



中国城镇供水排水协会2026年会

# 多机组系统能效最优运行理论在二次供水节能领域的应用

姚福来 博士

电邮: [fulaiyao@163.com](mailto:fulaiyao@163.com)

微信: [yaofulai65](https://www.wechat.com/p/yaofulai65)





中国城镇供水排水协会2026年会

## 目 录

- 1、二次供水领域节能减碳潜力调查
- 2、电能浪费的原因
- 3、应对措施及改造案例
- 4、“效达峰”是“碳达峰”的技术支撑
- 5、“多机组系统”定义
- 6、“多机组系统能效预知理论”
- 7、“姚定理1”和“姚定理2”的数学证明
- 8、该理论在其它领域的应用



01

## 二次供水领域节能减碳潜力调查

多机组系统能效最优运行  
理论—姚定理1和姚定理2

2020年，疫情期间，我们开始对北京6层以上高层建筑中的二次供水泵站进行运行能效随机调查和节能诊断，到目前为止，已经完成了对**北京、上海、河北、山东等地近2000个泵站的调查和诊断**。据我们了解，这也是全国第一次对该领域进行规模化节能减碳调查和诊断。以北京为例：

**调查区域：**东城、西城、海淀、朝阳、丰台、房山、门头沟、石景山、通州、顺义、大兴、昌平、平谷、经开区。

**建筑类型：**公共建筑、办公楼、居民小区、商超等。

**设备新旧：**刚用的新设备到多年的旧设备，多品牌。

**供水方式：**变频恒压、全变频、水箱、无负压、隔膜罐。

**调查结果：**平均每个泵站的节电潜力54%。







河北、山东等地城市的情况与北京相似。

**由于二次供水几乎都是小范围局部供水，所以，北京的调查情况几乎代表了全国绝大部分城市的二次供水现状。**

上海的情况有点特殊，除了变频恒压供水，有很大一部分是高位水箱供水。

国务院2026年2月11日发布《供水条例》，2026年6月1日后**二次供水泵站将逐步交由供水企业运行维护。**

这既是责任也是机遇，由于目前二次供水泵站存在大比例的电能浪费，供水企业如果以此为抓手，完全可以在完成国家降碳任务中，交出满意答卷，并收获“节电”和“碳资产”**双重收益。**



输送清水的二次供水泵站，其电耗公式如下：

$$P(\text{电能}) = \frac{W(\text{势能} mgh)}{\eta(\text{效率})} = \frac{QH}{367\eta}$$

其中，P为泵站消耗的电功率（kW），Q为泵站水流量（m<sup>3</sup>/h），H为泵站全扬程（m），η为泵站运行能效。

从这个公式可以看出，对于已经应用了变频的泵站来说，如果不少干活，**流量不减，扬程不减**，目前的问题主要是**运行能效低**，造成泵站电耗偏高。（无负压是靠少干活降低扬程节能，没有提高运行效率，大多能效还低了）

**结论：目前二次供水节能工作已经进入以提高运行能效为主的深水区。**





运行能效低的**客观原因**：居民用水高峰和低谷的变化幅度太大，造成泵站运行能效偏低。其它方面的原因：

- 1、**控制方面**：缺乏最优运行能效控制方法，主要靠经验摸索，各有高招；
- 2、**设计方面**：泵站流量从几乎零到满负荷变化，设计和选型有困难；
- 3、**缺乏运行能效验收环节**：“中国标准化研究院”2019年曾让本人起草“电机系统”泵站部分能效评价国家标准，大家在讨论中，觉得用**最低运行能效和一条能效曲线对设备进行能效标定**太严了，我们的理由：用一条能效曲线一看就知道水平高低，便于监管；设备选定后，各厂商设备的最高运行能效几乎都相等，只是最低运行能效不同，造成电耗不同。最后标准没有通过，后来“中国绿发会”作为团标发布：“T CGDF 00006-2021 泵组运行能效限定值及能效等级”。





**提高运行能效的措施，主要是两个：**

- 1、硬件--设备的优化设计、更新和改造；
- 2、软件--能效优化控制技术应用。

我们采用**“泵站能效预知技术”**对北京等地近**200个二次供水泵站进行了节能设计和节能减碳改造**，证实了这些电能浪费的真实性，验证了技术上的可实现性，以及经济上的可行性。（对无负压设备进行节能改造，节电比例相对更高一些。）

