

# 天津大学大学生创新创业训练计划

## 项目申报书（创新训练）

项 目 名 称：	基于自适应终身学习的综合 能源系统在线调控技术及装置
所 属 专 业 名 称：	电气工程
项 目 负 责 人：	樊东来
联 系 电 话：	13224291318
指 导 教 师：	穆云飞 教授
联 系 电 话：	15822509583
申 报 日 期：	2020 年 4 月 14 日

## 天津大学教务处制

<b>项目名称</b>		基于自适应终身学习的综合能源系统在线调控技术及装置					
<b>项目所属 专业类代码</b>		080601		<b>申请经费</b>		壹万元	
<b>项目实施时间</b>		起始时间： 2021 年 5 月 完成时间： 2022 年 5 月					
<b>申请人或申请团队</b>		姓名	年级	学号	所在院系 /专业	联系电话	E-mail
	负责人	樊东来	2018	3018208174	求是学部/ 电气工程及 其自动化	13224291318	fd10622@tj u.edu.cn
	成员	刘昱麟	2018	3018001206	求是学部/ 电气工程及 其自动化	16622808551	1262396734 @qq.com
		狄思宇	2018	3018001169	求是学部/ 电气工程及 其自动化	15241250799	dsy_201803 27@163.com
<b>指导教师</b>	第一 指导 教师	姓名	穆云飞		专业技术职 务	教授	
		单位	天津大学电气自动化 与信息工程学院		研究方向	电力系统及其自动化	
		联系电话	15822509583		E-mail	yunfeimu@tju.edu.cn	
	第二 指导 教师	姓名			专业技术职务		
		单位			研究方向		
		联系电话			E-mail		

**一、项目简介**

本项目针对综合能源系统运行调控面临的随机不确定性强，多工况变化快且交织复杂，运行调控模型精准性与调控策略适应性不足，系统运行经济与预期不符等难题，研发基于自适应终身学习的综合能源系统在线调控技术及装置。首先，建立综合能源系统**机理-数据混合的建模方法**；进而，基于综合能源系统电气冷热多元负荷、所处气象环境及能源转换装备历史量测及感知数据，提出**自适应终身学习**的综合能源系统调控模型**在线参数整定与调控技术**；最终将前述研究成果集成于研发**在线调控装置**并开展测试应用。

## 二、申请理由

从服务国际民生到引领能源变革，作为现代经济发展和社会进步的重要基础和保障，我国电网建设取得了重大成果。打破冷、热、电、气等供能系统独立规划、建设、运行与服务的既有模式，构建高度协同的综合能源系统是面向智慧城市能源发展的一种典型实践。

团队成员对综合能源系统相关领域充满兴趣，并了解到其调控环节面临随机性强、运行工况复杂等难题。然而，目前综合能源调控相关机理建模技术存在精度不足的问题，系统运行经济性差，极大限制了综合能源系统的发展。**人工智能与大数据技术**为解决上述难题提供了契机。基于**机理-数据混合**的建模方法，可以提高系统模型的精准度，进而，基于实际工况数据，可生成更加精准的**在线调控方案**，对于提升综合能源系统科学调度水平具有重要意义。项目研究成果涉及**电力及信息领域**的交叉，属于当前**多学科融合研究**的热点问题，综合能源服务市场具有万亿体量，项目研究成果具有重要推广应用价值。

本项目团队由 3 名电气工程及其自动化专业的本科生组成，两人曾获得国家奖学金，一人曾获得国家励学金。一人综合测评位列求是学部本科生第一名，两人加权成绩位列电气专业前三名。团队成员具备如下优势：

1. 团队成员均具备扎实的电力系统基础知识，有较好的计算机编程能力，曾系统学习 C++、Python 等课程，对人工智能算法具有较好的掌握水平。
2. 团队成员均具备扎实的数理基础，曾多次在天津市数学竞赛、全国大学生数学竞赛等学科竞赛中取得一、二等奖，此外，团队成员在全国大学生数学建模竞赛和北美数学建模竞赛中均取得二等奖的成绩，具备较强的模型构建能力，也为接下来要开展的综合能源系统的建模奠定了基础。
3. 团队成员均参与过综合能源系统相关课题研究，具备一定的基础，曾组队参加天津大学“挑战杯”并获得二等奖，彼此之间有过多次合作，团队默契度较高。
4. 团队成员均已高分通过英语四、六级考试，有较高的英文阅读水平，能够快速阅读并理解英文文献内容，对国内外数据库内文献查阅有丰富经验
5. 团队负责人刘昱麟，前期为挑战杯相关项目的负责人，担任班级组织委员，曾为校级优秀实践队长，具有很好的组织协调能力。
6. 团队成员樊东来，连续两学年以求是学部综合测评第一名获国家奖学金，专业基础扎实，曾参与配电网相关课题研究并担任队长，具有较强的责任感。
7. 团队成员狄思宇，前期参与挑战杯项目打下坚实的基础，积累丰富经验，担任班级学习委员，多次参与组织大型志愿实践活动，具有较强的综合素质。

经过前期的资料调研及实践，团队成员已对项目涉及的知识进行了调研和学习，已经实现了部分模块的建模，有能力进行更深入细致的研究。

### 三、项目方案

#### 1、项目研究背景

##### 1.1 研究背景

能源是现代经济社会发展的重要物质基础。我国能源结构长期以煤为主，油气对外依存度高，能源转型是实现“碳达峰、碳中和”目标的主战场。而综合能源系统（Integrated Energy System, IES）是践行国家节能降碳政策的有效载体、推动能源转型升级的重要抓手。IES 涉及多种形式及品位能源的生产、传输转换、存储以及分配等过程，可实现多种能源的综合管控和协同优化，有利于提升能源利用效率，降低用能成本，提升能源系统低碳化水平。

