它的优点就是可以得到全局最优解，但其缺点就是当求解问题的维数增加时，问题的解决将会变得十分困难了。

（3）遗传算法：遗传算法是通过研究生物进化机制来提出的，其包括三个步骤：选择、交叉及变异。选择是进行交叉的前提条件，其决定着被选个体产生后代的数量，该步骤分两步进行，先对相关适应度进行计算而后进行父代个体的选择；交叉的主要方法主要包括二进制交叉和实值重组；变异实质上是子代的基因按照小的概率进行扰动所带来的结果

因为遗传算法用了群体搜索的策略以及个体间信息交换，所以遗传算法可以解决传统的算法所无法解决的困难问题。但同时，由于其计算步骤复杂所以计算速度远远慢于动态规划法，而且其耗费了大量时间计算后的结果并不准确通常只是一个近似值。故计算简单的优化问题时很少用到遗传算法，对复杂的问题进行优化时才会用到遗传算法。

（4）模拟退火法：模拟退火法是一种通用的概率演算法，常被用来解决复杂组合问题，它是受到金属退火过程的启发所提出来的。对金属进行加热变成液体，分子做随机运动之后，原来停留在使得内能有局部最小值位置的原子离开原来的位置，随机移动，最终会有极大可能找到比原来能量更低的位置。现如今，模拟退火法已经成为了一种通用的优化算法。,目前其已经应用于许多的工程实际中，如控制工程、生产调度、VLSI、机器学习等领域。

模拟退火法主要分为五个步骤：1）使初始状态随机化，并且设置合理的初温、参数以及退火规律等；2）对个体位置进行随机扰动；3）判断位置更新之后的总内能是否小于原来的内能；4）重复步骤2与步骤3一直到系统状态稳定为止；5）对系统降温，再重复步骤2到步骤4，直到温度达到一定时为止。

（5）群体智能算法：群体智能算法是一类针对模拟自然界生物群体智能行为的算法，其创立于20世纪60年代的仿生学。其中包括有蚁群算法，人工鱼群算法，混合蛙跳算法以及粒子群算法等。

其中粒子群算法是群体智能算法中最先进的算法，它是受到了鸟群的群体活动的启发而提出的。在1987年时，Reynolds等人根据鸟类群体飞行的特点，提出了Bold模型。该模型主要用于模拟鸟群聚集飞行的行为，并且Reynolds等人还用了三个规则作为鸟群中个体的简单行为规则：避免碰撞、速度一致、向中心聚集。之后Kennedy与Eberhart等人又借助了鸟群行为规则和优化问题的求解之前存在的相似性，从而提出了粒子群算法。该算法求解非线性规划问题时搜索的范围宽、适应能力很强、求出的全局最优解也比较可靠，对问题的限制较少，而且计算的速度远优于前文提到的几种算法，。故本文选用粒子群算法进行管网的优化研究。

2.2天然气管网优化研究现状

随着管道互相联通，中国天然气管网实现网络化运行管理。从能耗角度来说，管网系统层级的优化空间要远远大于单条管线的优化空间，运行方案编制也更应着眼于管网系统层面。由于管网系统中存在环状结构，一方面产生了新的环内流量分配问题，增加了决策变量的维度及约束条件的个数；另一方面难以构造出按压气站顺序进行的多阶段决策问题，动态规划法将不能直接应用。因此输气管网最优运行方案的求解相比于单条管道来说增加了难度。

近年来，研究人员尝试采用多种方法求解输气管网运行方案优化问题，如 Carter 等提出了基于DP算法的非序列动态规划法（Non-sequential Dynamic Programming，NDP），通过对管网拓扑结构进行预处理，提前给定管网中各条管道的输量，NDP 算法可以对管网中的节点压力进行优化；Flores 等提出广义简约梯度法（Generalized Reduced Gradient，GRG）优化管网中的节点压力和环内流量分配；Möller对优化问题中的非线性约束进行了区域线性化处理，将原问题近似为混合整数线性规划问题； Cobos-Zaleta[19]采用外逼近法、等式约束松弛和增广罚函数法（Outer Approximation with Equality Relaxation and Augmented Penalty，OA/ER/AP）直接求解原混合整数非线性规划问题。

根据气流如何随时间变化，我们区分稳态和瞬态的系统。当表征系统中的气体流量的值与时间无关时，系统被称为处于稳定状态。在这种情况下，系统约束，特别是描述通过管道的气流的系统约束，可以使用代数非线性方程来描述。相反，瞬态分析需要使用偏微分方程（PDE）来描述这种关系。这使得从优化角度来解决问题变得更加困难。事实上，瞬态模型的优化是最具挑战性的研究领域之一。在瞬态优化的情况下，系统的变量（例如压力和流量）是时间的函数。

稳态模型

基于动态规划的方法

解决MFCP最成功的技术之一是动态规划（DP）。 DP的主要优点之一是可以保证找到全局最优，并且可以轻松处理非线性。直到最近，它的应用实际上仅限于非循环网络，例如线性（也称为枪管）或树状拓扑。众所周知，在DP计算中，时间随着状态变量向量的维数呈指数增长，通常称为维数的诅咒。

用于管道优化的DP最初应用于20世纪60年代后期的枪管系统。由于其计算行为和处理顺序系统非线性的多功能性，它一直是最有用的技术之一。 DP于1968年首次应用于线性系统，由Wong和Larson应用于线性系统，然后应用于Wong和Larson的树状结构拓扑。Lall和Percell在1990年描述了一种类似的方法，他们允许在他们的系统中有一个不同的分支。

1989年，Luongo等人发布了一种分层方法，允许任意复杂性的周期和分支。这代表了在最终解决现实世界管道配置问题方面取得的重大进展。他们的技术不再是纯粹的DP。基本上，DP用于最佳地描述以顺序方式排列的管道部分。这通常将系统简化为更小的组合问题，而没有任何递归DP解决方案的可能性。一个足够小的实例可以通过枚举精确解决；否则使用模拟退火不完全解决。这种分层方法对于某些复杂的流水线非常有效，但对于其他流水线，计算成本非常高。

基于梯度搜索的方法

1987年，Percell和Ryan应用了一种基于广义简化梯度（GRG）非线性优化技术的非循环结构的不同方法。 与DP相比，GRG的一个优点是它们可以相对较好地处理维度问题，因此可以应用于循环结构。 然而，作为基于梯度搜索的方法，不能保证全局最优解。 Villalobos-Morales和Ríos-Mercado评估了GRG的预处理技术，例如缩放，变量边界和起始溶液的选择，从而为循环和非循环结构提供了更好的结果。 Flores-Villarreal和Ríos-Mercado对循环结构上的大量实例进行了GRG方法的广泛计算评估，并取得了相对成功。

几何编程方法

最近，Misra等人提出了一种基于几何规划（GP）的MFCP新方法。 他们证明了对于非循环系统，GP方法将MFCP转化为凸优化问题，从而允许精确有效（多项式时间）解决方案。 与传统的动态规划方法相比，GP方法的显着优点源于不必将节点压力和压缩比变量离散化。 即使在具有高度分支的网络中，GP方法也可以很好地扩展。 他们在比利时的天然气网络和美国的Transco管道网络上测试了他们的方法，表明他们提出的几何编程算法在非循环系统中始终优于DP。

线性化方法

De Wolf和Smeers对问题采取了不同的观点。他们提出了一种基于非线性流压关系的分段线性近似的求解方法。近似问题通过Simplex方法的扩展来解决。解决方法在比利时天然气网络的一个实例中得到了说明，并解决了一些现实案例。他们将他们的方法与其他基于LP的方法进行了比较，称为连续线性规划（SLP）。他们发现他们提出的方法比SLP花费的时间更少。他们还发现，由于该模型通常是非凸的，因此如果限制自己只在本地解决方案或全局程序中的解决方案的上限，则选择起点至关重要。因此，他们设计了一种机制来生成初始解决方案，该解决方案凭经验证明可以将运行时间缩短50％。

