

系统工程概论

● 教学目的

了解自动化学科的系统工程方向的知识结构、专业特点和培养目的；了解作为一个系统工程师应具有的基本素质和专业基础知识，尤其是如何用系统的观点来分析考虑问题（如一些复杂的技术经济系统问题）、用工程的方法来研究解决问题。

● 内容安排

第一讲 为什么要学点“系统工程”知识？

第二讲 系统、系统科学与系统工程

第三讲 自然物理系统及其复杂性

第四讲 社会经济系统及其复杂性

第五讲 系统工程学科基础

第六讲 系统分析（1）

第七讲 系统分析（2）

第八讲 系统建模与仿真（1）

第九讲 系统建模与仿真（2）

第十讲 系统设计与评价

第十一讲 系统决策概述

第十二讲 深化的系统思想*

● 讲课教师

赵 勇：系统科学和工程系（系统工程研究所）

Email: zhiwei98530@hust.edu.cn

韩守东：系统科学和工程系（系统工程研究所）

Email: shoudonghan@gmail.com

● 学习基础

高等数学，线性代数，概率论，以及控制工程或管理工程专业的基本知识

● 考核方式

平时成绩(40%) + 期终考试(60%)

● 参考文献

- 1) 梁军、赵勇，系统工程导论，化工出版社，2005
- 2) 孙东川、林福永、孙凯，系统工程引论（第2版），清华大学出版社，2010.1.12
- 3) 周德群、贺峥光，系统工程概论(第三版)，科学出版社，2018.1
- 4) 汪应洛，系统工程（第五版），机械工业出版社，2017.1
- 5) 姚德民、李汉铃，系统工程实用教程，哈尔滨工业大学出版社，1997
- 6) 宋健主编，《中国大百科全书》自动控制与系统工程卷，科学出版社，1994

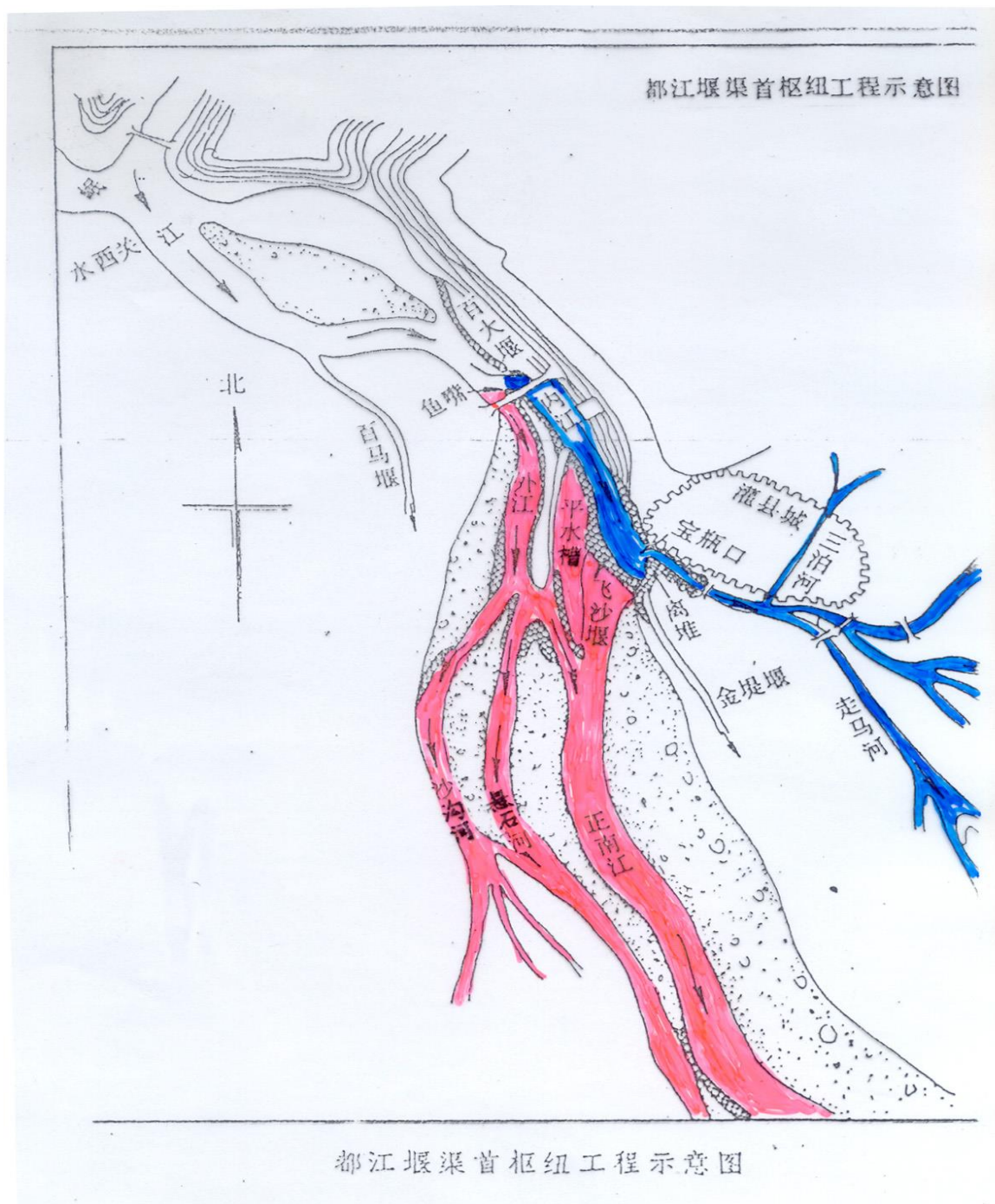
- 7) 苗东升, 系统科学精要(第 2 版), 中国人民大学出版社, 2006
- 8) 许国志, 系统科学, 上海科学技术出版社
- 9) Ian Ayres, 大数据思维与决策, 人民邮电出版社, 2016
- 10) 中国工程院, 《中国制造 2025》系列丛书, 电子工业出版社, 2016
- 11) B S Blanchard & W J Fabrycky, Systems Engineering and Analysis (中译本: 系统工程与分析(第三版)), 清华大学出版社, 2002
- 12) Andrew P. Sage, James E. Armstrong Jr., Introduction to Systems Engineering (中译本: 系统工程导论), 西安交通大学出版社, 2006.9

第一讲 为什么要学点“系统工程”知识？

一、系统工程的经典案例

系统概念和思想来源于古代人类社会实践经验。

1) 都江堰水利工程（公元前 256 年建）



- 历史:战国秦昭王时期,蜀郡太守李冰于公元前 227 年修建,是中国最古老的水利工程,是我国科技史上的一座丰碑,誉为世界奇观。2250 多年来,引水灌溉,才使蜀地有“天府之国”的美誉。都江堰是“天府”富庶之源,灌溉良田 1000 多万亩。
- 总体目标:分四六 平潦旱
- 选址:岷江出山口与平原接合部
 - 利用地形,分级排沙
 - 鱼嘴分水 内江:灌溉
 - 外江:排洪
 - 宝瓶口 控制内江水量
 - 飞沙堰 分洪排沙
- 就地取材:杓槎断流 清淤