目前快速发展的各类大型产业园区具有清洁高效用能的迫切需求，且考虑到其资产归属统一，便于开展多种能源之间的协同，是目前 IES 系统构建和利用最好的试验田。IES 以多种能源转换设备，如冷热电联产（Combined Cool, Heat and Power, CCHP）、电制氢、热泵（Heat Pump, HP）等为枢纽，可在园区内通过整合电能、天然气、热能以及可再生能源等多类能源，运用信息技术和控制技术，实现不同能源子系统间的协调规划和运行优化<sup>[1]</sup>。然而，随着 IES 应用规模的逐渐增大，涉及的能源设备数量急剧增多，其结构变得异常复杂，系统运行调控面临的随机不确定性强，能源转换设备运行参数会随着系统运行工况发生动态变化，当前大量线性化的模型假设会造成建模精度的下降，单纯机理建模方法调控策略适应性不足，系统运行经济与预期不符，难以应对多能源耦合系统的运行调控精度要求，极易造成 IES 运行与预期目标偏差，经济性和能效水平不高等问题。随着大数据和机器学习技术的发展，以及越来越多的测量装备接入能源系统，数据驱动方法在 IES 相关研究中相继出现，一定程度上可用于提升 IES 的建模精度，但是数据驱动方法需要大量的真实运行数据训练，对数据质量要求较高，模型的可解释性较弱<sup>[2]</sup>，鉴于机理建模和数据驱动方法在建模精度、计算效率以及模型可解释性等方面均存在各自的特点，机理-数据融合的 IES 建模方法逐渐被研究人员关注。

因而本课题基于自适应终身学习的综合能源系统在线调控技术及装置方面的研究，建立能源系统机理-数据协同驱动模型，提出自适应终身学习的综合能源系统调控模型在线参数整定与调控技术，最终将前述研究成果集成于研发在线调控装置并开展测试应用，对于推进综合能源系统安全、经济、高效运行，实现“碳达峰、碳中和”目标有着重要意义。

##### 1.2 国内外研究现状

自综合能源系统这一概念被提出以来，国内外大量的研究人员对其进行了广

泛研究。文献<sup>[3]</sup>考虑风、光、负荷等的随机特性，建立了热电联供型园区混合能源系统经济运行的随机优化模型；文献<sup>[4]</sup>采用集中母线方式，提出了 CCHP 园区 HP 优化调度通用建模方法，并基于该方法构建了园区 HP 的动态经济调度模型框架；文献<sup>[5]</sup>在考虑综合能源系统风电接入、天然气网络和水电系统间影响的基础上，研究了电力系统机组组合问题。

截至目前，我国已通过 973 计划、863 计划、国家自然科学基金等研究计划，启动了众多与综合能源系统相关的科技研发项目，并与新加坡、德国、英国等国家共同开展了这一领域的很多国际合作，内容涉及基础理论、关键技术、核心设备和工程示范等多个方面。两大电网公司、天津大学、清华大学、华南理工大学、河海大学、中国科学院等研究单位已形成综合能源系统领域较为稳固的科研团队和研究方向。

欧洲同样很早就开展了综合能源系统相关研究，并最早付诸实施。除在欧盟整体框架下推进该领域研究外，欧洲各国还根据自身需求开展了一些特色研究。以英国为例，英国工程与物理科学研究会资助了大批该领域的研究项目，涉及可再生能源入网，不同能源间的协同，能源与交通系统和基础设施的交互影响以及建筑能效提升等诸多方面。

随着大数据与机器学习等信息技术的发展，越来越多的测量装备接入能源系统，如广域量测系统(wide area measurement system, WAMS)、数据采集(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统等量测技术,积累了体量庞大的反映能源系统运行状态的在线或离线数据资源。因此，基于数据的机器学习方法，如线性回归<sup>[6]</sup>、支持向量机<sup>[7]</sup>、人工神经网络<sup>[8]</sup>、高斯过程模型<sup>[9]</sup>等，已应用于 IES 系统变量的建模中<sup>[10-11]</sup>。其基本思想是指用数据资源实现多能源系统的预报、评价、调度、决策和优化等各种期望功能。

数据驱动方法常被应用于设备变量的建模中，如线性回归模型被用于废物发电厂设备(如锅炉、汽轮机)<sup>[12]</sup>及 CCHP 机组<sup>[13]</sup>的建模过程中。此外，数据驱动的网络化系统建模方法也被广泛应用，如文献<sup>[14]</sup>针对电-热-气耦合的 IES 建模问题，通过采集多能流网络中各节点的数据，提出采用信息熵方法量化可再生能源的不确定性因素以给出 IES 模型的概率型描述。文献<sup>[15]</sup>考虑区域热网建模中的水力模型的复杂性，采用线性回归方法对其进行简化。

但目前数据驱动方法在电力系统潮流计算方面的研究成果较为丰富，而在多能耦合的 IES 能流计算问题上应用仍然较少。文献<sup>[16]</sup>针对电-热耦合系统的潮流计算问题，提出了一种基于数据的电-热互联 IES 潮流线性化方法，但该方法中电网和热网的线性回归模型是分别建立的，并未对其能源耦合部分进行建模。

综上所述，虽然数据驱动的 IES 相关研究目前已取得了大量成果，但是依旧存在以下几个问题：

- **在 IES 建模方面：**数据模型无法完全替代机理模型，且模型的训练需要大量训练数据，目前的数据模型难以获得理想的泛化能力；
- **模型的解释性方面：**由于数据模型无需关注系统的机理信息所建多为黑箱模型，模型解释性差，限制了此类方法的大规模应用；
- **机器学习算法方面：**尚处于“计算智能”阶段，对于多能耦合以及结构复杂的 IES 运行优化问题，亟需研究具备自我感知系统状态的数据驱动方法。