Jin和Wojtanowicz提出了一项旨在优化中国大型案例研究的研究。网络的大尺寸和复杂几何形状需要将其分解为更小的组件，优化组件的本地操作，将优化的组件重新组合到网络中并在全球范围内优化网络。这个四步法采用四种不同的优化方法来解决问题：惩罚函数方法，模式搜索，枚举和非顺序动态编程。应用全局优化的结果表明，气体吞吐量的增加大大降低了成本。例如，当将燃气率从67％提高到9000万m3/d时，观察到运营成本节省从23％降低到1.2％。该研究还表明，当压缩机站以最大容量工作时，运行成本接近当前实践中的运行成本。因此，当天然气管道系统以不同于其最大额定值的任何质量流量工作时，全局优化被证明更有效，这是中国天然气网络中当前操作的典型情况。

MINLP模型的方法

Pratt和Wilson提出了一种连续的混合整数线性规划方法。 他们的算法通过线性化压降流量Eq来迭代地解决非线性优化问题，整数变量包含在压缩机单元选择的公式中，并且使用分支和边界来解决问题。

Cobos-Zaleta和Ríos-Mercado提出了一种解决方法，该方法基于具有相等松弛的外近似和用于求解混合整数非线性规划模型的增广惩罚算法OA/ER/AP，其中整数决策变量代表数字包含在每个站内运行的压缩机单元。 它们呈现出令人满意的结果，因为它们能够在许多实例中找到局部最优值。

马丁等人结合二元决策变量来决定是否使用压缩机站内的压缩机单元以及是否打开或关闭阀门。他们描述了一些用于模型非线性的分段线性逼近的技术，从而产生了大的混合整数线性程序。他们研究了连接这些分段线性近似的子多面体，并表明顶点的数量在计算上易于处理，产生精确的分离算法。它们还提供了适合分离算法的分支策略。他们在他们的工业合作伙伴E.ON Ruhrgas AG（一家德国天然气公司）提供的三个真实案例中测试了他们的方法。实例的大小范围从11到31个管道和3到15个压缩机站。他们观察到分段线性逼近足够精确以保证全局最优解。

Chebouba等提出了一种用于MFCP的蚁群优化算法（ACO），其具有压缩机站内可变数量的压缩机单元。决策过程的一部分涉及确定每个压缩机中的操作单元的数量。 ACO算法是一种相对较新的进化优化方法，用于解决不同的组合优化问题。他们在Argelia的Hassi R'mell-Arzew真实世界管道网络上测试了他们的方法，包括5个管道，6个节点，5个压缩机站和每个压缩机中的3个单元。他们还建造了三个额外的箱子，最多23个压缩机站，每个压缩机有12个压缩机组。他们将他们的方法与DP实现进行比较。他们的实证研究表明，该方法在非循环系统中具有良好的性能。

Tabkhi等提出了MFCP的计算研究，应用于法国公司Gaz de France的案例研究。作者提出了MINLP模型，其中引入了用于表示管道流动方向的二元变量。他们使用GAMS/SBB求解器求解MINLP模型，该模型调用CONOPT来解决NLP子问题。现实世界的案例有30个管道和6个压缩机站。为了使问题更容易解决问题，作者考虑了几种不同的策略来初始化一些或所有二元变量。他们还报告了敏感性分析，讨论了初始化二元变量的特定策略之一。

Wuet al提出了一种具有压缩机切换约束的混合目标模型，其旨在最大化收益和吞吐量，同时考虑加权值以解决两个优化问题。该模型通过粒子群优化（PSO）算法求解，该算法包括自适应惯性权重调整程序以克服早熟收敛问题。使用市售的模拟软件来提供满足基础模型的初始粒子。作者提出了一个基于中国天然气管道系统的案例研究，该系统具有枪管拓扑结构和四个压缩机站。与PSO算法的其他扩展相比，该算法显示出快速的收敛速度。

瞬态模型

瞬态模型更具挑战性，因为必须考虑与气体系统动力学相关的控制偏微分方程。从描述性的角度来看肯定有一些研究。 在这里，我们调查与瞬态系统优化相关的最重要的工作。

分层控制方法

优化技术也已应用于瞬态（时间相关）模型。例如，Larson和Wismer 提出了一种用于枪管管道系统的瞬态操作的分级控制（HC）方法。 Osiadacz和Bell提出了一种简化的瞬态气体输送网络优化算法，该算法基于HC方法。瞬态模型的HC方法可以在Anglard和David，Osiadacz以及Osiadacz和Swierczewski中找到。就优化压缩机站子问题而言，已经从这些方法报告了一定程度的成功。然而，这些方法在全局优化最低成本方面具有局限性。

从HC的角度来看，解决天然气管道系统中瞬态流动的最重要的早期努力之一是由于Osiadacz 开发了一种基于分层控制和网络分解的算法。使用梯度搜索技术解决了局部问题。使用目标协调方法协调子系统以找到全局最优。他为输出压力作为控制矢量的元素处理的情况制定了离散状态方程。该算法使用英国国家电网的一部分进行测试，该网格包含23个节点，13个管道，3个压缩站，2个存储供电节点和1个源。建立24小时的时间框架，时间离散化步长为2小时。结果有点类似于基于Furey的基于序列二次规划的替代算法所获得的结果。发现的最大差异大约为15％。作者指出，超过24小时的动态实例无法在合理的时间内完全解决。作者总结说，他们提出的基于分解协调的方法适用于并行计算。

数学编程方法

关于天然气管道系统瞬态优化的早期工作归功于Mantri等人他们开发了一种瞬态气体优化模型，可以最大限度地降低天然气运输成本，在这段时间内，由于供需指定的波动，线路包装和吞吐量正在发生变化。其优化引擎的主要组成部分基于GRG方法和动态编程。 Tao和Ti推导出一种在天然气管网中进行瞬态分析的方法。传统上，用于气体管道系统的瞬态分析的控制方程涉及两个偏微分方程，其通常通过复数数值方法求解。作者通过结合电阻和电容来扩展电子模拟方法，这导致了一阶常微分方程和解决瞬态问题的另一种方法。发现所提出的方法比以前的方法更有效。后来Ke和Ti 使用与电气系统相同的类比来开发新模型。经验证据表明，在这种新模型下获得的解决方案与使用以前模型的解决方案兼容。这个新模型更容易处理。Osiadacz和Chaczykowski对天然气管道系统中瞬态流动的等温和非等温模型进行了比较。

Ehrhardt和Steinbach解决了瞬态流水线优化问题。它们提供适当的空间和时间离散化以获得大规模非线性规划问题（NLP）。这个大规模的NLP通过通用NLP代码SNOPT与自动微分附加SnadiOpt相结合来解决。他们在相对较小的网络上测试他们的方法，其中三个压缩站考虑了不同的情况

Aalto 提出了一项关于瞬态条件下天然气管道实时优化的研究。他指出，即使在压缩机站（CS）关闭或启动等大型瞬变中，许多管道系统也只是轻度非线性。定义了一个动态的后退水平优化问题，其中管道的自由响应预测是从管道模拟器获得的，并且获得决策变量的最优值，解决了近似二次规划（QP）问题，其中成本函数是能量消费CS。使用离散决策变量，CS的关闭/启动命令扩展了该问题。定义了混合逻辑动态（MLD）系统，但得到的混合整数QP问题显示为非常高维。相反，定义了一系列QP问题，导致尺寸相当小的优化问题。在模拟环境中测试后退水平优化，并与来自真实天然气管道的数据进行比较，显示压缩机能耗节省5-8％。

