

研究论文

基于带补偿随机规划的蒸汽动力系统优化设计

盖丽梅¹, 孙力², 刘畅¹, 贺高红¹

(¹大连理工大学精细化工国家重点实验室, 膜科学与技术研究开发中心, 辽宁 大连 116024;

²曼彻斯特大学过程集成中心, 英国 曼彻斯特 M13 9PL)

摘要: 在蒸汽动力系统优化设计中, 考虑不确定因素的优化策略能避免基于确定性设计策略的保守设计, 并能针对不确定因素的实现提出相应的调度调节策略。本研究分析了蒸汽动力系统设计包含的不确定因素的特性及其对蒸汽动力系统优化目标和约束条件的影响。不确定因素的表达分成两类: 基于时间变化表达和基于发生概率表达。对基于时间变化表达的因素, 转化为多周期问题进行处理; 对外部工艺过程变化引起的汽电需求不确定波动等基于发生概率表达的因素, 应用随机规划策略, 补偿不确定参数的实现可能引起的约束背离。基于本研究建立的多周期带补偿的二阶段随机规划 MILP 模型, 求解蒸汽动力系统结构, 同时优化调度调节策略, 用调节决策和惩罚不足应对汽电需求等不确定因素的实现, 实现系统安全稳定运行和经济效益最优。

关键词: 随机规划; 蒸汽动力系统; 模拟; 优化设计; 过程系统

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.11.042

中图分类号: TQ 021.8

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2014) 11—4509—08

Steam power system optimization design based on stochastic programming with recourse

GAI Limei¹, SUN Li², LIU Chang¹, HE Gaohong¹

(¹State Key Laboratory of Fine Chemicals, Research and Development Center of Membrane Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; ²Centre for Process Integration, School of Chemical Engineering and Analytical Science, University of Manchester, Manchester, M13 9PL, UK)

Abstract: Steam power system optimization design under uncertainty provides schedule plans in the design stage to avoid a conservative design based on deterministic design. The characteristics of uncertainties and their influence on optimization objectives and constraints were analyzed in this work. Uncertain factors were divided into two types. Fluctuations of some variables were expressed by time, and fluctuations of the others were expressed by probabilities. The first type variables caused the design to be a multi-period problem. Fluctuation of the second type variables were compensated based on stochastic programming to deal with constraint violations. A mixed integer linear programming model (MILP) based on multi-cycle stochastic programming with recourse was formulated to obtain optimal system configuration and operating state. Schedule plans were addressed in the design stage to satisfy uncertain steam and power demand.

Key words: stochastic programming; steam power system; simulation; optimal design; process systems

2014-04-18 收到初稿, 2014-08-19 收到修改稿。

联系人: 孙力。第一作者: 盖丽梅 (1988—), 女, 硕士研究生。

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (21125628); 辽宁省科学技术计划项目 (2011224005); 中国石油科技创新基金资助 (2011D-5006-0401)。

Received date: 2014-04-18.

Corresponding author: SUN Li, li.sun@manchester.ac.uk

Foundation item: supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (21125628), the Science and Technology Plan Projects of Liaoning Province (2011224005) and China Petroleum Science and Technology Innovation Fund (2011D-5006-0401).

引 言

蒸汽动力系统包括锅炉、余热锅炉、燃气透平、蒸汽透平、减温减压阀以及蒸汽管网等,消耗大量的燃料为生产过程提供蒸汽、冷剂、动力、电力等。实际优化设计不可避免包含不确定因素。不确定因素会使系统现有设计和操作偏离最优状态,造成过程的不合理,甚至带来安全隐患,所以在蒸汽动力系统设计中有必要进行不确定优化研究。不仅要给出蒸汽动力系统的最优设计流程、各设备的操作状态和运行负荷,同时保证当不确定工况发生时,能够迅速地调整操作方案保证生产的安全稳定进行,同时保证较高的效率和较好的经济性。

对于蒸汽动力系统优化研究,1998年,Iyer等^[1]将多周期操作引入公用工程系统模型。2000年,Yi等^[2]同时考虑蒸汽动力系统内部和外部汽电需求确定性变化,并将其转化为多周期模型进行求解。2007年,Aguilar等^[3]建立设备故障模型并考虑了燃料、电力价格不确定变化。罗向龙等^[4-6]考虑汽电需求不确定因素下对蒸汽动力系统进行多周期操作优化,使调度方案更加符合实际。李晖等^[7]将不确定汽电需求直接反映在蒸汽动力系统优化设计的目标函数和约束中。上述研究一般都是将不确定问题转变为确定性多周期进行求解,即划分成多个周期,在每个周期内取不确定变量的期望值进行优化。但实际上在每个周期内外部工艺或生产过程的随机波动还会引起不确定变量的随机变化,传统的多周期方法不能更真实地反映不确定变量对优化目标和约束条件的影响,可能导致设计和操作偏离最优状态。因此,正确处理系统的不确定性因素具有十分重要的理论和现实意义。

