



2017年中国电机工程学会年会

CSEE ANNUAL MEETING 2017

我国新能源消纳问题及应对措施

郭剑波

中国电力科学研究院有限公司

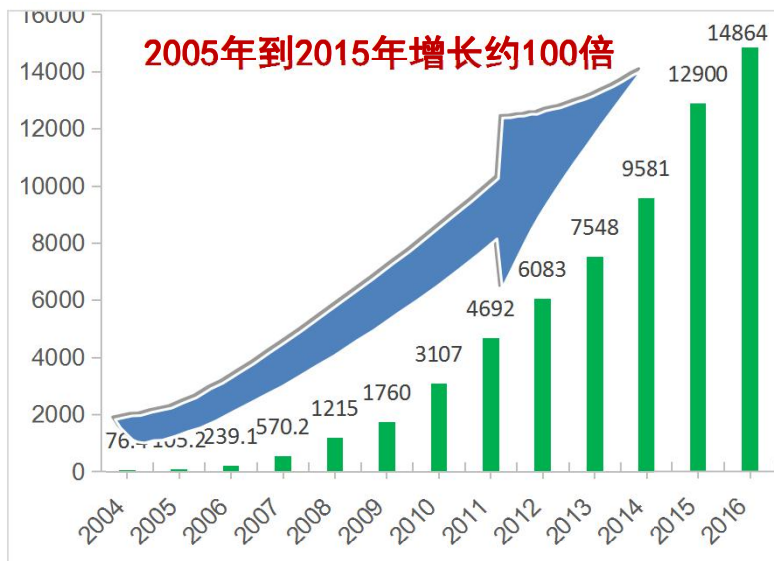
新能源与储能运行控制国家重点实验室

2017年11月24日 南宁

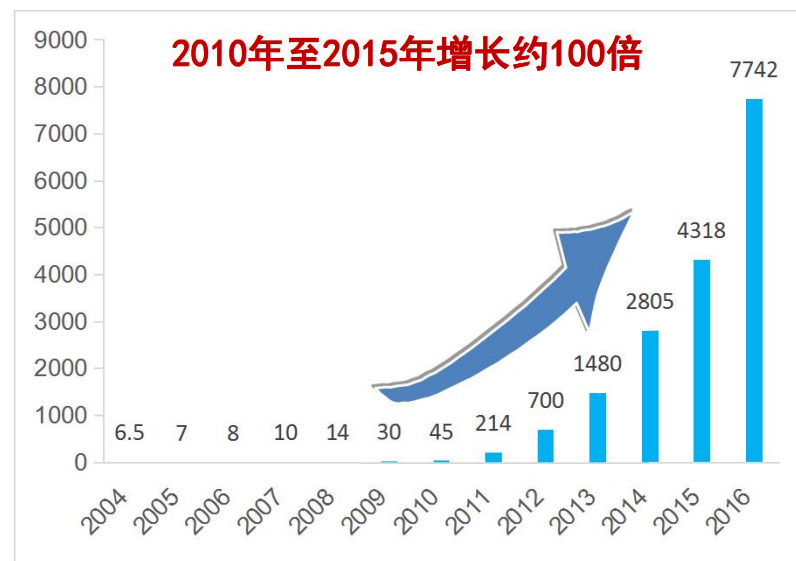


- 一、我国新能源发展情况
- 二、新能源消纳能力评价方法
- 三、技术措施及有效性
- 四、结论

我国是全球风电和光伏发电**发展最快**的国家。“十二五”期间，风电装机年均增速**34%**，相当于**每年新增4个丹麦**的风电装机；太阳能发电装机年均增速**178%**。截至2016年底，我国风电和太阳能发电装机容量**2.26亿千瓦**，超过全球的**1/4**。



2004~2016年我国风电并网容量（万千瓦）

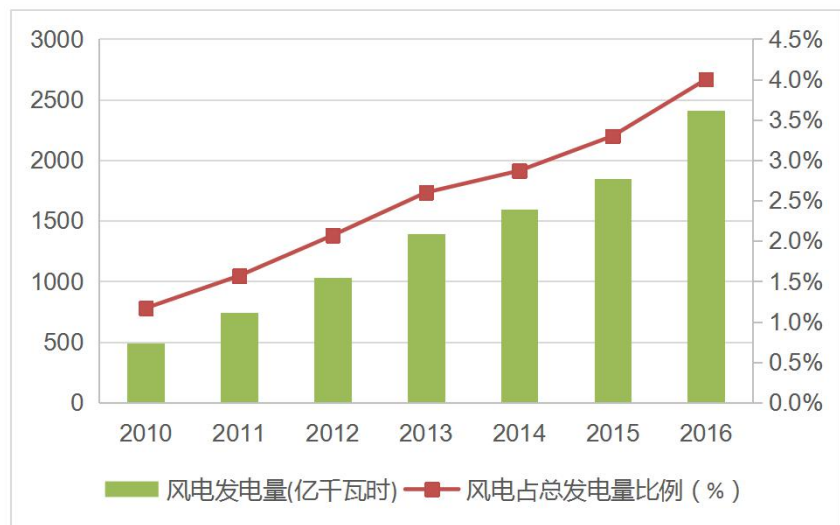


2004~2016年我国光伏并网容量（万千瓦）

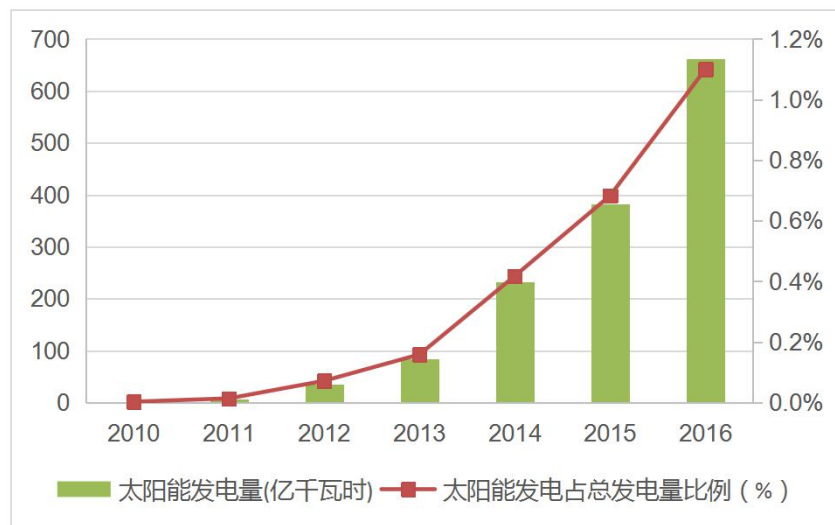
发电量逐年增加

“十二五”期间，全国风电年发电量由494亿千瓦时增长到1851亿千瓦时，年均增速**30%**。太阳能发电量由1亿千瓦时增长到383亿千瓦时，年均增速**219%**。