2) 丁渭(962-1033)修建皇宫

宋真宗祥符年间,皇宫毁于火灾,丁渭奉命限期修建

- 挖道成渠:取土烧砖
- 引水:连汴河以运木石
- 皇宫建成后,废料填渠成道

3) 泰勒的科学劳动组织

- 工序分析:工序是一切工业生产的最基本的组织单位。
- 动作分析:研究完成各种工序的合理动作。

- 时间分析：机动时间、手动时间、准备结束时间、自然需要时间等。

这三个方面实际上反映了劳动组织的有机联系的三个重要组成部分，是劳动组织系统的整体分析。通过这些分析，使劳动组织达到完整、合理、科学。

4) 阿波罗登月计划

1961-1972, 300 多亿美圆, 2 万多家企业, 120 所大学与研究机构, 400 多万人员（其中高级技术人员 42 万）



5) 其他还有：丽江古城、北极星计划、三峡工程、神舟飞船等

以上典型案例的共性：

- A. 研究和处理的对象被视为一个整体
- B. 强调分系统或元素间协调配合
- C. 涉及科学、技术、工程、生产、经济和管理等多个方面
- D. 问题的解决有一个合理的步骤与程序
- E. 整体优化

6) 古代“朴素”的系统思想

系统思想(System Thought)就其最基本的涵义来说，是关于事物的整体性观念、相互联系的观念、演化发展的观念。

- 管子《地员篇》、《诗经》中的农事诗“七月”等
- 周秦至西汉初年古代医学总案的《黄帝内经》
- 我国古天文学
- 田忌赛马

在古代中国和古希腊哲学中也能反映“朴素”的系统概念：

- 古希腊的《论自然界》(Heracleitus)、《宇宙大系统》(Democritus)
- 春秋时期的思想家老子强调自然界的统一性、南宋陈亮的“理一分殊”

系统思想的演变：

“朴素”的系统思想→近代“还原论”（分解与分析）→科学的系统观（综合与集成）

二、社会经济技术发展的需要

- 自然界和社会、政治、经济、管理、经营以及国家关系之间相互制约、相互联系日趋紧密和复杂。
- 通讯技术和信息科学的发展缩短了空间和时间，使社会生产和经济过程的各环节得以迅速地有机联系起来。
- 现代化的最优化技术体系已经形成，使得大型复杂问题的定量分析和运算、最优化决策和管理成为可能。
- 科学技术和工业生产的高度发展，使各种设备仪器高功能化、小型化、自动化，为大规模、复杂系统问题的处理提供了可靠的物资基础。

此外，我们所处的“知识经济时代”、“网络经济时代”、“新经济时代”、“计算机时代”、“信息时代”、“纳米时代”、“基因时代”、“航天时代”、“人工智能时代”等，综合起来可以说是处在一个“系统工程时代”。

三、控制学科发展的需要

1) 控制学科的特点

思想性，方法论

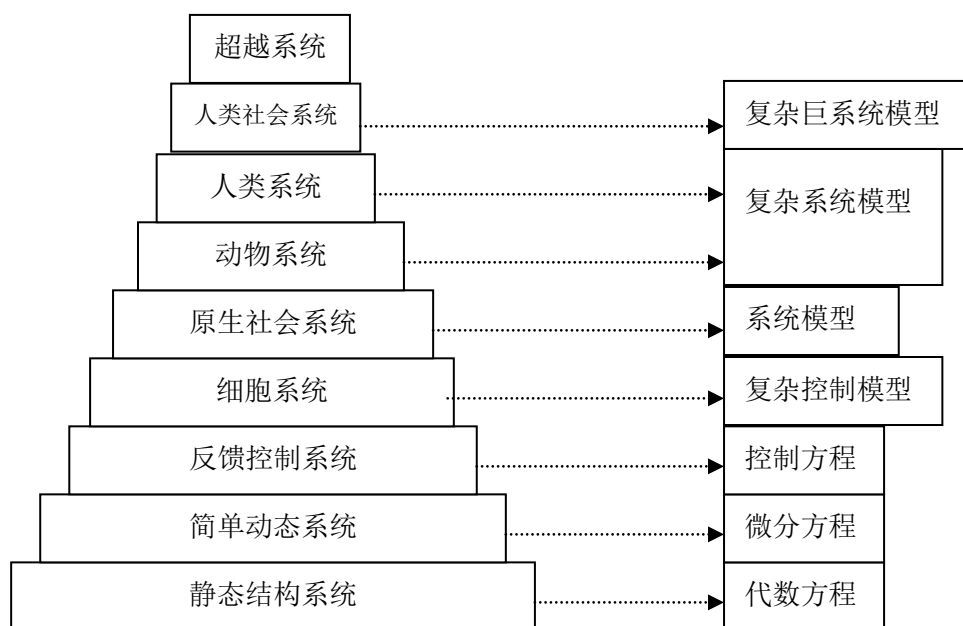
研究工程技术中的共性问题

2) 控制系统组成

- 传统的控制系统：控制器和控制对象→自动化技术
- 现代的控制系统：人、控制器和控制对象→控制、决策和管理

3) 控制对象

机器系统→生物系统→社会系统



4) 系统科学和系统工程

定性到定量、静态到动态、简单到复杂、客观到主观、机械自动化到人工智能，等

四、系统工程专业的任务和特点

数字化、网络化、集成化、智能化、信息化、标准化、模块化、一体化等是当今人机系统控制技术和方法的发展趋势，符合中国制造 2025 的国家战略需要。要实现大型复杂系统或过程的综合控制，其关键之一是系统工程理论与方法，即从整体性和系统性思想出发，对大型复杂系统或过程进行分析、建模、仿真，并实现整体优化。

1) 主要任务

确立大型复杂系统或过程的目标，分析系统的环境，设计出使工程组态与社会环境和自然环境相融合的总体方案，在有风险或不确定情况下，从整体上实现最优的物资、人力、资金和时间的均衡投入。

2) 特点和培养目标

本专业方向属于自然科学、社会科学与工程技术相互交叉与综合的领域，研究的对象是工程技术系统和社会经济系统，人才培养的目标是总工程师。

- 特点：素质教育（英语、计算机、数学、表达）

3) 现代高级工程技术人员应具备的基本素质

总工程师是具有高级工程师或工程师技术职称的工业企业科学技术工作的总负责人，在厂长（或经理）的领导下，统一指挥和组织协调企业科技系统的工作。在现代科学技术和背景下，一个总工程师或高级管理人才应具有以下素质：

A. 具有系统观点

B. 要成为 T 形人才

- C. 具有协调能力
- D. 具有实事求是的科学精神和正直的品格
- E. 能正确看待系统工程研究成果的咨询性

4) 课程设置与知识体系

- **自动化基础知识：**控制原理、微机原理、信息技术基础、电类和机械类基础知识等。
- **系统工程基础课程：**系统工程概论、系统建模与仿真技术、数据结构、数学模型、优化理论（运筹学）等。
- **专业课程**
 - ✓ **信息系统工程：**软件工程、电子商务、互联网技术及应用、信息系统工程基础；
 - ✓ **过程控制系统工程：**过程控制、测控原理、故障诊断等
 - ✓ **金融系统工程：**经济学、博弈论、金融工程、预测与决策
 - ✓ **物流系统工程：**物流装备与自动化系统、物流服务与运作管理、库存理论
 - ✓ **工程系统工程：**工程经济学、工程管理、网络评审计划；
 - ✓ **生产系统工程：**生产自动化与制造系统、生产计划与调度。
- **综合课程设计。**