Mahlke等提出了瞬态天然气网络优化问题的模拟退火元启发式算法。对于这个瞬态问题，它们呈现出高度复杂的混合整数非线性程序。他们通过将这些约束与适当的惩罚因子结合到目标函数中来放松描述管道中气体动力学的方程式。针对松弛问题开发了合适的邻域结构，其中时间步长以及气体的压力和流动是分离的。他们在德国天然气公司E.ON Ruhrgas AG提供的三个真实案例中测试了他们的方法。尺寸范围从11到31个管道和3到15个压缩机站。他们在极具竞争力的运行时间内获得了相当不错的结果。

2.3天然气管网优化研究主要方向

由于复杂输气管网运行优化问题的规模庞大、模型结构复杂，通用的管网优化引擎必须兼顾计算效率 及结果最优性等各方面问题，关键是针对优化问题的特点选择合适的简化方法和优化算法。

燃料成本最小优化MFCP

在气体传输网络中，系统的总体运行成本高度依赖于网络中压缩机站的运行成本。然而，压缩机站的运行成本通常通过压缩机站处消耗的燃料来测量。根据Luongo等人的说法，运行压缩机站的运营成本占公司总运营预算的25％至50％。因此，传输网络的目的是最小化压缩机站的总燃料消耗，同时满足输送终端处的指定输送流速和最小压力要求。

输量分配优化

我国天然气管网路径复杂，分布差异大，并且在未来的发展规划中还将有大量天然气管网投入运营。由于用气存在峰谷差，主要干线输气量对于输送效率至关重要，所以必须对主要的天然气管道干线的输气量根据用气量的实际情况及数据预测作出合理优化分配以提高输送效率，例如中亚天然气管道等大型主线天然气管道的输气量分配优化。

储存节点优化

如果不立即运输天然气，可以在需要时将其放入储存设施。目前，天然气的储存设施主要是地下储气库。地下储气库,就是将天然气重新注入地下可以保存气体的空间而形成的天然气气藏，是集季节调峰、事故应急供气、国家能源战略储备等功能于一身的能源基础性设施。2017 年我国地下储气库有效工作气量接近100亿m3，约占我国天然气消费量4%，远低于世界平均水平10%，距离2020 年、2025年和2030 年的目标缺口分别超过48 亿m3，200 亿m3，250 亿m3。2017 年底的“气荒”引起天然气价格的剧烈波动，充分暴露了国内天然气存储、调峰能力的严重不足的短板，国家层面已经意识到此方面的问题，2018 年来快节奏发布多项政策来刺激天然气储气工程的建设。

随着天然气产业链建设的不断完善，天然气储存节点将在天然气运销和调峰中占据重要角色，同时也将成为天然气管网中的重要一环，在天然气管网优化问题中必须将其纳入考虑范围。天然气储存节点，如地下储气库，一般都配备一定数量维持压力的压缩机，保持天然气干燥的脱水设施等大型工业设备，在日常的运行中将耗费大量能源。根据储气压力、湿度和储气量等条件不同，运行工况不同，所以可以将储气节点纳入管网优化系统中进行最佳储气量与最低能量消耗运行优化，进而节约储气环节的成本。

管存控制

管存是指管道中储存的气体量，是反映管道运行时的气体流速、管道压力、运行站场配置及运行效率的综合指标，亦是控制管道进出气体平衡的一个重要指标。管存变化对天然气管道安全性及能耗影响主要表现为：①在管存超高的情况下，由于管道平均压力较高导致系统运行风险增加；然而相对较高的管道压力可使管道内气体流速降低，进而全线的沿程磨阻降低，可节省能耗。②管存超低的情况下，各压气站入口压力较低，管道末端的压力亦较低，无法满足交气的合同压力；同时较低的管存导致管道平均压力较低，管道内气体流速较高，进而沿程磨阻较高，造成能耗增加。

管存控制是指管存的量和管存位置的控制，为确定合理的天然气管道管存控制范围，中亚天然气管道以全线各压气站和计量站为节点将管段分为若干段，根据站场压力控制值实现每段最优管存量的控制，进而实现全线最优管存量和管存位置的控制。管存量与季节、输气量等有关，全线的管存应如何分布能最大限度的保证运行平稳及能耗优化，则需要制定详细、合理的管存控制原则。

压力控制

压力控制是指利用压缩机组负荷分配系统实现站场压力控制，进而实现管存量和管存位置的控制。每日优化运行小组通过模拟仿真，计算出在当日工况下各站最优压力控制值，并通过调度令下达各合资公司 执行。中亚管道从投产至今，各站使用压缩机组转速控制，而转速控制无法实现全管道系统在稳态运行下的各节点控制，也就无法保证管道处于长期稳定及能耗最优状态，同时管道不稳定工况也会一定程度的造成设备金属疲劳，降低设备寿命。对国际先进的管道公司进行调研发现，已经采取压力控制的调控方式。

粒子群优化算法

3.1粒子群优化算法原理

粒子群算法是Kennedy和Eberhart等人根据鸟群的行为与优化问题之间求解的相似性提出的，在此处称为基本粒子群算法，以便于与后来提出的各算法进行区别。

粒子群算法计算初始时每个粒子都在n维空间中以一定的速度飞行搜索，X\_i=(x\_i1,x\_i2,…x\_in)是粒子i的当前位置，V\_i=(v\_i1,v\_i2,…v\_in)是粒子i的当前飞行速度。〖Pbest〗\_i=(〖Pbest〗\_i1,〖Pbest〗\_i2,…〖Pbest〗\_in)是粒子i所经历的最优位置。

将f(X)设为最小化的目标函数，则粒子i当前位置可表示如下：

pbest\_i (t+1)={█(pbest\_i (t)，若f(X\_i (t+1))≥f(〖pbest〗\_i (t))@X\_i (t+1)，若f(X\_i (t+1))<f(〖pbest〗\_i (t)))┤ （3-3）

假设群体中粒子的总数为N，所有粒子经历过的位置中最好的位置为gbest(t)，则：

gbest(t)=min⁡{f(pbest\_1 (t))，f(pbest\_2 (t))，…，f(pbest\_N (t)) （3-4）

粒子飞行位置和速度可根据个体和群体的飞行经验进行动态更新，其速度与位置更新方程可以表示如下：

v\_ij (t+1)=v\_ij (t)+c\_1 r\_1 (〖pbest〗\_ij (t)-x\_ij (t))+c\_2 r\_2 (〖gbest〗\_j (t)-x\_ij (t)) （3-5）

x\_ij (t+1)=x\_ij (t)+v\_ij (t+1) （3-6）

由上文可见有三部分组成了其速度更新公式（3-5），粒子初始的速度是其第一部分；粒子的认知部分是其第二部分，从这一部分可以看出粒子自身的经验思考使得粒子个体有了认知能力，c\_1是加速因子，它是用来调节粒子飞向自身最优位置步长的参数；粒子的社会部分是其第三部分，从这一部分可以看出粒子之间可以信息共享和相互作用，而c\_2也是加速因子，可以利用它来调节粒子飞向全局最优位置的步长。

在粒子群算法中，全局最优可以看做一个全局吸引点，各个粒子都会向着这个吸引点靠拢；同时，粒子的个体最优可以维持粒子在多个区域搜索，一定程度上克服了早熟收敛而达到局部最优。