尽管数据驱动方法在 IES 研究中存在诸多限制和瓶颈，其未来的应用潜力仍是相当巨大的。在 IES 建模方面，机理-数据协同驱动的方法为未来 IES 建模提供了一个很好的研究方向，可通过机理分析弥补数据模型可解释性差的缺点，并通过数据模型的高精度反向弥补机理模型的复杂度高精度差的缺点。

### 1.3 研究意义

基于机理和数据混合驱动的综合能源系统的建模方法可以在一定上实现优势互补，综合反映能源系统的运行状况并进行协同优化。随着可再生能源的不断发展，无论是当下还是未来很长一段时间，综合能源系统的机理-数据混合驱动建模方法都将是能源领域的重要研究方向，对于推进综合能源系统安全、经济、高效运行，实现“碳达峰、碳中和”目标有着重要意义，其研究前景广阔。

实际综合能源系统的运行工况是动态变化的，机理-数据混合驱动模型除了捕捉真实系统的初始特征，还需要能够与真实系统同步演变。为了能够真实准确反应系统运行工况，模型需要对设备的量测数据进行终身学习并适时做出调整。基于自适应终身学习的机理-数据混合驱动模型能够通过运行信息的反馈，准确捕捉真实系统特征的积累性变化，从而保证模型与真实系统的动态一致，进而将混合模型用于系统在线调控，以提升系统运行水平。

本项目构建的模型将具有考虑环境因素的影响、数据与机理联合驱动、终身自适应学习等技术特点，在应用中表现为更高的精确度和运算速度，支持模型参数的动态调整，相比于传统的机理建模更加贴近于实际系统运行状况，基于在线参数整定与调控技术研发的调控装置能够实现对设备的精确调度和准确控制，根据系统模型反馈数据对能源设备的运行实时做出调整，进而实现了能源系统在线优化与经济调度，体现出了较强的创新运行模式，将具有很高的实际应用潜力和市场推广价值。

### 1.4 项目已有基础

当前，本项目成员在综合能源系统建模领域开展了部分工作，具体为：

#### （1）建立了冷热电联供（CCHP）机理模型

我们采用分层次模块化的建模方法建立了分布式燃气轮机冷热电系统的全工况模型，如图 1 所示，首先将冷热电系统按照物理功能分成子系统，每一个子系

统是一个模块，如燃气轮机子系统、吸收式制冷机子系统等，将每一子系统按照设备之间的关系联系起来，组合成冷热电联供系统的全工况模型。

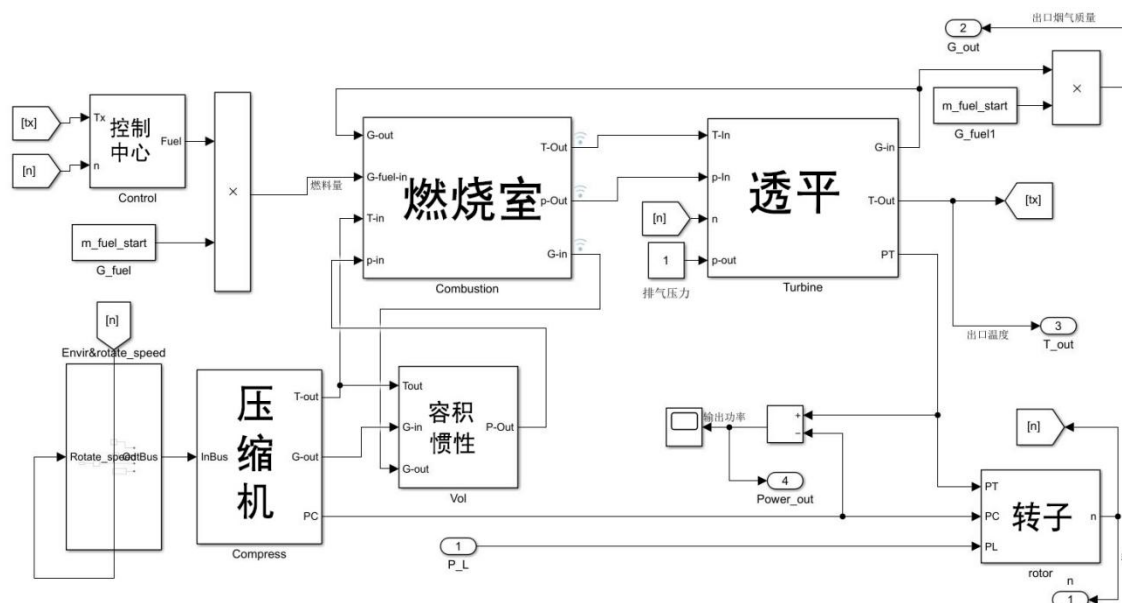


图 1：冷热电联供系统机理模型

## (2) 读取机理模型数据并确定了 CCHP 系统稳态运行边界

为了确定已有机理模型的稳态运行边界及不同目标功率下输入输出的对应关系，我们将 Simulink 仿真与 Matlab 中 for 循环语句相结合，读取模型实时运行过程中的出口温度、负荷功率、投入燃气量、转速的输出值并实时输出。