5) 毕业生去向

大学和科研院所（中科院、船所、航天研究院、电子科学研究院等）、银行、证券、保险、电信、外资企业（微软、波音、埃森哲、

马士基等)、大型国企(中兴、三峡、华能、国电、中核、中国商用飞机等)、大型民企(华为、腾讯、阿里巴巴等); 政府机关(公务员); 出国攻读学位。

五、国内外著名的系统科学与系统工程研究机构

1、国际应用系统分析研究所

国际应用研究所(International Institute of Applied Systems Analysis, IIASA)是一个非政府的研究组织, 1972 年创办, 总部设在奥地利的维也纳, 有“学术界的小联合国”之称。

其目标是: 为公众、科学社团、国家和国际研究机构选择有益的解决问题方案; 以创新的方式提出严肃的问题; 提供及时的相关信息和政策分析。

研究特点: 利用系统的方法分析全球问题, 利用不确定模型探讨动力学过程、决策支持方法以及风险管理和公平问题的新观点, 具有突破传统科学研究硬边界的特点。

研究范围(<http://www.iiasa.ac.at>): Energy & Technology; Dynamic System (DYN); Energy (ECS); New Technologies (TNT); Environment & Nature Resources; Adaptive Dynamics (AND); Air Pollution (TAP); Forestry (FOR); Land Use (LUC); Radiation Safety (RAD); Population & Society; International Negotiation (PIN); Population (POP); Risk, Modeling & Society (RMS); General Research; Sustainable Rural Development (SRD).

2、兰德公司（RAND）

兰德公司（Research and Development）是一个非赢利的咨询公司，1945 年创立于道格拉斯飞机制造公司，1948 年独立。早期研究偏重于系统工程，但很快就偏重于成本和策略。

其目标是：向政策制订者提供有足够情况作为依据的政策建议，使决策优化。在 21 世纪，其致力于“预测能源问题，建立新的咨询角度，为政府、商业和社会规划新的领域”。

研究特点：系统分析。

研究范围(<http://www.rand.org>)：Children and Adolescent; Civil Justice; Education; Energy and Environment; Health and Health Care; International Affairs; Population and Aging; Public Safety; Science and Technology; Substance Abuse; Terrorism and Homeland Security; Transportation and Infrastructure; U.S. National Security.

主要成就：提供了美国空间计划的基础，以及数字计算机和人工智能的贡献；在不确定情况下为决策者提供理论和工具；博弈论、线性理论、动力学理论、数学模型和仿真、网络理论、成本分析等。兰德公司的系统分析方法由最先为军事决策服务，拓展到社会政策计划和分析上，例如在城市衰落、健康、教育等方面。在社会经济方面，20 世纪 60 年代兰德公司开发出计划-程序-预算系统(PPBS)。

3、圣菲研究所

圣菲研究所(Santa Fe Institute, SFI)也是一个非赢利的研究所，1984

年成立于美国新墨西哥首府圣菲市。创办者是 George Cowan，倡导者有诺贝尔经济学奖获得者 K.J.Arrow，诺贝尔物理学奖获得者 M. Gell-mann 和 P. W. Anderson 等。

研究目标：冲破学科界限，打破近代科学中普遍存在的片面强调还原论思想的弊病以及由此而来的种种问题，如学科分割造成的隔阂，综合的、整体的观念缺乏，只见树木不见森林的短视和偏见，在丰富多彩的现实面前的僵化和无能。

研究特色：开展跨学科、跨领域的复杂性研究；没有固定的研究人员，可以培养硕士、博士和博士后，并接纳访问学者；20 世纪末被评为全美最优秀的 5 个研究所之一。

研究范围(<http://www.santafe.edu>)：认知神经科学，物理和生物系统的计算，经济和社会的相互影响，进化动力学，网络动力学，探测计划，健康，战争与和平等。

主要论点：事物的复杂性是由简单性发展来的，是在适应环境的过程中产生的。他们把经济、生态、免疫系统、胚胎、神经系统及计算机网络等称为复杂适应系统，认为存在某些一般性的规律控制着这些复杂适应系统的行为。

目前代表性成果有：SWARM 软件平台。

4、中国系统工程学会

在钱学森倡导下 1980 年成立于北京，挂靠单位是中国科学院系统工程研究所。现有 1 个学会办公室和 20 几个专业委员会。

主要任务：围绕本学科领域组织开展国内外学术交流、促进理论

与应用研究、科技普及、教育培训、书刊编辑、决策咨询、项目论证、成果鉴定、资格评审、国际合作、科技服务。

出版物：《系统工程学报》

《系统工程理论与实践》

《Journal of Systems Science and Systems Engineering》

《模糊系统与数学》

《系统科学与数学》

《农业系统科学与综合研究》

《交通运输系统工程与信息》

《系统工程与电子技术》

《Journal of Systems Engineering and Electronics》

六、系统科学与工程系简介

1) 主要研究方向

- 面向社会经济技术系统的决策理论、方法及技术
- 以物流为中心的大型工程、企业系统的优化与控制
- 以信息为中心的系统分析与集成
- 系统科学与控制科学紧密结合的复杂系统理论

例如，本人的研究方向包括：

- 大型工程项目管理与风险分析
- 决策支持系统与信息技术
- 可视化支持技术与人工智能
- 多目标评价与系统优化设计
- 博弈论与电子商务
- 行为决策与经济系统仿真技术
- 优化理论与智能算法

2) 完成的部分典型系统工程项目

1	大型水电工程的建设、生产、调度、安全监控及高层决策支持系统	三峡开发总公司、华能集团、黄河小浪底公司、南水北调指挥部等
2	城市基础设施建设与运维的信息规划、集成管理	世行、亚行贷款的湖北、上海、广西的城市污染处理设施建设项目，武汉地铁公司，武汉市科委等
3	面向全生命周期的电网主要设备、物资等分类识别、管理、信息集成及检修策略研究，能源优化与电力市场	国家电网及其河北、湖北、湖南等分公司
4	基于忆阻器的大容量认知存储技术研究	武汉市应用基础研究计划项目、华为技术有限公司、深圳科委、国家科技部等
5	数字化仓储管理、调度及监控技术	武汉市科技局、武汉烟草公司、武汉港口公司、三峡开发总公司、武汉钢铁公司、湖北省储备物资管理局
6	敏捷后勤与国民经济动员演练系统，非常规突发事件应对的多部门多环节协同决策	国家发改委、武汉市经委、总后、广州军区等； 三峡开发总公司、国家安监局等

- 世行贷款湖北污水处理项目服务定价分析与仿真(1998-2000)
- 南水北调中线工程沿岸地区水价测算及经济影响(2001-2004)
- 澜沧江水电梯级电站优化调度与定价对策研究（2002-2012）
- 电网资产全寿命成本分析与管理评价（2010）
- 武器装备的虚拟采办（2008）

- 大数据与计算机审计信息系统的研发(2017-目前)
- 人工智能与泛在电力物联网（2019-目前）
- 电网资产全寿命周期成本分析、管理评价指标体系研究及系统开发(2010-2012)
- 面向未来电网的可实施双侧竞争机制及关键技术研究（2020-现在）

举例 1：世行贷款湖北城市环境项目经济分析与服务定价的建模与仿真

武汉市污水定价问题： The goals of the present pricing model are to provide guidelines to determine an appropriate price for wastewater charge, to ensure WUDDC is able to run as an autonomous enterprise, and to afford repayment of the World Bank's loan. Given that various services are provided for different users, setting up respective prices for individual services can improve economic efficiency.

