•新型电力系统•

DOI:10.12454/j.jsuese.202500188

本刊网刊

气电综合能源信息物理系统多目标可靠性优化方法

臧天磊[1,2],李丝婷[1,2],冉励搏[1,2],贺科崴[1,2],余　澜[1,2],周步祥[1,2]

(1.四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065;2.智能电网四川省重点实验室(四川大学),四川 成都 610065)

摘　要:气电综合能源系统涉及电力、天然气能源子系统和信息系统的紧密耦合,其复杂性和故障原因的多样性,使系统的可靠性评估与优化变得尤为困难。鉴于此,本文提出了一种气电综合能源信息物理系统多目标可靠性优化方法。首先,在传统的可靠性指标基础上,考虑天然气系统、信息系统加入的影响,构建了一套可靠性评估指标体系。为充分考虑信息系统加入对气电综合能源系统可靠性的影响,引入修正因子对元件故障率和平均修复时间进行修正。然后,建立了可靠性优化的多目标模型,其中两个子函数分别为反映修正故障率和平均修复时间的惩罚成本函数与广义系统供缺能量期望函数。在此基础上,利用非支配排序遗传算法对气电综合能源信息物理系统可靠性优化模型进行了求解,并将其与多目标遗传算法、多目标粒子群算法进行了性能对比。最后,采用一个8节点配电网系统与11节点天然气系统耦合的气电综合能源系统作为算例进行了仿真验证。仿真结果表明:经过优化后两个目标函数值均有所降低,其中惩罚成本降低12.42%,广义系统供缺能量期望降低15.66%,广义系统供给不足持续时间降低2.35%,系统的可靠性得到整体提升。最后,考虑信息系统故障、物理元件破坏和面对网络攻击3种场景,分别对系统的可靠性进行优化,验证了不同场景下优化方法的有效性。

关键词:气电综合能源系统;信息物理系统;可靠性优化;多目标优化;非支配排序遗传算法

中图分类号:TM732　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)06-0134-14

综合能源系统(integrated energy system,IES)是一个融合了多种能源资源(如电力、热能、冷能、天然气、太阳能、风能等)和多个能源系统的复杂工程体系。其中,气电互联综合能源系统有效地实现了电力与天然气之间的高效互联与资源利用,推动了可再生能源的应用和发展,也有助于实现节能减排目标。然而,随着两个子系统耦合加强,系统间的交互作用增加了整体故障风险,小扰动事件可能引发大规模故障,如何确保系统可靠安全运行,成为需要关注的重点[1]。

在未来,能源供应系统的发展趋势是信息和能源高度融合,物联网、大数据、云计算等信息通讯技术加入电力系统,在提升电力系统运行效率的同时,势必会对电力系统可靠性造成一定影响[2−3]。在信息物理交互的环境中,气电综合能源系统的可靠性会受到各种因素的影响,这些因素类型繁多、范围广泛。除了传统的影响因素外,信息系统带来的诸如网络攻击[4−5]、信息失效[6−7]、人为操作错误[8]等因素也对其可靠性产生了重要影响,这些因素同样不容忽视。为此,有必要进行气电综合能源信息物理系统可靠性优化的研究。

目前,在综合能源系统可靠性评估方面,解析法和蒙特卡洛模拟法是常用的两种模型驱动的可靠性评估方法[9]。张鼎茂等[10]提出了一种基于时变故障率下含多种分布式电源的配电系统的可靠性评估解析方法。Eajal等[11]采用一种新制定的快速准确线性化潮流算法用于概率计算,并进行可靠性评估。Koeppel等[12]采用了状态空间解析法对系统的期望供能可靠度和供能不足期望值等可靠性指标进行了计算分析。Guimarães等[13]提出了一种新的准序贯蒙特卡洛方法,并验证了其在可靠性评估中的精度与计算效率。在可靠性评估指标方面,传统配电网可靠性指标在许多场景下已不再适用,在计及信息系统接入的影响时,亟需对其进行改进[14−15]。

对于信息系统或综合能源加入后系统的可靠性,国内外也有相关研究。Zhou等[16]结合故障树与Petri网提出配电网CPS可靠性评估方法,分析了信息组件故

收稿日期:2025 – 03 – 18　　**修回日期:**2025 – 05 – 10　　**网络出版日期:**2026 – 05 – 15

基金项目:国家自然科学基金项目(52377115)

作者简介:臧天磊(1986—),男,副教授. 研究方向:综合能源系统运行优化与控制. E-mail:zangtianlei@126.com

障、网络攻击等因素对系统可靠性的影响。郑焕坤等[17]提出基于马尔科夫链蒙特卡洛的可靠性评估方法，分析信息设备故障对综合能源信息物理系统可靠性的影响，并评估了不同设备的敏感性。

然而，不论研究对象是一般配电网、综合能源系统还是综合能源信息物理系统，上述研究对于气电综合能源系统的可靠性仅仅进行了评估，而评估只是问题的分析阶段，缺乏优化策略和决策支持。针对可靠性优化相关研究，Arya等[18]将可靠性优化目标近似为中断成本形式的惩罚成本，实现了经济性与可靠性的统一考量。Zhou等[19]使用类似方法，构建反映故障率和修复时间调整成本的惩罚函数，并采用自适应高斯粒子群算法进行优化。Bakkiyaraj等[20]则基于非序贯蒙特卡洛模拟与粒子群优化、最小化中断成本与组件投资成本，提出电力系统的最优可靠性指标规划方法。然而，上述研究的优化目标均为单一目标，且大部分未考虑信息物理耦合和多能耦合。

综上所述，目前针对可靠性优化研究工作，大多仅针对其中某一指标进行优化，还有些未考虑信息系统加入后的综合能源系统。鉴于上述不足，本文在可靠性评估相关研究基础上，提出了一种气电综合能源信息物理系统多目标可靠性优化方法。与现有研究相比，本文的主要创新如下：

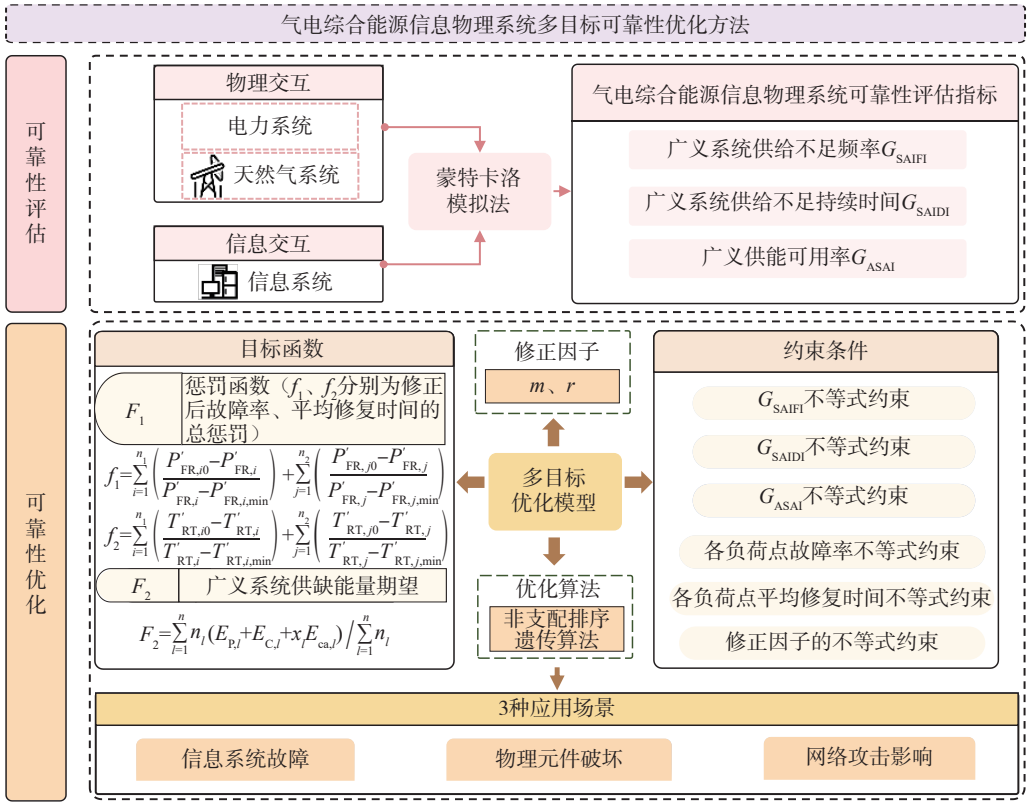
1）提出了计及气电耦合与信息系统影响的广义可靠性评估指标，实现了多能耦合、信息物理耦合下的可靠性评估；