在此基础上，我们通过调整目标功率的值确定已有模型的稳态运行边界，当目标功率达到边界值时模型的运行状态如图 2 所示。

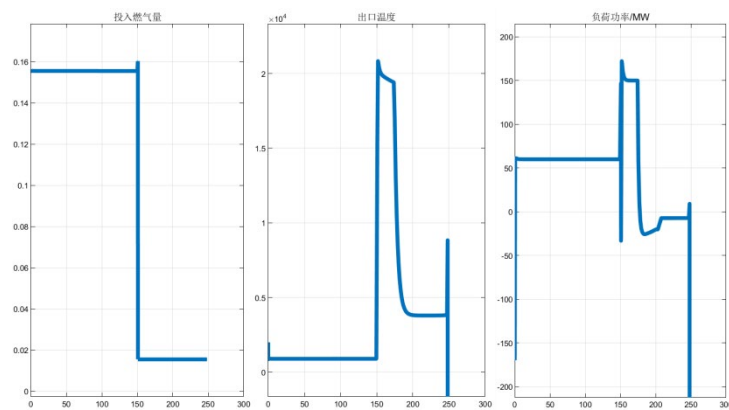


图 2：CCHP 模型的稳态运行边界

## (3) 建立了自适应终身学习的 CCHP 数据驱动模型

根据已有数据，建立误差反传（BP）神经网络进行机器学习，将烟气温度、烟气流量、转子转速作为输入量，将发电功率作为输出量，用从机理模型中读取的数据进行训练，其中 15% 的数据作为测试集，初步得到了 CCHP 的数据驱动模型，运行结果如图 3 所示。

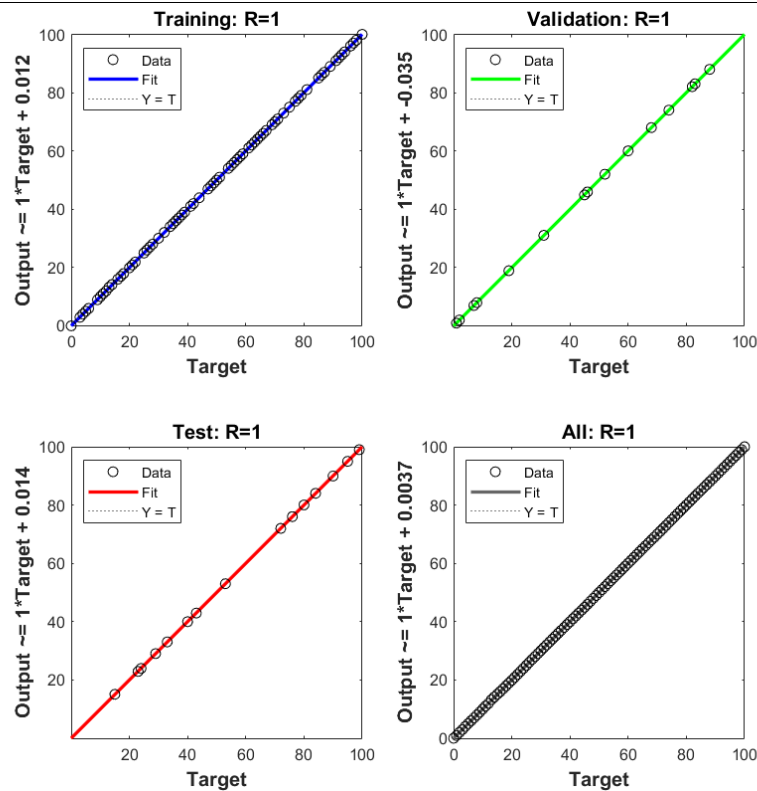


图 3：CCHP 数据驱动模型运行结果

## 1.5 尚缺少的条件及方法

(1) 尚缺少对综合能源系统中部分模块的建模：除 CCHP 外，其他模块的吸收式制冷装置、电热锅炉等的建模尚未完成。

(2) 各模块的集成问题：综合能源系统中各个模块建模后相对独立，而现实系统要求各模块配合运行，需要对它们进行合理连接形成整体系统。

(3) 尚缺少园区实际运行数据：我们将与企业合作，得到园区综合能源系统的各种能源输入输出数据，验证联合驱动模型的准确性。

## 2、项目研究目标及主要内容

### 2.1 项目研究目标

本项目针对综合能源系统运行调控面临的随机不确定性强，多工况变化快且交织复杂，运行调控模型精准性与调控策略适应性不足，系统运行经济与预期不符等难题，研发基于自适应终身学习的综合能源系统在线调控技术及装置。期望所研发的在线调控装置的功能描述如图 4 所示。