**“泵站能效预知技术”**是本人博士和博士后研究内容**“多机组系统能效预知理论”**的一个应用，后面讲。





用“泵站能效预知技术”对二次供水泵站进行了节能设计和节能减碳改造的流程，有六步，三步常规操作，三步专有技术操作。

### 三步常规操作，确定节能改造前的基准线：

- 1、去现场，安装“泵站能效测试仪”，采集流量、压力、液位、电压、电流、电量等数据，并记录水泵、电机、变频器、传感器等设备数据，安装不影响泵站的正常运行；
- 2、去现场，取回“泵站能效测试仪”；
- 3、提取“测试仪”数据，计算泵站运行能效及吨水电耗。





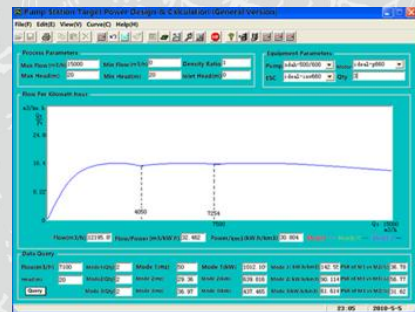


### 三步专有技术操作，确定节能改造后的基准线。

1、用“泵站能效预知技术”分析运行能效变化规律，计算**节电比例**，同时完成**泵站节能改造设计方案**；

2、完成硬件采购与**装配**，完成**软件编程**，出厂测试；

3、去现场，完成设备**安装、投运、验收**。该工作一般在夜间进行，验收后，运行一段时间，确定节能改造后的运行能效或吨耗基准线，**按节电量回收投资**。





建筑领域的二次供水泵站，节能改造案例（北京），验证了浪费的真实性。



中国水网2026年会员专享



建筑领域二次供水泵站，节能改造案例（河北），验证了浪费的真实性。







- 北京上林溪小区中区供水泵站 (有变频, 节电 73.8%)
- 北京上林溪小区高区供水泵站 (有变频, 76.7%)
- 北京金融街物业漫香苑中水泵站 (有变频, 84.9%)
- 北京SOHO呼家楼低区泵站 (有变频, 65.5%)
- 北京中铁诺德低二区泵站 (有变频, 62.8.3%)
- 北京北控燕化星城3#站 (有变频, 74.1%)
- 东方世纪城一区东区-高区 (有变频, 76.1%)
- 东方世纪城一区西区-高区 (有变频, 72.9%)
- 东方世纪城一区西区-中区 (有变频, 55.8%)
- 长芦世纪城-中区 (有变频, 75.6%)
- 安运佳苑-生活低区 (有变频, 53.3%)
- 安运佳苑-高区 (有变频, 63.2%)
- 禧福荷堂A区--低区 (有变频, 57.8%)
- 禧福荷堂A区-高区 (有变频, 53.8%)
- 颐和庄园二期 (有变频, 79.3%)

“双碳”目标已逐渐成为企业的考核指标。

“双碳”目标三件事：1) 能源的绿色获取（去碳）和高效获取；2) 能源的节约使用和高效使用；3) 高效的碳捕获和碳利用。

三件事都涉及高效，中国称能效为第一绿色能源，国际能源署称“能效为第一绿色燃料”，**“如果全球不加强能效举措，就没有机会实现能源和气候目标”（双碳）**，“2040年，通过提高能效产生的减排量应占总减排量的40%以上”，能效的重要性不言而喻。

从物理意义上讲，**任何用能设备都是完成不同或相同能量形式的转换**，用公式表达：

$$W = P * \eta$$

其中，W是设备做功，P是设备消耗能量（碳排放？）， $\eta$ 是设备运行能效。**从这个公式也可以看出“双碳”的重点。**





上面公式的目标函数是做功 $W$ ，能效优化就是求 $W$ 的最大值 $\max M$ 。

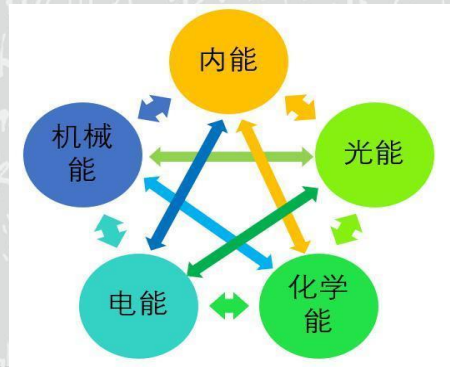
上式可以变换为： $P = W/\eta$

目标函数是能耗 $P$ ，能效优化就是求 $P$ 的最小值 $\min P$ 。

上述求最大值和最小值，是一个优化问题的两种表现形式，**干最多的活吃最少的饭=吃最少的饭干最多的活**，解决一个即可。从上面公式也可以看出，做功 $W$ 一定，减少能源消耗 $P$ 只有一个途径：**那就是提高运行能效 $\eta$** 。