决策分析：

- 武汉市宏观经济状况及发展→还款能力
- 污水处理项目的特点→服务成本分析→固定成本与可变成本
- 居民需求分析→需求弹性→公共服务的特点→定价原则
- 低收入居民利益的保障→限制垄断性企业的自由定价→政府补贴
- 因素分析→建立数学模型→设置政策变量
- 多个选择方案的仿真→效益分析与评价→决策和建议

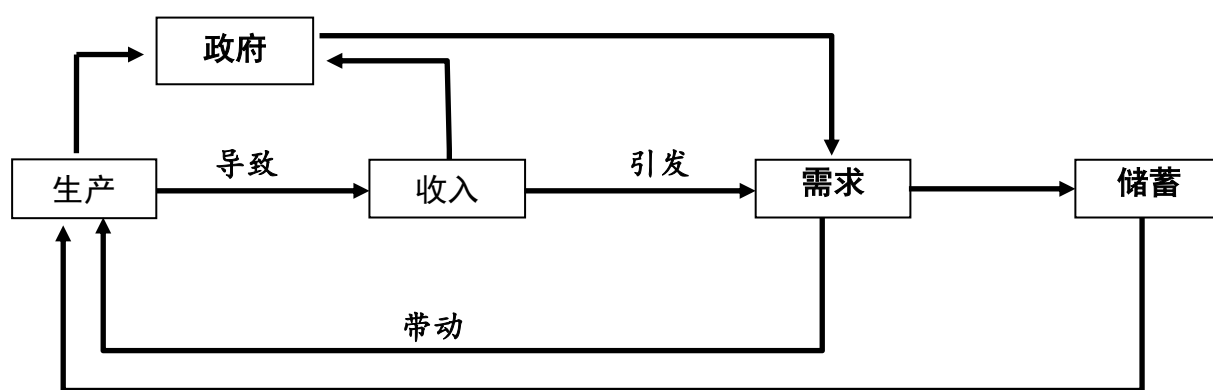
结论与建议：

- Wuhan's overall economic potential can ensure its ability to repay the loan, but the residents' present low income level results in their low willingness to pay wastewater charges. It is necessary for the government to provide appropriate subsidy when adjusting the price of wastewater charge.
- the key to setting wastewater charge policies and operating the company as an autonomous enterprise is to raise the residents' incomes and environmental protection consciousness. Thus, relevant education and enforcement should simultaneously be strengthened.

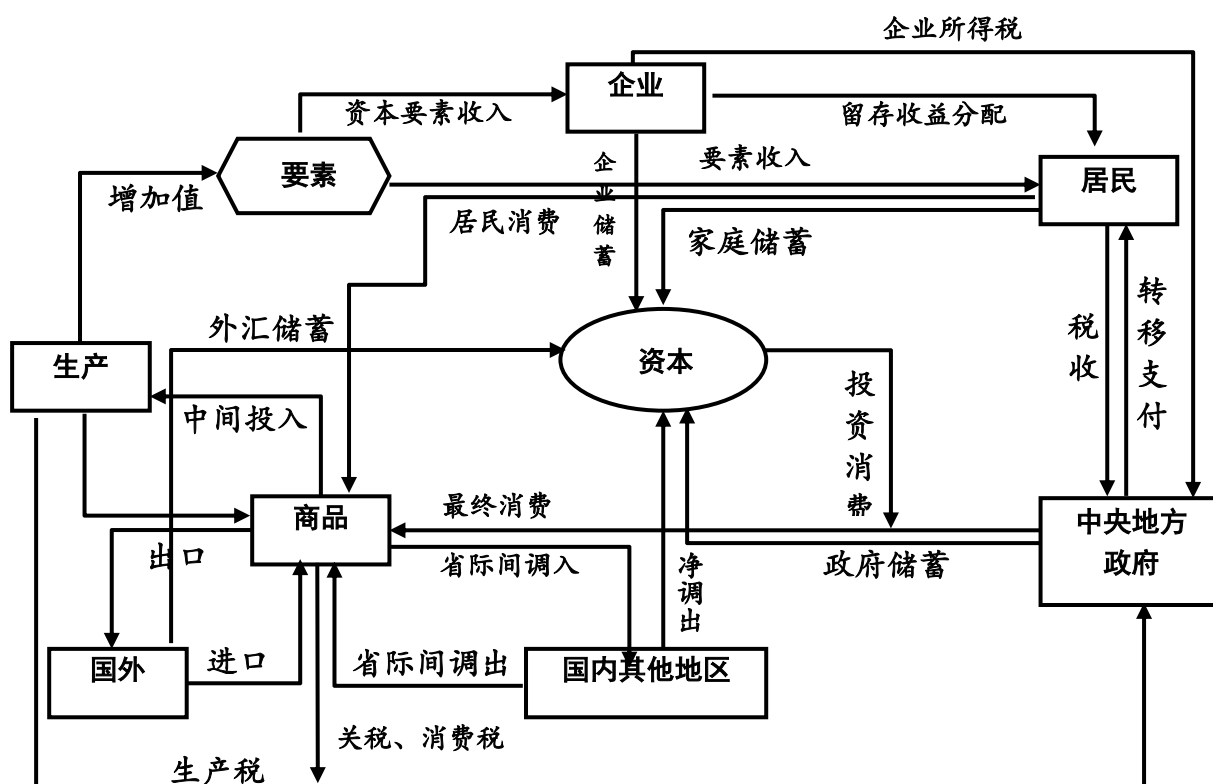
- the pricing strategy should not be fixed. With changes resulting from inflation or other economic drivers (such as the residents' income, purchasing power, and the services cost), the rate of the wastewater services charge should be dynamically offset.