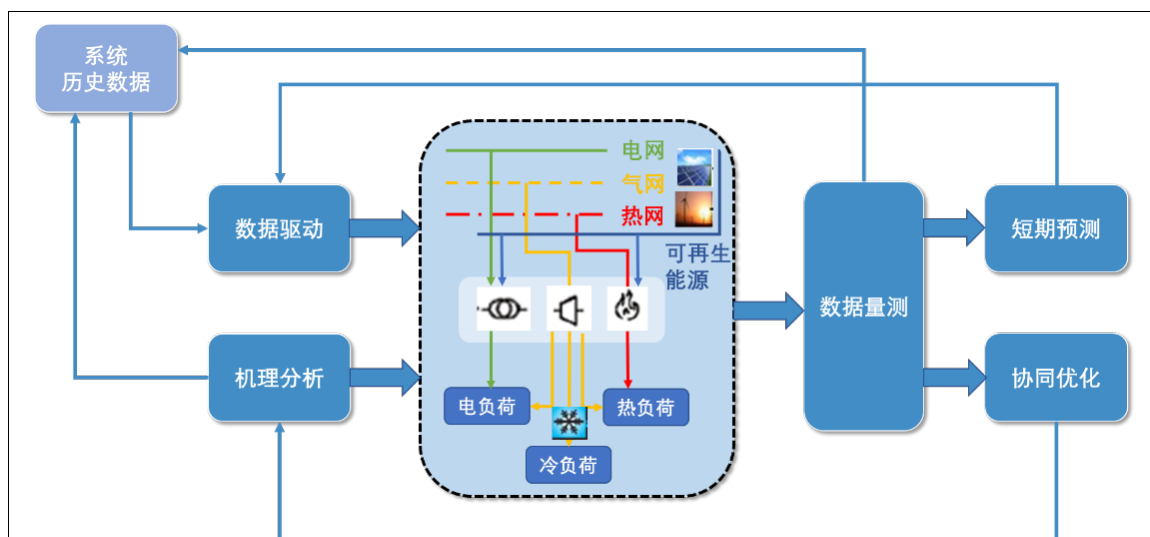


图 4：机理-数据混合驱动下系统功能描述装置

## 2.2 项目主要内容

### （1）综合能源系统的全工况机理模型

分布式冷热电联供系统是一种在能量梯级利用原理之下建立的将发电、制冷、供应生活热水一体化的三联供系统，典型的分布式燃气轮机冷热电联供系统与分产系统如图 5 所示。

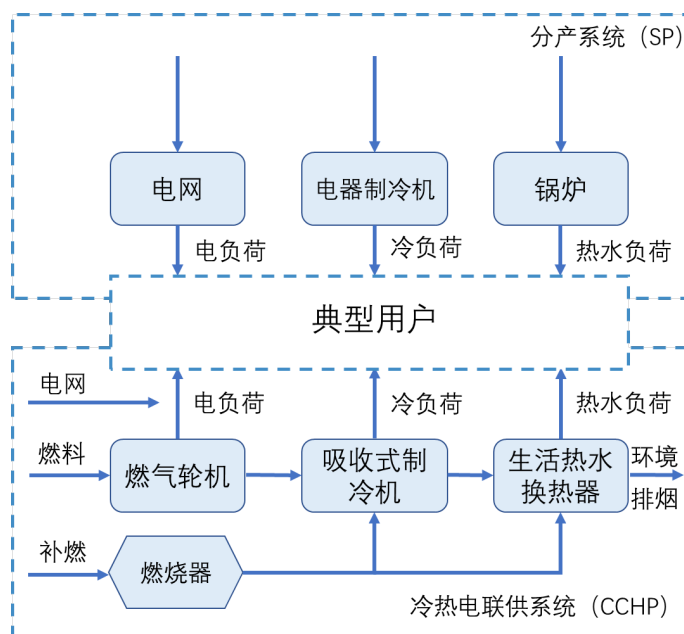


图 5：燃气轮机冷热电联供系统示意图

在冷热电系统进行设计时，通常采用单点设计方法进行系统配置，即根据用户建筑单位面积的设计电负荷、热负荷、冷负荷来确定发电机组、余热回收设备、辅助冷热源的容量大小。在进行冷热电系统的经济性评价时，通常规定机组的年

运行小时数与理想运行策略，从而确定冷热电系统的经济性指标。通过这种方式确定的系统实际运行时由于用户负荷变化，设备变工况，环境条件变化等因素会长期处于偏离设计工况的状态运行，容易造成系统实际运行效果达不到设计效果[17]。

冷热电联供系统是多种设备、多种循环构成的总能系统，有多种负荷输出，因此根据对系统效益关注的不同，存在多种评价指标。由于本项目重点关注联供系统变工况下节能性能下降研究，常用的一次能源利用率过于强调能量数量变化，而忽略了不同能量品位的区别；而热力学第二定律的焓效率，强调不同能量产品的做功能力，忽略了不同产品价值的不同，目前还没有一个非常好的指标反映系统地性能，所以选择最常用的相对节能率作为系统节能性的评价指标。

在追踪电负荷运行策略之下，当联供系统电负荷不足时候，需要从电网输入电负荷满足用户需求，其余时间燃气轮机发电机组负荷输出与用户负荷需求相同。当用户冷负荷或者热负荷输出不满足用户需求时候，系统通过一个燃烧器或者锅炉进行补燃，增加系统冷热负荷输出。

用户电负荷平衡如下：

$$E_{grid} + E_{gt} = E_{building} \quad (1)$$

燃气轮机燃料输入为：

$$F_{gt} = E_{gt} / \eta_{gt} \quad (2)$$

用户冷负荷补燃量：

$$F_{ch}' = \frac{Q'_{cool} - Q_{cool}}{COP_{ch}} \quad (3)$$

用户热负荷补燃量：

$$F_{hc}' = \frac{Q'_{heat} - Q_{heat}}{\eta_{ch}} \quad (4)$$

用户热水负荷补燃量：

$$F_{hw}' = \frac{Q'_{hw} - Q_{hw}}{\eta_{hw}} \quad (5)$$

分布式冷热电联供系统能耗：

$$F_{cchp} = F_{gt} + F_{ch}' + F_{hc}' + F_{hw}' \quad (6)$$

分布式冷点连供系统相对节能率：

$$PES = 1 - \frac{F_{cchp}}{F_{sp}} \quad (7)$$

## (2) 基于自适应终身学习的数据驱动建模

数据驱动模型关注系统内在物理规律,有建模过程简单,且计算成本较机理建模方法低的优点。对于园区综合能源系统的一个模块(如 CCHP),可以用神经网络的模型建模。BP (Back Propagation, 反向传播)神经网络具有很强的自组织、自学习、自适应和非线性映射能力,因此可以作为构建 CCHP 数据代理映射模型的合适选择。

神经网络的结构主要包含输入层、隐藏层和输出层,每一层的基本单元为神经元,相邻层节点间全连接。输入层接收输入的多维数据  $X$ , 隐藏层一般为单层或多层神经元来对输入数据进行特征提取和转换, 输出层输出最终的结果  $Y$ 。一般来说,输入层和输出层的节点数量是固定的,隐藏层的数量是可以自由指定的。层与层之间通过权值相乘和偏置量连接起来,相邻两层的节点通过全连接方式连接,即上一层的每个节点都会通过权值  $w$  和偏置与下一层每个节点连接。BP 神经网络的建模流程为: 首先初始化各节点的权值和偏置; 其次输入训练数据,通过前向传播计算各节点输出值; 然后通过输出值和真实值计算偏差函数,再基于预测的偏差反向传播计算各参数的负梯度; 最后更新梯度和偏置。迭代上述步骤直到误差收敛, BP 神经网络模型训练完成。