所以我们说“碳达峰”的峰有多高，“效达峰”是技术支撑！

由于提高运行能效涉及工艺变化、成分变化、环境变化等众多因素，目前进展缓慢。





如果用能系统由多台用能设备组成（多机组），做功最大化公式变成：

$$\max W = \sum_{i=1}^n P_i \eta_i$$

例如，**多台发电设备组成的水电站**，做功最大化就是发电最大化，W是总发电量， $P_i$ 是第i台发电机消耗的原材料能量（碳排放？）， $\eta_i$ 是第i台发电机的能效。

如果用能系统由多台用能设备组成（多机组），能耗最小化公式变成：

$$\min P = \sum_{i=1}^n W_i / \eta_i$$

例如，**多台水泵组成的泵站**，能耗最小化就是用电最小化，P是总用电量（碳排放？），做功 $W_i$ 就是第i台水泵提高的水的势能， $\eta_i$ 是第i台水泵的能效。



为了完成一个任务，由一个以上用能设备组成的系统，统称为多机组系统（或多动力系统），多机组系统涵盖了大部分用能领域。

**从发电侧：**多水轮机组水电站、多汽轮机组火电站，等；

**到输电侧：**多变压器配电站；

**再到用能侧：**多水泵组成的泵站、多风机组成的风机站、多冷水机组制冷站、多锅炉供热站、风电电解槽制氢站、多电机驱动的动车、多电机驱动的汽车（单电机多挡位汽车）、电动轮船、多旋翼飞机、多发动机火箭，多IT机柜大数据中心等。

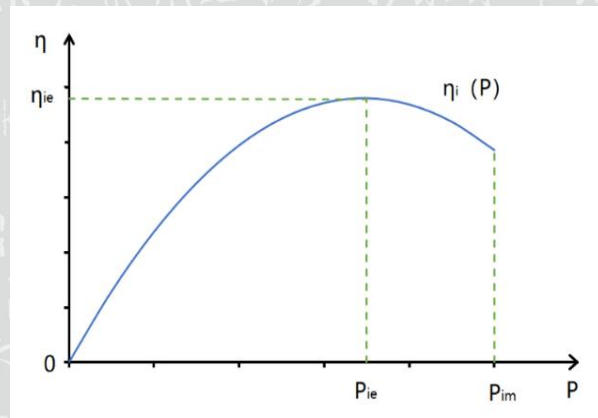




对于这些多机组系统，由于多数用能设备的**能效曲线是凹的**，**二阶导数小于零**（如下图），其**运行能效优化问题**，《Efficient Energy-Saving Control and Optimization for Multi-unit Systems-A Guide for Electrical Engineers(中文：多机组系统高效节能控制与优化)》（Springer 2024年出版）**一书给出了答案**。

目前，该书下载量已达53000多，是技术类头部热门图书。

Springer Nature 是全球最大的学术图书出版机构，超过200多位诺贝尔奖、50多位菲尔兹奖、70%的图灵奖获得者选择在 Springer 发表其科研成果，其旗下《自然》杂志在科技界也享有很高盛誉。





书中提出的“多机组系统能效预知理论”，主要内容是两个定理。

### 姚定理1：

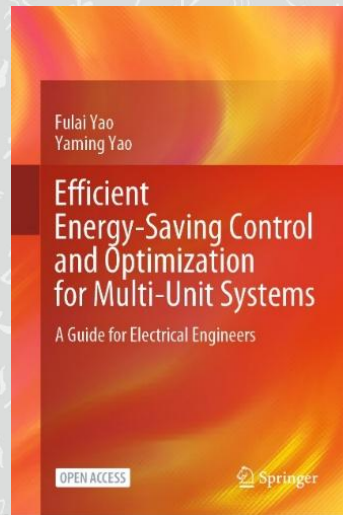
在效率相似多机组系统中，运行能效最优的负荷分配方法为：

$$\eta_1 (P_1) = \eta_2 (P_2) = \dots = \eta_k (P_k)$$

### 姚定理2：

在效率相似多机组系统中，运行能效最优的设备台数切换方法：

$$\eta_1 \left( \frac{P_t}{\sum_{i=1}^m \beta_i} \right) = \eta_1 \left( \frac{P_t}{\sum_{i=1}^k \beta_i} \right) \text{ or } \frac{P_t}{\sum_{i=1}^m \beta_i} = P_{1m}$$