1） 基本粒子群算法的计算流程

步骤一：将粒子群个体的速度与位置进行随机初始化，将每个粒子的初始位置设为个体最优位置pbest，将粒子群的最优位置gbest设置为粒子的全局最优位值；

步骤二：根据公式调整当前粒子的位置和速度；

步骤三：将个体更新后的位置与之前最优位置作比较，若相较来说更优则将个体的最优位置更新，否则，维持原值；

步骤四：将群体最优值与每个粒子的个体最优值进行比较，若个体最优值较优则用其替代原先的群体最优值，否则保持不变；

步骤五：检查算法是否达到了终止条件，若已经达到，则终止迭代，否则返回步骤二继续进行计算。

2）基本粒子群算法的参数设置

基本粒子群算法参数包括种群规模N，粒子最大速度V\_max加速因子c\_1和c\_2以及最大迭代次数T

种群规模：即种群中所有粒子的总数，种群规模越大则全局搜索能力越强，但同时其收敛速度也就越慢；

粒子最大速度：为了防止粒子搜索过程中超出约束空间范围，所以要对其最大速度进行限制，使粒子更新速度在[-V\_max，V\_max]之间，若粒子的速度超过限制范围则令其等于边界值。

加速因子：其代表每个粒子朝向局部最优值和全局最优值方向运动的加速权重，一般使

c\_1和c\_2相等，取值范围在[0，4]之内。

最大迭代次数：可将算法最大迭代次数作为其终止条件，取值视具体问题而定。

3）算法终止条件

粒子群算法终止条件一般可以设为满足一定的误差准则、达到最大迭代次数等。若终止条件为满足一定的误差准则则需要提前知道所求问题的最优值以及误差允许范围，当粒子群算法所求结果误差在允许范围之内时，可以认为算法已经收敛并且达到了全局最优值，此时使算法终止，否则就继续之前的计算步骤直到达到全局最优值为止。若终止条件选为达到最大迭代次数，则不论最终是否达到了全局最优值，只要达到最大迭代次数就使算法终止。

3.2粒子群优化算法优势

近年来随着国民们对天然气的需求，天然气管道的铺设也越来越多，天然气管网也越来越复杂。这就需要一种求解速度快，结果准确的新算法。而新型智能算法中粒子群算法脱颖而出，其在非线性非线性规划问题的求解上展现出了特有优势，它的搜索范围宽，对问题的限制少，找到最优解的可能性大，并且所得结果准确。

粒子群算法是一种基于计算机科学和群体智能的方法，在大多数的情况下，所有的粒子可能更快的收敛于最优解，适合于求解复杂的大规模的问题，因此粒子群算法为天然气管网优化提供了一种新的求解方法。

粒子群算法在求解多约束多目 标问题方面具有良好的求解性能和鲁棒性，为提高粒子群算法的求解性能，很多学者提出了改进方法，其中Clerc等设置压缩因子用来改进学习因子对算法的影响，Lovbjerg等将遗传算法的群体概念运用到粒子群算法，并提出子种群概念，Frans等提出协同粒子群优化算法，刘卓倩等提出三群协同粒子群算法，Liu等提出混沌粒子群算法。

运用实例

对粒子群算法进行变异改进后应用于管网算例。

综合能源服务发展背景

综合能源服务的基本内涵

基本概念

综合能源服务是一种新型的为满足终端客户多元化能源生产与消费的能源服务方式，涵盖能源规划设计、工程投资建设、多能源运营服务以及投融资服务等方面。具体而言，即在传统综合供能（电、气、热（冷）、水）基础上，整合可再生能源、氢能、储能设施及电气化交通等，通过天然气冷热电联供、分布式能源和能源智能微网等方式，结合大数据、云计算、物联网等技术，实现多能协同供应和能源综合梯级利用，从而提高能源系统效率，改善终端用户能源服务质量，降低用能成本的一种新型能源服务模式。

基本特征

综合能源服务本质上是由绿色发展、新能源技术与电子信息技术革命引发的能源产业结构重塑，从而推动的新兴业态、商业模式、服务方式不断创新，其具有综合、互联、共享、高效、友好的特点。

（1）综合是指能源供给品种、服务方式、定制解决方案等的综合化；

（2）互联是指同类能源互联、不同能源互联以及信息互联；

（3）共享是指通过互联网平台实现能源流、信息流、价值流的交换与互动；

（4）高效是指通过系统优化配置实现能源高效利用；

（5）友好是指不同供能方式之间、能源供应与用户之间友好互动。

我国的综合能源服务将依托以电力为中心的能源互联网展开，是泛在电力物联网的重要实施载体。

服务模式

综合能源服务意味着能源行业从产业链纵向延伸走向横向互联，从以产品为中心的服务模式转向以客户为中心的服务模式，这也是能源行业供给端结构性改革的本质要求。

从产业链角度可将综合能源服务大致分为四类：

（1）供给端延伸型的综合能源服务；

（2）网络传输端升级型的综合能源服务；

（3）用户端衍生型的综合能源服务；

（4）技术、装备渗透型的综合能源服务。

与传统能源服务模式的区别

传统能源服务，多是从产业链上游向下游纵向延伸的合纵模式，而综合能源服务则是围绕客户需求提供一站式服务的连横模式。新模式相对于传统模式的变化主要体现为以下两个方面：

（1）从以产品为中心的服务模式，变为以客户为中心的服务模式；

（2）从基于事物的弱互动服务模式，变为基于关系的强互动服务模式。

发展综合能源服务的重要意义

随着我国经济社会持续发展，能源生产和消费模式正在发生重大转变，能源产业肩负着提高能源效率、保障能源安全、促进新能源消纳和推动环境保护等新使命。构建综合能源服务系统的需求十分迫切。其重要意义如下：

（1）有助于打破能源子系统间的壁垒；

（2）有助于解决我国能源发展面临的挑战和难题；

（3）有助于推动我国能源战略转型。

技术层面——技术驱动

能源技术的革新为综合能源服务搭建了技术准备平台。机器学习、大数据科学、云平台与计算、分布式能源微网、多能互补系统等新技术概念与技术创新使构建以综合能源为基础，实现智慧应用的新型能源消费市场成为可能。

经济层面——万亿级市场

4月9日召开的“三型两网、世界一流”战略下的综合能源服务研讨会表示，保守估计，2020~2025年，我国综合能源服务产业进入快速成长期，市场潜力将0.5~0.6万亿元增长到0.8~1.2万亿元；2035年步入成熟期，市场潜力在1.3~1.8万亿元。

政策层面——“十四五”重头戏

为提高环境质量，促进可再生能源消纳，提高能源系统综合效率，国家密集出台了一系列相关支持政策，仅2017年综合能源服务中所有涉及的相关要素基本都已出台了最新政策，做好了政策支持框架布局，包括23个多能互补示范项目、55个能源互联网示范项目、28个新能源微网示范项目、136个生物质热电联产项目、超195个增量配电网试点项目、燃煤耦合生物质发电试点，以及微电网、并网型微电网、电力需求侧管理、储能技术、分布式发电市场化交易等辅助政策，为综合能源服务新业态的发展奠定了良好的政策基础。

在综合能源服务市场刚刚起步的情况下，国家只会加大政策扶持力度，帮助行业健康成长。

社会层面——施利于民

综合能源服务涉及能源的供给端、输配端和用户端的重大变革，旨在创新能源体系，提高能源效率，降低环境污染，降低能源成本，不仅为社会提供更高性价比的能源服务，还可为社会创造大量的就业岗位，对改善民生，建设生态文明社会大有脾益。

小结

国内外行业发展现状及趋势

国外发展现状及趋势

综合能源服务最早兴起于国外，经过多年的发展，目前在欧、美、日已成为能源电力企业的主流商业模式，也形成了较为完善的产业链。其产业模式是基于能源互联网+大数据+云计算平台，与用户进行友好互动，为用户提供以多种能源为支撑的，个性化、差异化、定制式的用能服务。