在 Matlab 神经网络工具包中,隐藏层每一层的神经元数目是由程序自动优化得到,而隐藏层的数目是人为设定的。为了得出最合适的隐藏层数目,比较不同的神经网络结构下训练的回归系数及误差,结果最好的数目为最终隐藏层个数。也可以使用遗传算法,将神经网络的结构作为基因,训练误差作为表现型,优化得到最优隐藏层的个数。

### (3) 数据与机理协同驱动的建模

鉴于机理建模和数据驱动方法在建模精度、计算效率以及模型可解释性等方面均存在各自的特点,机理-数据融合的 IES 建模方法也逐渐被研究人员所关注。我们将上述混合建模方法分为串联、并联以及嵌入融合三种方式,如图 6 所示。

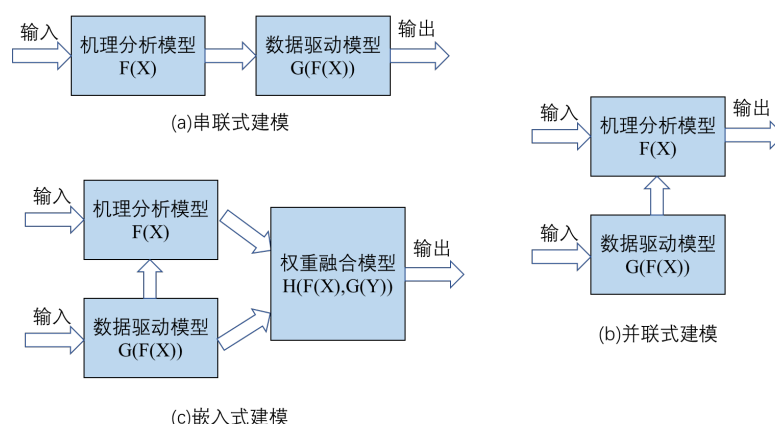


图 6: 机理-数据协同驱动建模的三种方式

在串联方式中,机理模型部分可为数据模型筛选关键特征,以减少数据模型

的输入特征的维数，而数据模型同时修正机理模型的结果，该方式可提高模型的精度和计算效率<sup>[18]</sup>；在并联方式中，通过对机理模型和数据模型的输出结果进行加权组合得到最终结果，以提升模型预测结果的可靠性，该方式的建模精度和灵活性较高，但计算效率较低；在嵌入融合方式中，以数据模型替代机理模型中较复杂的模块或修正机理模型的参数，该方式提升了模型的计算效率和灵活性，但精度较低。采用串联方式对系统输出功率进行建模，进而基于多种机器学习方法（如 ANNs、SVMs 等）建立输入因素与输出功率间的非线性模型。我们针对微型燃气轮机的多时间尺度动态特性建模问题，采用机理建模方法来建立机电系统的准线性过程模型，而针对非线性的热力子系统则采用基于粒子群优化的径向基 ANNs 模型来拟合其非线性关系，从而给出其嵌入式结构模型。采用嵌入融合方式建立了区域供热网络模型，采用 ANNs 模型表示网络中的质量流量循环，并通过求解连续性方程和能量方程来建立质量流量和温度模型，避免了针对动量方程的耗时迭代求解过程，在保持较高计算精度的前提下提高了求解速度。

## **2.3 项目创新特色**

### **2.3.1 将环境因素考虑入能源集线器模型**

当前研究多利用机理模型构建 IES 模型，以 CCHP 为例，当前 CCHP 的稳态及动态模型没有在整个热电联产系统中仿真 CCHP 的特性<sup>[1-3]</sup>，因此与实际运行工况有所偏差。在 IES 中，不仅要考虑各类能源转换设备的内在特性，也要考虑温度、气压、湿度等环境因素的影响。该模型将烟气温度等变量考虑在内，构建的模型更贴近真实情况。

### **2.3.2 采用数据与机理协同驱动的建模方法**

IES 通常集成了电力系统、供热系统以及天然气系统等多个能源子系统，各子系统间通过能源转换设备相互耦合形成了复杂的能源网络。文献<sup>[4-6]</sup>构建了 CCHP 的机理模型，但是由于众多变量的引入，机理模型的构建会非常复杂。另外，对于机理模型所需的一些变量的测量和计算非常复杂，需要使用近似值，这样也会引入误差。相比于机理建模方法，数据驱动方法无需关注系统内在物理规律，建模过程简单，且计算成本较机理建模方法低。然而，此类方法在建模时需要大量训练数据，对数据的质量要求较高，并且所建通常为黑箱模型，导致其可解释性较弱。因此，本项目采用机理—数据融合的建模方法，用神经网络机器学习的方法得到各个模块的模型，再根据各个模块的能量联系构建整体的系统。这样做的好处是，以数据模型替代机理模型中较复杂的模块或修正机理模型的参数，提升了模型的计算效率和灵活性，同时兼备机理模型的可解释性。

### **2.3.3 使用终身学习的方法对模块进行训练**

数据驱动建模的误差来源于训练数据的局限，而终身自适应学习解决了这一问题。先用已有的历史数据训练得到 BP 神经网络，在系统运行时得到的输入输

出数据也加入训练集中，不断对网络进行训练，有效地减小了误差，且使模型在运行中趋于稳定。

#### **2.3.4 研发基于自适应终身学习的园区综合能源系统在线调控装置**

当前 IES 的调控策略，模型及其参数往往整定后维持不变，未能考虑外界环境、运行工况对模型参数的影响，由此造成模型与实际系统脱节的难题，本项目将研发基于自适应终身学习的园区综合能源系统在线调控装置，形成具有自主知识产权的产品，加以测试应用。