2）构建了以可靠性维护成本与广义系统供缺能量期望为目标的双目标优化模型，弥补了现有研究中缺少多目标可靠性优化的不足；

3）针对信息系统故障、物理元件破坏、网络攻击3类风险场景开展可靠性评估与优化测试，验证了所提模型与算法的有效性，能够为不同场景下可靠性提升策略的制定提供参考。

1　研究框架

本文的研究框架如图1所示。研究围绕气电综合能源信息物理系统的可靠性评估与优化两个层次展



注：n_1和n_2分别为电力负荷点数和天然气负荷点数，$P'_{FR,j0}$和$P'_{FR,j0}$分别为修正后电负荷点i和气负荷点j的初始故障率，$P'_{FR,i}$和$P'_{FR,j}$分别为修正后电负荷点i和气负荷点j的当前故障率，$P'_{FR,i,min}$和$P'_{FR,j,min}$分别为修正后电负荷点i和气负荷点j的最小可达故障率，$T'_{RT,i0}$和$T'_{RT,j0}$分别为修正后电负荷点i和气负荷点j的初始平均修复时间，$T'_{RT,i}$和$T'_{RT,j}$分别为修正后电负荷点i和气负荷点j的当前平均修复时间，$T'_{RT,i,min}$和$T'_{RT,j,min}$分别为修正后电负荷点i和气负荷点j的最小可达平均修复时间，n为负荷点数，n_l为电力或天然气负荷点l用户数，$E_{P,l}$为由物理元件故障直接导致的系统能量缺额的期望值，$E_{C,l}$为由信息元件故障引起控制失效而间接导致的系统能量缺额的期望值，$E_{ca,l}$为由网络攻击引起控制失效而导致的系统能量缺额的期望值，x_l为电力或天然气负荷点l遭受网络攻击的概率。

图1　研究框架

Fig. 1　Research framework

开。在可靠性评估方面，针对电力系统与天然气系统之间的耦合，以及信息系统引入所带来的信息交互，本文在传统可靠性指标基础上构建了广义可靠性评估指标体系，包括广义系统供给不足频率、广义系统供给不足持续时间与广义供能可用率；同时引入修正因子将信息系统故障与网络攻击对系统的影响映射为对元件故障率和平均修复时间的修正，并采用蒙特卡洛模拟法对修正后的系统进行可靠性指标计算。

在可靠性优化方面，采用修正后的故障率、平均修复时间构建了两个目标函数。一是将维护系统可靠性所需的费用成本通过可靠性相关参数表征为惩罚形式的成本函数；二是通过广义系统供缺能量期望表征系统能量供缺程度的目标函数。在满足相关指标以及故障率、修复时间与修正因子等约束的前提下，采用非支配排序遗传算法对上述双目标优化模型进行求解。然后，针对信息系统故障、物理元件破坏和网络攻击3种典型场景，分别开展可靠性评估与优化测试，验证所提模型与算法在不同场景下的有效性和适应性，为可靠性提升策略的制定提供参考。

2 广义可靠性评估指标构建

目前，配电网可靠性评估已经有一套较为完整的指标体系[21−22]，但本文所建立的综合能源系统可靠性指标与传统可靠性指标有所不同，是计及多能耦合与信息物理交互的广义可靠性评估指标。这些指标考虑了天然气系统元件加入的影响，以及信息系统故障或系统遭到网络攻击时对系统控制的影响，从而反映了信息物理融合的综合能源系统的整体可靠性水平，相较于传统可靠性指标考虑得更为全面。首先从频率角度定义3个可靠性指标。

1）广义系统供能不足频率指标G_{SAIFI}，反映由物理组件故障或信息组件故障和网络攻击引起的控制故障而导致的负荷削减的频率，定义如下：

$$G_{\mathrm{SAIFI}}=\sum_{l=1}^{n}n_l(C_{\mathrm{P},l}+C_{\mathrm{C},l}+x_lC_{\mathrm{ca},l})\Big/\sum_{l=1}^{n}n_l \tag{1}$$

式中，n为负荷点数，n_l为电力或天然气负荷点l的用户数，$C_{\mathrm{P},l}$为电力或天然气负荷点l直接因物理元件故障而导致的年削减次数，$C_{\mathrm{C},l}$为电力或天然气负荷点l因信息元件故障而导致的年削减次数，$C_{\mathrm{ca},l}$为电力或天然气负荷点l由网络攻击引起的控制失效而导致的年削减次数，x_l为电力或天然气负荷点l遭受网络攻击的概率。

2）广义系统供能不足持续时间指标G_{SAIDI}，反映系统中因物理部件故障或信息组件故障和网络攻击引起的控制故障而导致的系统年平均供能缩减时间，定义如下：

$$G_{\mathrm{SAIDI}}=\sum_{l=1}^{n}n_l(U_{\mathrm{P},l}+U_{\mathrm{C},l}+x_lU_{\mathrm{ca},l})\Big/\sum_{l=1}^{n}n_l \tag{2}$$

式中，$U_{\mathrm{P},l}$为电力或天然气负荷点l直接由物理元件故障而导致的年停运时间，$U_{\mathrm{C},l}$为电力或天然气负荷点l由信息元件故障引起的控制故障而导致的年停运时间，$U_{\mathrm{ca},l}$为电力或天然气负荷点l因网络攻击引起的控制失效而导致的年停运时间。

3）广义供能可用率指标G_{ASAI}，反映实际供能总时户数与要求供能总时户数之比，定义如下：

$$G_{\mathrm{ASAI}}=1-\sum_{l=1}^{n}n_l(U_{\mathrm{P},l}+U_{\mathrm{C},l}+x_lU_{\mathrm{ca},l})\Big/\sum_{l=1}^{n}8\ 760\cdot n_l \tag{3}$$

3 气电综合能源信息物理系统可靠性优化模型

3.1 多目标优化模型

气电综合能源信息物理系统可靠性优化模型的目标函数为最小化系统惩罚成本函数和最小化系统能量损失，具体表示如下：

$$\min F(P_{\mathrm{FR}},T_{\mathrm{RT}})=(F_1,F_2) \tag{4}$$

式中，P_{FR}、T_{RT}分别为故障率和平均修复时间，F_1、F_2分别为通过可靠性相关参数表征的惩罚成本函数和表征系统能量损失程度的供缺期望函数，将在第3.3节进行详细介绍。模型的约束条件将在第3.4节详细介绍。模型的决策变量为系统各元件的故障率和平均修复时间。

3.2 修正因子

气电综合能源信息物理系统是一个深度融合能源物理设施与信息技术的复杂系统，其核心目标是通过信息与物理系统的双向交互，实现电能与天然气的高效协同与互补。其中，物理系统元件具体包括电力系统中的电力线路、天然气系统输气管道、气源站、气体压缩机、系统耦合元件P2G装置、燃气轮机等能源转换设备。而信息系统中引入各类监测设备、通信设备、控制设备，可以实时监测元件状态，提前预警潜在故障，故障发生后可快速定位并远程协助修复，因此其对于综合能源系统各元件故障率和平均修复时间均有一定程度的影响。

为了使评估和优化结果更符合实际情况，需要对系统的故障率和平均修复时间进行一定修正。本文增加了修正因子m和r，来修正故障率和平均修复时间。通过将信息系统的加入映射为对元件故障率和平均修复时间的调整，使得在进行可靠性评估与优化时能够更真实地反映信息元件对系统可靠性的影响。修正

因子的取值主要受线路或管道的重要性、元件故障类型和故障影响、系统安全要求、元件故障恢复时间和恢复措施等因素的影响[18,23]。综合考虑上述因素后确定合适的修正因子，通过式(5)准确地反映信息元件加入对气电综合能源信息物理系统可靠性的影响。在信息组件良好作用时，故障率和平均修复时间被修正如下：

$$\begin{cases} P'_{\mathrm{FR}} = mP_{\mathrm{FR}}, \\ T'_{\mathrm{RT}} = mT_{\mathrm{RT}} + (1-m)r \end{cases} \tag{5}$$

式中：P_{FR} 和 P'_{FR} 分别为修正前后的故障率；T_{RT} 和 T'_{RT} 分别为修正前后的平均修复时间；m 和 r 为修正因子，$0<m<1$，$r>0$。修正后的故障率和平均修复时间既考虑了由物理元件故障带来的影响，也考虑了因信息系统元件加入带来的影响。

网络攻击会降低系统的可靠性，增加故障发生的概率，延长平均修复时间。类似使用修正因子表征信息系统的影响，本文使用修正因子来调整故障率和平均修复时间，通过式(6)来反映网络攻击对系统可靠性的影响。在考虑网络攻击时，修正因子的引入将使元件故障率和平均修复时间增大。具体进行如下修正：

$$\begin{cases} P'_{\mathrm{FR}} = \dfrac{P_{\mathrm{FR}}}{m}, \\ T'_{\mathrm{RT}} = \dfrac{T_{\mathrm{RT}}}{m} + \dfrac{r}{(1-m)} \end{cases} \tag{6}$$

式中，$0<m<1$，$r>0$。

综上所述，在进行具体可靠性评估和优化前，首先将根据历史数据和元件特性，为每个物理元件及线路管道等设定初始故障率和平均修复时间；然后，考虑信息系统和网络攻击影响，按照式(5)、(6)进行修正计算；最后，将修正后的故障率和平均修复时间代入可靠性评估和优化模型，进行相关运算求解。

3.3　目标函数

实际系统中，相关成本数据往往难以获得，尤其是改善故障率或平均修复时间方面的成本信息较为缺乏。因此，本文将维护系统可靠性的费用成本，通过可靠性相关参数进行表征，构造惩罚形式的成本函数 F_1。为了减少故障率或修复时间，将增加投资，进而提高系统的可靠性。惩罚函数定义如下：

$$F_1 = f_1 + f_2 \tag{7}$$

式中，f_1 表示修正后故障率的总惩罚，定义如下：

$$f_1 = \sum_{i=1}^{n_1}\left(\frac{P'_{\mathrm{FR},i0} - P'_{\mathrm{FR},i}}{P'_{\mathrm{FR},i} - P'_{\mathrm{FR},i,\min}}\right) + \sum_{j=1}^{n_2}\left(\frac{P'_{\mathrm{FR},j0} - P'_{\mathrm{FR},j}}{P'_{\mathrm{FR},j} - P'_{\mathrm{FR},j,\min}}\right) \tag{8}$$