06

## 多机组系统能效预知理论及两个定理--中国新发展奖

多机组系统能效最优运行  
理论—姚定理1和姚定理2

2025年作者获Springer Nature 颁发的“中国新发展奖”，该奖每年选出**10位中国学者**出版的英文著作，以表彰他们对联合国17个持续发展目标做出的重要研究贡献，本书研究成果“多机组系统能效预知理论”以及“姚定理1”和“姚定理2”，对实现联合国“气候目标”和“能源目标”有重要研究贡献。





能量的应用场景千差万别，但**能量的表达式只有两个要素**，势能 $mgh$ ，机械能 $Fs$ ，电能 $UI$ ，燃烧热能 $\lambda m$ ，热交换 $=\beta m \Delta t$ ，等，如果能量的两个要素为矢量，要乘以 $\cos\theta$ ， $\theta$ 可以通过补偿或调整 $=0$ 。

**节能减碳的方向只有3个：做功的两个能量要素和一个整体运行能效。**两个能量要素是否富裕度或有跑冒滴漏？是否可以利用其它环节的余压、余热？是否有自然能可以利用？另一个就是提高运行能效减少能源使用。自然能的利用目前进展最快，太阳能、风能、地热、河流、潮汐等都有很多利用。跑冒滴漏、富裕、余热、余压这些手段显而易见，过去多年解决的差不多。

目前，**节能减碳已进入深水区，提高运行能效这个路还没有完全走通**，而这个问题恰是“多机组系统能效预知理论”和“姚定理1”“姚定理2”要解决的事。





“姚定理1”和“姚定理2”的数学证明：

(略)

详见《Efficient Energy-Saving Control and Optimization for Multi-unit Systems-A Guide for Electrical Engineers》（Springer出版）。

下载地址：<https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-97-4492-3>

**能量形式：**机械能、热能、电能、磁能、光能、化学能，核能等。

**从能量角度看，用能系统（设备）就是完成不同形式或相同形式能量的转换。**

例如：**水电站是把水的势能转换为电能（绿电）**， $mgh \rightarrow (pQ)gh \rightarrow W(kW)$

$$W_t = k\rho h \sum_{i=1}^n Q_i \eta_i$$

$$Q_t = \sum_{i=1}^n Q_i$$

其中， $n$ 为设备台数， $k$ 是系数， $\rho$ 为水的密度， $h$ 水的高度， $Q_t$ 为河水总流量， $Q_i$ 为流过第 $i$ 台水轮发电机组的流量， $\eta_i$ 为第 $i$ 台水轮机组的运行效率。



热电厂是把煤燃烧放出的热能转化为电能（碳排放）， $m \lambda \rightarrow W(\text{kWh})$ ；

$$W_t = k\lambda \sum_{i=1}^n m_i \eta_i$$

$$m_t = \sum_{i=1}^n m_i$$

其中， $n$ 为设备台数， $k$ 是系数， $\lambda$ 为煤的比焓， $m_t$ 为煤总质量， $m_i$ 为第 $i$ 台设备的用煤质量， $\eta_i$ 为第 $i$ 台设备的运行效率。







**光伏电站**是把光能转化为电能。

**风电场**是把风能转化为电能。

**潮汐发电等** .....

这些自然界免费馈赠的能源，由于存不住，不用就白白浪费，**没有能量输入最小化多机组优化问题**，提高单机设备的使用效率和额定效率即可（例如，阳光垂直照射、风向垂直等）。



对于变配电站（以及储能，电源，充电器，变频器）是**电能到电能**，输入电能，输出也是电能，根据用电量，启停不同数量的变压器，给运行变压器分配负荷。

$$W_t(\text{kWh}) \rightarrow W_0(\text{kWh}) ;$$

$$W_t = \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{\eta_i}$$

$$W_0 = \sum_{i=1}^n W_i$$

其中， $n$ 为变压器台数， $W_t$ 为输入的总电能， $W_0$ 为输出的总电能（用户的总用电量）， $W_i$ 为第 $i$ 台变压器输出的电能， $\eta_i$ 为第 $i$ 台变压器的运行效率。