举例 2：南水北调中线工程沿岸地区水价测算及经济影响

CGE 模型是模拟经济系统中生产创造收入，收入引发需求，需求导致生产的经济循环过程。它是在一致的帐户平衡关系和闭合的核算体系内，通过一组供给、需求以及均衡方程，在各种经济行为主体最优化（生产者成本最小化、消费者效益最大化、进口收益利润最大化、出口成本优化等等）的约束条件下求解这一方程组，得到在各个市场都达到均衡时的一组数量和价格。它常被用于模拟由外在冲击和变化引发供给或需求变化，而导致各经济系统部门间发生直接或间接波及影响，以及对经济整体的全局性影响。



● 模型框架



无南水北调情景组	B1 (水资源非可持续利用情景)	B2 (水资源可持续利用情景)
第一组： 基准情景	<ul style="list-style-type: none"> 总供水量保持基年水平； 继续年超采 4.26 亿 M³； 保持 80% 的地表水利用率； 生态用水为零； 居民用水年均增长 2%。 	<ul style="list-style-type: none"> 停止超采地下水，使地区总供水量年均减少 4.26 亿 M³； 地表水利用率降至 60%； 逐年恢复地区生态用水，从 1997 零用水量线性增长到 2020 年的 9.2 亿 M³； 居民生活用水年均增长 2%。
南水北调情景组	S1	S2
第二组： 对照情景	所有假设与 B1 类似，但还包括： <ul style="list-style-type: none"> 从 2008 年起，南水北调工程调水完工，向北京输送 10.2 亿 M³ 的水； 调水首先满足居民用水需求，随后在工、农业和商业用途分配。 	所有假设与 B2 类似，但还包括： <ul style="list-style-type: none"> 2008 年工程完工，开始输送 10.2 亿 M³ 的水； 调水首先满足居民用水需求，随后在工、农业和商业用途分配。