式中，n_1 和 n_2 分别为电力系统负荷点数和天然气系统负荷点数，$P'_{\mathrm{FR},i0}$ 和 $P'_{\mathrm{FR},j0}$ 分别为修正后的电负荷点 i 和气负荷点 j 的初始故障率，$P'_{\mathrm{FR},i}$ 和 $P'_{\mathrm{FR},j}$ 分别为修正后的电负荷点 i 和气负荷点 j 的当前故障率，$P'_{\mathrm{FR},i,\min}$ 和 $P'_{\mathrm{FR},j,\min}$ 分别为修正后的电负荷点 i 和气负荷点 j 的最小可达故障率。

f_2 表示修正后平均修复时间的总惩罚，定义如下：

$$f_2 = \sum_{i=1}^{n_1}\left(\frac{T'_{\mathrm{RT},i0} - T'_{\mathrm{RT},i}}{T'_{\mathrm{RT},i} - T'_{\mathrm{RT},i,\min}}\right) + \sum_{j=1}^{n_2}\left(\frac{T'_{\mathrm{RT},j0} - T'_{\mathrm{RT},j}}{T'_{\mathrm{RT},j} - T'_{\mathrm{RT},j,\min}}\right) \tag{9}$$

式中，$T'_{\mathrm{RT},i0}$ 和 $T'_{\mathrm{RT},j0}$ 分别为修正后电负荷点 i 和气负荷点 j 的初始平均修复时间，$T'_{\mathrm{RT},i}$ 和 $T'_{\mathrm{RT},j}$ 分别为修正后的电负荷点 i 和气负荷点 j 的当前平均修复时间，$T'_{\mathrm{RT},i,\min}$ 和 $T'_{\mathrm{RT},j,\min}$ 分别为修正后电负荷点 i 和气负荷点 j 的最小可达平均修复时间。

本文考虑信息系统加入和网络攻击对可靠性优化的影响。由于引入的信息系统会对线路和管道的故障率和平均修复时间产生影响，因此，也需要对负荷点的故障率和平均修复时间进行修正。在考虑信息系统引入的情况下，电力负荷点的修正故障率和平均修复时间表示如下：

$$\begin{cases} P'_{\mathrm{FR},i0} = m_{i0}P_{\mathrm{FR},i0}, \\ P'_{\mathrm{FR},i} = m_i P_{\mathrm{FR},i}, \\ P'_{\mathrm{FR},i,\min} = m_{i,\min}P_{\mathrm{FR},i,\min}, \\ T'_{\mathrm{RT},i0} = m_{i0}T_{\mathrm{RT},i0} + (1-m_{i0})r_{i0}, \\ T'_{\mathrm{RT},i} = m_i T_{\mathrm{RT},i} + (1-m_i)r_i, \\ T'_{\mathrm{RT},i,\min} = m_{i,\min}T_{\mathrm{RT},i,\min} + (1-m_{i,\min})r_{i,\min} \end{cases} \tag{10}$$

式中：m_{i0} 和 r_{i0} 为电负荷点 i 的初始修正因子，$i=1,2,\cdots,n_1$；m_i 和 r_i 为电负荷点 i 的当前修正因子；$m_{i,\min}$ 和 $r_{i,\min}$ 为电负荷点 i 所能达到的最小修正因子。

对于天然气系统，天然气负荷点的故障率和平均修复时间也需要进行修正。天然气负荷点的修正故障率和平均修复时间表示如下：

$$\begin{cases} P'_{\mathrm{FR},j0} = m_{j0}P_{\mathrm{FR},j0}, \\ P'_{\mathrm{FR},j} = m_j P_{\mathrm{FR},j}, \\ P'_{\mathrm{FR},j,\min} = m_{j,\min}P_{\mathrm{FR},j,\min}, \\ T'_{\mathrm{RT},j0} = m_{j0}T_{\mathrm{RT},j0} + (1-m_{j0})r_{j0}, \\ T'_{\mathrm{RT},j} = m_j T_{\mathrm{RT},j} + (1-m_j)r_j, \\ T'_{\mathrm{RT},j,\min} = m_{j,\min}T_{\mathrm{RT},j,\min} + (1-m_{j,\min})r_{j,\min} \end{cases} \tag{11}$$

式中：m_{j0} 和 r_{j0} 为天然气负荷点 j 的初始修正因子，$j=1,2,\cdots,n_2$；m_j 和 r_j 为天然气负荷点 j 的当前修正因子；$m_{j,\min}$ 和 $r_{j,\min}$ 为天然气负荷点 j 可实现的最小修正因子。

由于信息系统的引入，还需考虑网络攻击对电力和天然气负荷点的故障率和平均修复时间的影响。在考虑网络攻击时，电力负荷点的修正故障率和平均修复时间表示如式(12)所示；类似地，天然气负荷点的修正故障率和平均修复时间表示如式(13)所示。

$$\begin{cases} P'_{\mathrm{FR},i0}=\dfrac{P_{\mathrm{FR},i0}}{m_{i0}}, \\ P'_{\mathrm{FR},i}=\dfrac{P_{\mathrm{FR},i}}{m_i}, \\ P'_{\mathrm{FR},i,\min}=\dfrac{P_{\mathrm{FR},i,\min}}{m_{i,\min}}, \\ T'_{\mathrm{RT},i0}=\dfrac{T_{\mathrm{RT},i0}}{m_{i0}}+\dfrac{r_{i0}}{1-m_{i0}}, \\ T'_{\mathrm{RT},i}=\dfrac{T_{\mathrm{RT},i}}{m_i}+\dfrac{r_i}{1-m_i}, \\ T'_{\mathrm{RT},i,\min}=\dfrac{T_{\mathrm{RT},i,\min}}{m_{i,\min}}+\dfrac{r_{i,\min}}{1-m_{i,\min}} \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases} P'_{\mathrm{FR},j0}=\dfrac{P_{\mathrm{FR},j0}}{m_{j0}}, \\ P'_{\mathrm{FR},j}=\dfrac{P_{\mathrm{FR},j}}{m_j}, \\ P'_{\mathrm{FR},j,\min}=\dfrac{P_{\mathrm{FR},j,\min}}{m_{j,\min}}, \\ T'_{\mathrm{RT},j0}=\dfrac{T_{\mathrm{RT},j0}}{m_{j0}}+\dfrac{r_{j0}}{1-m_{j0}}, \\ T'_{\mathrm{RT},j}=\dfrac{T_{\mathrm{RT},j}}{m_j}+\dfrac{r_j}{1-m_j}, \\ T'_{\mathrm{RT},j,\min}=\dfrac{T_{\mathrm{RT},j,\min}}{m_{j,\min}}+\dfrac{r_{j,\min}}{1-m_{j,\min}} \end{cases} \tag{13}$$

式(12)、(13)中，$i=1,2,\cdots,n_1$，$j=1,2,\cdots,n_2$，后文同。

目标函数F_2定义为刻画系统能量损失程度的广义系统供缺能量期望，该目标函数反映了由物理组件故障和信息组件故障或由网络攻击引起的故障导致系统能量缺额的期望值，定义如下：

$$F_2=\sum_{l=1}^{n}n_l(E_{\mathrm{P},l}+E_{\mathrm{C},l}+x_lE_{\mathrm{ca},l})\Big/\sum_{l=1}^{n}n_l \tag{14}$$

式中，$E_{\mathrm{P},l}$为由于物理元件故障直接导致的系统能量缺额的期望值，$E_{\mathrm{C},l}$为由于信息元件故障引起控制失效而间接导致的系统能量缺额的期望值，$E_{\mathrm{ca},l}$为由于网络攻击引起的控制失效而导致的系统能量缺额的期望值。

系统通过降低故障率和平均修复时间来提高可靠性，但此修正操作会增加投资成本，导致F_1值上升；F_2广义系统供缺能量期望则可直接衡量系统供缺能量值，其通常随故障率和平均修复时间的降低而下降。因此，降低F_2需要降低系统元件故障率和平均修复时间，提高系统可靠性，但提高可靠性又会增加F_1惩罚成本，两者的优化存在矛盾与冲突，可采用多目标优化算法进行求解。

3.4 约束条件

为保证系统的安全与可持续运行，还需要同时满足一系列约束条件。本文考虑的约束条件如式(15)～(20)所示。

1)广义系统供能不足频率指标G_{SAIFI}的不等式约束为：

$$G_{\mathrm{SAIFI}}\le G_{\mathrm{SAIFI,d}} \tag{15}$$

2)广义系统供能不足持续时间指标G_{SAIDI}的不等式约束为：

$$G_{\mathrm{SAIDI}}\le G_{\mathrm{SAIDI,d}} \tag{16}$$

3)广义供能可用率指标G_{ASAI}的不等式约束为：

$$G_{\mathrm{ASAI}}\le G_{\mathrm{ASAI,d}} \tag{17}$$

4)各负荷点的故障率的不等式约束表示为：

$$\begin{cases} P_{\mathrm{FR},i,\min}\le P_{\mathrm{FR},i}\le P_{\mathrm{FR},i0}, \\ P_{\mathrm{FR},j,\min}\le P_{\mathrm{FR},j}\le P_{\mathrm{FR},j0}, \\ P'_{\mathrm{FR},i,\min}\le P'_{\mathrm{FR},i}\le P'_{\mathrm{FR},i0}, \\ P'_{\mathrm{FR},j,\min}\le P'_{\mathrm{FR},j}\le P'_{\mathrm{FR},j0} \end{cases} \tag{18}$$