随机规划是研究不确定性参数的优化模型和算法,通常这些随机参数符合一定的概率分布,随机规划正是通过不确定参数的概率函数来建模的。自1955年Dantzig^[8]和Beale^[9]提出随机线性优化后,随机规划在理论和求解策略上快速发展。随机规划策略主要包括带补偿的随机规划(SPR)和机会约束规划(CCP)^[10],多应用于风能发电^[11]、生产调度^[12]、天气研究预报^[13]等。在化工和石油化工系统优化中,Li^[14]运用随机分析对电力系统进行优化设计。Soroush等^[15]通过对附加误差的期望值进行建模来预测不确定性的影响,对电厂发电、物流储运进行

优化。Zhang等^[16]提出了应用机会约束规划的方法处理电力系统最优电流(OPF)中负荷不确定的问题。Sun等^[17-18]、张化杰等^[19]通过分析随机规划策略和不确定因素的特性及其对化工分离过程的影响,应用带补偿的随机规划和机会约束规划实现了不确定因素对精馏优化目标和约束的影响。目前随机规划鲜有应用于公用工程特别是蒸汽动力系统的设计和优化。

蒸汽动力系统的设计既要实现系统的经济目标优化,又要保证系统能应对不确定因素实现而正常运行。本文对蒸汽动力系统进行优化设计,第一部分对不确定因素进行分析及分类,并应用不同的策略建立其对目标函数和约束的影响,建立多周期带补偿的二阶段随机规划模型并对其进行求解。第二部分应用多周期带补偿的二阶段随机规划策略对某石化企业蒸汽动力系统进行优化设计,并与传统确定性方法的设计方案进行对比讨论。

1 多周期带补偿的二阶段随机规划模型

在蒸汽动力系统的优化设计中,式(1)是系统总费用TC的目标函数。

$$\min TC = Cap + Cop = F_{ann} F_{inst} \sum_n PC_n + (Cop_f + Cop_w + Cop_e) \quad (1)$$

式中, Cap 是投资费,包括设备购买费、安装费等; F_{ann} 为年折算因子; F_{inst} 为安装因子; PC_n 为设备购买费用; Cop 是操作费,包括燃料费 Cop_f 、锅炉给水费 Cop_w 以及外购电力的费用 Cop_e 。不确定因素的表达可以分成基于时间变化以及基于发生概率表达两大类。基于时间变化表达的因素,如季节气候、加工方案等不确定因素引起的汽电需求周期性变化;由于季节变化引起能源市场需求的变化从而导致燃料价格的波动以及为调节市场需求制定的分时电价。基于发生概率表达的因素主要包括:蒸汽动力系统的诸多用户在工艺生产过程中操作温度、压力、物流量等变化导致的汽电需求不确定波动;蒸汽动力系统的不可预见性设备故障。

为应对各种不确定因素优化模型的建立分为两步:第一,对基于时间变化表达的变量进行多周期离散化处理;第二,对基于发生概率表达的变量应用带补偿的随机规划策略。建立多周期带补偿的二阶段随机规划模型。

1.1 基于时间变化因素的多周期问题

由于汽电需求、燃料电力价格等会随季节气候等发生周期性变化, 属于可预测的基于时间的确定性变化, 故本文将基于时间变化的因素转化为多周期问题。全周期分为 t 个周期, 操作费为各周期操作费用之和, 相应的目标函数如式(2)所示

$$\min TC = F_{\text{ann}} F_{\text{inst}} \sum_n PC_n + \sum_t \text{Cop}_t = F_{\text{ann}} F_{\text{inst}} \sum_n PC_n + \sum_t (\text{Cop}_{\text{fi}} + \text{Cop}_{\text{wt}} + \text{Cop}_{\text{et}}) \quad (2)$$

1.2 随机规划策略及补偿

在实际生产过程中由于外部工艺或生产过程的波动引起蒸汽压力、温度、流量、设备效率等不可预见性的变化, 从而导致在每个周期内的汽电需求处于随机变化的状态, 根据历史数据对其进行概率统计, 属于基于发生概率表达的不确定因素。本研究对每个周期内基于发生概率表达的汽电需求不确定波动引起的约束不可行在优化目标中引入补偿项, 应用带补偿的二阶段随机规划策略在 t 周期内对蒸汽动力系统进行操作优化设计。

