

智慧能源网

DPS

卢强

清华大学电机系





第一部分：智能电力系统和智能电网

一、究竟什么是智能电力系统和智能电网

1.1 “智能”问题是一个“优化”控制问题

好——更好——最好
good——better→ the best

1.2 智能电力系统问题是一个**多指标**优化控制问题 (A multi-index optimization subject)

- 三大类指标：安全、优质、经济
- 标准优化指标集合：{安全稳定、品质优良、经济节能}



1.3 智能电力系统和智能电网定义

定义：

一个具有多指标自趋优运行能力的电力系统称之为**智能电力系统**。

110kV及以下电压等级的智能电力系统称之为智能电网。



二、多指标优化问题的解析数学一般表达式

综合指标：电压质量、频率质量、电压安全稳定性、频率（功角）安全稳定性、网损最小化、...

How?

$$\begin{aligned} \min \quad & J(x, y) = \int_0^\infty \sum_i^n q_i F_i(x, y) dt \\ \text{s.t.} \quad & \dot{x} = f(x, u) \\ & 0 = \varphi(x) \\ & \gamma \leq \mathbf{X}_i \leq \beta \quad \text{for } i=1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

Lagrange's method:

$$J(x, \Lambda) = \int_0^\infty \left(\sum_{i=1}^n q_i F_i(x) + \sum_{j=1}^m \lambda_j (-\dot{x}_j + f_j(x, u)) \right) dt$$

巨型条件变分问题。求解析解。

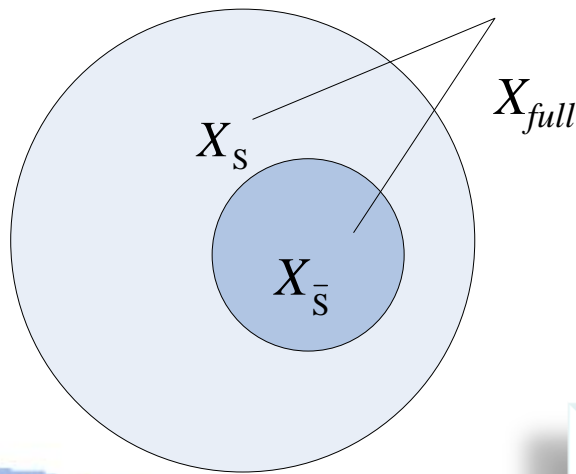
No Way!