5)各负荷点平均修复时间的不等式约束表示为：

$$\begin{cases} T_{\mathrm{RT},i,\min}\le T_{\mathrm{RT},i}\le T_{\mathrm{RT},i0}, \\ T_{\mathrm{RT},j,\min}\le T_{\mathrm{RT},j}\le T_{\mathrm{RT},j0}, \\ T'_{\mathrm{RT},i,\min}\le T'_{\mathrm{RT},i}\le T'_{\mathrm{RT},i0}, \\ T'_{\mathrm{RT},j,\min}\le T'_{\mathrm{RT},j}\le T'_{\mathrm{RT},j0} \end{cases} \tag{19}$$

6)修正因子的不等式约束表示为：

$$\begin{cases} m_{i,\min}\le m_i\le m_{i0}, \\ m_{j,\min}\le m_j\le m_{j0}, \\ r_{i,\min}\le r_i\le r_{i0}, \\ r_{j,\min}\le r_j\le r_{j0} \end{cases} \tag{20}$$

式(15)～(20)中，$G_{\mathrm{SAIFI,d}}$、$G_{\mathrm{SAIDI,d}}$、$G_{\mathrm{ASAI,d}}$分别为G_{SAIFI}、G_{SAIDI}、G_{ASAI}的期望值阈值。G_{SAIFI}、G_{SAIDI}、G_{ASAI}等指标均与优化决策变量故障率和平均修复时间有紧密联系，通过将G_{SAIFI}、G_{SAIDI}、G_{ASAI}作为优化约束条件，可以引导故障率和平均修复时间向有利于提升可靠性的方向变化。而对于各负荷点故障率、平均修复时间以及修正因子的约束，则能够保证所得结果合理可行。

4 可靠性评估及优化

4.1 可靠性评估

采用序贯蒙特卡洛法进行可靠性评估。其原理是通过预先收集好的各元件的故障率、平均修复时间等可靠性参数，对故障场景进行抽样，计算各元件正常工作状态下的运行时间并确定故障元件的修复时间，然后分析故障元件对系统各负荷点运行状态的影响。当模拟时间达到预先设定的时长后，统计各负荷点能量供缺时长及次数，并计算各可靠性指标[24–25]。

4.2 多目标优化算法

采用非支配排序遗传算法[26](non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ，NSGA–Ⅱ)进行多目标优化。该算法在基本遗传算法的基础上进行了以下3方面的优化，以更好地解决多目标优化问题：

1）引入快速非支配排序机制，优先保留在多目标上表现更优的解，使优化结果既满足可靠性要求，又能降低实现成本，形成多样化且合理的优化方案。

2）采用拥挤度距离计算，在气电综合能源信息物理系统的优化过程中，确保在非支配层内的解尽可能均匀分布，避免陷入局部最优解。

3）引入精英保留机制，通过父代与子代合并排序，保证优质解不被淘汰，推动优化过程稳定收敛至最优解集，实现系统的可靠经济运行。

4.3　可靠性优化过程

可靠性优化流程如图 2 所示。

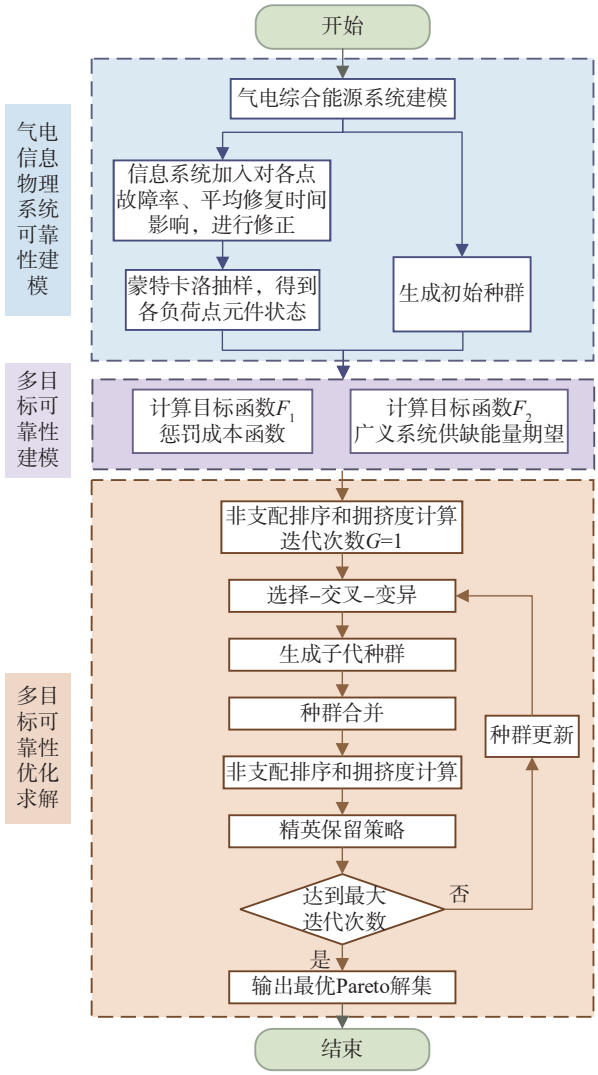


图 2　可靠性优化流程图

Fig. 2　Flow chart for reliability optimization

具体步骤如下：

1）对气电综合能源系统进行建模。包括气电耦合系统拓扑结构、线路和管道参数以及负载数据等，考虑线路重要程度、故障类型、修复时间等因素，设置各线路、管道可靠性修正因子。

2）考虑气电综合能源系统中信息系统加入对各负荷节点故障率和平均修复时间产生的影响，并根据设定的修正因子作一定修正后，对综合能源系统元件进行蒙特卡洛抽样，计算系统可靠性指标。

3）明确定义多目标优化问题，包括优化的目标函数、决策变量、约束条件。

4）采用 NSGA–Ⅱ算法进行结果搜索。首先计算适应度函数，对种群中的每个个体，通过计算其目标函数值来评估其适应度。在多目标问题中，一个个体的适应度通常由其在多个目标函数上的表现决定。

5）对种群中的个体进行非支配排序，将它们划分为不同的前沿等级，使得每个前沿等级上的个体都比它们之前等级上的个体更优或者相对更好。在排序的基础上，对每个前沿等级上的个体，在其决策空间中进行拥挤度计算，拥挤度越高意味着其所在的区域越密集。

6）根据非支配排序和拥挤度信息，从种群中选择一组个体作为父代。接着，经过选择、交叉和变异操作生成子代种群。将父代和子代合并后，重新进行非支配排序和拥挤度评估，并应用精英策略保留表现最优的个体，以此构成新的父代种群。

7）判断是否达到设定的最大迭代次数，若未达到则对选定的个体应用选择交叉操作，同时对子代中的一些个体应用变异操作，以引入随机性和多样性，重复步骤 4）；若达到最大迭代次数，则输出优化 Pareto 解集，确定各元件最优故障率及平均修复时间，输出两目标函数值。

5　算例测试

5.1　算例系统及参数

利用 8 节点配电网系统与 11 节点天然气系统耦合的气电综合能源系统进行仿真测试，系统结构如图 3 所示。该系统包括 8 条输气管道、2 条气驱压缩机支路、2 个气源站、7 个天然气负荷点、8 个电力负荷点和 7 条配电线路。天然气节点 19 通过燃气轮机与电负荷点 7 相连，天然气节点 13 通过 P2G 与电负荷点 5 相连。燃气轮机的额定功率为 0.8 MW，P2G 的额定功率为 1.0 MW。

天然气系统管道参数详见附录 A 表 A1，天然气系统负荷数据详见附录 A 表 A2，电力系统负荷数据详见附录 A 表 A3，元件可靠性相关参数详见附录 A 表 A4，各线路及管道参数设置详见附录 A 表 A5。