随机优化设计问题包括“设计”和“操作”两个阶段, 决策变量也分成设计变量 $\mathbf{X}$ 和操作变量 $\mathbf{Y}$ 两类。针对蒸汽动力系统而言, 在“设计”阶段确定各设备(包括锅炉、余热锅炉、燃气透平、蒸汽透平等)的选用状态、个数以及设计尺寸等设计变量。在“操作”阶段, 针对不确定汽电需求实现可能引起的操作费用高、设备的燃料量或锅炉给水量、系统产生的蒸汽或电力的剩余或不足等影响和损失, 进行补偿操作, 并确定操作变量。其中操作变量包括锅炉给水量、设备的所需燃料量、输出轴功以及进汽量等。实现两个阶段的投资费和操作费之和最小, 确保过程的需求和效益处于最优状态。

补偿操作包括调节决策以及惩罚不足。对汽电需求的不确定波动通过调节设备的燃料量、锅炉给水量以及设备的进出口蒸汽量等操作变量使过程效益处于最优, 此为调节决策。若调节决策仍不能满足过程蒸汽或电力需求, 需要低价卖出电力, 或高价买入电力, 此为惩罚不足。

基于上述策略建立多周期带补偿的二阶段随机规划模型, 其优化目标函数见式(3)。

$$\min TC = F_{\text{ann}} F_{\text{inst}} \sum_n PC_n(x_n, Z_n) + \sum_t E_{t, \theta \in \Omega} [Q_t(x_n, \theta_{\text{srt}}^{\text{dem}}, \theta_{\text{et}}^{\text{dem}})] \quad (3)$$

其中, 第 t 周期的补偿函数为

$$Q_t(x_n, \theta_{\text{srt}}^{\text{dem}}, \theta_{\text{et}}^{\text{dem}}) = \min f_t(\theta_{\text{srt}}^{\text{dem}}, \theta_{\text{et}}^{\text{dem}})^T \times \mathbf{Y} = \min \left\{ \sum_i P_{ti} \left[q_{\text{fi}}(y_{\text{fi}}, C_{\text{fi}}, \theta_{\text{srti}}^{\text{dem}}, \theta_{\text{eti}}^{\text{dem}}) + q_{\text{wti}}(y_{\text{wti}}, C_{\text{wti}}, \theta_{\text{srti}}^{\text{dem}}, \theta_{\text{eti}}^{\text{dem}}) + q_{\text{eti}}(y_{\text{eti}}, C_{\text{eti}}, \theta_{\text{srti}}^{\text{dem}}, \theta_{\text{eti}}^{\text{dem}}) \right] \right\} \quad (4)$$

式中, x_n 是设备 n 的设计尺寸, 包括锅炉、余热锅炉、燃气透平、蒸汽透平等; Z_n 是设备 n 选用状态的二元变量, 即设备选用运行行为 1, 否则为 0。 $\mathbf{Y}$ 为操作变量, y_{fi} 、 y_{wti} 、 y_{eti} 分别为第 t 周期 i 工况下的设备所需燃料量、锅炉给水量、外购或外卖电量。 $\theta_{\text{srt}}^{\text{dem}}$ 、 $\theta_{\text{et}}^{\text{dem}}$ 分别为第 t 周期内的 r 等级蒸汽需求和电力需求的不确定变量, $\theta_{\text{srti}}^{\text{dem}}$ 、 $\theta_{\text{eti}}^{\text{dem}}$ 分别是将 $\theta_{\text{srt}}^{\text{dem}}$ 、 $\theta_{\text{et}}^{\text{dem}}$ 离散为符合概率分布的 i 个确定值。 C_{fi} 、 C_{wti} 、 C_{eti} 分别为第 t 周期 i 工况下的燃料价格、锅炉给水价格、外购或外卖电的价格。

$E_{t, \theta \in \Omega} [Q_t(x_n, \theta_{\text{srt}}^{\text{dem}}, \theta_{\text{et}}^{\text{dem}})]$ 为第 t 周期补偿函数的均值, 即 t 周期的操作费, 其为调节决策和惩罚不足费用之和。其中 $\sum_i P_{ti} [q_{\text{fi}}(y_{\text{fi}}, C_{\text{fi}}, \theta_{\text{srti}}^{\text{dem}}, \theta_{\text{eti}}^{\text{dem}}) + q_{\text{wti}}(y_{\text{wti}}, C_{\text{wti}}, \theta_{\text{srti}}^{\text{dem}}, \theta_{\text{eti}}^{\text{dem}})]$ 为 t 周期调节决策的费用, 包括设备的燃料费用和锅炉给水费用。 $\sum_i P_{ti} q_{\text{eti}}(y_{\text{eti}}, C_{\text{eti}}, \theta_{\text{srti}}^{\text{dem}}, \theta_{\text{eti}}^{\text{dem}})$ 为 t 周期惩罚不足的费用, 主要是指买卖电力费用。 P_{ti} 为第 t 周期 i 工况下不确定变量 $\theta_{\text{srt}}^{\text{dem}}$ 、 $\theta_{\text{et}}^{\text{dem}}$ 实现的概率。 $q_{ti}(y_{ti}, C_{ti}, \theta_{\text{srti}}^{\text{dem}}, \theta_{\text{eti}}^{\text{dem}})$ 为第 t 周期操作变量的补偿值。