欧洲

欧洲是最早提出综合能源系统概念并最早付诸实施的地区，其投入大，发展也最为迅速。早在欧盟第五框架（FP5）中，尽管综合能源系统概念尚未被完整提出，但有关能源协同优化的研究被放在显著位置，在后续第六（FP6）和第七（FP7）框架中，能源协同优化和综合能源系统的相关研究被进一步深化，Microgridsand More Microgrids（FP6）、Trans-European Networks（FP7）、IntelligentEnergy（FP7）等一大批具有国际影响的重要项目相继实施。

根据Utilities UK集团的市场调研，欧洲已经涌现出上千家能源服务公司。对于欧洲很多国家而言，其能源系统间的耦合和互动急剧增强，德国和英国就是典型案例。

德国

德国于2008年在智能电网的基础上选择了6 个试点地区进行为期4 年的E 能源（E-Energy）技术创新促进计划，主要是以信息通信技术为基础，打造新型能源网络，开展了大规模清洁能源消纳、节能、双向互动等方面的示范工作。如哈茨可再生能源示范区项目（regenerative model region Harz，RegMode Harz），对分散风力、太阳能、生物质等可再生能源发电设备和抽水蓄能水电站进行协调，从而使得可再生能源联合循环利用率达到最优。

通过智能区域用能管理系统、智能家居、储能设备、售电网络平台等多种形式开展试点，E-Energy最大负荷和用电量均减少了10%~20%。此外，在E-Energy项目实施以后，德国政府还推进了IRENE、Peer Energy Cloud、ZESMIT和Future Energy Grid等项目。

英国

英国政府和企业长期以来一直致力于建立一个安全和可持续发展的能源系统。除了国家层面的集成电力燃气系统，社区层面的分布式综合能源系统的研究和应用在英国也得到了巨大的支持。例如英国的能源与气候变化部DECC和英国的创新代理机构Innovate UK（以前称为TSB）与企业合作资助了大量区域综合能源系统的研究和应用。2015年4月创新英国在伯明翰成立“能源系统弹射器”（Energy Systems Catapult），每年投入3千万英镑，用于支持英国的企业重点研究和开发综合能源系统。

美国

美国各类能源系统间有着较好协调配合，使得其综合能源供应商得到了较好发展，如美国太平洋煤气电力公司、爱迪生电力公司等均属于典型的综合能源供应商。

在技术上， 美国非常注重与综合能源相关理论技术的研发。美国能源部在2001年即提出了综合能源系统（Integrated Energy System，IES）发展计划，目标是提高清洁能源供应与利用比重，进一步提高社会供能系统的可靠性和经济性。2007年美国明确要求社会主要供用能环节必须开展综合能源规划（Integrated Resource Planning，IRP），并在2007~2012财年追加6.5亿美元专项经费支持IRP的研究和实施。

日本

日本的能源严重依赖进口，因此日本成为最早开展综合能源系统研究的亚洲国家。2009年9月，日本政府公布了其2020、2030和2050年温室气体的减排目标，并认为构建覆盖全国的综合能源系统，实现能源结构优化和能效提升，同时促进可再生能源规模化开发，是实现这一目标的必由之路。在日本政府的大力推动下，日本主要的能源研究机构都开展了此类研究，并形成了不同的研究方案，如由NEDO于2010年4月发起成立的JSCA（Japan Smart CommunityAlliance），主要致力于智能社区技术的研究与示范。

小结

国内发展现状及趋势

国内综合能源服务尚处于起步阶段。目前，开展能源服务的企业类型包括售电公司、服务公司和技术公司等。传统能源产业，包括：电网企业、电力企业、油气企业、设备商、ESCO（节能服务公司）、系统集成商以及专业设计院等，都在策划综合能源服务转型。国内典型的综合能源服务供应商，有南方电网旗下的南方电网综合能源有限公司、广东电网综合能源投资有限公司，以及新奥泛能网、协鑫分布式微能源网、远景能源、阿里云新能源等。

两大电网公司

新一轮的电力体制改革放开了配售电业务、公益性和调节性以外的发用电计划以及输配以外的竞争性环节电价，重塑了电力市场竞争格局，动摇了电网原有市场垄断地位，倒逼电网公司进行改革。

国家电网公司（国网）

国家电网公司已开展的综合能源服务包括节能和电能替代改造、电力需求响应、智慧车联网、风光储一体化、电动汽车充电桩服务、能效监测与诊断等。公司重点打造的苏州同里综合能源服务中心已开始示范运营。

中国南方电网有限责任公司（南网）

南网旗下南方电网综合能源有限公司于2010年12月成立，公司致力于成为国内领先、国际知名的现代能源综合服务商，目前主营“节能服务、能源综合利用、新能源和可再生能源开发、分布式能源、电动车充换电”等业务。2017年 2月，南网成立广东电网综合能源投资有限公司，增加了综合能源、增量配网建设与投资、分布式能源、电动汽车投资与运营、市场化售电、能效服务等六个新兴业务经营模块。

五大发电集团

中国华能集团公司（华能）

华能已从初期的单一燃煤发电模式发展为燃煤、燃气、可再生能源的多元化发电模式，并积极探索新型能源服务模式。华能整合在渝发电企业资源，于2016年8月全资成立华能重庆能源销售有限责任公司，在全市范围多个工业园区开展能源销售及增值服务、配网建设、分布式能源等业务，为用户提供了安全可靠和极具价格优势的电、热、水、冷等综合能源服务。

中国大唐集团公司（大唐）

大唐集团的目标是通过2~3年时间构建适应市场、统一协调、机制灵活、决策高效、体系完整的营销体系，建立“总部宏观指导、省级公司经营决策，基层发售电公司组织实施”的营销管理管控体制。目前大唐集团已经成立了17家区域性的营销公司和三家区域的售电公司，开始向综合能源服务企业挺进。

中国华电集团公司（华电）

华电以供给侧结构性改革为主线，推动公司由生产型向生产服务型转变，并于近日正式发布《中国华电集团有限公司综合能源服务业务行动计划》。这是国内同类型企业首次发布综合能源服务类行动计划，标志着中国华电迈出打造“清洁友好、多能联供、智慧高效”综合能源服务业务的实质性步伐。

国家能源投资集团有限责任公司（国能投）

国家能源投资集团有限责任公司由国电与神华合并重组而成，继承两者特点，形成强强联合、优势互补的煤电联营模式。国能投推动实施区域综合能源一体化方案，实现横向“电热冷气水”能源多品种之间，纵向“源-网-荷-储-用”能源多供应环节之间的生产协同、管廊协同、需求协同以及生产和消费间的互动。

中国电力投资集团公司（国电投）

国家电投正在大力推动综合智慧能源这方面的发展，提出“综合智慧能源服务”模���：提供能源一体化解决方案，针对新建楼宇、园区的电、水、气、热、冷等不同的管道，将不同能源进行有机的合成，使其协同发展。

四小豪门

华润电力控股有限公司（华润电力）

综合能源服务是华润集团的新兴战略业务，主要包括：电力销售、配网建设与运营、分布式能源，以及能源互联网引领下的新兴业务。早在2017年，华润电力首个综合能源示范项目福耀智慧能源项目首批18MWp分布式光伏项目便已并网发电。

国投电力控股股份有限公司（国投电力）

国投电力近年来大力发展新能源业务，紧跟光热发电、智能微网、固废发电、储能等前瞻性能源行业的新业务、新业态、新模式，着力打造“水火并举，风光互补”的大型综合能源公司。

国家能源集团国华电力公司（国华电力）

国华电力着力推动由传统能源提供者向综合清洁能源生产专家、综合能源配置专家和综合能源使用专家转变。在分布式能源方面，国华电力积极探索贴近需求侧的综合能源供应商业模式，为用户提供“以分布式能源为主导，多能互补、能源互联网的综合能源一体化解决方案”，构建“源、网、荷、储、控”协调发展、集成互补的综合能源系统。