如何解决？唯有实现智能电力系统（IPS）



三、清华学派的理论和方法论

- 若无科学的理念和方法论，实施电力系统多指标趋优就无从下手



$$X_{full} = X_S + X_{\bar{S}}$$

若令 $X_{\bar{S}} \triangleq E$

则 $X_{full} \equiv X_S + E$

用控制手段使 $E \rightarrow 0$

则 $X_{full} \equiv X_S$ 趋优化完成

A full state space X = union of state space X_S and $X_{\bar{S}}$

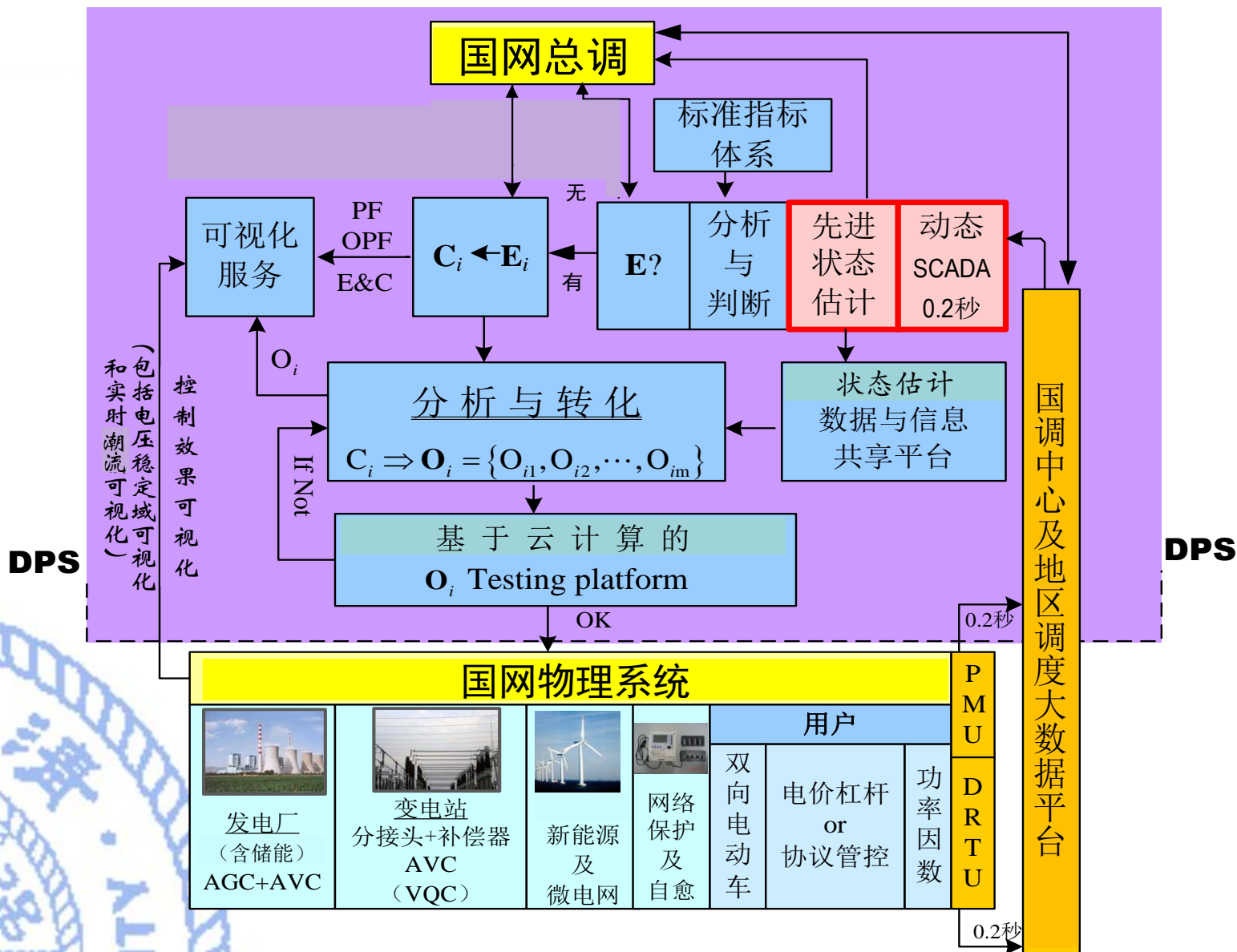
The state space X_{full} is approaching to optimization ones.