优化模型(3)中各设备购买费用 PC_n 参照文献[20]进行计算。本文提出的多周期带补偿的二阶段随机规划模型要满足一系列约束条件, 包括等式约束以及不等式约束, 具体见 1.3 节。

1.3 约束条件

基于多周期带补偿的二阶段随机规划模型, 约束条件分为设计阶段约束和操作阶段约束。

(1) 设计阶段约束

设备的设计尺寸约束

$$\text{Lim}_n^{\text{low}} Z_n \leq x_n \leq \text{Lim}_n^{\text{up}} Z_n \quad (5)$$

设备操作负荷约束

$$\text{Lim}_n^{\text{low}} Z_{nti} \leq \text{Output}_{nti} \leq \text{Lim}_n^{\text{up}} Z_{nti}, \quad \phi_n x_n \leq \text{Output}_{nti} \leq x_n \quad (6)$$

设备选用运行状态约束

$$Z_n \leq \sum_t \sum_i Z_{nti}, Z_{nti} \leq Z_n, Z_{nti} = Z_{ntj} = Z_{nt} \quad (7)$$

电力输入输出约束

$$W_{ti}^{\text{exp}} \leq W_{ti}^{\text{up}}, \quad W_{ti}^{\text{imp}} \leq W_{ti}^{\text{up}} \quad (8)$$

减温减压阀的蒸汽流量约束

$$LD_{nti} \leq LD_{nti}^{\text{up}} \quad (9)$$

(2) 操作阶段约束

设备物料平衡

$$\sum_{\text{in}} Y_{nti}^{\text{in}} = \sum_{\text{out}} Y_{nti}^{\text{out}} \quad n=1, 2, \dots, N \quad (10)$$

设备能量平衡

$$\sum_{\text{in}} Y_{nti}^{\text{in}} H_{nti}^{\text{in}} = \sum_{\text{out}} Y_{nti}^{\text{out}} H_{nti}^{\text{out}} + W_{nti} + Q_{Lnti} \quad (11)$$

设备的性能模型是设备能量平衡的具体表述, 包括锅炉(B)、余热锅炉(HRSG)、燃气透平(GT)、背压蒸汽透平(BT)、冷凝透平(CT)、多级抽气透平(MT)等均按照 Aguilar^[20]回归的各设备性能模型公式进行计算。本文仅列出锅炉的性能模型^[20]

$$M_{\text{stm}}^{\text{boi}} \Delta h_T^{\text{boi}} \left(1 + \frac{\Delta h_{\text{eco}}^{\text{boi}} F_{\text{bld}}^{\text{boi}}}{\Delta h_T^{\text{boi}}} \right) = \frac{Q_f^{\text{boi}}}{B_f^{\text{boi}}} - D_{\text{avg}}^{\text{boi}} \quad (12)$$

各等级蒸汽供求平衡

$$\sum_n S_{nrti}^{\text{in}} - \sum_n S_{nrti}^{\text{out}} = \theta_{srti}^{\text{dem}} \quad (13)$$

电力供求平衡

$$W_{ti}^{\text{imp}} + \sum_n W_{nti} - W_{ti}^{\text{exp}} = \theta_{cti}^{\text{dem}} \quad (14)$$

1.4 模型求解

应用上述策略建立多周期带补偿的二阶段随机规划 MILP 模型, 用 GAMS23.6 中 CPLEX7.5 求解器进行求解。确定各设备的个数、设计尺寸、操作状态和运行负荷, 给出蒸汽动力系统的最优设计流程, 同时在不确定变量实现时给出相应的调度策略。

2 案例研究

2.1 案例描述

本文对某石化企业蒸汽动力系统进行设计, 满足系统需求同时保证经济最优。各等级蒸汽参数见表 1。

表 1 蒸汽参数

Table 1 Steam parameters

Steam condition	Pressure /MPa	Temperature /°C
VHP	10.1	539
HP	2.06	333
MP	0.41	186
LP	0.27	150