泵站是把电能转换为水的势能,  $W(\text{kWh}) \rightarrow mgh \rightarrow (\rho Q)gh$ ;

$$W_t = k\rho h \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{\eta_i}$$

$$Q_t = \sum_{i=1}^n Q_i$$

其中,  $n$ 为设备台数,  $k$ 是系数,  $\rho$ 为流体密度,  $h$ 水的扬程,  $Q_t$ 为水总流量,  $Q_i$ 为第 $i$ 台水泵输出的流量,  $\eta_i$ 为第 $i$ 台水泵的运行效率;





风机站是把电能转换为风的压力能（全压）， $W(\text{kWh}) \rightarrow \rho QP$ ;

$$W_t = k\rho P \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{\eta_i}$$

$$Q_t = \sum_{i=1}^n Q_i$$

其中， $n$ 为设备台数， $k$ 是系数， $\rho$ 为流体密度， $P$ 流体全压， $Q_t$ 为流体的总流量， $Q_i$ 为第 $i$ 台风机输出的流量， $\eta_i$ 为第 $i$ 台风机的运行效率。



建筑、大数据中心等企业的制冷站是把电能（碳排？余热余压利用？）转换为冷能， $W(\text{kWh}) \rightarrow \rho Q \beta \Delta t$ ;

$$W_t = k\rho\beta \sum_{i=1}^n \frac{Q_i \Delta t_i}{\eta_i}$$

$$Q_t \Delta t = \sum_{i=1}^n Q_i \Delta t_i$$

其中， $n$ 为设备台数， $k$ 是系数， $\rho$ 为流体密度， $\beta$ 为流体比热容， $\Delta t_i$ 为第 $i$ 台制冷机组冷冻流体的进出温差， $Q_i$ 为第 $i$ 台制冷机输出的流量， $\eta_i$ 为第 $i$ 台制冷机的运行效率， $Q_t$ 为冷冻流体的总流量， $\Delta t$ 为冷冻流体的总平均进出温差。（IT设备同样适用）



高铁、地铁是把电能转换为机械能， $W(\text{kWh}) \rightarrow FS \rightarrow FV \rightarrow Mn$ ;

$$W_t = k \sum_{i=1}^l \frac{M_i n_i}{\eta_i}$$
$$M_t = \sum_{i=1}^n M_i$$

其中， $l$ 为设备台数， $k$ 是系数， $n_i$ 为第 $i$ 台电机的转速， $M_i$ 为第 $i$ 台电机的输出转矩， $\eta_i$ 为第 $i$ 台电机的运行效率， $M_t$ 为列车需要的总转矩。





风电制氢站是把电能（绿电）转换为化学能， $W(\text{kWh}) \rightarrow \rho Q$ ;

$$W_t = k\rho \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{\eta_i}$$

$$Q_t = \sum_{i=1}^n Q_i$$

其中， $n$ 为制氢机台数， $k$ 是系数， $Q_i$ 为第 $i$ 台制氢机的制氢量， $\eta_i$ 为第 $i$ 台制氢机的运行效率， $Q_t$ 为总制氢量。



电动汽车是把电能（绿电？）转换为机械能， $W(\text{kW}) \rightarrow \text{FV} \rightarrow \text{Mn}$ ;

$$W_t = k \sum_{i=1}^l \frac{M_i n_i}{\eta_i}$$
$$M_t = \sum_{i=1}^n M_i$$

其中， $l$ 为电机台数，大于1（=1时，要求有多档位）， $k$ 是系数， $n_i$ 为第 $i$ 台电机的转速， $M_i$ 为第 $i$ 台电机的输出转矩， $\eta_i$ 为第 $i$ 台电机的运行效率， $M_t$ 为电动汽车需要的总转矩。