目的：消除事件空间E

**理念：由事件 E 激发控制
由控制 C 消除事件**



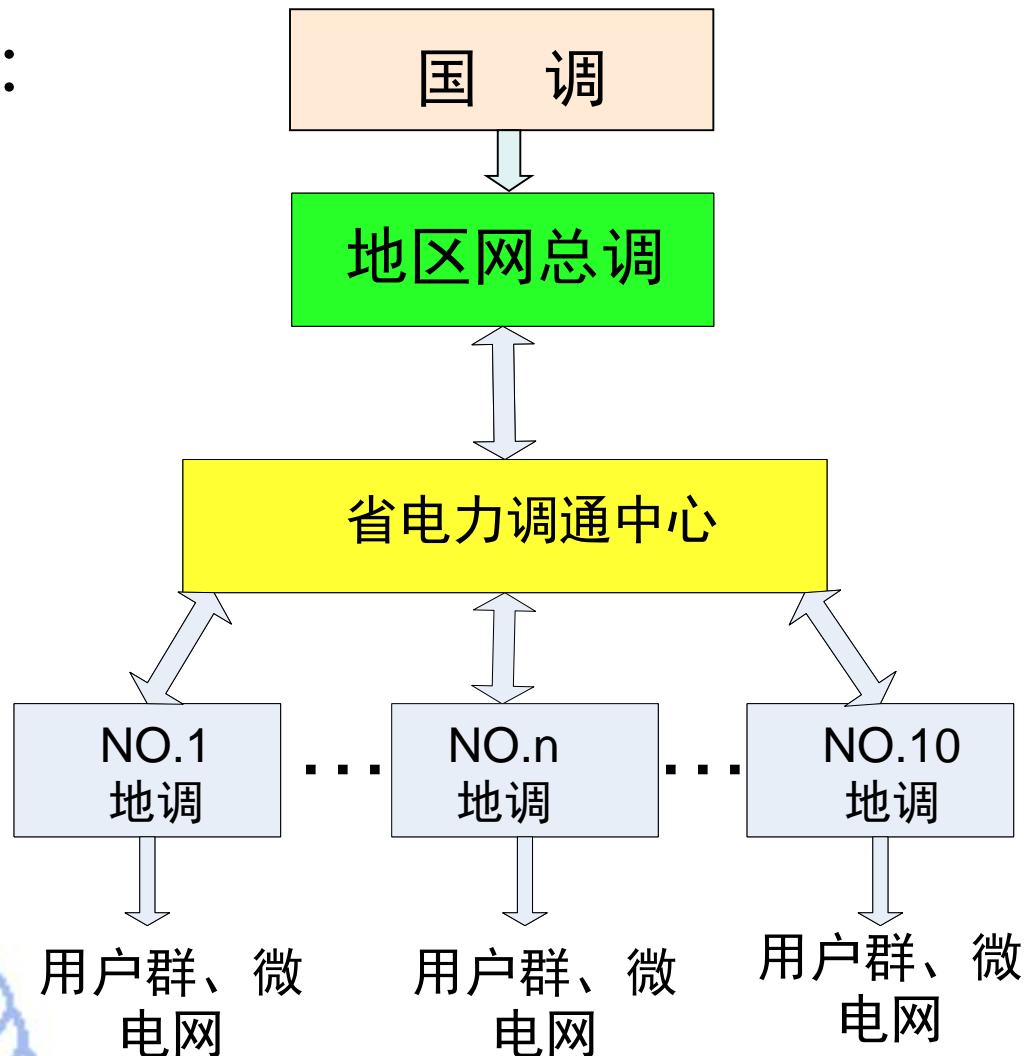
四、大网调中心层面智能调度自动化（闭环控制）系统（IEMS）结构图





五、国调、网、省、地四级调度皆需建立IEMS

例：





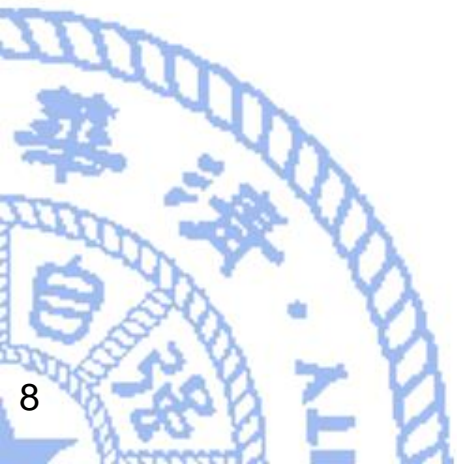
六、电力广域智能机器人 (S-WAR)

- 如此一来：

IT ⊕ 计算机科学 ⊕ 电力系统知识、经验 ⊕ 创新方法论
⊕ 创新控制理论 ⊕ 基层受控器

————→ **智能广域机器人 (Smart Wide Area Robot, S-WAR)**。

- 政、产、学、研多结合，有望2025年建成真正意义上的智能广域机器人 (S-WAR) 示范工程。





七、若干重要问题探讨与建言

- ✓ 提高绿色能源利用率20%，相当在我国大地上又出现两个三峡电站。
- ✓ 用户响应（LR）。
- ✓ 全国兴建绿色蓄能库（在电源端与用户端）。
- ✓ 加大对用户侧调节“峰谷差”的重视度，发展有中国特色的用户侧能源互联网实体经济；加强对超大电力系统实时自趋优软件的开发力度，并在我国及BR国家应用。