不确定变量包括汽电需求以及电力价格等。本文将基于时间变化表达的汽电需求以及电力价格等不确定变量转变成多周期处理, 即将全周期(一年)分为 6 个周期, 每周期按 1440 h 计算。各周期电力、天然气、锅炉给水的价格见表 2。各周期汽电需求量见表 3。对基于发生概率表达的汽电需求不确定变量应用带补偿的随机规划策略, 根据实际经验以及对历史数据进行概率统计, 在每个周期内对由于外部工艺过程等波动引起的汽电需求不确定参数表示为符合正态分布的概率函数 $N(\mu_i, \sigma_i^2)$, σ_i 取 $0.05\mu_i$, μ_i 为各周期汽电需求量的标称值, 见表 3。本研究选取设计变量为各设备[包括锅炉(B)、余热锅炉(HRSG)、燃气透平(GT)、背压蒸汽透平(BT)、冷凝透平(CT)、多级抽气透平(MT)等]的选用状态、个数以及设计尺寸等。操作变量为锅炉给水量、设备的所需燃料量、输出轴功以及进汽量。各设备的最

表 2 按周期离散化的价格数据

Table 2 Price data

Period	Peak hours per day /h	Import peak electricity /\$(kW · h) ⁻¹	Import off-peak electricity /\$(kW · h) ⁻¹	Export electricity /\$(kW · h) ⁻¹	Nature gas /\$ · t ⁻¹	Water /\$ · t ⁻¹
3—4	12	0.10	0.08	0.06	250	0.43
5—2	7	0.09	0.08	0.06	250	0.43

表 3 各周期各等级蒸汽和电力需求(标称值)

Table 3 Multi-period steam and electricity demands

Period	VHP steam /t · h ⁻¹	HP steam /t · h ⁻¹	MP steam /t · h ⁻¹	LP steam /t · h ⁻¹	Electricity/MW
1	30	60	40	50	22
2	10	20	30	35	25
3	40	20	25	45	24
4	30	40	40	50	24
5	30	40	30	50	26
6	40	30	25	55	26

表 4 各设备的最大设计规格

Table 4 Upper limit of each device design size

B/t · h ⁻¹	HRSG /t · h ⁻¹	GT /MW	BT /MW	CT /MW	MT /MW
360	200	100	20	20	60

大设计规格见表 4。

允许最大外购电量为 0.1 MW，最大外卖电量为 5 MW，流经减温减压阀的最大蒸汽流量为 18 t · h⁻¹。F_{ann} 取 0.05，F_{inst} 取 4.5。锅炉排污率取 10%，锅炉燃料为天然气，其低热值为 50244 kJ · kg⁻¹。

2.2 优化设计方案与结果讨论

应用本文提出的多周期带补偿的二阶段随机规划策略进行优化设计。得到最优设计流程如图 1(a) 所示。传统的确定性方法为保证系统可操作性凭经验引入安全系数，即将汽电需求增加 15%，而对每个周期内的需求波动没有采取相应操作。与应用传统的确定性方法确定的设计方案[图 1(b)]相比，两种方法得到的流程结构和操作方案各异。

两种优化设计方案选用的设备相同，都选用了 1 台燃气透平和 1 台余热锅炉联用进行热电联产、1 台锅炉、3 台背压蒸汽透平和 1 台冷凝透平，但设备尺寸不同，详见表 5。

传统确定性方法是按照每个周期需求的最大

波动值设计，而对每个周期内的其他需求波动没有采取相应操作，故当需求发生波动时各设备的使用效率降低。本文提出的优化设计包含应对各等级蒸汽需求波动不确定性变化的补偿操作。表 6 只列出了第 1 周期中的部分工况下的各设备的调度决策。汽电需求无波动时，各设备的运行操作如状态 1 所示。当汽电需求发生波动，各设备的运行操作相应进行调整。状态 2 和 3 分别是蒸汽需求最大和最小时对应的操作策略。状态 4 是操作中可能发生的一种蒸汽需求波动，这时采取的相应调节决策为：相对于状态 1，将锅炉 B1 的产汽量减少 0.99 t · h⁻¹，蒸汽透平 BT1 的进汽量减少 6.75 t · h⁻¹，BT2 的进汽量增加 1.25 t · h⁻¹，蒸汽透平 BT5 的进汽量减少 9.75 t · h⁻¹，减温减压阀 LD3 的进汽量增加 7.25 t · h⁻¹，外卖电量减少 1.51 MW，实现操作费用最小。本研究通过调节决策和补偿不足来权衡操作，使得当发生不确定需求波动时各设备仍能维持较高效率运行。