2016年，风电发电量**2410亿千瓦时**，太阳能发电量**662亿千瓦时**。



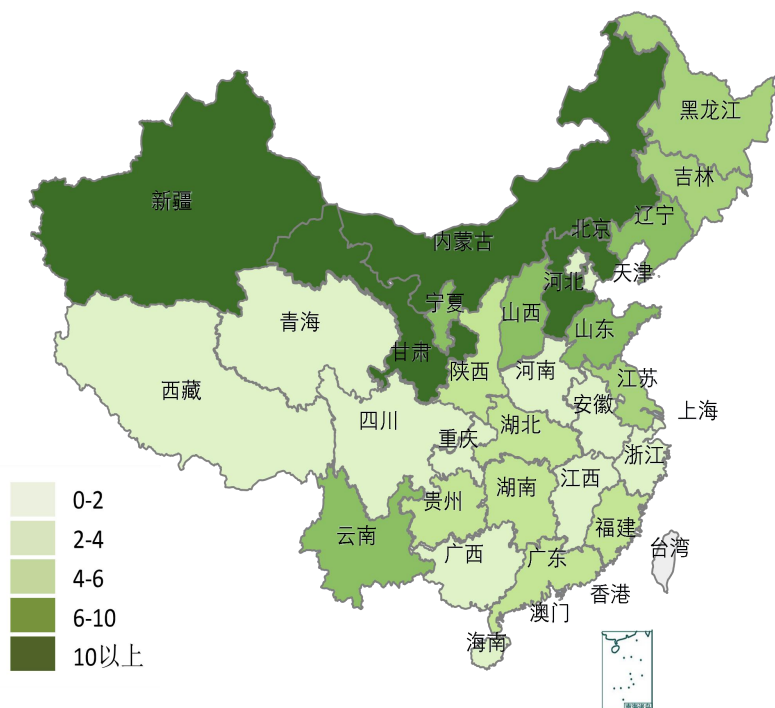
2010~2016年我国风电发电量（亿千瓦时）



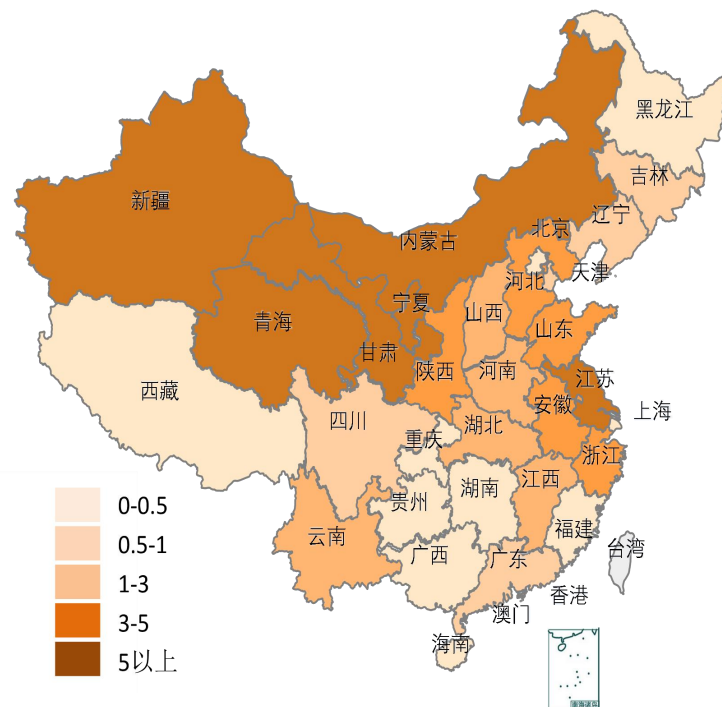
2010~2016年我国太阳能电发电量（亿千瓦时）



截至2016年底，“三北”地区风电累计装机容量**1.15亿千瓦**，占全国风电装机容量的**77%**；西北地区太阳能发电累计装机容量**3195万千瓦**，占全国太阳能发电装机容量的**41%**。

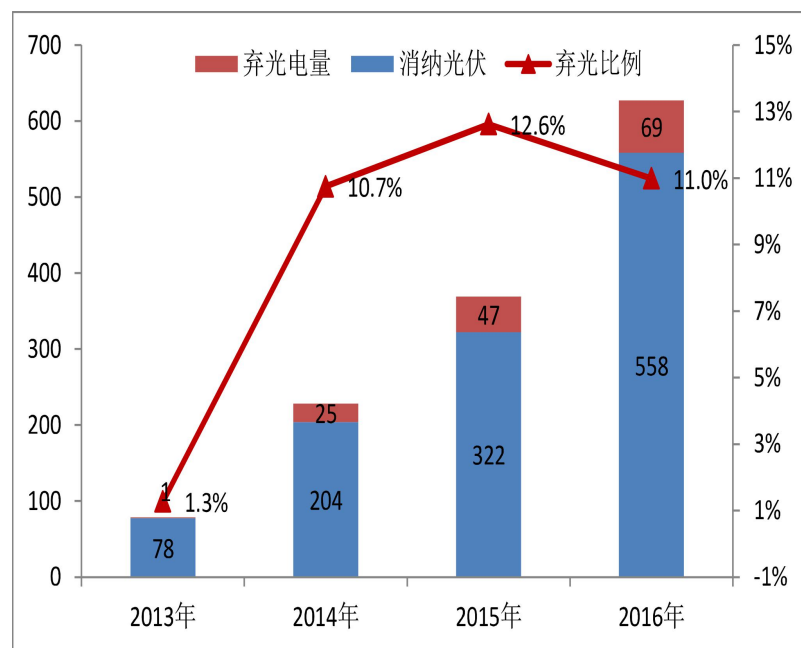
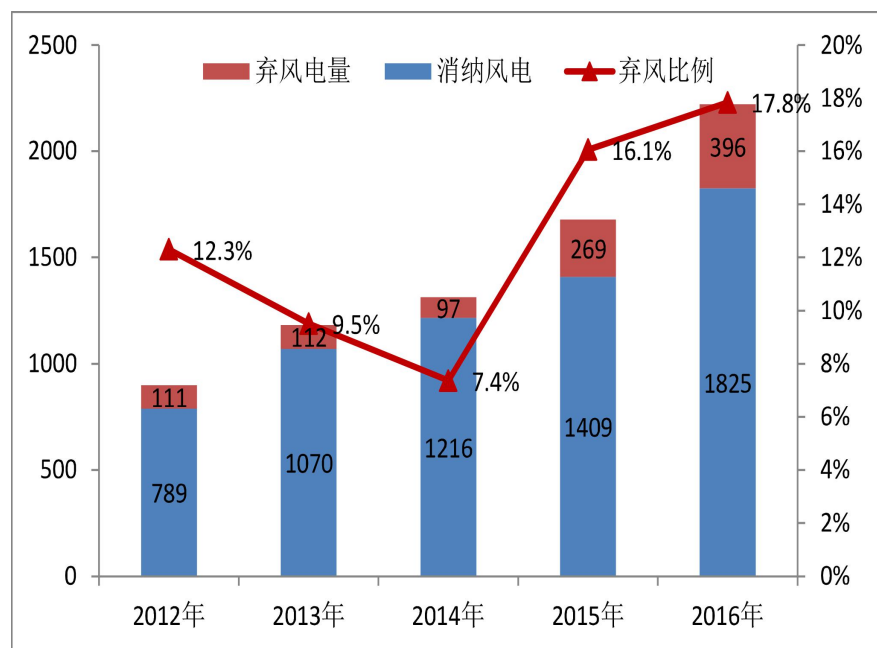


2016年我国风电装机容量分布 (单位：GW)



2016年我国太阳能装机容量分布 (单位：GW)⁵

- “三北”地区风电发电量持续快速增加，2012-2014年**弃风率逐年下降**，但2015年、2016年弃风率出现了反弹。
- 2013-2015年弃光率逐年上升，2016年**弃光率有所下降**。