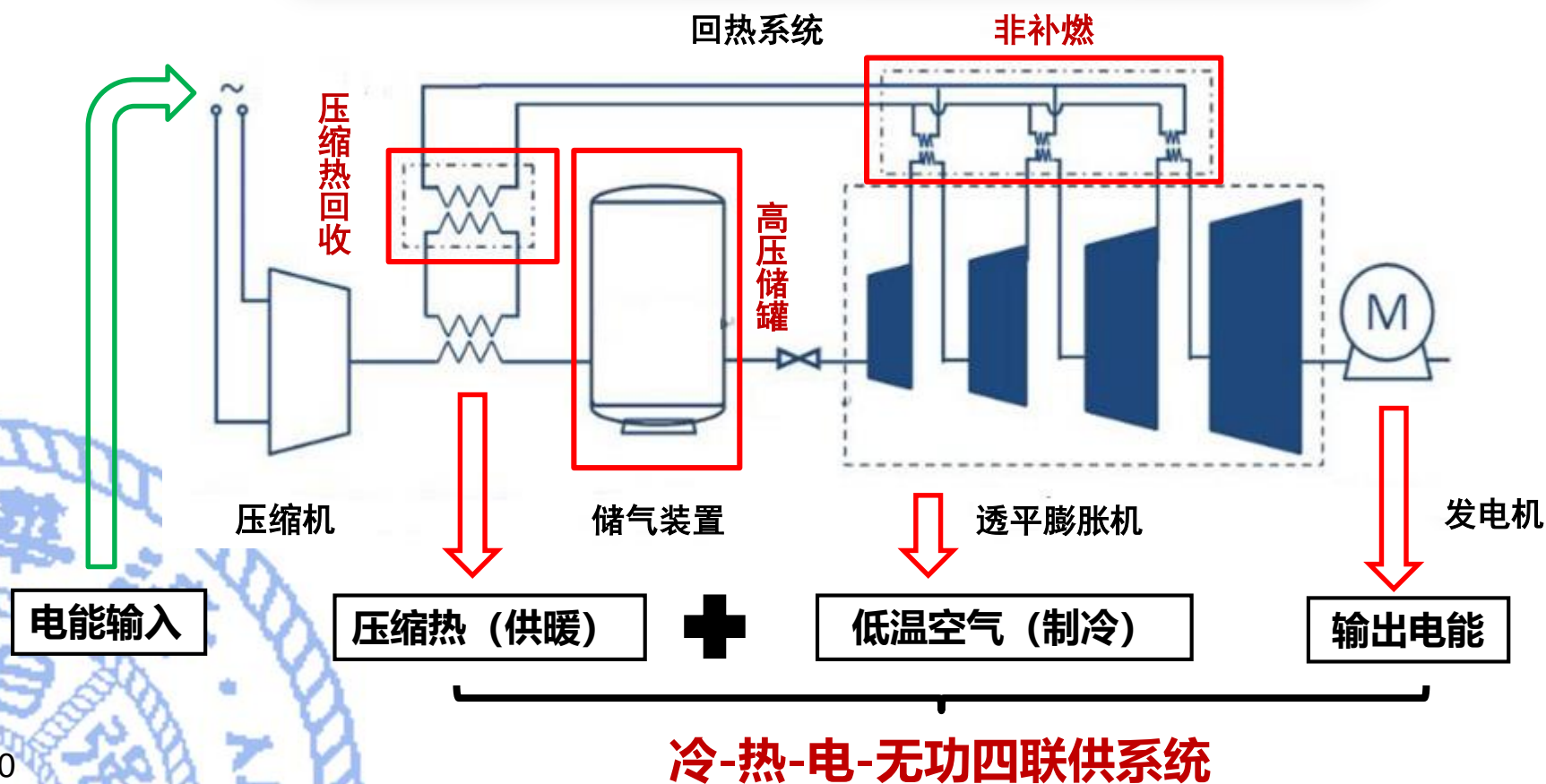




第二部分：智能微能源网

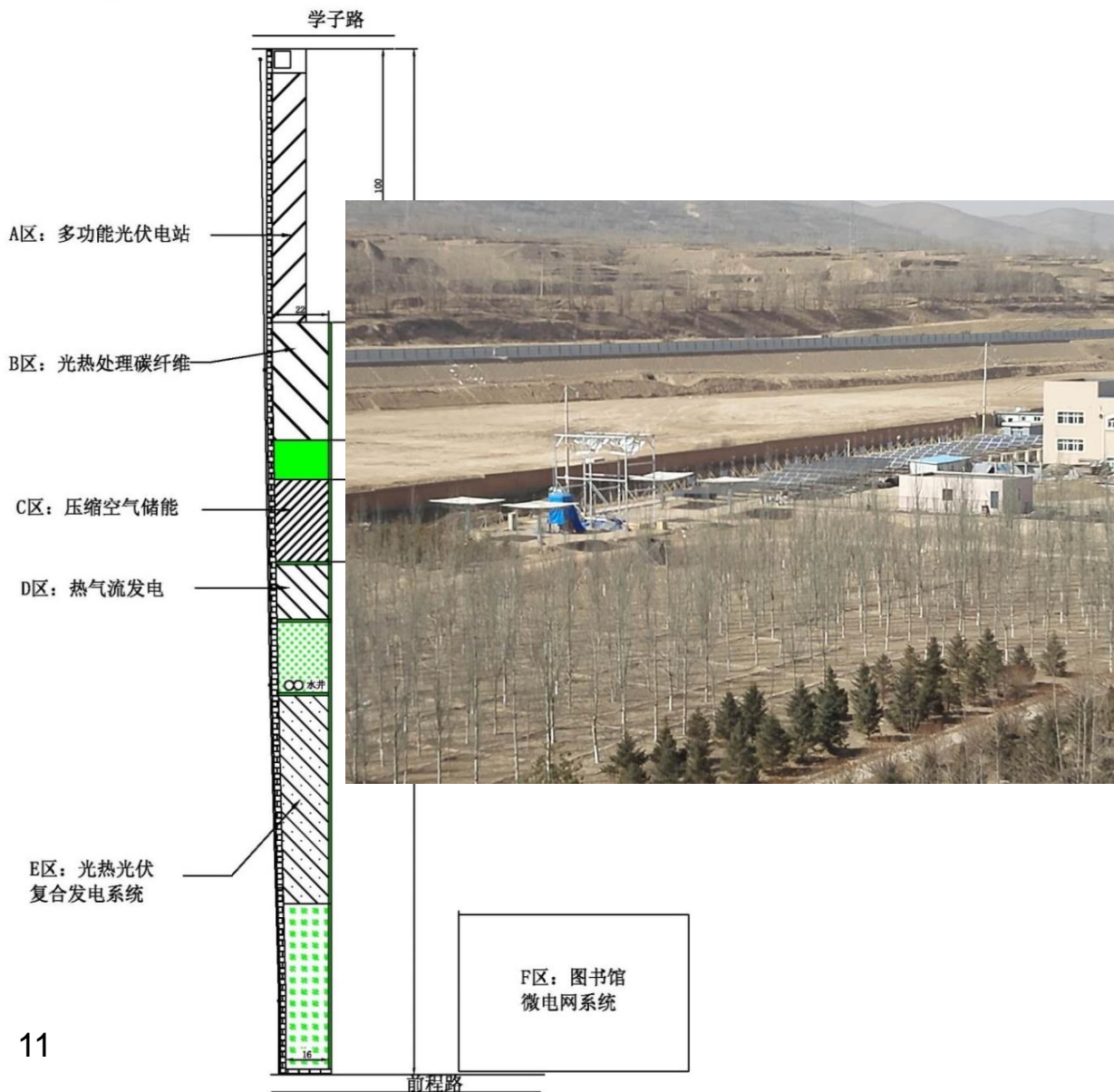
一、最新机电型储能技术：零污染、高效率、长寿命绿色能源库的建设

非补燃压缩空气储能系统流程图





二、工程实践



- 青海大学微能源网七大项目:
 - 50kW多功能光伏电站
(校园享纳)
 - 50kW光热回收机翼碳纤维
(光伏驱动)
 - 100kW压缩空气储能发电系统
 - 高原热气流发电
(太阳能发电与生态保持于一体)
 - 100kW新型全光谱发电
——军民融合
 - 110kW图书馆微电网系统
(建筑与光伏发电技术相结合)
 - 微能源网综合监控系统
(微型智能调度机器人)