与传统的确定性方法相比，本文的优化方案年总费用降低了 8.72%，如表 7 所示，其中年投资费用降低了 4.57%，年操作费用降低了 9.51%。

案例研究表明，基于多周期带补偿的二阶段随机规划策略的优化方案结构流程与传统确定性方法

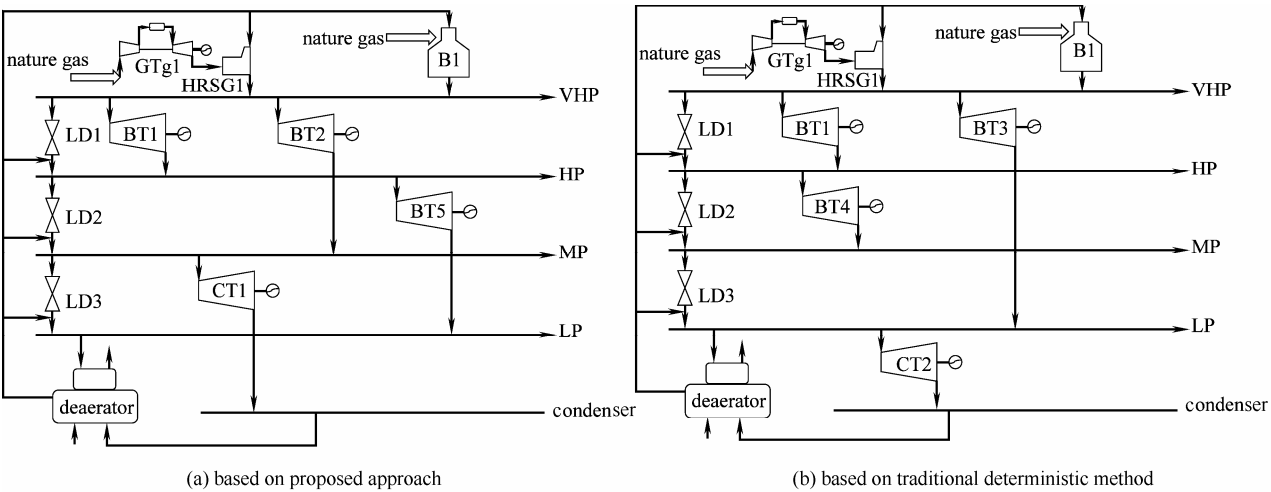


图 1 蒸汽动力系统的设计流程
Fig.1 Steam power system configuration

表 5 选用设备设计尺寸
Table 5 Equipment selection in design

Design strategy	HRSG1 /t · h ⁻¹	GTg1 /MW	B1 /t · h ⁻¹	BT1 /MW	BT2 /MW	BT3 /MW	BT4 /MW	BT5 /MW	BT6 /MW	CT1 /MW	CT2 /MW	MT1 /MW	MT2 /MW
traditional	4.01	15.88	181.89	9.77	—	11.09	2.82	—	—	—	0.88	—	—
proposed	2.92	11.80	188.70	10.99	7.83	—	—	3.96	—	1.52	—	—	—

表 6 第 1 周期不确定需求工况下的设备运行方案

Table 6 Unit operation in the first period

Condition <i>i</i>	GTg1 /MW	HRSg1 steam /t · h ⁻¹	B1 steam /t · h ⁻¹	BT1 steam /t · h ⁻¹	BT2 steam /t · h ⁻¹	BT5 steam /t · h ⁻¹	CT1 steam /t · h ⁻¹	LD1 steam /t · h ⁻¹	LD2 steam /t · h ⁻¹	LD3 steam /t · h ⁻¹	LD4 steam /t · h ⁻¹	Import electricity /MW	Export electricity /MW
1	7.08	18.30	161.70	105.25	44.75	45.25	0	0	0	4.75	0	0	5.00
2	11.80	21.50	131.50	78.38	31.12	42.50	0	18.00	2.88	0	0	0	3.89
3	7.08	18.30	188.70	108.50	46.00	39.50	0	18.00	18.00	18.00	0	0	5.00
4	7.08	18.30	160.71	98.50	46.00	35.50	0	0	0	12.00	0	0	3.49

Note: Uncertain demand conditions *i* represents steam demand for (VHP, HP, MP, LP) four levels of specific fluctuations.

i=1, VHP=30 t · h⁻¹, HP=60 t · h⁻¹, MP=40 t · h⁻¹, LP=50 t · h⁻¹;

i=2, VHP=25.5 t · h⁻¹, HP=51 t · h⁻¹, MP=34 t · h⁻¹, LP=42.5 t · h⁻¹;

i=3, VHP=34.5 t · h⁻¹, HP=69 t · h⁻¹, MP=46 t · h⁻¹, LP=57.5 t · h⁻¹;

i=4, VHP=34.5 t · h⁻¹, HP=63 t · h⁻¹, MP=34 t · h⁻¹, LP=47.5 t · h⁻¹.