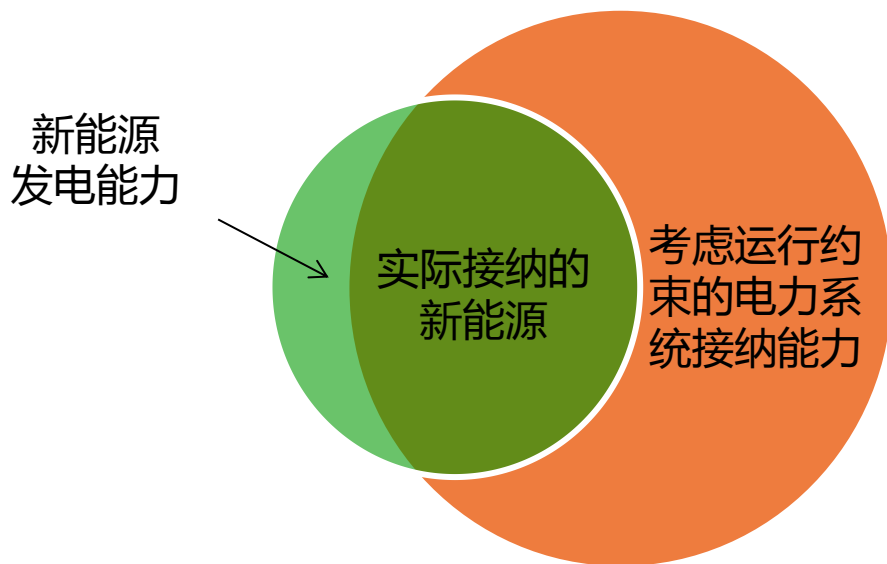


国网经营范围弃风、弃光电量变化趋势（单位：亿千瓦时）

需定量分析影响因素

弃风/弃光原因复杂，主要受电源、负荷、网架等多种因素影响，各种因素相互交织，影响机理复杂，且各网省的影响情况不同。

亟需研发新能源消纳能力评估工具，**科学定量分析**影响新能源消纳的**关键因素及其贡献率**，为提高新能源消纳能力提供指导。



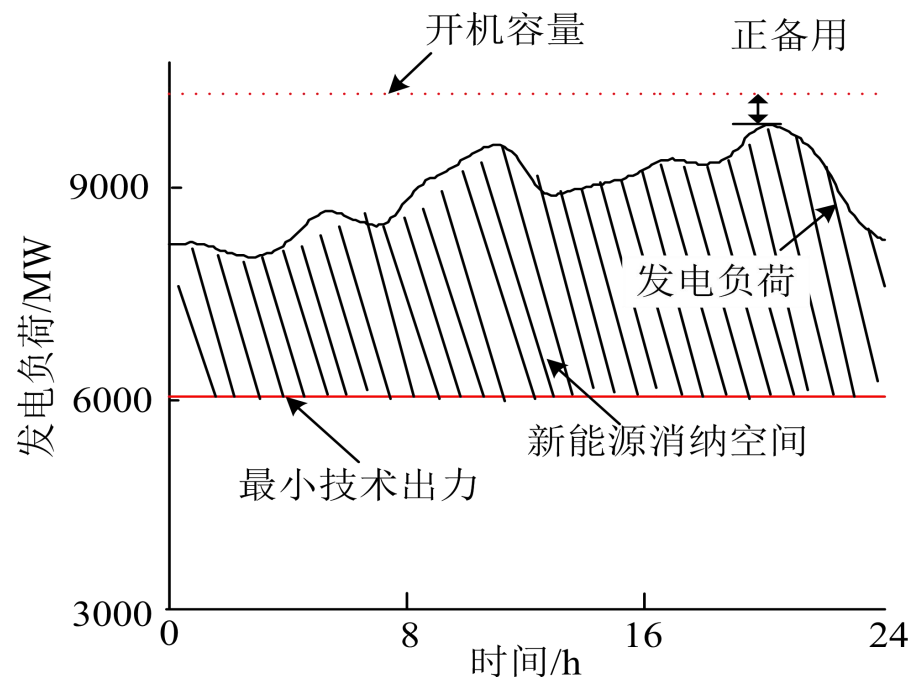


- 一、我国新能源发展情况
- 二、新能源消纳能力评价方法
- 三、技术措施及有效性
- 四、结论

新能源消纳空间概念

对于无网络约束的电力系统，发电负荷与常规机组最小技术出力之间的系统调节空间，即新能源最大消纳空间。

新能源消纳空间和**用电负荷**、**备用**以及常规机组**最小技术出力**密切相关。



新能源
消纳空间电量

备用率

$$E_a = \int [P_l(t) - (P_{lm} + r \cdot P_{lm}) \cdot k] dt$$

$$= \int [P_l(t) - \frac{1}{p} (P_l(t) + r \cdot P_l(t)) \cdot k] dt$$

负荷功率

负荷率

常规机组最小技术出力系数



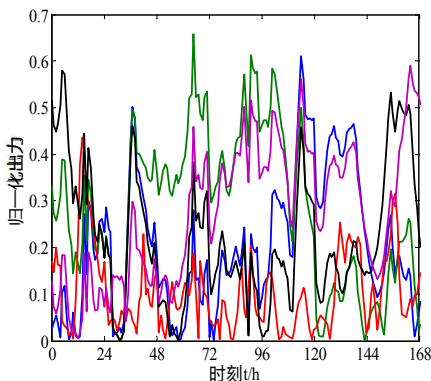
时序生产模拟方法

- 时序生产模拟方法考虑负荷、新能源等随时间变化的特性，逐个时间断面模拟电力系统发用电平衡情况，广泛应用于电力系统规划和运行分析。
- 新能源生产模拟方法基于新能源年/月电量预测，生成符合样本波动特性的多条新能源时序出力序列，用于新能源时序生产模拟，仿真长时间尺度下含新能源的电网各类电源开机及运行情况。

年/月电量预测

预测
电量

时间序列建模



出力
序列

生产模拟模型

电源模型

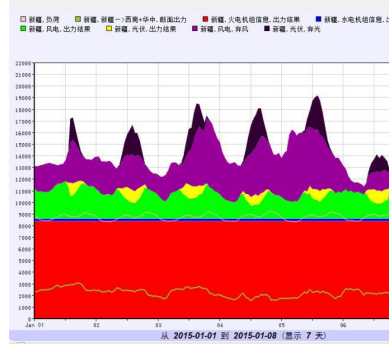
电网模型

计算模型

求解器

时序
结果

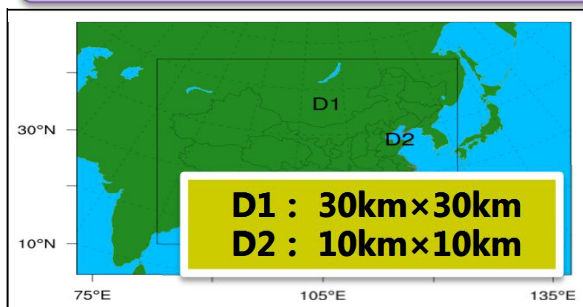
各类电源出力



新能源年/月电量预测方法

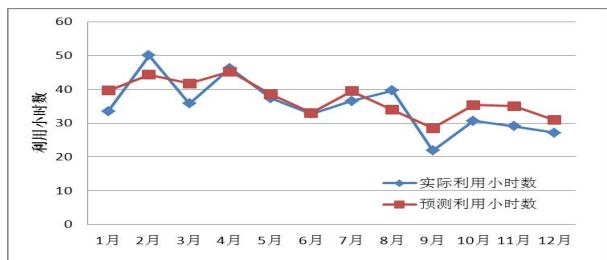
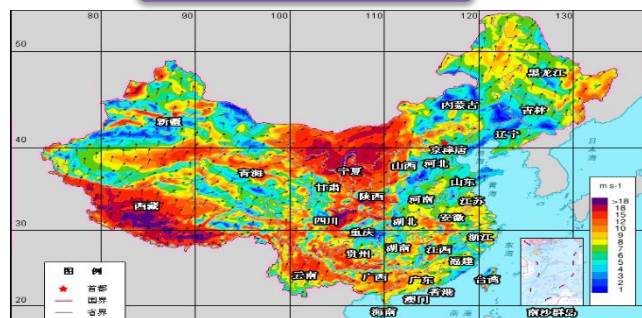
基于新能源资源长期历史再分析数据和预测数据，建立了纵向同月递推和横向逐月滚动修正的年/月电量预测模型，实现了新能源电量的准确预测，预测误差小于10%。