5.2　测试结果及分析

5.2.1　可靠性评估及优化结果

设置气电综合能源系统各系统参数及可靠性参数，采用蒙特卡洛模拟法进行可靠性评估，系统可靠性评估结果如表 1 所示。

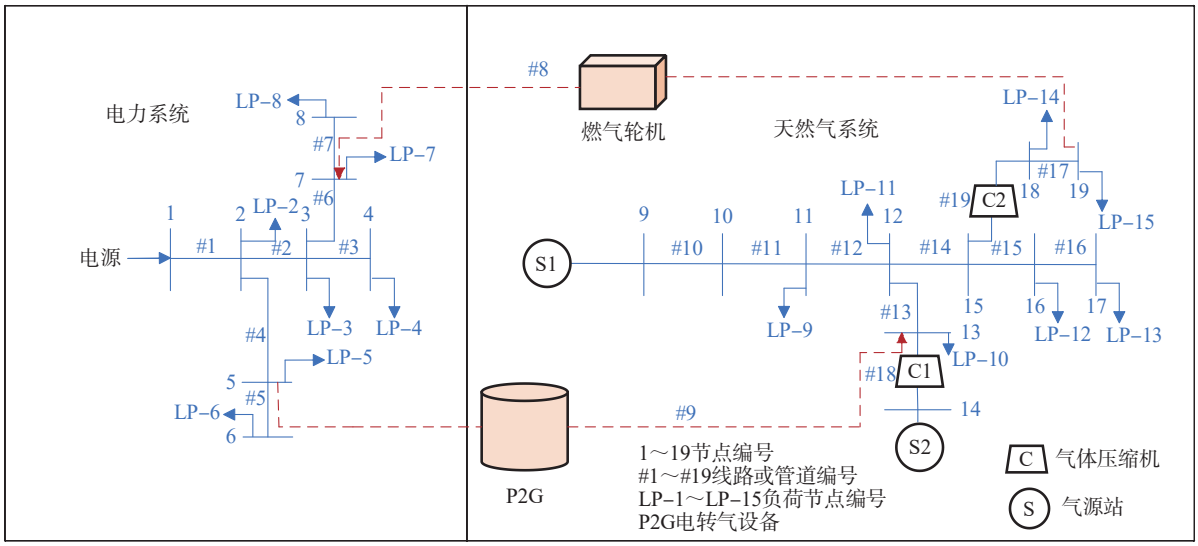


图3 气电耦合系统拓扑图

Fig. 3 Topology diagram of the gas-electric coupling system

表1 初始可靠性评估结果

Tab. 1 Initial reliability assessment results

指标	G_{SAIFI}/(次·(户·a)$^{-1}$)	G_{SAIDI}/(h·(户·a)$^{-1}$)	G_{ASAI}/%	F_1	F_2/(MW·h·a^{-1})
数值	0.5471 7	8.229 4	99.906 1	53.360 9	40.783 7

为了对非支配排序遗传算法进行全面的比较，突出说明该优化算法的优越性和适用性，本文采用NSGA–Ⅱ算法、多目标遗传算法[27](multi-objective genetic algorithm，MOGA)、多目标粒子群算法[28](multi-objective particle swarm optimization，MOPSO)3种算法进行对比分析，其中种群数量均被设置为100，迭代次数设置为100，收敛精度设置为10^{-8}。MOGA算法和NSGA–Ⅱ算法交叉率设置为0.8，变异率设置为0.08。MOPSO算法惯性权重设置为0.9，学习因子c_1设置为1.5，c_2设置为1.6。通过仿真得出3种算法的优化后目标函数结果对比如图4所示。

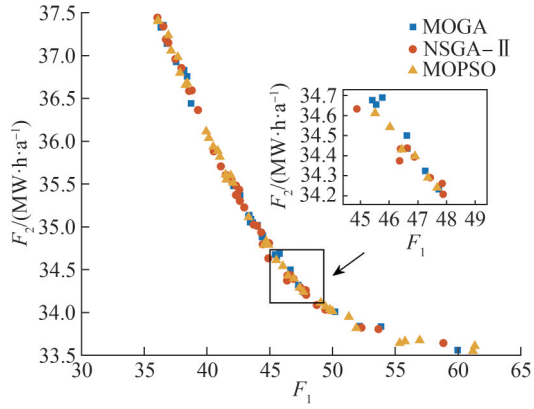


图4 3种算法的优化后目标函数结果对比

Fig. 4 Comparison of optimized objective function results among three algorithms

为了更精确地比较每种算法对系统可靠性优化的效果，对每种算法分别进行了100次运算，并对运算结果进行了统计分析，得到了3种算法下两个目标函数的最大值、最小值、平均值和标准差，具体数据如表2所示。

表2 多目标优化算法目标函数计算结果比较

Tab. 2 Comparison of objective function calculation results for multi-objective optimization algorithms

算法	NSGA–Ⅱ		MOPSO		MOGA	
	F_1	F_2/(MW·h·a^{-1})	F_1	F_2/(MW·h·a^{-1})	F_1	F_2/(MW·h·a^{-1})
平均值	46.789 63	34.360 33	46.806 88	34.385 73	46.871 63	34.498 92
最大值	47.980 00	34.679 70	48.373 80	34.855 40	47.923 50	34.907 90
最小值	45.996 60	34.068 40	45.299 50	34.087 80	45.978 00	34.093 20
标准差	0.450 07	0.081 63	0.462 34	0.104 18	0.541 92	0.144 19

由100次独立仿真运算的统计结果可知，3种算法均具有寻优能力，且求解结果总体稳定。然而，由表2可知，NSGA–Ⅱ算法经过100次运行结果统计，目标函数的标准差是3种算法中最小的。较低的标准差意味着经过100次运行后得出的结果更加接近，算法对初始条件和随机因素的敏感度较低，优化路径稳定一致，能够稳定地收敛到相似的解[29]。同时，通过NSGA–Ⅱ算法得到的平均值也是三者中最小的，基于此也评估

出该算法的搜索能力和全局优化性能是三者中最优秀的，解的质量更高，能够达到更好的优化效果。在单次求解时间方面，NSGA–Ⅱ、MOPSO、MOGA 3 种算法 100 次运行的平均时间分别为 1 271.01、1 395.16、1 368.98 s，对比可知 NSGA–Ⅱ求解更快，效率更高。由此可见，NSGA–Ⅱ算法更适用于求解较为复杂的多目标、多约束可靠性优化问题，选择此算法得到的优化解能更加有效地支持系统的设计以及运营决策，因此后续各场景的可靠性优化均采用 NSGA–Ⅱ算法。

本文采用无权重的帕累托优化，即用 NSGA–Ⅱ算法直接求解目标冲突的非劣前沿解集。利用 NSGA–Ⅱ算法进行优化后的系统可靠性指标及变化如图 5 所示。

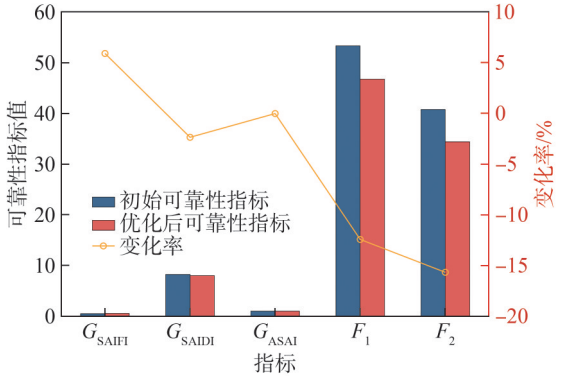


图 5　优化前后指标变化对比

Fig. 5　Comparison of metric changes before and after optimization

根据图 5 对优化后各可靠性指标数据及变化率分析可知，通过 NSGA–Ⅱ多目标优化算法优化后，两个优化目标得到降低，其中 F_1 降低了 12.42%，F_2 降低了 15.66%，另外 G_{SAIDI} 降低了 2.35%，而 G_{ASAI} 变化较小，G_{SAIFI} 略有增加，但是增幅不大。由此可见，通过此多目标优化算法优化系统元件故障率和平均修复时间后，系统可靠性整体得到提升，而实现此可靠性提升所需的惩罚成本也得到了降低，验证了所提方法的有效性和优越性。

5.2.2　信息系统故障

信息系统是考虑了信息物理交互的气电综合能源系统可靠性优化的关键，它为系统实现信息流和能量流之间的协同交互提供了技术支持，从而提高了系统的可靠性和稳定性。为了评估信息系统对气电综合能源系统可靠性的影响，对信息系统完全故障时的气电综合能源系统可靠性进行评估和研究。由式(5)可知，m 值接近 1 时，表示信息系统的积极影响几近消失。信息系统故障的模拟则是将所有物理元件的修正因子 m 调整为接近 1 的值，使修正公式中信息系统引入的积极效果基本消除。信息系统故障时可靠性评估及优化结果如图 6 所示。

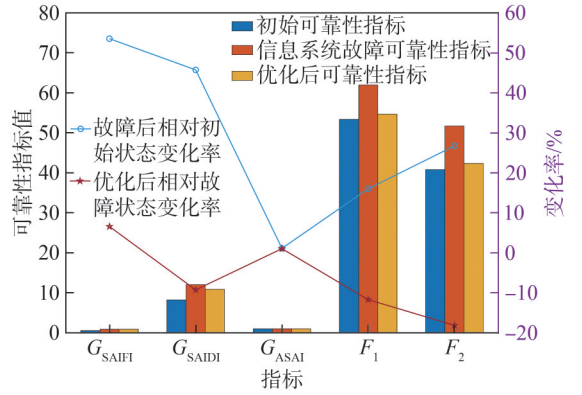


图 6　故障前后及优化后可靠性指标变化对比

Fig. 6　Comparison of reliability metric changes before failure, after failure and after optimization

由图 6 对可靠性各指标变化率分析可知，信息系统出现故障后，各可靠性指标均有大幅度升高，系统供能不足频率、供能不足持续时间、供缺能量期望、惩罚成本函数均有大幅度增加。由于信息系统提供了对线路运行状态和性能指标的实时监测，能够及时发现线路故障或异常，减少故障造成的影响范围，降低故障率，因此当信息系统出现故障后，系统可靠性将受到严重影响。

在信息系统故障的情况下利用 NSGA–Ⅱ优化算法，能够有效减少故障所造成的影响，经过优化后，G_{SAIDI}、惩罚函数、广义系统供缺能量期望均有所下降，也证明了优化方法在信息系统故障情况下的有效性。