表 7 两种设计方案费用对比

Table 7 Cost comparisons

Design strategy	Total cost /\$ · a ⁻¹	Capital cost /\$ · a ⁻¹	Operating cost /\$ · a ⁻¹	Fuel cost /\$ · a ⁻¹	Water cost /\$ · a ⁻¹	Power cost /\$ · a ⁻¹
traditional	3.0843×10 ⁷	0.4906×10 ⁷	2.5937×10 ⁷	2.7474×10 ⁷	0.0697×10 ⁷	-0.2234×10 ⁷
proposed	2.8152×10 ⁷	0.4682×10 ⁷	2.3470×10 ⁷	2.4630×10 ⁷	0.0630×10 ⁷	-0.1790×10 ⁷

设计设备个数相同,但设备尺寸减小,故“设计”阶段年投资费用下降。与传统的确定性方法相比,本文对不确定因素采取随机规划策略,通过调节决策和惩罚不足协调运行的补偿方式来指导操作,使得燃料费、锅炉给水费以及外卖电的费用分别降低了 10.35%、9.61%、19.87%,其中通过调节决策的补偿方式使得年操作费用降低了 11.22%,通过补偿不足使年操作费增加了 1.71%。这是由于通过调节决策减少了设备燃料量和锅炉给水量,故使得年操作费用降低。蒸汽透平的设计尺寸略有减小,其产电量也相应降低,同时通过补偿不足减少了外卖电量,故使得年操作费用略有增加。通过调节决策的补偿方式引起的年操作费用降低大于通过补偿不足引起的年操作费增加,故“操作”阶段的年操作费用降低。本文优化方案实现了结构和操作的同时优化,通过补偿操作应对各种汽电需求的波动,同时保证了蒸汽动力系统综合经济效益最优。

本文模型求解所用计算机 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-3470,主频为 3.20 GHz。两种设计模型中包含的约束方程数、变量数(连续/离散)以及模型求解时间如表 8 所示。由于本研究考虑了每个周期内基于发生概率表达的汽电需求不确定波动,并对其引起的约束不可行在优化目标中引入补偿项,设计模型变量数和约束方程数增加,导致求解时间较长,但在可接受范围之内。

表 8 变量、约束方程总数及求解时间

Table 8 Number of variables, constraint equations and computing time

Design strategy	Continuous variables	Discrete variables	Constraints	Computing time /h
traditional	365	105	816	0.0005
proposed	198797	56265	524976	27.8

3 结 论

(1) 本文通过对不确定因素进行分析归类,应用不同的策略建立其对目标函数和约束的影响,建立多周期带补偿的二阶段随机规划模型并进行求解,真实反映了不确定变量对优化目标和约束条件的影响。

(2) 案例研究表明:对不确定因素采取随机规划策略,通过调节决策和惩罚不足协调运行的补偿方式来指导操作,从而使得蒸汽动力系统产生的蒸汽和电力得到充分利用,调度调节更加合理,将年操作费用降低了 9.51%,同时系统结构也得到进一步优化,从而将年投资费用降低了 4.57%,实现了结构和操作的同时优化。本文提出的多周期带补偿的二阶段随机规划策略与传统的确定性方法相比,不仅能应对各种汽电需求的不确定变化,同时保证了系统的安全稳定运行和经济效益最优,提出的设计方案使年总费用降低了 8.72%,故优化方案更加

合理。

(3) 本文由于考虑了不确定因素对蒸汽动力系统优化目标和约束条件的影响, 使得优化模型变量数和约束方程数增加, 从而导致求解时间变长, 下一步计划开发合适的求解算法来解决这一问题。

符 号 说 明

Cap —— 投资费, $\$ \cdot \text{a}^{-1}$
 Cop —— 操作费, $\$ \cdot \text{a}^{-1}$
 C_e —— 电力价格, $\$ \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$
 C_f —— 燃料价格, $\$ \cdot \text{t}^{-1}$
 C_w —— 锅炉给水的价格, $\$ \cdot \text{t}^{-1}$
 D_{avg} —— 天然气在锅炉内燃烧对应截距回归参数, kW
 E_t —— t 周期操作费用的期望值, $\$ \cdot \text{a}^{-1}$
 F_{ann} —— 年折算因子
 F_{inst} —— 安装因子
 H_n —— 进出设备 n 物流的焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
 $\Delta h_{\text{eco}}^{\text{boi}}$ —— 给水通过锅炉省煤器的焓变, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
 Δh_r^{boi} —— 锅炉给水进出口蒸汽焓差, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
 LD —— 流经减温减压阀的蒸汽量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
 Lim_n —— 设备 n 尺寸边界值, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 kW
 $M_{\text{stim}}^{\text{boi}}$ —— 锅炉实际产汽量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
 $N(\mu, \sigma^2)$ —— 均值为 μ , 标准差为 σ 的正态分布函数
 Output_n —— 设备 n 的输出功或产汽量, kW 或 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
 P —— 不确定参数概率
 PC —— 设备购买费用, $\$$
 Q_{Ln} —— 设备 n 对外热损失, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
 Q_f —— 天然气燃烧释放净热量, kW
 $Q_t(y, \theta)$ —— t 周期罚函数, $\$ \cdot \text{a}^{-1}$
 $q(y_{it}, \theta_i)$ —— t 周期工况 i 下的补偿值, $\$ \cdot \text{a}^{-1}$
 S —— 蒸汽量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
 TC —— 年总费用, $\$ \cdot \text{a}^{-1}$
 W —— 设备产生的电量或功量
 W_e —— 外卖电量, kW
 W_i —— 外购电量, kW
 X —— 设计变量矩阵
 x_n —— 设备 n 的设计尺寸
 Y —— 操作变量矩阵
 Y_n —— 设备 n 的物流质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
 y_e —— 外购或外卖电量, kW
 y_f —— 设备所需燃料量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
 y_w —— 锅炉进水量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
 Z_n —— 设备 n 是否被选用的二元变量
 Z_{nti} —— 设备 n 是否运行的二元变量
 η_{boi} —— 锅炉效率
 θ_{sr} —— r 等级不确定蒸汽需求量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
 θ_e —— 不确定电力需求量, kW