建立全国NWP降尺度回算平台

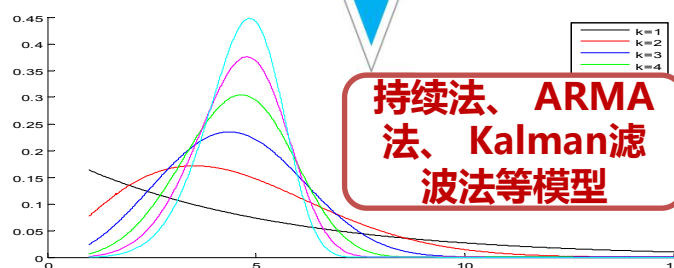


多年风速、
风向等基
础数据

多年平均风速



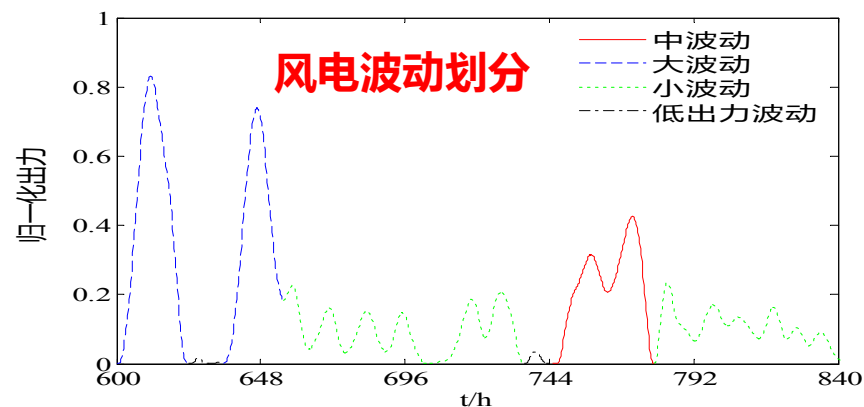
年/月电量预测结果



持续法、ARMA
法、Kalman滤
波法等模型

预测模型

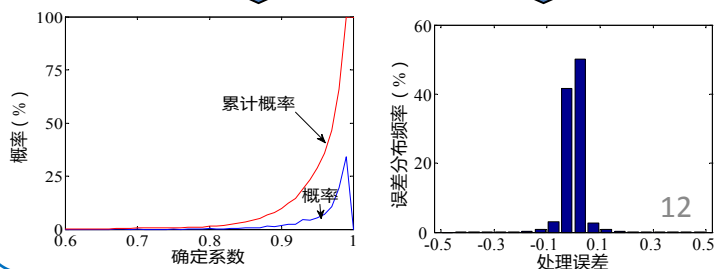
风电出力长时间序列建模



波动形状定量描述

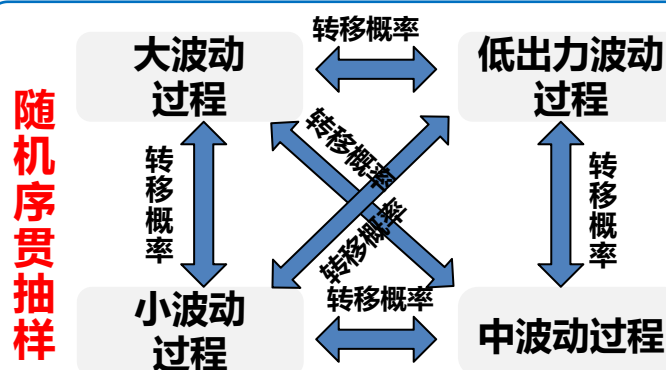
极值参数 $f_i(x) = a_i e^{-\left(\frac{x-b_i}{c_i}\right)^2}$ 位置参数 变化趋势参数

高斯函数定量描述验证



概率特性统计

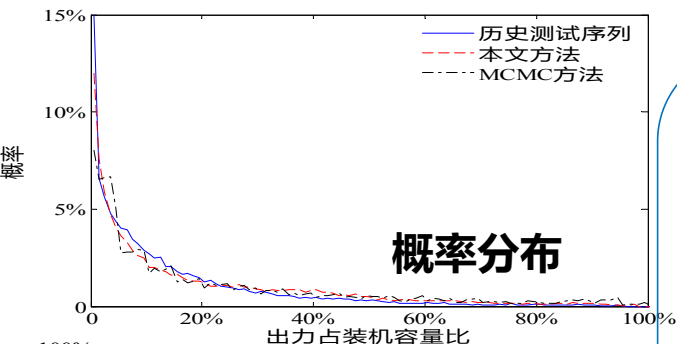
提出了基于数据挖掘辨识波动参数和基于高斯函数模拟波动过程的风电时间序列建模方法，实现符合风电出力波动性、随机性和相关性指标的风电时间序列随机建模。



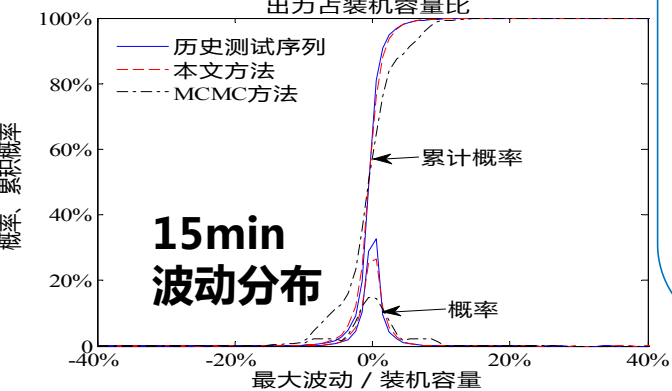


风电出力长时间序列建模

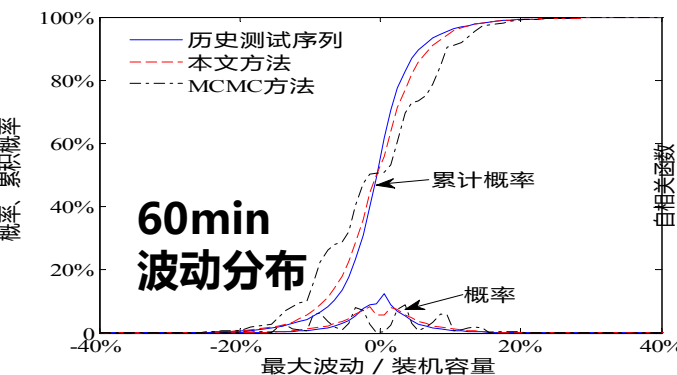
建模的风电时间序列符合历史运行特性，且在波动特性、自相关性、月特性方面优于马尔科夫链蒙特卡洛 (MCMC) 方法。