5.2.3　物理元件破坏

耦合装置和气源对系统的运行起着至关重要的作用。因此，本文对物理系统中 P2G、燃气轮机以及气源遭到破坏的情况进行了可靠性评估，并在此基础上进行了可靠性优化。本文将耦合装置以及气源的初始故障率和平均修复时间，即 $P'_{FR,0}$、$T'_{RT,0}$ 调整增大，模拟此情况下可靠性提升所需增加的惩罚成本；同时，降低耦合装置转换效率以及气源出气量，提升故障率，等效模拟元件的故障状态。

场景 1：破坏耦合元件，具体为分别破坏 P2G 和燃气轮机。两种情况下优化前后可靠性指标数值以及负荷点可靠性情况如表 3、4 和图 7、8 所示。

由表 3、4 可知，在破坏耦合元件 P2G 和燃气轮机之后，系统各可靠性指标均有所上升，由图 7、8 可知，部分负荷点年平均能量供缺时间也有所增加。由于没有耦合装置，电力系统和天然气系统将不再紧密连接，能量源之间缺乏能量转换枢纽，也就造成了能源供应的严重不足，从而对系统的可靠性造成了严重的

表3 破坏耦合元件P2G及优化后可靠性指标

Tab. 3 Reliability assessment results of the damaged P2G and optimization results

优化前后	G_{SAIFI}/(次·(户·a)$^{-1}$)	G_{SAIDI}/(h·(户·a)$^{-1}$)	G_{ASAI}/%	F_1	F_2/(MW·h·a^{-1})
优化前	0.571 46	8.432 5	99.903 7	59.017 2	43.289 7
优化后	0.686 70	8.002 6	99.908 6	52.419 3	35.356 4

表4 破坏燃气轮机及优化后可靠性指标

Tab. 4 Reliability assessment results of the damaged gas turbine and optimization results

优化前后	G_{SAIFI}/(次·(户·a)$^{-1}$)	G_{SAIDI}/(h·(户·a)$^{-1}$)	G_{ASAI}/%	F_1	F_2/(MW·h·a^{-1})
优化前	0.588 55	9.321 3	99.893 6	62.987 4	42.384 8
优化后	0.629 52	8.622 6	99.901 6	56.530 5	36.392 4

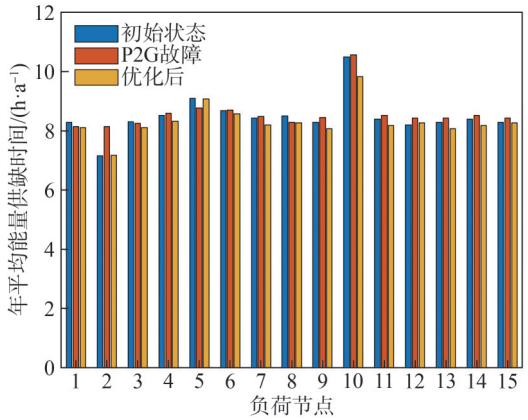


图7 P2G故障前后及优化后负荷节点可靠性指标

Fig. 7 Reliability metrics of load nodes for P2G before failure, after failure and after optimization

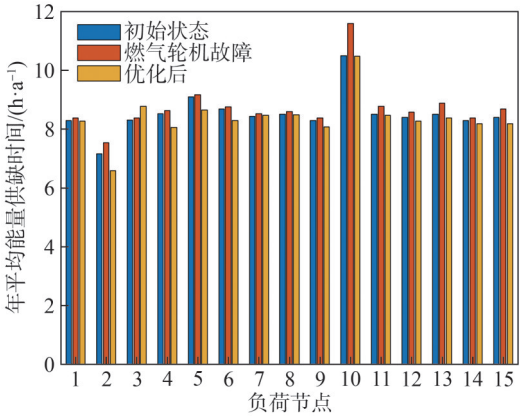


图8 燃气轮机故障前后及优化后负荷节点可靠性指标

Fig. 8 Reliability metrics of load nodes for gas turbine before failure, after failure and after optimization

影响，这也证明了耦合元件是提高系统可靠性的关键因素。在此基础上利用NSGA–Ⅱ优化算法对系统进行优化，目标函数均有所下降，大部分负荷点年平均能量供缺时间也有所降低，成功降低了耦合元件被破坏后对系统可靠性造成的影响，也证明了在此情况下该可靠性优化方法的有效性。

场景2：破坏气源。破坏后的可靠性评估及可靠性优化指标如图9所示。

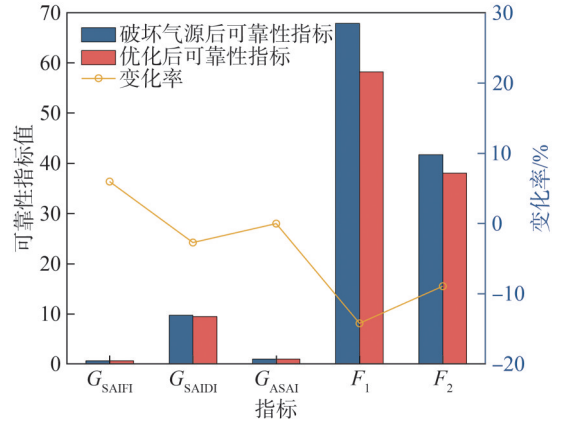


图9 破坏气源后及优化后可靠性指标

Fig. 9 Reliability metrics after the gas source was disrupted and after optimization

由图9可知，破坏气源后各可靠性指标值均有所上升。在气电综合能源信息物理系统中，气源作为天然气系统的核心节点，承担着天然气能源的主要供给功能，其运行状态直接决定了天然气网络的可用性与稳定性。气源故障不仅会导致天然气供应中断，还可能通过气电耦合装置，影响电力系统的能量供给，进而放大系统范围内的供能缺失风险。通过多目标优化方法进行优化后，F_1、F_2均有所降低，F_1下降达14.2%。由此可见，所提方法能减小气源故障后对系统可靠性造成的影响，验证了在此情况下可靠性提升方法的有效性。

5.2.4 网络攻击影响

信息系统的加入也可能带来网络攻击，为了分析网络攻击对系统可靠性优化的影响，将攻击分别作用于各电力线路和输气管道上，根据设定的修正因子及式(6)所示的修正方法分别对各线路、管道故障率和平均修复时间进行修正，并进行可靠性评估。统计不同攻击对象下两个目标函数值的变化情况，如图10、11所示。

由图10、11可知，当线路和输气管道暴露于网络攻击后，目标函数F_1和F_2的值与不考虑网络攻击时相比有不同程度的提高。特别地，在对线路攻击时，攻击编号1、5、7线路时对系统可靠性影响更大，这是由于这3条线路更靠近电源及耦合元件；而在对输气管道攻击时，攻击编号10、13、17管道对系统可靠性影响更大，这是由于这3条管道更靠近气源及耦合元件。针对上述关键线路与管道遭受网络攻击的工况，采用NSGA–Ⅱ算法对系统进行可靠性优化，目标函数值的变化结果如图12、13所示。

由图12、13可知，经所提方法进行优化后目标函

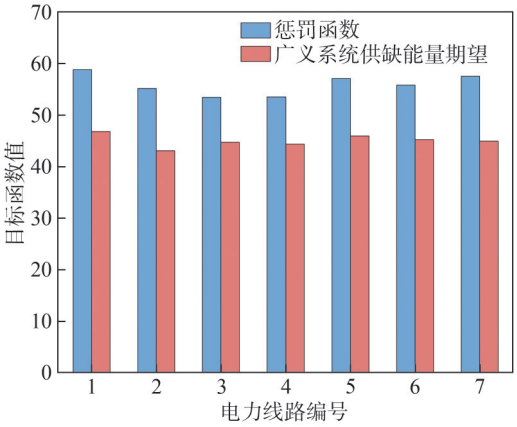


图 10　网络攻击电力线路的可靠性目标函数值

Fig. 10　Reliability objective function values of the power line under cyber attack

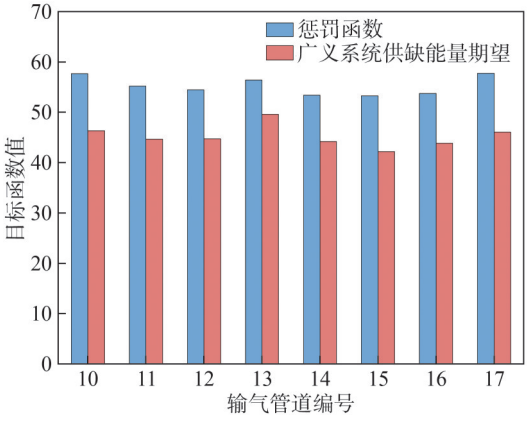


图 11　网络攻击输气管道的可靠性目标函数值

Fig. 11　Reliability objective function values of the gas pipelines under cyber attack