中国广东核电集团有限公司（中广核）

中广核已在国内多地成立综合能源服务公司，围绕清洁能源开发、建设、生产、供应与利用，提供以掌握核心技术和掌控产业链关键资源为目的的相关工业产品；提供与清洁能源开发、建设、生产与供应相关的专业化服务；提供与能源利用和消费相关的能效服务；提供与清洁能源业务相关的金融、公共事业等综合服务。

热力企业

北京京能股份：推进综合能源服务业务发展，目前首个综合能源服务项目已落地。

北京热力集团：为迈向绿色发展，清洁供热进行了各种探索，正在推广的包括：分布式光伏、生活污水余热回收、浅层低温能、冷热联供、无干扰地岩热、谷电蓄热等。

东方能源：构建综合能源发展平台，努力将公司建设成为创新型、清洁型、效益型的一流现代国有综合能源企业。

油气企业

中石油：已经进军售电业务，欲开拓综合能源服务。

中石化：推出首座综合供能站融合三大能源零售体系。

中海油：积极布局分布式能源与海上风电，打造新型综合能源基地。

延长石油：明确“提高清洁综合能源和高端石化产品供应能力、建成受人尊敬的创新型现代化国际能源化工公司”的发展目标。

华润燃气：积极推进分布式能源及充电桩等新业务。

北京燃气：着力打造清洁、高效、安全的城市综合能源供应体系，深入推动“多能协同、智能耦合”的能源协作模式。

民营企业

新奥：泛能网

新奥的泛能网以及协鑫的分布式微能源网都是属于区域能源互联网形式。新奥将冷热、燃气联系起来，开发冷热电联产项目，目前已形成新奥能源、能源化工、太阳能源、智慧能源、技术工程等相关多元化产业。

协鑫：分布式微能源网

协鑫的分布式微能源网按照“六位一体”模式实施：将天然气热电冷系统、光伏发电、风能发电、储能技术、节能技术、低位热能结合为一体，提供多种能源服务。

远景能源：互联网+能源

远景通过信息化技术包括大数据、云计算和数据挖掘等手段打造“互联网+”新能源发电的模式，积极构筑智慧能源生态，目前已从单一的风机制造商成长为领先的综合能源服务提供商。

阿里云新能源

阿里能源云，是为新能源行业提供丰富的专业化云端业务与技术解决方案，帮助能源运营商、服务商快速搭建标准化或定制化商业平台，实现业务应用的灵活开发与落地，构建能源互联新生态。

小结

小结

综合能源服务框架

综合能源服务依托能源互联网展开，通过泛在电力物联网应用，充分发挥电的枢纽作用，实现多种能源系统的统筹管理和协调优化，推动多能互补，实现能源精细利用，提升社会整体能效。以下从供给端、用户端和输配端对综合能源服务的实施方向进行说明。

供给端

电力

在新增电力方面，根据目前电网结构分析，2019~2020年每年新增装机将在130~160GW，而火电、水电、核电没有大批量新增装机，加之 “三北”外送通道助力，风电、光电装机空间重新打开。

在电力生产方式上，除去规模化的集中式风电、光电生产，分布式新能源系统也将得到大力支持。此外，在现有电力结构下，实现可再生能源之间和可再生能源与传统能源间的多能互补也是当前供给端改革的重要方向。

因此，可再生能源，尤其是风电、光电的相关产业仍将持续走热。

热力

从用能结构上看，2016 年底，供暖能源以燃煤为主（占 83%），天然气、电、地热能、生物质能等合计约占 17%。取暖用煤年消耗约 4 亿吨标煤，其中散煤约 2 亿吨标煤。根据供暖清洁化的发展趋势以及经济性角度考虑，未来一段时间将主要以发展集中供暖为主，分散供暖为辅。

集中供暖清洁化主要包括三个途径：一是通过热电联产等集中供热；二是采用先进燃煤工业锅炉；三是使用天然气、电、生物质、地热等清洁燃料。分散清洁供暖主要包括用先进炉具、电取暖、天然气取暖和热泵等技术。

油气

受当前国际形势的影响，国际油价的波动性较大，而全球天然气的供应格局正在重构。2018年，美国成为世界第一大油气生产国，油气出口快速增长，对全球油气市场的影响力明显增强，美国与减产联盟博弈、中美贸易摩擦等将进一步推动国际油气秩序重构。

中国油气行业正进入深化油气体制改革意见的实施阶段，国内油气行业全产业链扩大开放，民营油气企业进一步分化发展迅速崛起；天然气保障能力建设首次提升到国家战略层面，对冬季天然气保供起到关键作用；外资进入步伐明显加快、力度明显加大。未来，化石能源清洁低碳化发展与非化石能源规模化发展将成为能源结构优化的两大驱动力。

小结

用户端

节能改造

随着互联网和大数据技术的发展，企业通过建设能源管理系统来为企业进行能源决策成为了可能。传统的节能改造方式，只解决了“谁”、“做什么”的问题，而“如何做”、“做到什么程度”（运行绩效），主要由任职者主观意愿来决定。通过能源管理系统能将节能效果数字化，有利于节能目标分解落实和考核，大大减少工作中的随意性。这也意味着节能改造的方向将由单一的降低能耗转向能源综合利用的方式。

负荷调控

传统能源模式遵循“以需定供”的原则，对供给端的能源稳定性提出极高要求，同时也造成了调峰调负的困难。而随着未来大量可再生能源的渗透，其自身能源特点带来的不稳定性对现有模式造成极大挑战。因此，借鉴国外经验，结合物联网与数据信息技术，在当前电力结构“以需定供”的基础上，发展“以供调需”的灵活模式是解决这一挑战的有力手段，由此引发的新一轮用户端革命将带来广阔的市场机会。

智能设备

智能工厂、智能家居和智能楼宇系统是能源互联网的主要末端环节，在能源互联网实践中，需要智能化改造现有的能源设备，使之成为新的互联网入口端，实现对离散化、分布式负载端的动态管理与优化，因而也迫切需要能源互联网对于接口端的标准化。

小结

输配端

虚拟电厂

售电端改革的主要目的是形成市场化多买多卖、供需调节的电力体制，从目前部分地区直购电试点与电力交易平台试点的情况来看，售电端将沿着“点对点”直购电，“点对面”全国统一的竞价交易平台；“全用户、多品种”电力批发市场；“多衍生品”电力金融市场的方向发展。

而基于互联网大数据交互后的电力交易市场，不仅提供交易服务，还提供需求、负荷动态管理，电力期货和金融交易。

信息服务与优化调控

供给端与用户端设备的智能化改造将带来海量数据流，在现有水平下，靠单一的中央服务器进行管理调度并非良策，更有效可行的方式是采用分布式管理模式，通过各级子处理中心分担中央平台的压力。由此将带来更多的区域性企业竞争机会，因而发挥行业企业优势，建立企业辖内数据分析与优化调控平台，联合互联网企业与设备商，建立平台和接口标准优势，在“数据”割据局面下得以立足是企业必须考虑的战略行为。

在数据平台基础上，实行高质量的优化调控策略则是提高综合能源系统稳定性和能源效率，获取更大利润的重要保障。

充储服务

作为综合能源系统的重要支撑，储能可以起到削峰填谷作用，提高风、光等可再生能源的消纳水平，支撑分布式电源及微网，促进能源生产消费开放共享和灵活交易、实现多能协同。电动汽车具备用电+分布式储能双重身份，是未来能源网络的重要一环。通过能源互联网与可再生能源构互相配合，在光储式充换电站、快速充电站、需求响应充电中发挥储能作用，且动力电池梯次利用将降低储能电池应用成本。目前电动车量较少，对电网冲击有限，随着电动车数量上升，对电网的影响将非常大。