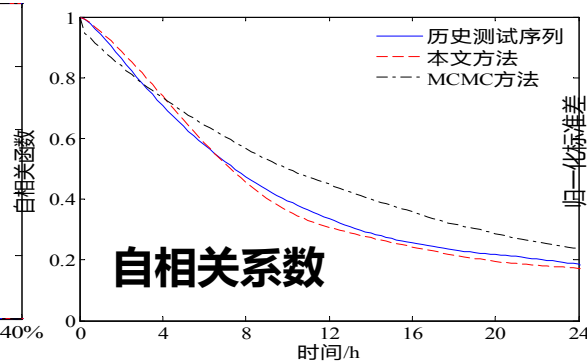
概率分布



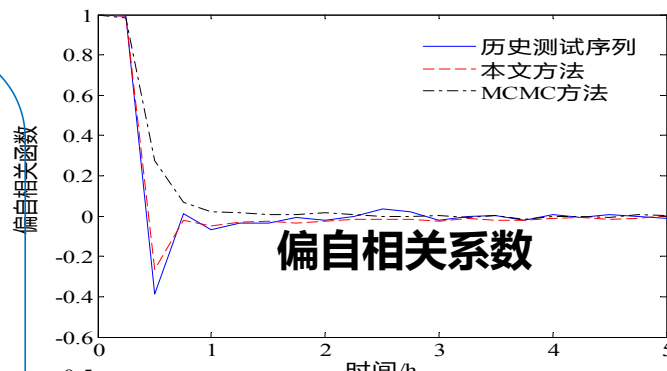
15min
波动分布



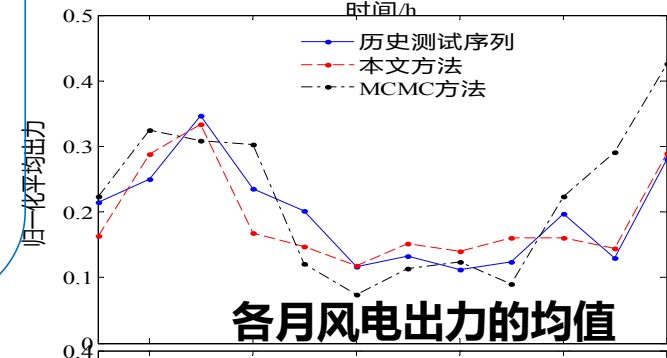
60min
波动分布



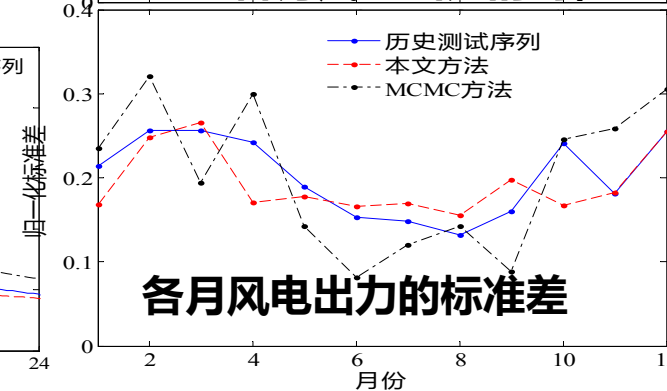
自相关系数



偏自相关系数



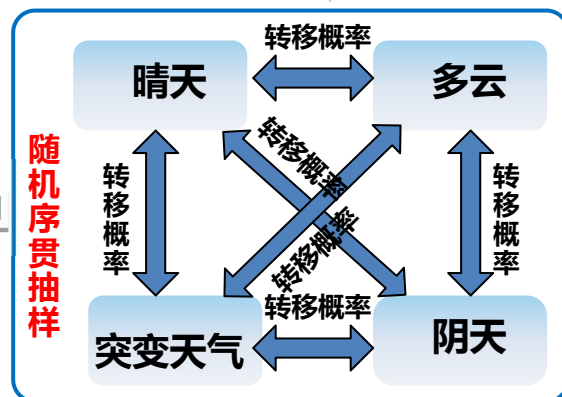
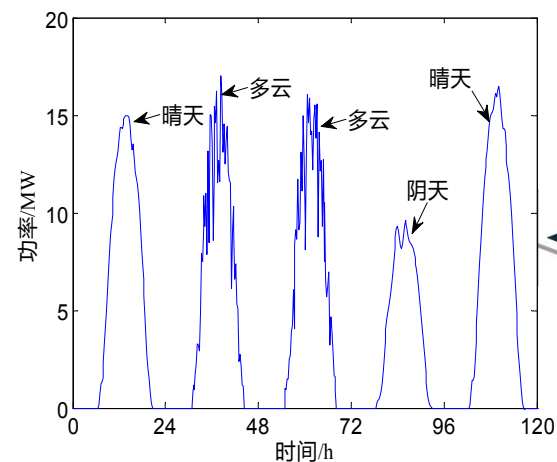
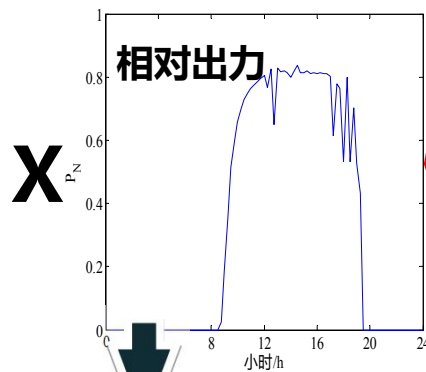
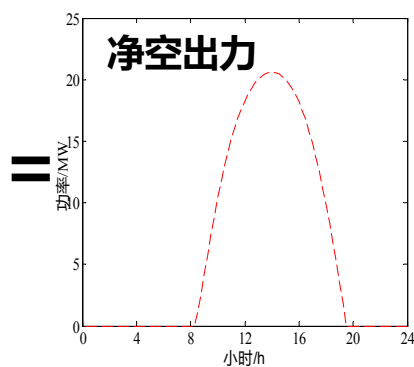
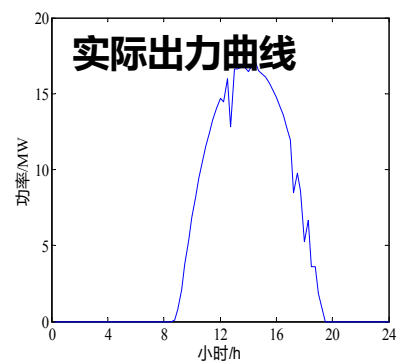
各月风电出力的均值