50kW多功能光伏电站

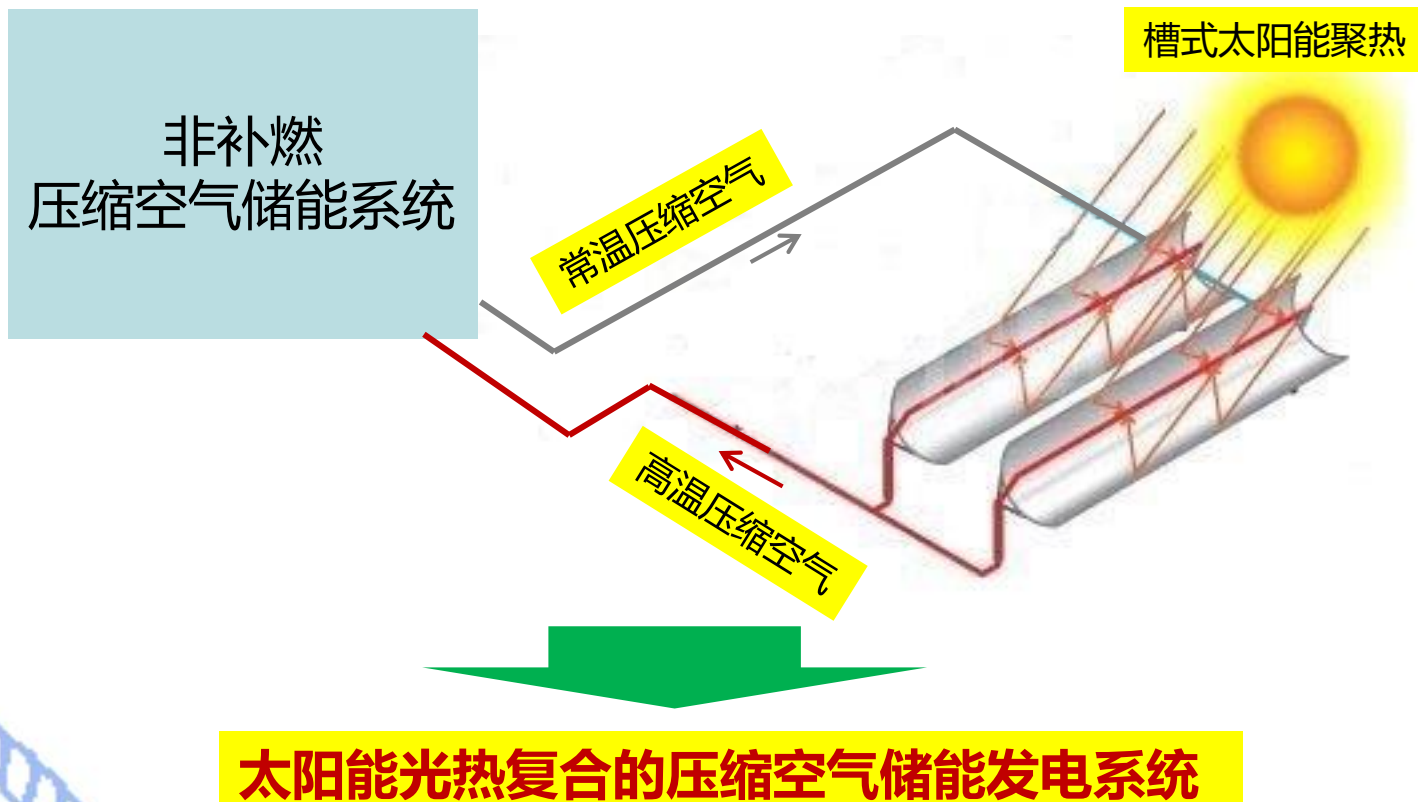


- **六种光伏电池组件**: 单晶、多晶、双面、碲化镉、非晶、铜铟镓硒
- **三种逆变器**: 微型逆变器、智能优化器、组串式逆变器
- **多种组合方式**: 组件、逆变器、支架分别组合
- **年发电量约8万度**