能源充储站的建设以及充储设备的开发是能源互联网的重要落地基础，也是分布式能源系统的基石，未来市场前景广阔，但是当前准入资产门槛较高，

小结

小结

综合能源核心技术发展现状及趋势

综合能源服务是在新能源技术与电子信息技术协同突破创新下诞生的新型能源服务模式，本文从综合能源服务的供给端、输配端和用户端提取三大共性关键技术，分别为优化控制技术、数据信息技术和硬件技术。

优化控制技术

能源生产与转化优化

综合能源服务的目标之一是提高清洁能源的占比，而可再生能源具有众多不可控的特性，若盲目开发不仅浪费资源，还造成一系列的新问题。多能互补系统作为提高可再生能源可靠性的有效手段涉及到一系列的优化问题，如设计、控制和运行优化等。此外，根据气象进行可再生能源的预测，根据负荷进行生产计划优化，根据资源进行分布式能源供给设计等都是实现综合能源服务的重要技术基础。

作为综合能源的另一个重要方面，根据需求将电、热、气等不同种类能源生产和转化进行有效的耦合调度，真正实现以电为枢纽的新型能源网络和服务，不仅需要开发新的能源技术，还需要设计深度优化策略对其进行优化调控。

负荷管理优化

高质量的需求侧管理不仅能够节约能源，还能平抑可再生能源发电间歇性，并且在分布式能源故障情况下帮助维持系统功率平衡。有别于传统的粗放式管理，新的能源模式要求更加精细化和预先性的管理模式，实现供需之间的最大匹配，在提高服务质量的同时节约能源。

能源网络优化

能源互联网中的能源网络优化主要包括储能装置与能源生产装置的综合能量管理，终端能源网络对分布式电源、电动汽车等新型配用电设备或系统的调度管理，微网、大网的调度协调优化，不同种类能源间的转化和调度，对能源再分配和再传输优化的能量路由技术等内容。

数据信息技术

信息和通信技术

信息通信技术（ICT 技术）是电信服务、信息服务、IT 服务及应用的有机结合。发挥ICT 技术的长处，将能源的生产、运输、交易和消费等相关设备连接起来，是实现能源互联的重要技术基础。

能源大数据技术

综合能源服务将借助云平台等设备，利用获取的能源大数据信息，使用机器学习等先进的数据分析手段，形成精准的能源生产和负荷用户画像，进一步结合气象、交通、文化等信息，匹配能源生产计划与负荷调度，提供智能化终端能源服务，实现多级优化。

硬件技术

能源转化技术

在能源生产方面，无论从技术还是经济性角度，目前风能、太阳能、生物质能、地热能和海洋能等可再生能源转化为电能、热能的水平尚未达到预期水准，迫切需要从技术上对其进行创新，实现硬件设备上的升级换代，提高市场竞争力。

在不同种能源间的转化耦合方面，现有的电、热、气转化技术，如联合燃气循环（CCGT）、热电联产（CHP）、电转气（气体燃料）（P2G）、电转液（液态燃料）（P2L）以及热泵等技术并不足以满足未来综合能源服务多场景、高灵活的需要，因此需要针对典型综合能源服务场景开发新型的能源间转化技术与设备，支撑行业深度改革。

先进储能技术

储能技术在供给端、输配端和用户端都起着重要作用。先进的储能技术包括压缩空气储能、电池储能、飞轮储能、超导储能、超级电容器储能、氢存储、P2G 、P2L等。从能源发展趋势来看，亟需研究以下储能方向：

（1）不同储能方式的互补模式；

（2）大容量化学电池模块化集成系统，储能系统能量转换装置；

（3）大容量集成储能间歇性能源功率平滑调节装置。

----todo list----

建立cmso.ircre.org网页（）

建立indico.ircre.org会议网页

设置ircre.org的企业邮箱（done）

设置nextcloud用户

设置git.mingtaoli.cn用户（done）

国际可再生能源研究中心

能源系统计算、建模、仿真、优化研究组行动计划

https://cmso.ircre.org

李明涛

mingtao@xjtu.edu.cn

摘要：本项目组以能源系统计算、建模、仿真、优化为核心研究内容。

1 总体思路

研究组最重要的是定位，组长最重要的职责之一是明确前进的方向。本研究组的核心定位是发展关键方法、培养人才、促进创新。三位一体：以关键问题为导向发展方法，以关键方法的研究培养人才，以人才为基础促进创新。反过来以创新创业为基础提炼问题，连接社会需求。

具体而言，立足于新一轮能源技术革命的历史关口，面向未来、谋划未来、引领未来，聚焦传统能源产业改造升级，推动IT技术与能源技术深度融合，探索新能源学科改造升级的实施路径，为信息化、数字化提供源源不断动力之源。

核心目标能源系统计算建模仿真优化。对社会而言：连接-生产-传播-服务。

a找对前进的方向

b形成技术影响力

c培养四项基本能力

1、能力建设为主，同时也需要有业务抓手；

2、立志高远，勇攀高峰，要做就做到最好。

技术壁垒

1、你所需要的一切资源几乎都能找到提供者，而且往往不止一个。

2、你也可以给各种需求节点提供服务，只要还在你的能力范围内。

3、由于规模巨大，需求节点和资源节点相互之间往往不知道对方在哪。

那我们做什么？能源系统计算建模仿真优化。

2 重点任务

连接：对接需求。

生产：发展核心方法与程序。

传播：促进社会对能源系统信息化、数字化的认识提高。

服务：为社会提供相应的服务，促进研究组良性循环。

3 重点工作分解

3.1 连接

可能的合作人员：杨树森、种道同、朱超、李燕、王倩、杨树森，种道同，刘俊，贺群武，张海涛，李燕，彭波涛，李辉

可能的工业界需求伙伴：思安新能源、炙耘、管网、

可能的学术界研究伙伴：

3.2 生产

学生：刘东宇、张晓海、余佳磊、汪龙、陈庚、李连坪、张蕾、李鲁冰

发展一系列工具：

培养一系列的人才：

3.3 传播

1. 发表一系列高质量的文章

2. 撰写一系列的书籍

3. 写博客，“做网红”

4. 开一系列研讨会

3.4 服务

支持合作者开办公司，服务社会

申请一系列课题

4 组织实施

近期拟申报的课题

科研方面申报课题的途径，西安交通大学校级项目、陕西省科技厅、深圳市、江苏省、苏州市，自然科学基金委、科技部，管道局，重点实验室开放课题，知名企业浪潮集团、曙光集团、并行科技、延长石油、炙耘信息、量子力能源、中石油管道、拓普索尔、暖舍节能、电建、西北有色院。