### **2.4 项目技术路线**

#### **(1) 建立园区综合能源系统的机理分析模型**

- 将各能源环节抽象为时域/频域、连续/离散、代数/微分/偏微分等多样模型形式。
- 对 CCHP、HP 等各能源转换设备进行机理分析并建立稳态运行模型。
- 针对电、气、热等能源时间尺度不同导致计算难度较大的问题，建立电、气、热多系统统一的参数电路和网络模型。

#### **(2) 建立园区综合能源系统的数据驱动模型**

- 确定各能源设备的稳态运行边界。
- 基于量测数据通过神经网络训练确定各出口参数之间的数学关系及出口参数随目标参数的变化情况。
- 利用已有的数据对系统未来短期运行状况进行预测。

#### **(3) 构建各能源子系统的数据库**

- 多源数据的价值信息，降低数据规模和复杂度，建立面向不同研究对象的关联数据集。
- 对园区综合能源系统的运行数据进行实时采集和记录，建立数据驱动下的自主学习和进化机制。

#### **(4) 基于自适应终身学习对各能源子系统进行协同优化在线调控**

- 分别通过串联、并联、嵌入式融合建立机理和数据混合驱动模型。
- 提出基于混合模型的园区综合能源系统在线调控策略，研发在线应用装置，并基于实际系统进行测试验证。
- 实现对模型的合理解释，刻画外部信息、环境、人为决策等要素与 IES 的耦合影响，对园区各能源子系统进行协同优化。

项目研究路线图如图 7 所示：

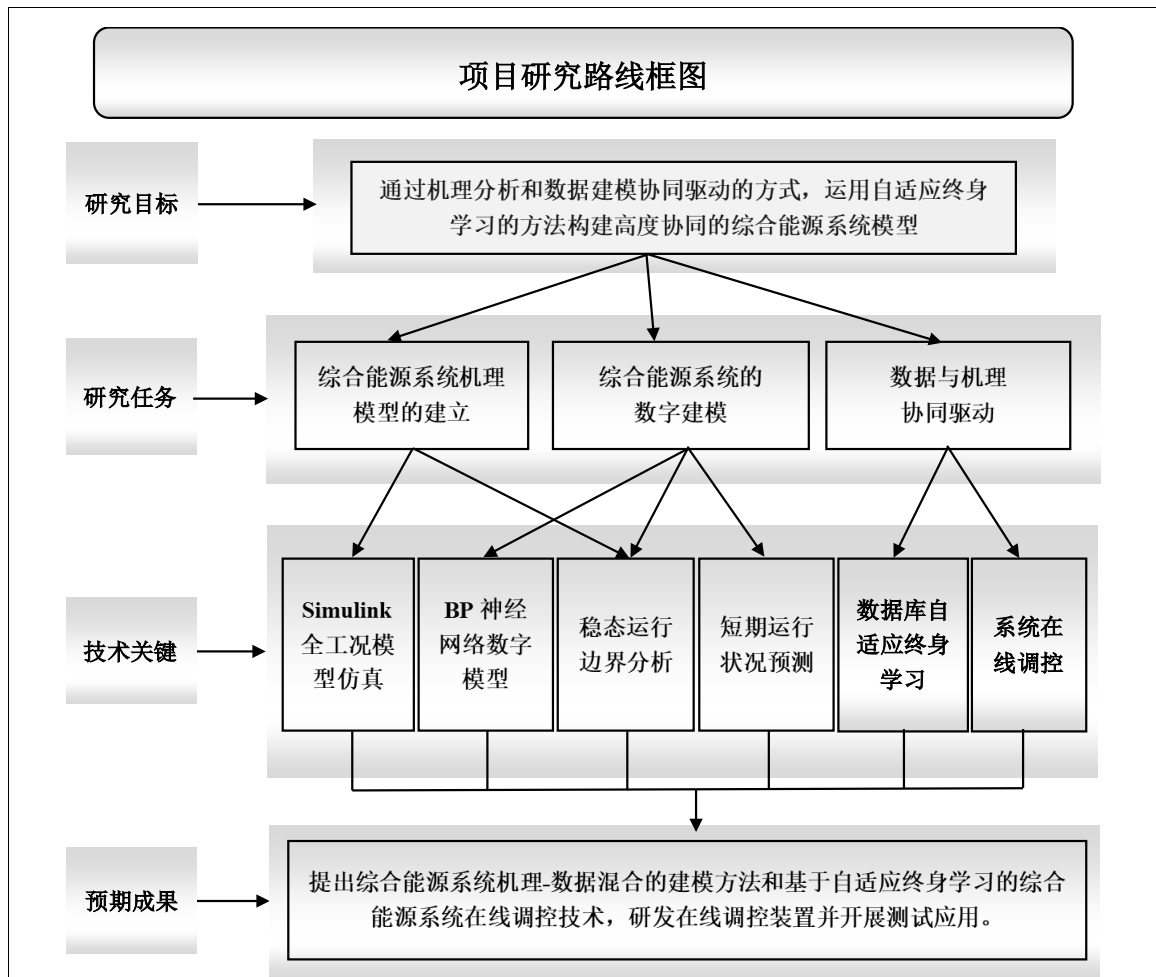


图 7：项目研究路线图

## 2.5 项目时间安排

任务	开始时间	耗时	完成时间
综合能源相关文献调研	2021 年 5 月 1 日	14 天	2021 年 5 月 14 日
建立训练数据库	2021 年 5 月 15 日	17 天	2021 年 5 月 31 日
各模块机理模型建模，利用运行数据训练数据驱动模型	2021 年 6 月 1 日	92 天	2021 年 8 月 31 日
对比实际数据验证机理模型可靠性，优化数据驱动模型	2021 年 9 月 1 日	45 天	2021 年 10 月 15 日
各模块集成为综合能源系统	2021 年 10 月 16 日	31 天	2021 年 12 月 15 日
设计网页	2021 年 12 月 16 日	47 天	2022 年 1 月 31 日
对已有项目进行优化	2022 年 2 月 1 日	28 天	2022 年 2 月 28 日
后续专利软著申请	2022 年 3 月 1 日	61 天	2022 年 4 月 30 日