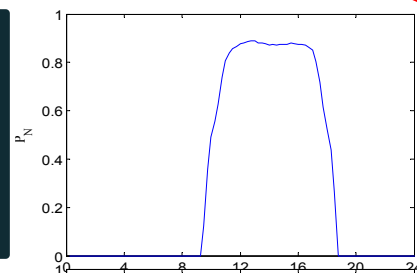
各月风电出力的标准差

光伏出力长时间序列建模

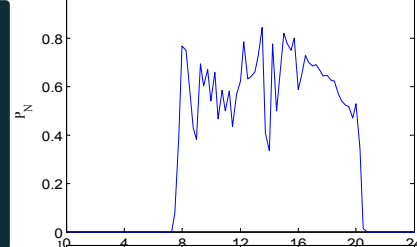
建立了基于净空确定性和天气特征不确定性的
的光伏发电时间序列分解模型



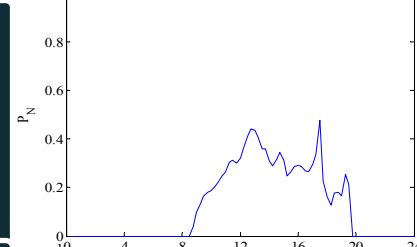
晴天



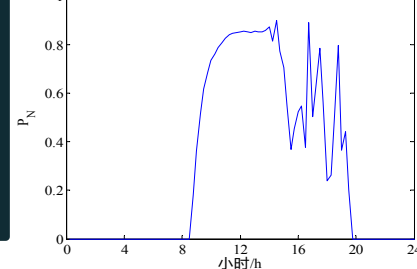
多云



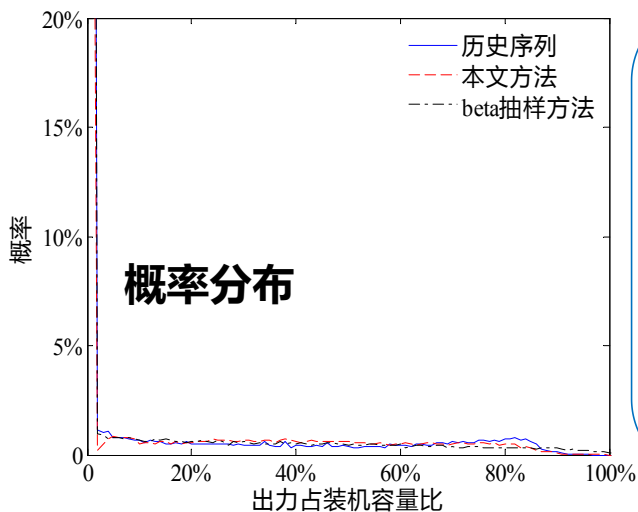
阴天



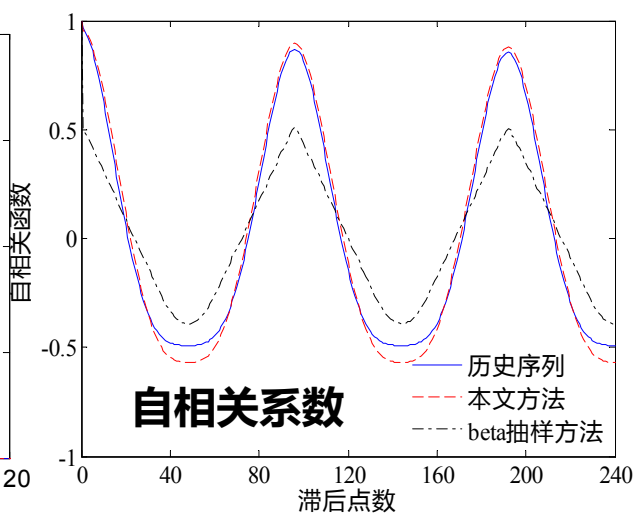
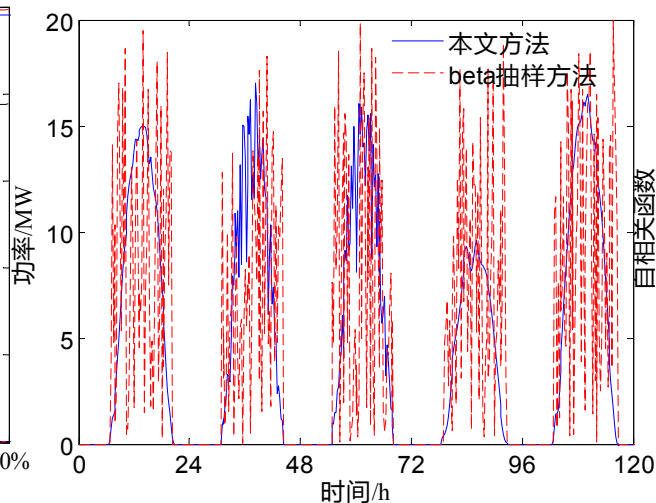
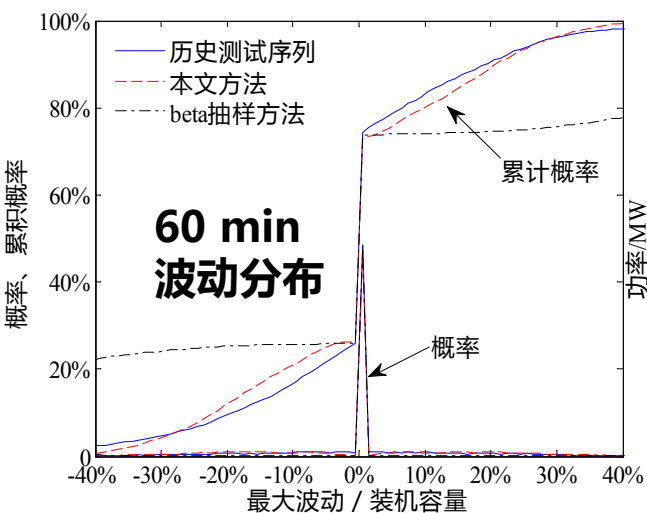
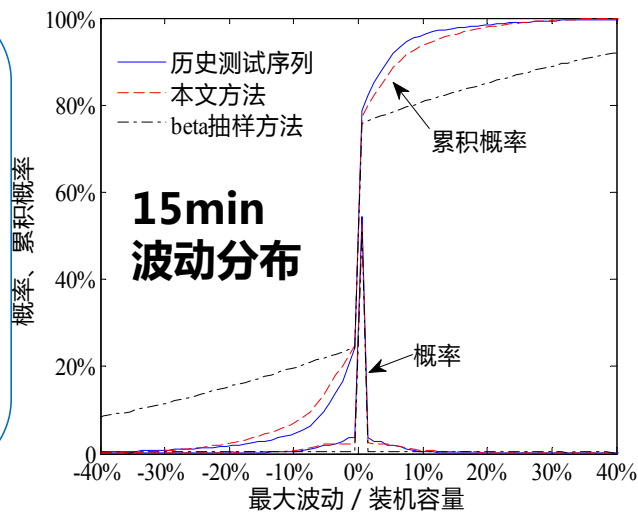
突变天气



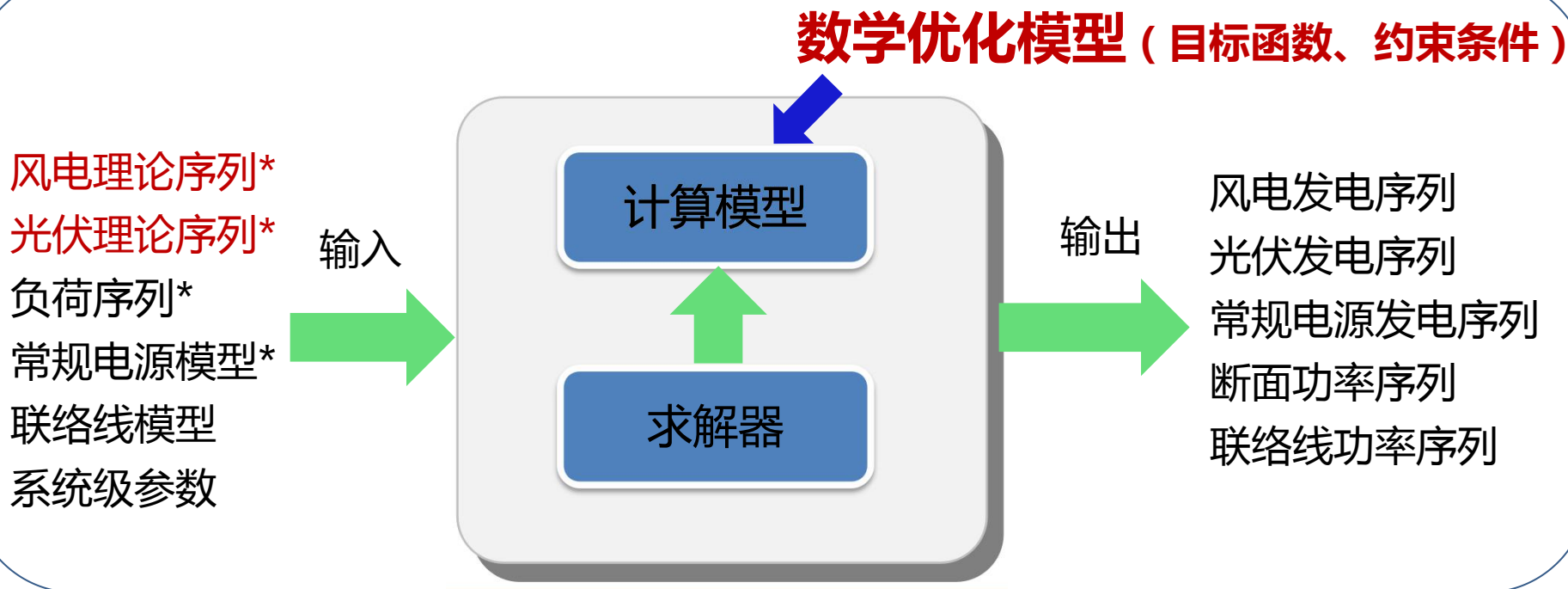
光伏出力长时间序列建模



建模的光伏时间序列符合历史运行特性，且在波动特性、波动形状、自相关性方面**优于Beta抽样方法。**



数学优化模型



时序生产模拟计算模型

■ **目标函数：**新能源发电量最大

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N (P_w(t, n) + P_{pv}(t, n))$$

风电出力

光伏出力

■ 约束条件

(1) 备用容量约束

$$\sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J (-P_{j,\max}(t, n) \cdot S_j(t, n) - P_w(t, n) - P_{pv}(t, n)) \leq -\sum_{n=1}^N P_l(t, n) - P_{re}$$
$$\sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J (P_{j,\min}(t, n) \cdot S_j(t, n) + P_w(t, n) + P_{pv}(t, n)) \leq \sum_{n=1}^N P_l(t, n) - N_{re}$$

(2) 区域负荷平衡约束

$$\sum_{j=1}^J P_j(t, n) \cdot S_j(t, n) + P_w(t, n) + P_{pv}(t, n) + L_i(t) = P_l(t, n)$$

(3) 区域间断面传输容量约束

$$-L_{i,\max} \leq L_i(t) \leq L_{i,\max}$$

(4) 机组出力约束

$$0 \leq \Delta P_j(t, n) \leq [P_{j,\max}(t, n) - P_{j,\min}(t, n)] \cdot S_j(t, n)$$
$$P_j(t, n) = P_{j,\min}(t, n) \cdot S_j(t, n) + \Delta P_j(t, n)$$