1999年5月在当年河北省最大的水厂（石家庄第八水厂）第一次应用。已成功应用于建筑二次供水、城镇供水、钢铁、石化、制药等领域近千个案例。

2003年，为南水北调开工的第一个泵站（东线宝应泵站）和装机容量最大的泵站（中线惠南庄泵站）提供节能咨询。



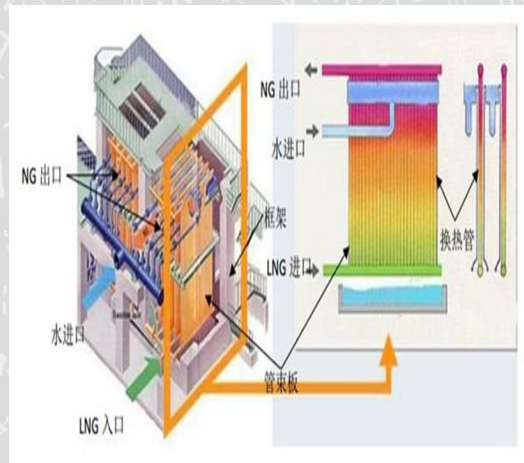


为大型LNG站（1200万吨/年）提供节能优化服务：

气化器（**37MW\*16台**）优化节能；

海水泵站（**1150kW\*9台**）优化节能；

温海水泵站（**3150KW\*8台**）优化节能。





### • 市政供水:

- 哈尔滨三水厂（改造已有变频，节7%）65万吨/日
- 浙江瑞安水厂泵站（改造已有变频，节32%）16万吨/日
- 广东惠阳水厂泵站（改造已有变频，节24%）40万吨/日
- 石家庄地表水厂（改造已有变频，节30%）40万吨/日
- 邢台董村水厂（上变频，节26%，3个水厂调度）10万吨/日

### • 钢铁:

- 河北钢铁集团宣化钢铁公司中心泵站（已有变频，节19%）
- 首钢集团秦皇岛首秦公司A C C供水泵站（节44%）
- 东北特钢大连公司浊环低压泵站（节41%）
- 武汉钢铁公司能源总厂PH2泵组（节54.5%）
- 广西柳钢公司净环水三循环泵组（节61%）
- 唐山国丰钢铁公司230循环水泵组（节54%）
- 四川德胜钢铁2#炉循环水泵组（40%）



## • 石油化工:

- 中国海洋石油中捷石化公司三催泵组 (节39%)
- 中国海洋石油中捷石化公司二水厂泵站 (节19%)
- 中国海洋石油中捷石化公司一巡泵站 (节19%)
- 中国石化沧州分公司循环水泵站 (节18%)
- 中国石化沧州分公司二循泵站 (节16%)

## • 制药化肥:

- 石家庄滹沱河化肥公司碳化循环水泵站 (节68%)
- 石家庄制药集团中润公司104泵站 (已有变频, 节25.9%)
- 石家庄制药集团中润公司制冷泵站 (已有变频, 节7.69%)
- 华北制药集团维尔康公司新循环水泵站 (已有变频, 节26%)





- **建筑中央空调冷冻、冷却、采暖泵站：**
- 北京中海油实业大厦中央空调冷冻水泵站 (节60%)
- 杭州祥和假日大酒店中央空调冷却水泵站 (节42%)
- 北京云佛山旅游渡假村冷却循环泵站 (节46%)
- 广州市迎商酒店冷冻水泵站 (节47%)
- 浙江丽水市现代广场大酒店\_冷却泵站 (节67%)
- 浙江紫金花大酒店\_冷媒水泵站 (节33.8%)
- 山西应县供热公司采暖二次循环泵站 (节18.3%)



中国专利和国际专利（中国2个、美国1个、日本1个、德国1个）：





11

生产基地

多机组系统能效最优运行  
理论—姚定理1和姚定理2

地点：金易奥（沧州），43000平米。







姚福来，博士，研究员，博士生导师，机械工业出版社“金牌作者”、“70周年百佳作译者”（**电子电工领域畅销书前五**）；在世界上解决了多机组系统运行能效优化问题，用数学方法证明了多机组系统运行能效最优的**两个定理**。研发了国内**第一台数控多工位圆刀模切机**，大量应用于手机等电子领域，2014年该成果应用企业“中鼎高科”被福布斯评为**中国非上市潜力企业100强第29名**，2015年并入“当升科技”。申请和获得发明专利近100项；出版中文著作13本，英文著作1部，

翻译著作1部，其中《**电气自动化工程师速成教程**》一书重印**27次**，《**自动化设备和工程的设计、安装、调试、故障诊断**》重印**16次**；发表论文100多篇。





中国城镇供水排水协会2026年会



谢谢!

姚福来 博士

微信: yaofulai65

电邮: fulaiyao@163.com