技术影响力

有形物：文章、著作、专利、软件、竞赛成绩等。

无形物：组织机构任职、参会做报告、对内对外合作、对内分享等。

团队的四项基本能力：连接、生产、传播、服务，其中“传播”就需要技术影响力。

对目标市场定位建议：

（1）以新建工业园区作为重点布局；

（2）将高负荷用电区域作为首选；

（3）兼顾可再生能源丰富的地区；

（4）重点关注北方清洁供暖市场。

（3）加快多种能源耦合技术研发，突破关键技术；

集群的基础知识

Linux基本使用

MobaXterm+filezilla

Python编程环境

电路

C++编程环境

Java编程环境

Fortran编程环境

Julia编程环境

最优化方法

粒子群算法

大数据

工业互联网

机器学习

过程与能源系统优化

模拟与仿真

GPU编程

Mpi

密度泛函理论使用入门

计算催化的进展

有限体积法cfd使用入门

有限元法入门

分子动力学入门

Trnsys入门

Modelica入门

Lider

Energyplus

Doe-2

Designbuider

Idaes pse

Genopt

Sam

Pyomo

Jump

1能源科学与能源技术，管窥美国国家实验室研究部

2能源系统建模与仿真，

3能源系统分析

4 优化

广义电路分析理论

数据程序、文档上线

Nextcloud

Git

网页宣传

大数据与机器学习于综合能源系统

Plasmo.jl

Ideas

Jump.jl

Blackboxopt.jl

“最优化问题的人工智能方法”重大项目指南

最优化理论是应用数学的重要分支，它在国防军事、经济金融、交通运输、工业工程、信息科学和航空航天等领域的重大问题中发挥非常重要的作用，特别是在新一代人工智能技术革命中，最优化思想与方法发挥着越来越重要、有时甚至是关键的作用。反过来，新一代人工智能技术的发展，凸显了传统最优化方法的诸多局限，也给最优化方法提出了许多挑战。例如，传统优化方法的设计原理往往以局部为导向，设计策略没有充分利用历史迭代信息和已有经验等先验知识，设计方式未考虑与具体问题的适配性。而人工智能技术注重以全局目标为导向，强调充分利用已有经验数据和环境交互信息，采用与实际问题相适应的方法等。人工智能技术的蓬勃发展，既给最优化理论的发展带来了重要机遇，也给最优化理论发展给予了重要启示。因此，开展最优化问题的人工智能方法研究，具有重要的理论意义与应用价值。本项目通过开展连续优化的自主学习方法、多目标优化的机器学习方法、混合整数规划的人工智能方法和组合优化的深度强化学习方法等研究，发展基于人工智能的自适应、自学习的全局优化方法与理论，并利用这些方法解决几类典型最优化问题。随着本研究项目计划的实施，将极大地推动该领域在我国的发展，培养更多的青年数学家从事这一领域的研究，形成一支具有国际一流水平的最优化研究队伍，加强我国在这一重要领域的国际影响力。

一、科学目标

本项目研究最优化问题的人工智能方法，面向最优化理论与方法的学科前沿，针对传统最优化理论与方法的局限，通过揭示人工智能技术中的一些新思想和新方法，开展以全局最优化为导向的最优化问题的人工智能方法研究，建立若干新理论和新方法，设计一系列高效算法，并在解决几类典型最优化问题方面取得突破。通过本项目的研究，从根本上突破传统最优化方法的局限，实现最优化理论的新发展，显著提升我国最优化领域的研究能力和研究水平。同时，也为人工智能技术革命、为解决国计民生中的重大优化问题提供新的方法。

二、研究内容

（一）连续优化的自主学习方法。

通过模拟人工智能的自适应学习原理，分析连续优化方法的共性构造特征；对几类典型的连续优化问题，研究其人工智能方法与理论；建立参数自调节，方向自选择的自适应迭代优化算法；通过建立连续函数空间的学习理论，为自适应优化算法建立理论基础。

（二）多目标优化的机器学习方法。

针对各类多目标优化问题，利用机器学习方法分析各个目标间的冲突，构建自主协调策略；针对非凸多目标优化问题，建立其凸化问题的机器学习方法；针对非光滑多目标优化问题，建立光滑化的机器学习方法；发展多目标优化问题簇的元学习方法与理论。

（三）混合整数规划的人工智能方法。

针对各类混合整数规划问题，充分利用问题类别与历史数据信息，构造分支与节点选择、割平面、启发式调用等的自适应策略，设计高效的混合整数规划的人工智能方法；建立这些方法的评价与反馈机制，发展求解混合整数规划的方法与理论。

（四）组合优化的深度强化学习方法。

针对各类组合优化问题，通过分析其共性结构，研究不同类型的组合优化问题的表示方法和特征提取方法、价值网络与策略网络的构造方法；研究相应的训练算法和策略搜索算法；建立机器学习与优化方法的混合迭代算法框架；建立算法的评价与反馈机制，发展计算复杂性理论。

（五）典型问题的应用。

结合信息科学与技术、管理科学与工程、交通运输等学科，应用前面所发展的方法与理论解决国家重大需求和瓶颈技术中的几类典型最优化问题，验证其方法的有效性、可行性和优越性。

http://archimedes.cheme.cmu.edu/

http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html

https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html

https://neos-server.org/neos/solvers/index.html

https://scip.zib.de/

https://www.minlp.org/

https://www.particleswarm.info/

http://www.minlplib.org/

http://openmdao.org/

http://www.optimization-online.org/

http://apmonitor.com/

http://www.swarmintelligence.org/

http://www.gamsworld.org/

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

http://titan.engr.tamu.edu/

http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634

https://www.nature.com/articles/s41560-019-0326-1?source=post\_page---------------------------

https://www.nature.com/articles/s41893-019-0352-9

ahttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1004954111600827

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965260700251X

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918316842#s0005

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418312111

http://iiesi.org/who.html

https://science.sciencemag.org/content/360/6396/eaas9793/tab-pdf

http://energyresources.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2698984

https://www.ncl.ac.uk/cesi/research/

https://gow.epsrc.ukri.org/NGBOViewGrant.aspx?GrantRef=EP/P001173/1

https://www.dur.ac.uk/dei/events/?eventno=38992

https://www.dur.ac.uk/dei/projects/cesi/

https://www.birmingham.ac.uk/facilities/esil/index.aspx

https://es.catapult.org.uk/capabilities/systems-integration/

https://gtr.ukri.org/projects?ref=EP%2FP001173%2F1

http://www.sussex.ac.uk/spru/research/projects/cesi

https://www.eera-set.eu/eera-joint-programmes-jps/list-of-jps/energy-systems-integration-2/

https://smartcities-infosystem.eu/energy/energy-system-integration

https://www.eera-set.eu/

https://ec.europa.eu/energy/en/events/energy-storage-service-evolving-energy-systems-and-renewables-integration

https://ec.europa.eu/energy/en/studies/report-first-results-h2020-projects-energy-efficiency-and-system-integration

https://www.eranet-smartenergysystems.eu/Calls/Regsys\_Calls/Focus\_Initiative\_Integrated\_Regional\_Energy\_Systems

https://www.sci.kit.edu/311.php

https://www.itas.kit.edu/english/erts\_current\_poga17\_esi.php

https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-esi.2019.0015

https://www.energy.gov/eere/wind/renewable-systems-integration

https://chinaproject.harvard.edu/event/omalley20171129

https://chinaproject.harvard.edu/renewable-electric-power-and-grid-integration

http://acep.uaf.edu/facilities/power-systems-integration-lab.aspx

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965260700251X

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1004954111600827

http://helios.princeton.edu/ANTIGONE/index.html

https://gekko.readthedocs.io/en/latest/index.html

https://neos-server.org/neos/solvers/index.html

https://scip.zib.de/

https://www.minlp.org/

https://www.particleswarm.info/

http://www.minlplib.org/

http://www.optimization-online.org/

http://apmonitor.com/

http://www.swarmintelligence.org/

http://www.gamsworld.org/

http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering

http://titan.engr.tamu.edu/

http://mooc.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?knowledgeId=663634

过程系统工程应用题目出题、调研

本科项目设计

本科毕业设计

本科开放实验

研究生学位论文

管院工程管理硕士大作业题目

1、空气压缩机站节能

2、天然气余压利用

3、

研究内容：基于数据挖掘技术分析多类型能源用能趋势，预测用能曲线和典型用能场景；以清洁低碳安全高效为目标，研究广域和局域能源互联网的规划技术；研究含电/热/冷/气的能源互联网的优化调度方法；研究基于“互联网+”能源交易模式，实现清洁能源就近高效利用。

考核指标：开发多类型能源预测软件；开发含电/热/冷/气的能源互联网优化调度系统并实现园区级的示范应用。

申报条件：企业或校联合申报。

5 小组成员

6 研究项目

7 个人简历