■ 约束条件

(5) 机组爬坡率约束

$$P_j(t+1, n) - P_j(t, n) \leq \Delta P_{j,up}(n)$$

$$P_j(t, n) - P_j(t+1, n) \leq \Delta P_{j,down}(n)$$

(6) 机组运行台数约束

$$0 \leq S_j(t, n) \leq S_{j,max}(n)$$

(7) 供热机组热电耦合约束

$$P_{BYj}(t) = C_{j,b} \cdot Q_j(t)$$

$$Q_j(t) \cdot C_{j,b} \leq P_{CQj}(t) \leq P_{CQj,max} - Q_j(t) \cdot C_{j,v}$$

(8) 新能源出力约束

$$0 \leq P_w(t, n) \leq P_w^*(t, n)$$

$$0 \leq P_{pv}(t, n) \leq P_{pv}^*(t, n)$$

(9) 其它约束

中国电科院开发了**新能源生产模拟系统（REPS）**，成为**新能源规划和运行**论证的重要分析工具。

系统应用：

- ❑ “三北” 15个省级电网2015-2018年新能源消纳能力优化计算
- ❑ 2015年和2020年“三北”地区6个省级电网抽水蓄能优化规划
- ❑ 西北电网跨省跨区新能源消纳模式
- ❑ 东北三省一区联络线优化互济消纳风电模式
- ❑ 张北柔性直流电网示范工程的规划定容
- ❑ 鲁能海西州多能互补集成优化示范工程的储能/储热定容





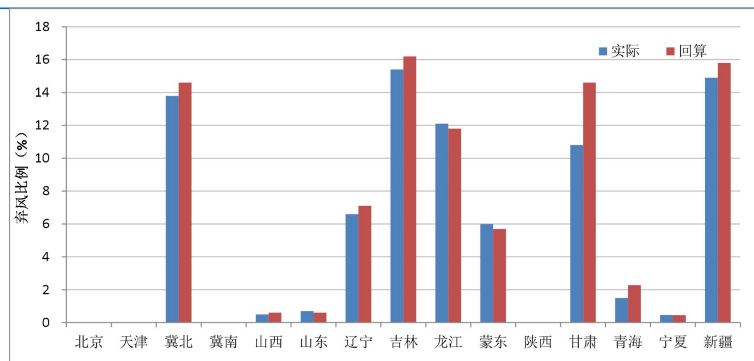
系统先进性

- ① 长时间尺度的**新能源时间序列建模**，生成的时间序列满足新能源波动性、时序性、季节性等指标。
- ② 实现含新能源的电力系统**时序生产模拟**，指导新能源**优化规划、布局**和**运行**工作。

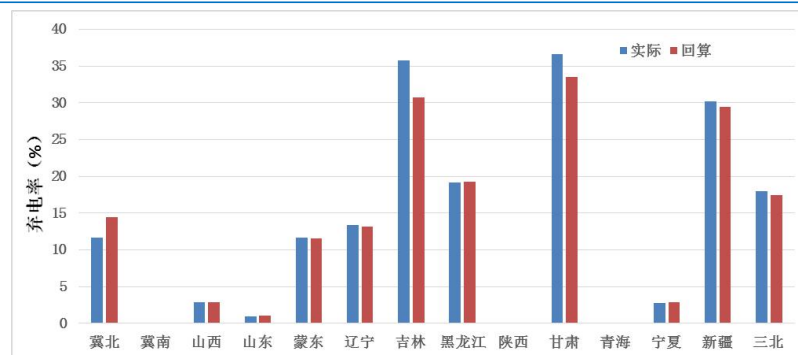
新能源生产模拟系统先进性国内外对比

对比指标		国内外情况	本系统情况
年/月电量预测	预测误差	未见相关报道	预测误差<10%
	建模方法	历史样本倍乘	随机建模
出力序列建模	与历史样本自相关系数误差	15%	≤10%
	与历史样本15min波动误差	5%	≤1%
年/月接纳能力评估	评估方法	典型日/周生产模拟	时序生产模拟
	功能	单一优化模型，流程复杂	具备多种优化模型，扩展性强

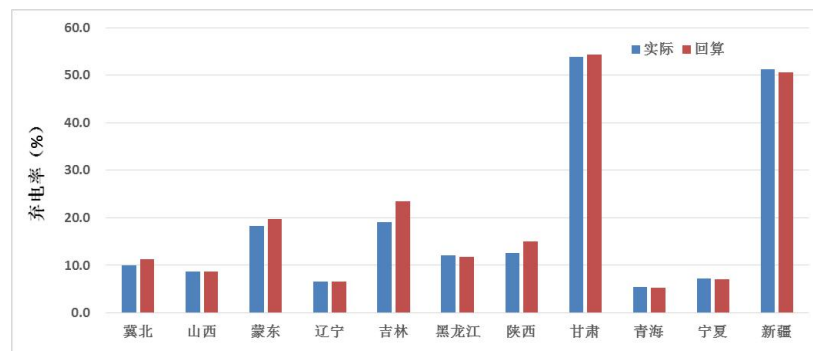
采用新能源生产模拟系统对“三北”地区新能源消纳情况进行回算，回算结果与实际新能源弃电率偏差平均值在1%左右，准确率高，验证了时序生产模拟方法的有效性，系统可作为新能源消纳分析的有效工具。



2014年“三北”新能源弃电率回算对比（平均偏差0.56%）



2015年1-9月份“三北”新能源弃电率回算对比（平均偏差1%）



2017年1-9月份“三北”新能源弃电率回算对比（平均偏差1.07%）



- 一、我国新能源发展情况
- 二、新能源消纳能力评价方法
- 三、技术措施及有效性
- 四、结论



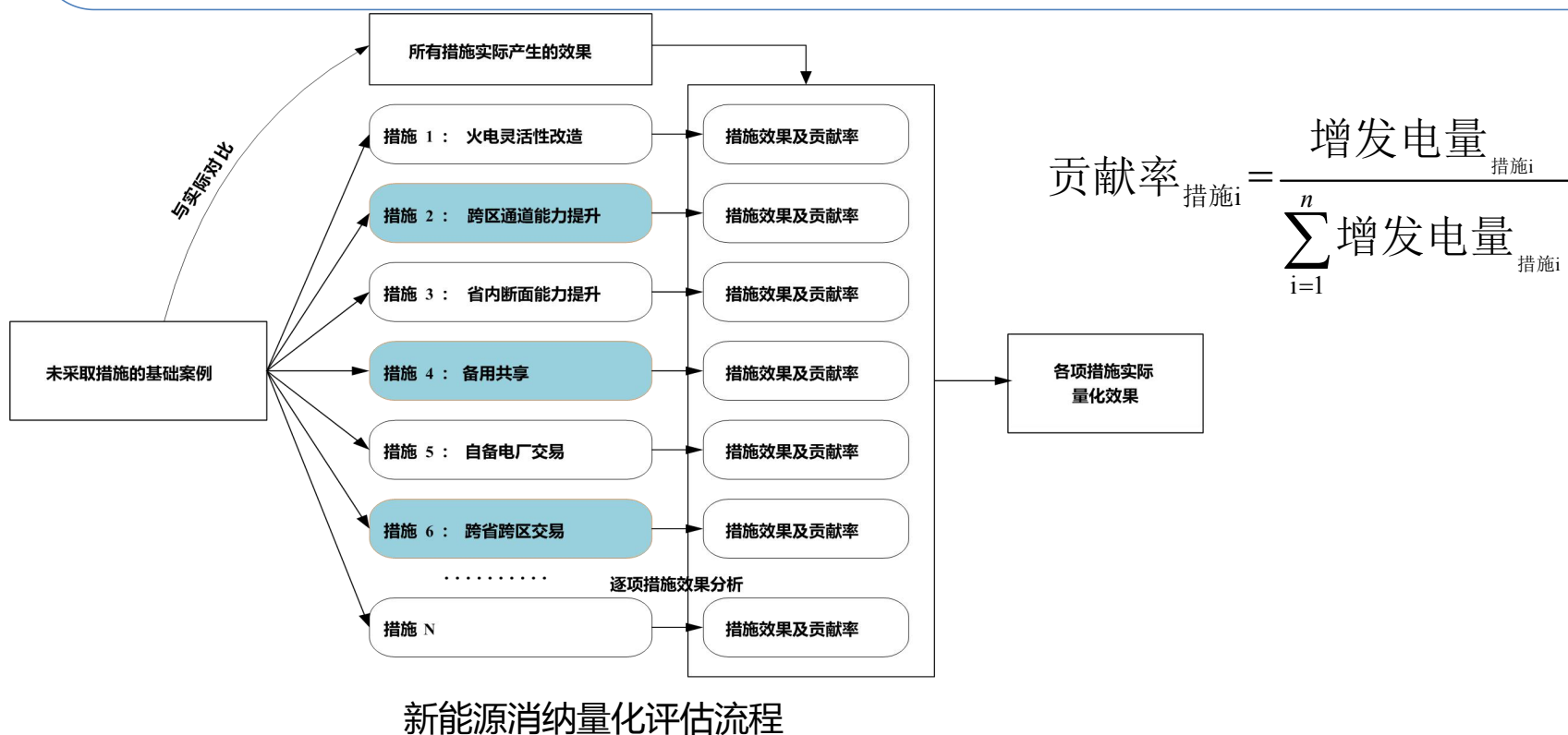
2017年1月，国家电网公司提出**20项促进新能源消纳的具体措施**，涉及电网建设、调峰能力建设、统一规划研究、关键技术研究等多个方面。