ϕ_n —— 设备 n 最小运行负荷比率

Ω —— 不确定变量的变化区间, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 kW

上角标

boi —— 锅炉
 dem —— 需求
 exp —— 外卖
 imp —— 外购
 in —— 输入
 low —— 最低值
 out —— 输出
 up —— 最高值

下角标

e —— 电力
 f —— 燃料
 i —— 离散需求工况编号
 n —— 设备编号
 r —— 蒸汽等级
 s —— 蒸汽
 t —— 周期编号
 w —— 水

References

- [1] Iyer R R, Grossmann I E. Synthesis and operational planning of utility systems for multiperiod operation [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1998, **22**(7): 979-993
- [2] Yi H S, Han C, Yeo Y K. Optimal multiperiod planning of utility systems considering discrete/continuous variance in internal energy demand based on decomposition method [J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2000, **33**(3): 456-467
- [3] Aguilar O, Perry S J, Kim J K, et al. Design and optimization of flexible utility systems subject to variable conditions(II): Methodology and applications [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2007, **85**(8): 1149-1168
- [4] Luo Xianglong(罗向龙). Study on the operational planning and design optimization of steam power system in refinery industry[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2007
- [5] Luo Xianglong(罗向龙), Chen Ying(陈颖), Hua Ben(华贲). Operational planning optimization of utility system under parameters uncertainty [J]. *Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section* (石油学报:石油加工), 2009, **25**(2): 233-240
- [6] Luo Xianglong(罗向龙), Hua Ben(华贲). Synthesis and design of flexible steam power system [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2009, **60**(4): 936-944
- [7] Li Hui(李晖), Sun Li(孙力), He Gaozhong(贺高红). Design and optimization of steam power system with uncertain steam and power demands [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2013, **64**(1): 318-325
- [8] Dantzig G B. Linear programming under uncertainty [J]. *Management Science*, 1955, **1**(3/4): 197-206
- [9] Beale E M L. On minimizing a convex function subject to linear inequalities [J]. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B: Methodological*, 1955: 173-184
- [10] Sahinidis N V. Optimization under uncertainty: state-of-the-art and

- opportunities [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2004, **28**(6): 971-983
- [11] Wang J, Shahidehpour M, Li Z. Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation [J]. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2008, **23**(3): 1319-1327
- [12] Grossmann I E, Guillén-Gosálbez G. Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2010, **34**(9): 1365-1376
- [13] Constantinescu E M, Zavala V M, Rocklin M, *et al.* A computational framework for uncertainty quantification and stochastic optimization in unit commitment with wind power generation [J]. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2011, **26**(1): 431-441
- [14] Li G. Stochastic analysis and optimization of power system steady-state with wind farms and electric vehicles[D]. Birmingham: University of Birmingham, 2012
- [15] Soroush M, Chmielewski D J. Process systems opportunities in power generation, storage and distribution [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2013, **51**: 86-95
- [16] Zhang H, Li P. Chance constrained programming for optimal power flow under uncertainty [J]. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2011, **26**(4): 2417-2424
- [17] Sun L, Pan J, Lou H H. A hybrid algorithm for 2-stage stochastic programming with recourse//The 2008 Annual Meeting of Computing and Systems Technology Division[C]. 2008
- [18] Sun L, Lou H H. A strategy for multi-objective optimization under uncertainty in chemical process design [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008, **16**(1): 39-42
- [19] Zhang Huajie (张化杰), Sun Li (孙力), Lu Xuefeng (陆雪峰). Distillation process optimization by the methodology of chance constrained programming with recourse [J]. *Computers and Applied Chemistry* (计算机与应用化学), 2010, **10**: 034
- [20] Aguilar O. Design and optimisation of flexible utility systems[D]. Manchester: The University of Manchester, 2005