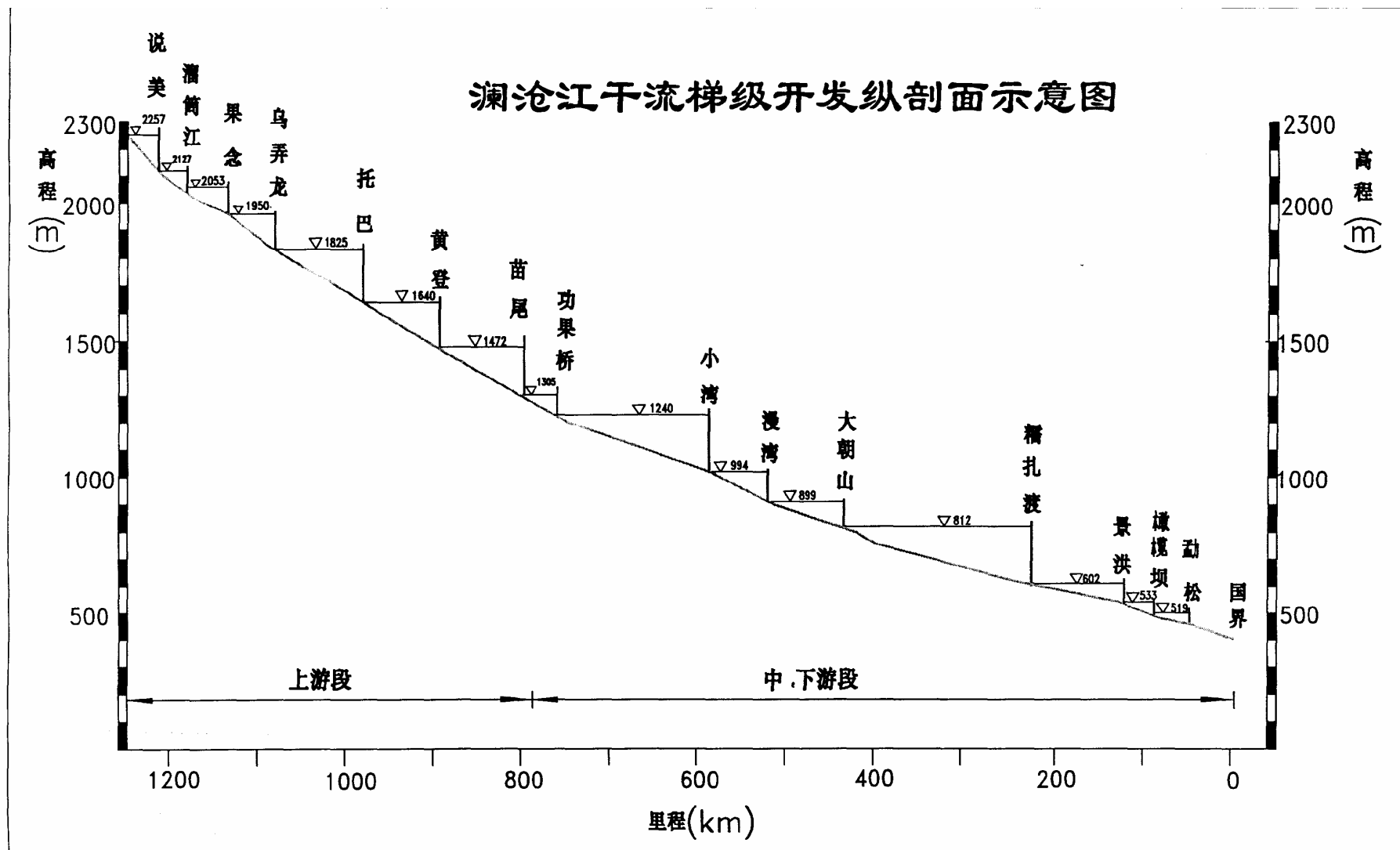
拟回答的问题包括：

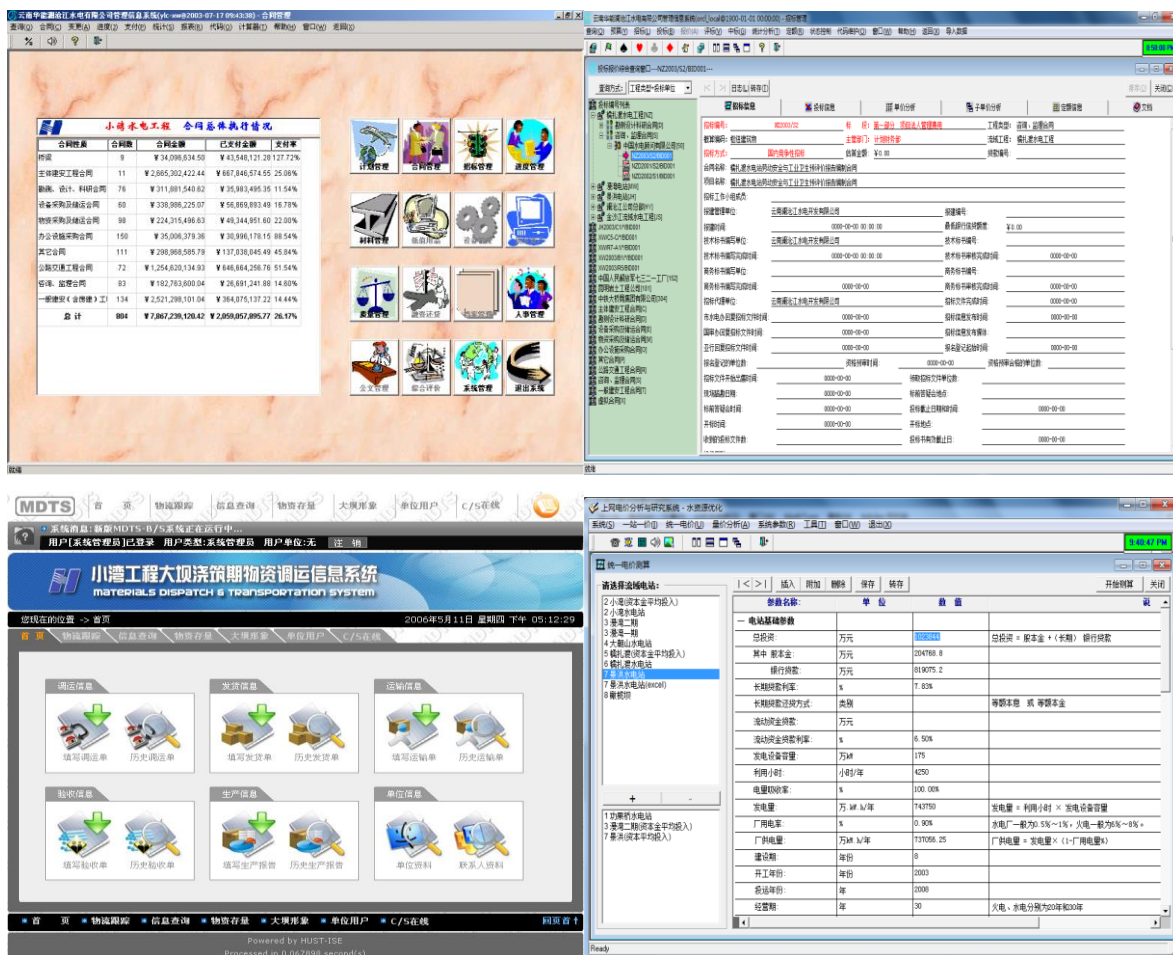
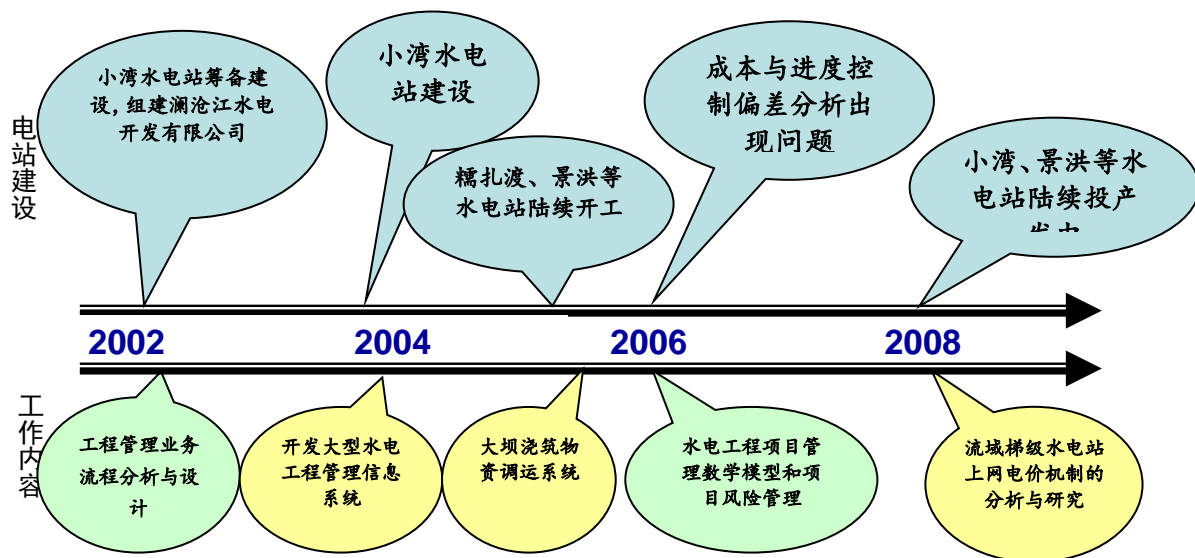
- 1) 调水工程对北京市的经济增长促进作用有多大？
- 2) 调水工程对地区财政收入有何影响？
- 3) 调水带动的生产对于地区居民收入和就业状况有何影响？

主要结论与建议：

- 在没有南水北调工程调水的非可持续情景 B1 中，至 2010 年和 2020 年间，北京市经济增长率仍可保持在 7.5%；但北京市实施水资源可持续利用战略的 B2 情景中，GDP 增长速度会急速下降至 5.5%。这充分说明在现有的水资源状况下，维持地区经济的高速增长目标与保护地区生态环境目标之间具有不可调和的矛盾性，地区经济高速增长是建立在对水资源的超常规利用和生态环境恶化的基础之上。在实施南水北调工程后，地区的 GDP 增长将基本平稳保持在 8.5% 的水平。由此可见，南水北调工程对于地区经济的可持续增长，以及对地区的环境保护起着重要的作用。
- 南水北调工程供水后，至 2010 年，南水北调工程新增水量将使北京市 GDP 年均增长率提高约 1%~2.3%，GDP 的增益约为 890 亿元；调水带动的生产扩大将使北京市新增劳动就业机会约 70 万人；平均将增加居民人均收入约 577 元左右，约占当年居民人均收入 2.5~4.1 个百分点；并促进政府财政收入增加 180 亿元。从长远看，随着地区用水效率的提高，南水北调工程的调水影响效应将更大，到 2020 年，调水产生的 GDP 增益约为 5271 亿元，将年均增加约 100 万左右的就业机会，直接促使居民人均收入增加约 7825 元，并产生约 870 亿元的政府财政收入增益。