## 2.6 项目成员分工

团队成员	项目分工
樊东来	负责调研综合能源系统各个模块的运行原理,探究影响模块运行的环境变量,搭建机理模型,并检验模型的可靠性;设计产品网页 UI 界面。
刘昱麟	负责调研数据驱动建模的可行方案,利用实际运行数据训练得到模型,比较不同模型的准确性;整合各个模块模型,组成综合能源系统模型。
狄思宇	负责建立数据库,实现数据驱动模型的终身自适应学习;调研产品的实际应用场景和市场推广前景,对模型的功能进行优化。

### 参考文献:

- [1] 陈龙, 韩中洋, 赵珺, 等.数据驱动的综合能源系统运行优化方法研究综述[J].控制与决策, 2021, 36(2): 283-294.
- [2] 陈强. 分布式冷热电联供系统全工况特性与主动调控机理及方法[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [3] 刘方, 杨秀, 黄海涛, 等.含热电联产热电解耦运行方式下的微网能量综合优化[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(01):51-57.
- [4] 王成山, 洪博文, 郭力, 等.冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J].中国电机工程学报,2013,33(31):26-33+3.
- [5] Kamalinia S, Wu L, Shahidehpour M. Stochastic midterm coordination of hydro and natural gas flexibilities for wind energy integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1070-1079.
- [6] Bishop C M. Pattern recognition and machine learning[M]. springer, 2006.
- [7] Vapnik V. The nature of statistical learning theory[M]. Springer science & business media, 2013.
- [8] He C, Ma M, Wang P. Extract interpretability-accuracy balanced rules from artificial neural networks: A review[J]. Neurocomputing, 2020, 387: 346-358.
- [9] Rasmussen C E, Nickisch H. Gaussian processes for machine learning (GPML) toolbox[J]. The Journal of Machine Learning Research, 2010, 11: 3011-3015.
- [10] Liu J, Shi D, Li G, et al. Data-driven and association rule mining-based fault diagnosis and action mechanism analysis for building chillers[J]. Energy and Buildings, 2020, 216: 109957.

- [11] Yang Y, Li X, Yang Z, et al. The application of cyber physical system for thermal power plants: Data-driven modeling[J]. *Energies*, 2018, 11(4): 690.
- [12] Nikpey H, Assadi M, Breuhaus P. Development of an optimized artificial neural network model for combined heat and power micro gas turbines[J]. *Applied Energy*, 2013, 108: 137-148.
- [13] Rossi F, Velázquez D. A methodology for energy savings verification in industry with application for a CHP (combined heat and power) plant[J]. *Energy*, 2015, 89: 528-544.
- [14] Fu X, Sun H, Guo Q, et al. Uncertainty analysis of an integrated energy system based on information theory[J]. *Energy*, 2017, 122: 649-662.
- [15] Guelpa E, Verda V. Compact physical model for simulation of thermal networks[J]. *Energy*, 2019, 175: 998-1008.
- [16] 卫志农, 仲磊磊, 薛溟枫, 等. 基于数据驱动的电-热互联综合能源系统线性化潮流计算[J]. *电力自动化设备*, 2019, 8.
- [17] Wang Q, Li F, Tang Y, et al. Integrating model-driven and data-driven methods for power system frequency stability assessment and control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(6): 4557-4568.
- [18] Guelpa E, Verda V. Compact physical model for simulation of thermal networks[J]. *Energy*, 2019, 175: 998-1008.



**四、预期成果（在对应项目后填写明细）**

A、研究报告：1 篇；

完成一份基于自适应终身学习的综合能源系统在线调控技术及装置的研究报告；

B、论文发表：1 篇；

完成一篇数据驱动与机理建模结合应用于综合能源系统在线调控及优化的创新性论文；

C、专利申请：1 项；

D、产品设计：1 个；

设计一个可以对实现综合能源系统在线调控的产品。

E、成果实物：0 个；

F、其它预期成果：无

**五、经费预算**

项目	预算（元）	计算依据
设备费	6000.00	租用服务器和购置高性能计算设备、正版软件等
材料费	2000.00	购买制造装置时所需材料，如传感器、各种电子元件以及报告、相关文献打印费等
测试化验加工费	/	
燃料动力费	/	
差旅费	3000.00	前往相关企业调研、住宿、交通费用
会议费	/	
出版/文献/信息传播/知识产权事务费	10000.00	书籍、文献购买，支付论文版面费、专利申请费等
其他	/	
合计：	21,000.00（元）	

六、指导教师意见

签名:

年 月 日

七、学院意见

学院评审委员会（小组）负责人签名： （学院盖章）

年 月 日

八、项目负责人承诺：

我保证填报内容的真实性。我已阅知并严格遵守天津大学关于大学生创新创业训练项目管理办法和相关财务管理制度规定。本人将按照申报书的内容负责实施本项目，切实保证学习研究时间，认真开展项目工作，及时报告重大情况变动，按时报送有关材料。

负责人签名：

年 月 日

九、学校推荐意见

学校负责人签名： （学校公章）

年 月 日