- ① 加快**跨区跨省电网建设**，扩大新能源配置范围
- ② 加强**调峰能力建设**，提高新能源消纳比重
- ③ 突破**电网核心技术**，提升大电网平衡能力
- ④ 着力**打破省间壁垒**，构建全国电力市场
- ⑤ 学习国际先进经验，加强技术与政策研究
- ⑥ 加强组织领导，积极汇报沟通

措施效果如何？如何量化？

措施效果量化评估方法和流程

- ① 计算**基础场景**，即未采取任何措施下的消纳能力；
- ② 比较采取措施后的实际消纳情况与基础场景，得到**所有措施的总效果**；
- ③ 在基础场景上，采用REPS程序逐一分析单项措施的效果；
- ④ 由于各措施效果具有交叉性，需通过计算贡献率得到**单项措施的效果**。





案例一措施实际效果评估

2017年某省级电网风电装机**505万千瓦**，光伏装机**157万千瓦**，火电装机1548万千瓦，负荷电量638亿千瓦时，最高负荷1015万千瓦。

基础场景：不采取任何新增措施，新能源弃电量**27.3亿千瓦时**，弃电率 **24%**。

2017基础场景边界条件

平均负荷率	火电最低技术出力 (p.u)	备用 (万千瓦)	联络线外送电量 (亿千瓦时)
0.7	0.6	66 (6.5%)	21

案例一措施实际效果评估

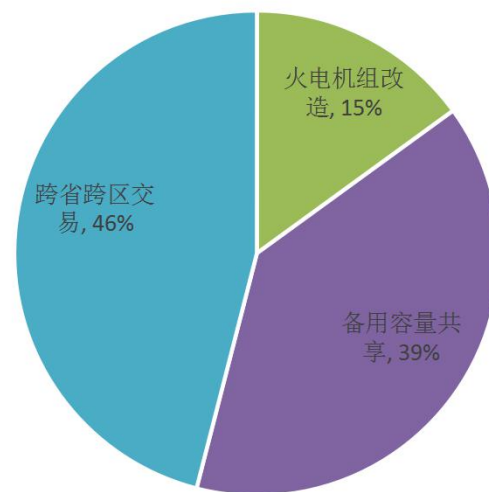
2017年，该省通过火电机组改造、备用降低和跨省跨区交易等多项措施，1-9月份新能源发电量70.4亿千瓦时，弃电量**14.8亿千瓦时**，弃电率**19%**。

预计全年减少新能源弃电量**4.6亿千瓦时**，弃电率降低至**19.7%**。

2017年某省网提高新能源消纳措施效果

序号	措施	减弃量 (亿千瓦时)	贡献率 (%)
1	火电机组改造250万千瓦	0.7	15
2	备用率由6.5%降至2.4%	1.8	39
3	跨省跨区交易长期11亿，现货1.5亿	2.1	46
总计		4.6	100

注：减弃量为考虑贡献率后的实际减弃量



措施贡献率



案例—措施理想效果仿真

理想情况下，通过改造所有火电机组、负荷增长、负荷转移、降低备用、直流外送等多项措施，可减弃新能源电量**26.6亿千瓦时**，弃电量降低至**0.74亿千瓦时**，弃电率降低至**0.66%**。

火电机组灵活改造、跨省跨区交易提升新能源消纳能力潜力巨大。

不同措施对新能源消纳能力的提升潜力

理想情况					实际情况	
措施	单项措施		所有措施（考虑贡献率）		所有措施（考虑贡献率）	实际减弃量 (亿千瓦时)
	减弃率 (%)	减弃量 (亿千瓦时)	减弃率 (%)	减弃量 (亿千瓦时)		
改造所有火电机组（最低技术出力由0.6降至0.4）	16.6	18.9	9.7	11.0	改造250万千瓦火电机组	0.7
负荷增长7%	2.8	3.2	1.6	1.8	—	—
负荷转移10%	4.0	4.6	2.3	2.7	—	—
备用率由6.5%降低至2%	4.6	5.3	2.7	3.1	备用容量由6.5%降至2.4%	1.8
特高压直流外送260亿千瓦时	12.0	13.7	7.0	8.0	跨省跨区交易长期11亿，现货1.5亿	2.1
总计	—	—	23.3	26.6	总计	4.6

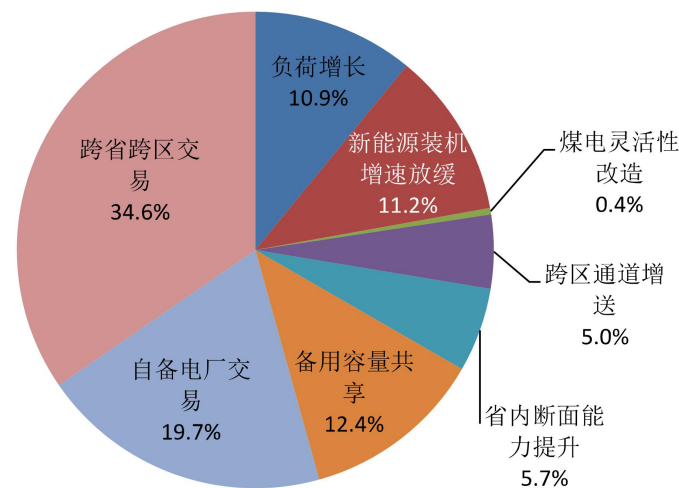


2017西北电网消纳情况

2017年，西北电网新能源装机**8071万千瓦**，火电装机**12160万千瓦**，用电量**6231亿千瓦时**，通过采取多项措施，预计全年减少新能源弃电量**360亿kWh**。

- 跨省跨区（灵绍、祁韶、银东、德宝直流等）和自备电厂交易：**效果显著，贡献率高**
- 火电厂灵活性改造：积极性低（改造容量占比**1%**），**实际效果差，贡献率低**

序号	措施	程度	减弃量 (亿千瓦时)	贡献率 (%)
1	负荷增长	6.2%	41	11.5
2	新能源装机增速放缓	814万千瓦	43	12
3	火电灵活性改造	132万千瓦	2	0.5
4	省内断面能力提升	158万千瓦	22	6
5	备用容量共享	250亿千瓦时	47	13
6	自备电厂交易	110亿千瓦时	75	21
7	跨省跨区交易	中长期544亿千瓦时， 现货47.5亿千瓦时	131	36
总计			360	100



2017年西北电网新能源消纳影响因素贡献率



- 一、我国新能源发展情况
- 二、新能源消纳能力评价方法
- 三、技术措施及有效性
- 四、结论



- ❑ 新能源发展应以消纳为目标，消纳能力评估应基于科学合理的方法，指导新能源的规划和运行。
- ❑ 跨省跨区交易、火电机组灵活改造、电能替代等部分措施尚未发挥根本性作用，在提升新能源消纳能力方面还有很大的空间。
- ❑ 完善政策法规与市场机制，消除省间壁垒，加强需求侧管理，进一步提升新能源消纳能力。



国家电网
STATE GRID

中国电力科学研究院有限公司
CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

谢谢!