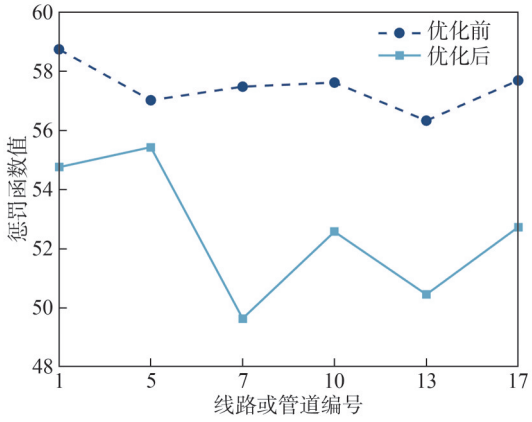


图 12　优化前后惩罚函数值

Fig. 12　Penalty function values before and after optimization

数 F_1、F_2 的值均有所下降。其中，对线路 7 进行优化后 F_1 函数值降低明显，对管道 10、13、17 优化后 F_2 的值也均有较大程度降低，优化效果可观。这也证明了本文所提方法在系统面对网络攻击时，能够有效提升系统可靠性。通过对这些关键线路及管道施加保护措施、增加运维检修次数，能够有效降低网络攻击线路和管道带来的影响，提高系统整体的可靠性。

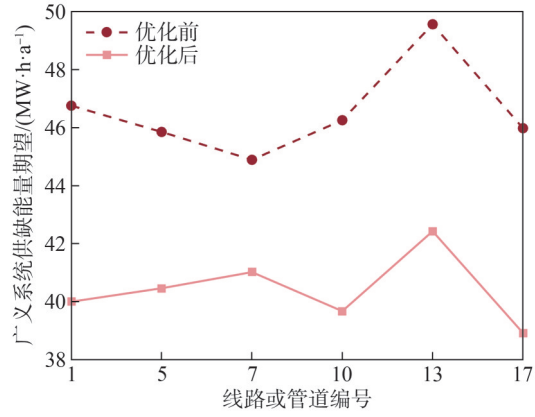


图 13　优化前后广义系统供缺能量期望值

Fig. 13　Generalized expected energy not supplied before and after optimization

6　结　论

在充分考虑信息物理系统特性与气电能源系统相互作用的基础上，建立了气电综合能源信息物理系统可靠性指标体系及多目标可靠性优化模型，并利用非支配排序遗传算法进行了求解，通过算例仿真和不同场景的测试，验证了所提方法的有效性，并得到了以下结论：

1）建立的可靠性评估指标体系更加全面、准确。在传统可靠性指标基础上建立广义系统级可靠性指标，该指标不仅考虑电力系统，也考虑了天然气系统加入的影响，同时，还将信息系统纳入考虑，综合反映了信息物理融合的气电综合能源系统的可靠性水平。该指标体系可以全面、精准地评价综合能源与信息技术相结合时系统的可靠性。

2）将信息系统对气电综合能源系统的影响转化为对故障率和平均修复时间的修正，从而能够准确地模拟信息系统加入对综合能源系统的影响。修正后的参数可兼顾多重影响因素，适用场景更广。

3）建立了多目标可靠性优化模型，其目标函数为表征系统能量损失程度的供缺期望函数以及通过可靠性相关参数表征的惩罚成本函数，利用非支配排序遗传算法分别从提高系统可靠性和降低其所需成本两个角度优化系统，优化结果使两个目标函数值均得到一定程度降低，使系统整体可靠性得到提升。

4）在信息系统故障、物理元件破坏、网络攻击影响等不同场景下，利用该模型及算法分别进行可靠性优化，测试结果表明系统可靠性均得到一定提升。证明了所提方法具有一定适用性，在不同场景下均有效可行。

本文采用的是无权重的帕累托优化，在未来研

究中，可以继续深入研究不同权重分配下的可靠性优化方式，提出不同应用场景下的优化方案；算法的比较仅针对 3 种智能算法，未来可以探究线性规划、动态规划等数学方法的应用效果；同时可进一步完善修正因子的设计，探究其不同取值对系统可靠性提升的影响。

附录见本刊网络版，扫描标题旁的二维码可阅读网络全文。

参考文献：

[1] Zhou Buxiang,Min Xinwei,Zang Tianlei,et al..Loss assessment and vulnerability analysis of an integrated electricity natural gas system under load redistribution attack[J].Advanced Engineering Sciences,2023,55(1):3–13.[周步祥，闵昕玮，臧天磊，等. 负荷重分配攻击下电–气系统损失评估与脆弱性分析[J]. 工程科学与技术，2023,55(1):3–13.]

[2] Zhou Buxiang, Sun Binjie, Zang Tianlei, et al. Security risk assessment approach for distribution network cyber physical systems considering cyber attack vulnerabilities[J]. Entropy,2023,25(1):47.

[3] Ding Maosheng, Wang Hongru, Wang Chao, et al. Review of reliability assessments for energy Internet based on cyber physical integration[J]. Power System Technology, 2021,45(2):425–436.[丁茂生，王洪儒，王超，等. 信息物理视角下能源互联网可靠性评估方法综述[J]. 电网技术，2021,45(2):425–436.]

[4] Liu Zhaoxi, Wei Wei, Wang Lingfeng, et al. An actuarial framework for power system reliability considering cybersecurity threats[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021,36(2):851–864.

[5] Chen Fan,Zhang Jicong,Zhao Meilian,et al.Operational reliability evaluation for power systems considering load redistribution attack[J]. Power System Protection and Control,2023,51(8):160–168.[陈凡，张继聪，赵美莲，等. 考虑负荷重分配攻击的电力系统运行可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制，2023,51(8):160–168.]

[6] Li Xiao, Xu Jianbing, Li Manli, et al. A security evaluation method for cyber physical distribution system considering influence of information failure[J]. Electric Power, 2022, 55(2): 73–81.[李晓，许剑冰，李满礼，等. 考虑信息失效影响的配电网信息物理系统安全性评估方法[J]. 中国电力，2022, 55(2):73–81.]

[7] Zhu Bingquan, Guo Yihao, Guo Chuangxin, et al. A survey of the security assessment and security defense of a cyber physical power system under cyber failure threat[J]. Power System Protection and Control,2021,49(1):178–187.[朱炳铨，郭逸豪，郭创新，等. 信息失效威胁下的电力信息物理系统安全评估与防御研究综述[J]. 电力系统保护与控制，2021,49(1):178–187.]

[8] Bao Yingkai, Guo Chuangxin, Zhang Jinjiang, et al. Impact analysis of human factors on power system operation reliability[J].Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2018,6(1):27–39.

[9] Liu Wenxia, Yang Yue, Li Zhengzhou, et al. Reliability evaluation of integrated energy system considering multi-energy flow transmission and thermal inertia based on sequential simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7):10–18.[刘文霞，杨粤，李征洲，等. 考虑多能流传输与热惰性的综合能源系统序贯模拟可靠性评估[J]. 电力自动化设备，2020,40(7):10–18.]

[10] Zhang Dingmao, Li Gengfeng, Li Yiran, et al. An analytical method for reliability evaluation of distribution systems with multiple distributed generations under time-varying failure rates[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(23):9075–9088.[张鼎茂，李更丰，李怡然，等. 时变故障率下含多种分布式电源的配电系统可靠性评估解析方法[J]. 中国电机工程学报，2025,45(23):9075–9088.]

[11] Eajal A A,El–Awady A,El–Saadany E F,et al.A Bayesian approach to the reliability analysis of renewables-dominated islanded DC microgrids[J].IEEE Transactions on Power Systems,2021,36(5):4296–4309.

[12] Koeppel G, Andersson G. Reliability modeling of multicarrier energy systems[J].Energy,2009,34(3):235–244.

[13] Guimarães I O,Leite da Silva A M,Nascimento L C,et al.Reliability assessment of distribution grids with DG *via* quasi-sequential Monte Carlo simulation[J]. Electric Power Systems Research,2024,229:110122.

[14] Wei Yong,Cui Junbin,Liu Xintong,et al.A reliability analysis method power system wide area protection communication system based on an improved dynamic fault tree[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 171–177.[魏勇，崔俊彬，刘辛彤，等. 基于改进动态故障树的电力系统广域保护通信系统可靠性分析方法[J]. 电力系统保护与控制，2021,49(23):171–177.]

[15] Xu Denghui, Wang Yanyan, Zhang Youbing, et al. Reliability assessment of active distribution network considering cyber failure in uncertain environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 134–142.[徐登辉，王妍彦，张有兵，等. 不确定性环境下考虑信息失效的主

动配电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化,2020,44(22):134–142.]

[16] Zhou Buxiang, Cai Yating, Zang Tianlei, et al. Reliability assessment of cyber-physical distribution systems considering cyber disturbances[J].Applied Sciences,2023,13(6):3452.

[17] Zheng Huankun, Lü Tingting, Sun Yaobin, et al. Reliability analysis of integrated energy cyber physical system considering information equipment failure[J]. High Voltage Engineering,2022,48(8):3078–3087.[郑焕坤,吕婷婷,孙耀斌,等.考虑信息设备故障的综合能源信息物理系统可靠性分析[J].高电压技术,2022,48(8):3078–3087.]

[18] Arya L D, Choube S C, Arya R. Differential evolution applied for reliability optimization of radial distribution systems[J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2011,33(2):271–277.

[19] Zhou Buxiang,Cai Yating,Zang Tianlei,et al.Reliability optimization method for gas-electric integrated energy systems considering cyber-physical interactions[J]. Energies, 2023,16(13):5187.

[20] Bakkiyaraj R A,Kumarappan N.Optimal reliability planning for a composite electric power system based on Monte Carlo simulation using particle swarm optimization[J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013,47:109–116.

[21] 王守相,王成山.现代配电系统分析[M].2 版.北京:高等教育出版社,2014.