举例 3：华能澜沧江梯级水电站定价建模与仿真



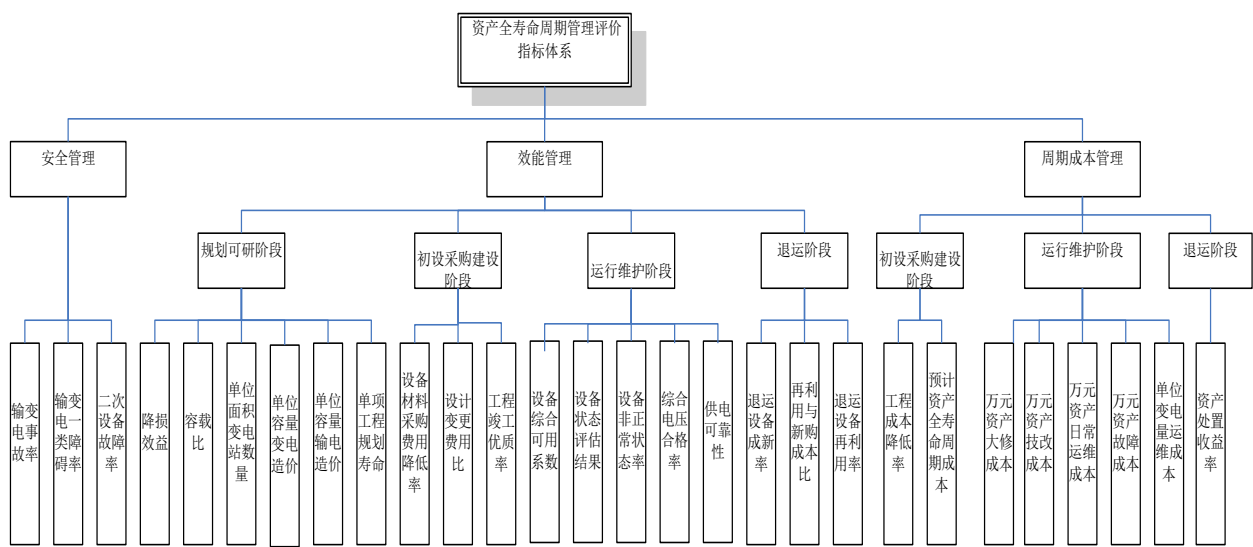


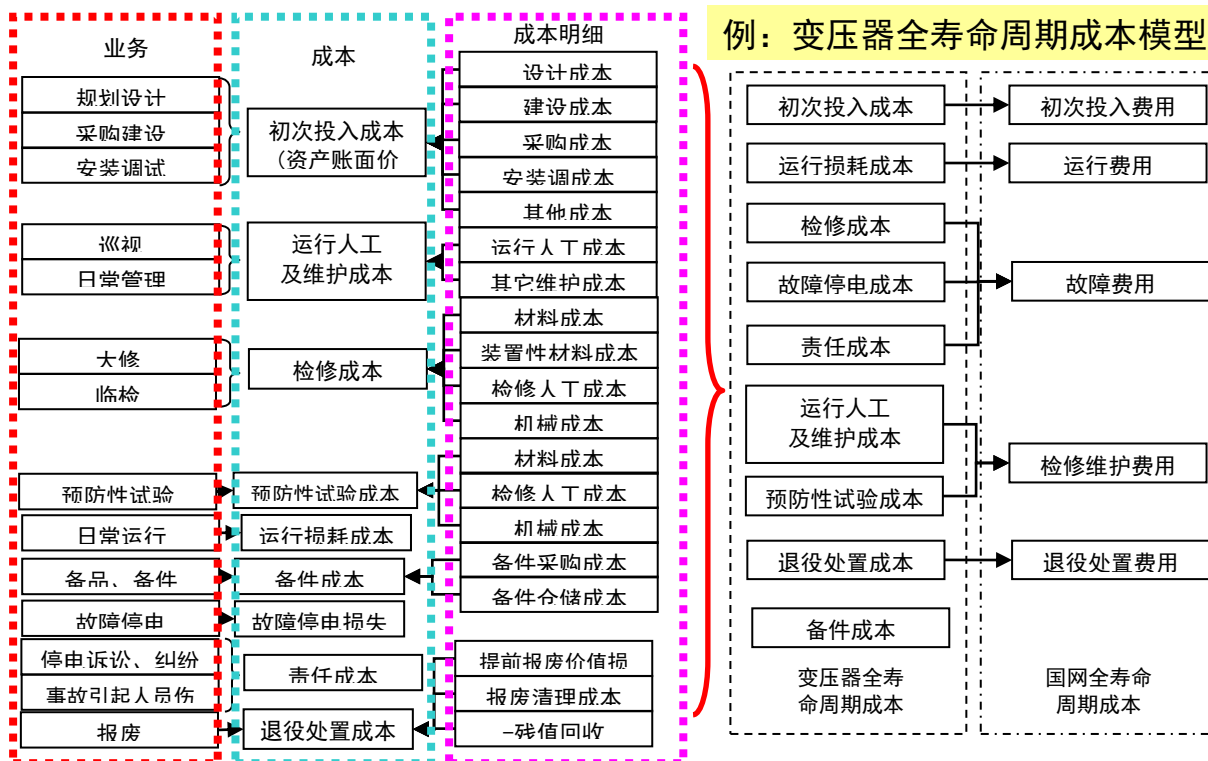
举例 4：电网公司资产全寿命周期管理成本分析与决策支持系统

我国电网资产产权制度中监督激励机制和权利相互制约机制的缺乏，加上管理观念的落后、管理体制的不健全、管理组织的不规范，使得电网从资源投入到目标产出的转换效率很难定量测定。在资产的运营管理成本相当大的情况下，如何突破传统管理模式的束缚，探寻提高电网安全稳定运行能力和资产赢利能力，延长电网经济寿命的新途径和新方法，成为电网企业亟待解决的关键问题。

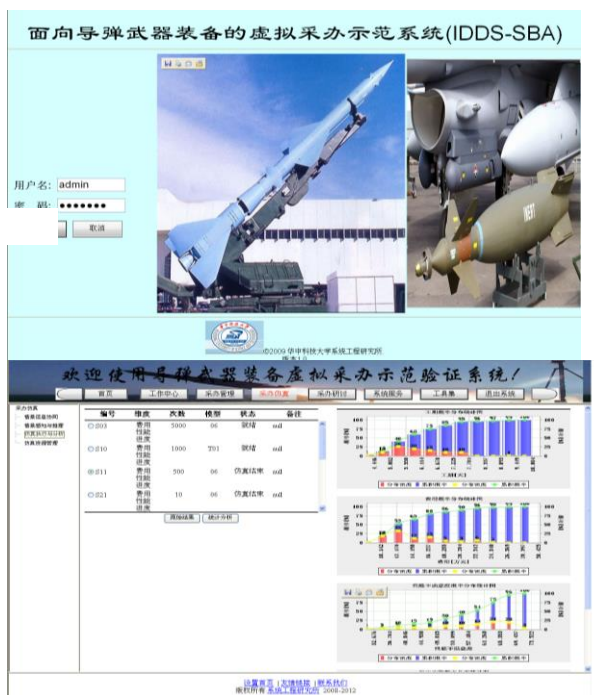
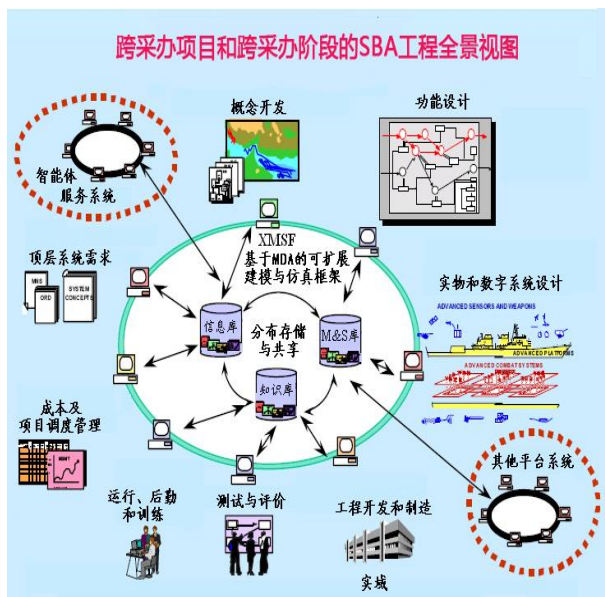
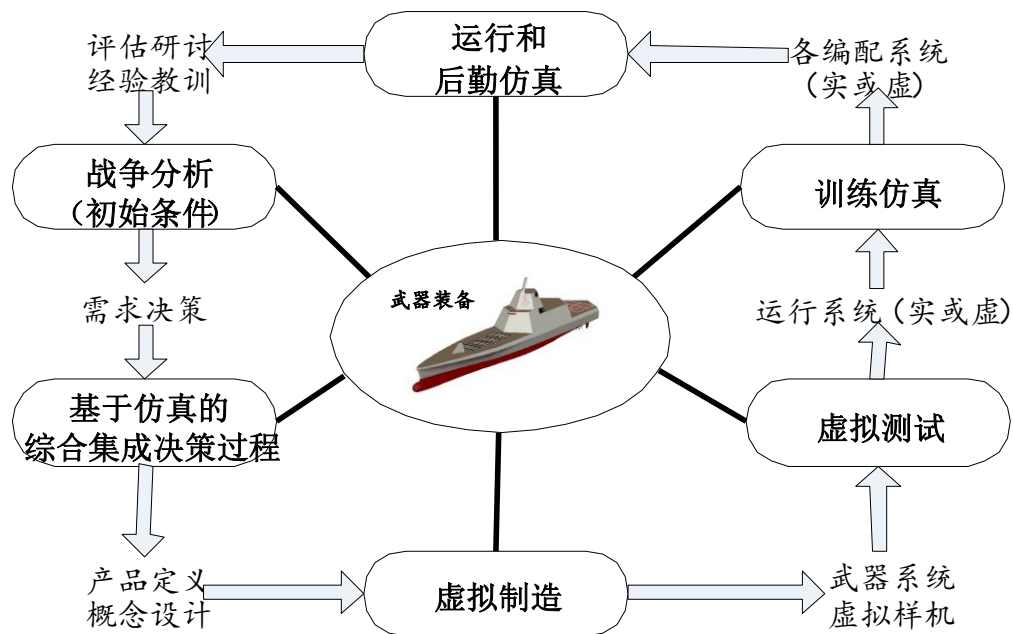
建立资产全寿命周期成本分析模型和评估决策模型，为资产全寿命周期的管理奠定科学合理的理论与技术基础，促进电网企业资产管理的