- **国内首座**组件类型齐全、测试功能完备的**实验电站**
- **服务于青海大学**新能源光伏发电及材料专业的教学科研



100kW压缩空气储能



- 电换电储能效率可达50%以上
- 空气透平直联高速发电机，通过先进的电力电子技术实现调频、调压及精确快速响应控制



国家级60兆瓦压缩空气储能技术综合利用示范发电厂航拍图





100kW光热光伏复合发电系统

利用能源材料将太阳能直接转换为电能的两类重要技术

太阳辐射能量：

99%在200~3000nm波长范围

- 200~800nm：紫外和可见光 约占58%E
- 800~3000nm：红外光 约占42%E

直接转换为电能的方式

1. 光电转换技术

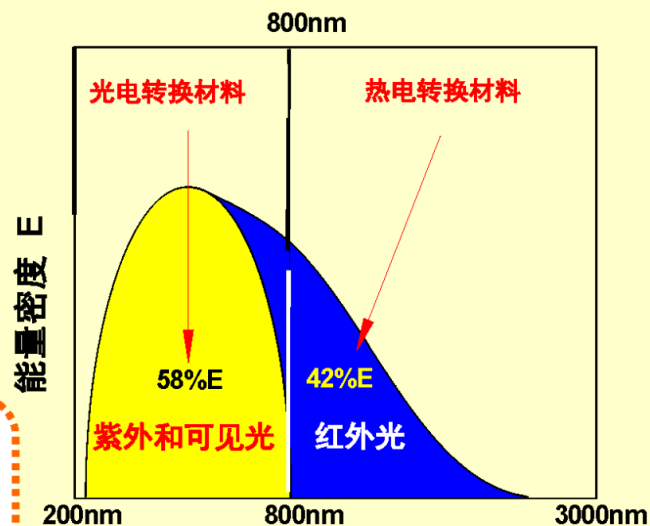
核心是光电转换材料

有效利用：58% E

2. 热电转换技术

核心是热电转换材料

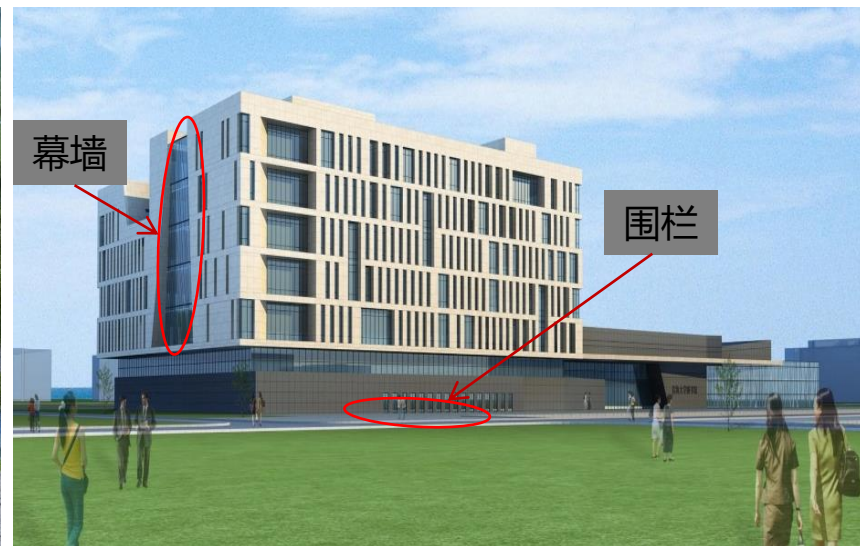