[22] Guo Jing,Liu Wenxia,Zhang Jianhua,et al.A survey of reliability modeling and evaluation methods for active distribution cyber-physics systems[J]. Power System Technology,2019,43(7):2403–2412.[郭经,刘文霞,张建华,等.主动配电信息物理系统可靠性建模与评估方法综述[J].电网技术,2019,43(7):2403–2412.]

[23] Chen Yangrong, Li J, Xu Ang, et al. Reliability evaluation for cyber-physical smart substation[J]. Complexity, 2021, 2021:1–14.

[24] Li Xueming, Liu Zengji, Tang Yi, et al. Reliability analysis of the security and stability control device based on the Monte Carlo method[J].Energy Procedia,2018,145:9–14.

[25] Ni Wei,Lü Lin,Xiang Yue,et al.Reliability evaluation of integrated energy system based on Markov process Monte Carlo method[J]. Power System Technology, 2020, 44(1):150–158.[倪伟,吕林,向月,等.基于马尔可夫过程蒙特卡洛法的综合能源系统可靠性评估[J].电网技术,2020,44(1):150–158.]

[26] Deb K,Pratap A,Agarwal S,et al.A fast and elitist multiobjective genetic algorithm:NSGA–Ⅱ[J].IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182–197.

[27] Fonseca C M, Fleming P J. Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms(ICGA93). Urbana–Champaign: Morgan Kaufmann,1993:416–423.

[28] Coello C A C, Pulido G T, Lechuga M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2004,8(3):256–279.

[29] Montano J, Guzmán–Rodríguez J P, Palomeque J M, et al. Comparison of different optimization techniques applied to optimal operation of energy storage systems in standalone and grid-connected direct current microgrids[J]. Journal of Energy Storage,2024,96:112708.

Multi-objective Reliability Optimization Method for Gas-electric Integrated Energy Cyber-physical Systems

ZANG Tianlei[1,2], *LI Siting*[1,2], *RAN Libo*[1,2], *HE Kewei*[1,2], *YU Lan*[1,2], *ZHOU Buxiang*[1,2]

(1.School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2.Key Laboratory of Intelligent Electric Power Grid in Sichuan Province (Sichuan University), Chengdu 610065, China)

Abstract:

Objective The gas-electric integrated energy system involves close coupling among power, natural gas, and cyber subsystems. The complexity and diversity of failure causes make system reliability assessment and optimization particularly challenging. In this study, we propose a multiobjective reliability optimization method for gas-electric integrated energy cyber-physical systems.

Methods First, the effects of incorporating natural gas and cyber systems were evaluated based on traditional reliability indicators, and a set of reliability evaluation indicators was established. A correction factor was introduced to adjust the system's failure rate and mean repair time to comprehensively account for the influence of the cyber system on the reliability of the gas-electric integrated energy system. Then, a multiobjective reliability optimization model was developed, in which two objective functions represented the penalty cost associated with the corrected fail-

ure rate and mean repair time and the generalized expected energy not supplied, respectively. Accordingly, the reliability optimization model for the gas-electric integrated energy cyber-physical system was solved using a nondominated sorting genetic algorithm, and its performance was compared to those of multiobjective genetic algorithms and multiobjective particle swarm optimization algorithms. Simulation-based verification was performed using an integrated gas-electric energy system comprising an 8-node power distribution network coupled with an 11-node natural gas system as a computational example. Finally, the system's reliability was optimized under three scenarios involving cyber system failures, physical component damage, and cyber attacks, verifying the effectiveness of the proposed optimization method under different operating conditions.

Results and Discussions Following the application of the NSGA-Ⅱ multiobjective optimization algorithm, both optimization objectives decreased. Specifically, the penalty cost decreased by 12.42%, whereas the generalized expected energy not supplied decreased by 15.66%. In addition, the generalized system average interruption duration index (G_{SAIDI}) decreased by 2.35%, whereas the generalized average service availability index (G_{ASAI}) exhibited minimal variation. The generalized system average interruption frequency index(G_{SAIFI}) increased slightly, although the magnitude of this increase remained negligible.

Under the cyber system failure scenario, the application of the NSGA-Ⅱ optimization algorithm effectively mitigated the effects of system faults. Post-optimization analysis revealed substantial improvements in key reliability indicators: G_{SAIDI} decreased by 9.28%, the penalty function decreased by 11.717%, and the generalized expected energy not supplied decreased by 18.143%. These quantitative improvements demonstrated that the proposed optimization method effectively enhanced system reliability during cyber system malfunctions.

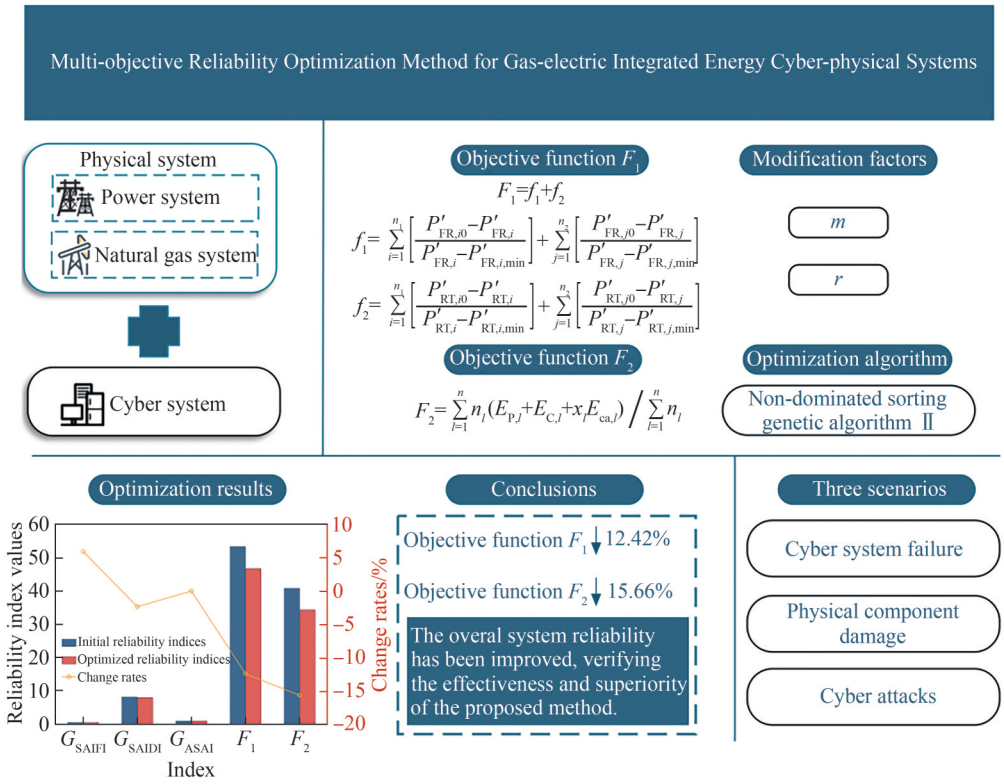
Following the destruction of the P2G coupling device and the gas turbine, all system reliability indicators increased, along with the average annual duration of energy supply shortages at each load point. Without the coupling device, the power and natural gas systems were no longer closely interconnected. The absence of energy conversion hubs between the two energy systems also resulted in severe energy supply shortages, which substantially compromised overall system reliability. These findings further demonstrated that the coupling device played a critical role in improving system reliability. Then, the NSGA-Ⅱ optimization algorithm was applied to optimize the system, resulting in reductions in both objective functions. The average annual duration of energy supply shortages at the load points also decreased, which effectively mitigated the adverse effects of coupling device destruction on system reliability and demonstrated the effectiveness of the optimization algorithm under this scenario. Following the destruction of the gas source facility, the resulting failure interrupted the natural gas supply but may also have affected the energy supply of the power system through the gas-electric coupling device, increasing the risk of energy shortages throughout the integrated system. After the application of multiobjective optimization, the penalty function and the generalized system energy not supplied decreased, with F_1 decreasing by 14.2%. These results indicated that the optimization algorithm effectively mitigated the effects of gas source failure on system reliability and further demonstrated the effectiveness of the proposed optimization method under this scenario.

When power lines and gas pipelines were subjected to cyber attacks, both objective functions increased to varying degrees compared to the scenario without cyber attacks. Attacks targeting lines and pipelines located closer to power sources, gas sources, and coupling devices exerted more substantial effects on system reliability. However, following the application of the multiobjective optimization algorithm, both objective functions decreased, demonstrating the effectiveness of the proposed optimization method under cyber attack conditions.

Conclusions The findings of the study indicate that establishing generalized system-level reliability metrics and applying the nondominated sorting genetic algorithm for multiobjective optimization of the gas-electric integrated energy cyber-physical system's reliability successfully reduced both objective functions to a certain extent, improving overall system reliability. In addition, the algorithm was applied to various scenarios, including cyber system failures, physical component damage, and cyberattack impacts, and consistently improved system reliability across all scenarios. These results demonstrate the effectiveness of the proposed model and algorithm under various conditions.

Key words: gas-electric integrated energy system; cyber-physical system; reliability optimization; multi-objective optimization; non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ

Graphical abstract:



（编辑　陈　雪）

引用格式：Zang Tianlei,Li Siting,Ran Libo,et al.Multi-objective reliability optimization method for gas-electric integrated energy cyber-physical systems[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(6):134–147.[臧天磊,李丝婷,冉励搏,等.气电综合能源信息物理系统多目标可靠性优化方法[J].工程科学与技术,2026,58(6):134–147.]