- 管理目标从注重设备效率向注重资产效率的转变
- 管理方法从技术决策向技术经济决策的转变
- 管理方式从职能管理向流程管理的转变





举例 5：武器装备的虚拟采办



举例 6：大数据与计算机审计信息系统的研发

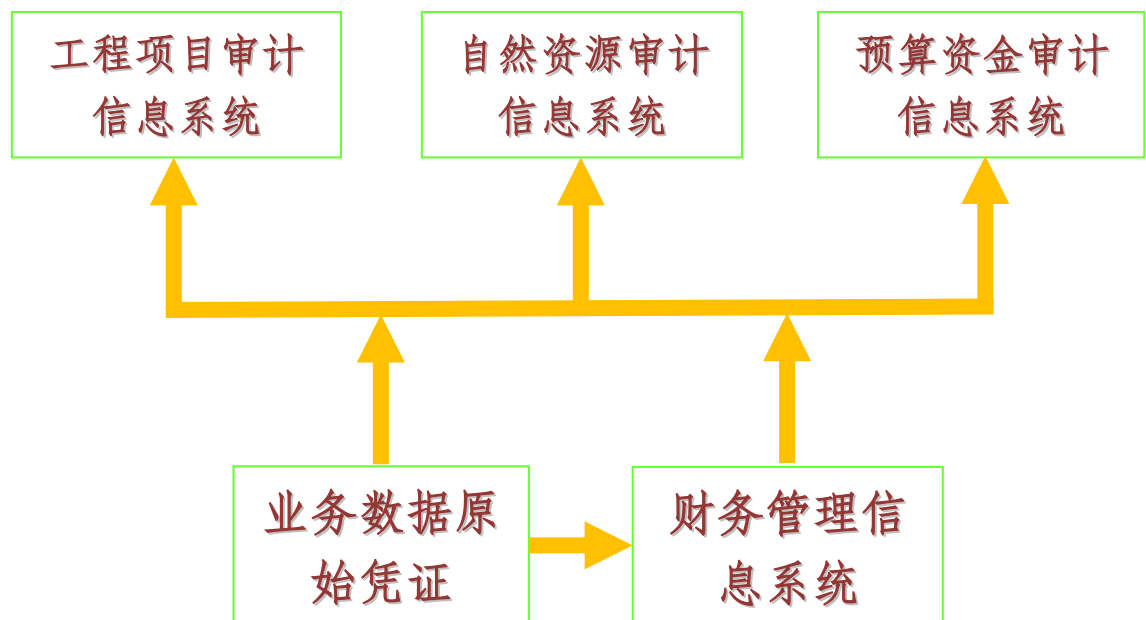
➤ 大数据环境下审计工作的困境

- 国家财政预算单位多，有国家财政资金投入的工程项目多，自然资源的真实数据难以采集。审计机关的人员较少，审计工作很难做到高质量地全覆盖。
- 传统的审计工作局限于“事后审计”，发现违规问题难以得到有效补救。
- 审计人员的实际工作很大部分时间用在翻阅大量的原始凭证，劳动强度高，信息化程度较低，效率不高。
- 现有审计信息系统要求审计人员能组织编写 SQL 语言，不符合基层审计工作的实际情况。

➤ 现代信息技术下审计系统解困的机遇与挑战

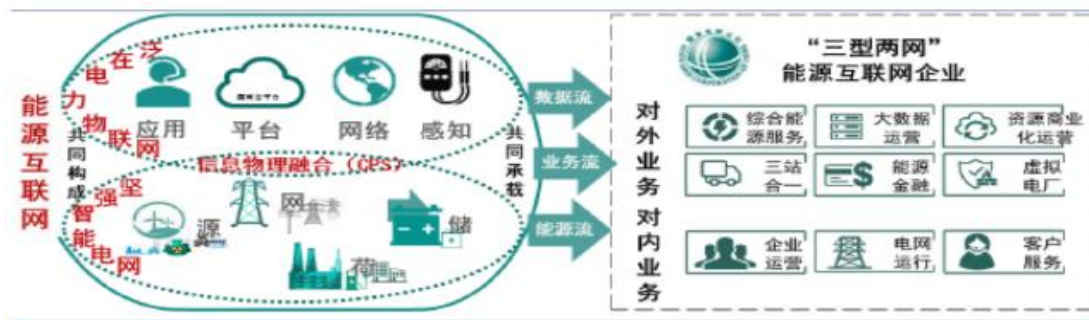
- 信息化技术日新月异，为审计信息系统的研发提供了可靠的技术手段。
- “审计信息系统”是“财务管理系统”的“后置系统”，必须在“财务管理系统”之前加入一个“前置系统”，弥补传统财务系统信息化不够完备的弱点。
- 人工智能技术可以将审计人员“问题导向”知识灌入系统，并且在系统使用过程中不断学习和丰富审计知识。

➤ 计算机审计信息系统的基本架构



举例 7：人工智能与泛在电力物联网

2019 年初，国家电网公司“两会”做出全面推进“三型两网”建设，加快打造具有全球竞争力的世界一流能源互联网企业的战略部署；并计划于 2024 年建成泛在电力物联网，全面实现业务协同、数据贯通和统一物联管理，全面形成共建共治共享的能源互联网生态圈。



本讲小结

- 系统工程是不同于传统工程技术的工程技术
 - 系统工程是工程战略
 - 是对工程技术的管理和组织
 - 是管理和工程的哲学统一
- 系统工程的核心是：整体最优化