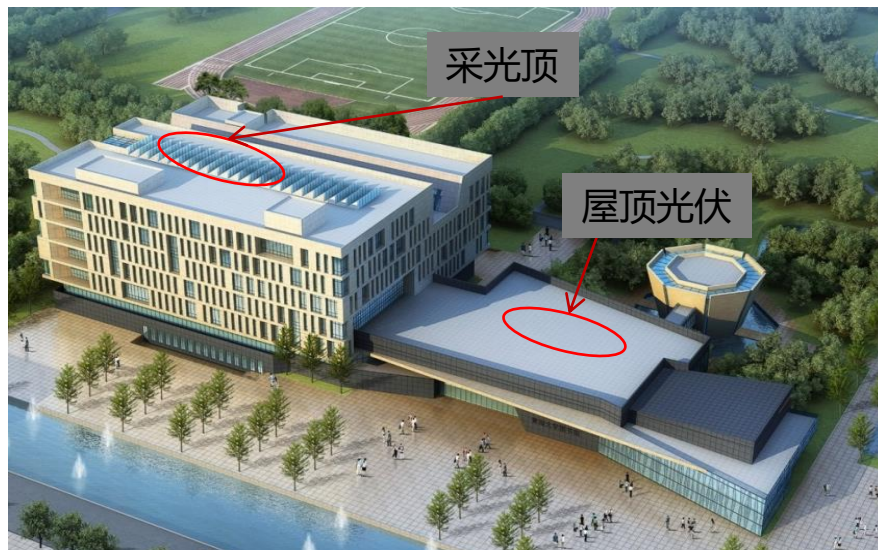
有效利用：42% E



太阳光光谱



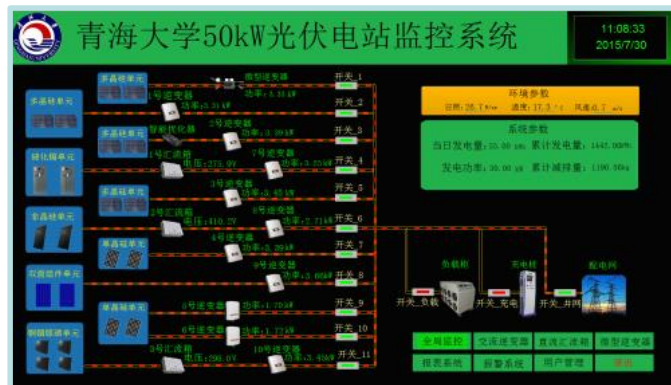
青海大学110kW **BIPV** 图书馆微电网系统



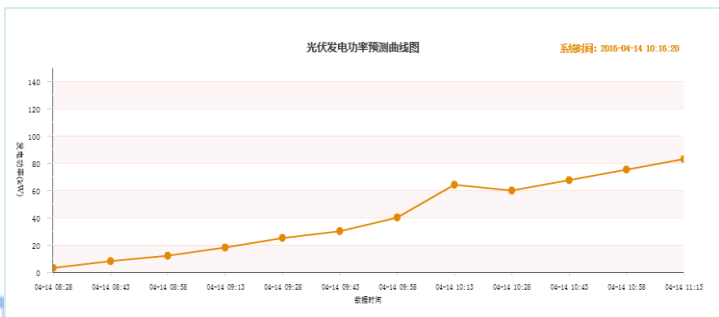
- 青海省首个光伏建筑一体化创新研究平台
- 绿色能源技术美与现代建筑艺术美的协调
- 我国能源局BIPV发展的最新进展——光伏玻璃建筑即将问世



微能源网综合监控系统



50KW多功能电站



功率预测



图书馆微网



能量优化调度

- 多指标自趋优调度
- 多种能量优化管理
- 微型智能调度机器人



第三部分：机电储能技术的工业化



- 国家级60兆瓦压缩空气储能技术综合利用示范发电厂，已在江苏省电力系统并网发电——人类储能发展史上的里程碑。
- 100万千瓦级第二期工程即将启动——人类绿色能源发展史上的新里程碑。

