

基于数据驱动的办公楼智慧用电信息交互失效控制方法

方铭¹, 李天楚¹, 伍智鹏¹, 刘元煌¹, 陈君², 杨兹望²

(1. 海南电网有限责任公司电力科学研究院, 海南省电网理化分析重点实验室, 海南 海口 570311;

2. 海南省电力学校, 海南 海口 570311)

摘要: 差异系数扰动下, 链路层出现部分失效信息数据在链路中堆积, 链路交互拥塞, 整体控制精度出现偏差, 为了解决此类问题, 提出一种办公楼智慧用电信息交互失效控制方法。优化失效信息数据参量驱动信息, 建立基于数据驱动的用电扰动失效信息模型, 更新控制参量中对失效信息识别与抑制系数, 进行信息交互失效控制参量随机鲁棒优化, 更新输出电力信息失效控制参量, 控制办公楼智慧用电信息交互失效问题。实验结果表明, 该方法应用下, 失效控制参量识别最佳识别率为93.6%, 可以减小控制误差, 提升电力信息交互失效控制质量的能力, 能够满足办公多链路智慧用电信息交互控制应用要求。

关键词: 数据驱动; 智慧用电; 失效; 控制方法; 数据优化计算

中图分类号: TP274 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)05-0080-05

Data-driven Failure Control Method for Intelligent Electricity Information Interaction in Office Building

FANG Ming¹, LI Tian-chu¹, WU Zhi-peng¹, LIU Yuan-huang¹, CHEN Jun², YANG Ci-wang²

(1. Hainan Key Laboratory of Physical and Chemical Analysis of Power Grid, Hainan Power Grid Research Institute,

Haikou 570311 China;

2. Hainan Electric Power School, Haikou 570311 China)

Abstract: Under the disturbance of the number of difference systems, some failure information data in the link layer are piled up in the link, the link interaction is congested, and the overall control accuracy is biased. In order to solve this problem, a failure control method for intelligent power information interaction in office buildings is proposed. It optimizes the data parameter driving information of failure information, establishes the failure information model of power consumption disturbance based on data driving, updates the identification and inhibition coefficient of failure information in control parameters, conducts random robust optimization of information interaction failure control parameters, updates the output power information failure control parameters, and controls the intelligent power consumption information interaction failure of office buildings. The experimental results show that the optimal identification rate of failure control parameters is 93.6%, which can reduce control error, improve the ability of power information interaction failure control quality, and meet the requirements of multi link intelligent power information interaction control application on highways.

Keywords: data-driven; intelligent use of electricity; failure; control method; data optimization calculation

0 引言

随着我国网络信息建设的不断完善, 在网络建设依托下数字化产业迅速崛起, AI、大数据计算、云端处理等高尖端网络开发产业纵深发展速度加快。其中办公楼智慧用电信息交互控制, 为能源合理利用, 新能源智能调配, 降低电能资源开销等方面有着积极的意义。但是, 其核心控制主要依托网络数据的高速运算, 网络状况、数据交互状态、信息交互精度都会影响最终的控制效果。经过实际应用发现, 电力信息在链路传输过程中, 会受到差

异噪声影响, 形成无效交互信息数据, 造成交互信息通道链坐标系中的扰动链, 降低控制精度与控制质量。基于上述问题, 文献[1]提出利用信息交互过程中扰动激励模式完成电感数据收集, 并通过对故障数据的分析, 得到交互失败控制数据参量, 通过期望值赋予构建控制模型, 以此达到优化控制效果的目的。文献[2]提出考虑模型与数据双重驱动的电力信息物理系统动态安全防护研究综述, 针对电力信息状态防护所采用的方式为双重驱动, 虽然能够精准构建电力状态模型, 但是在适应度方面存在很大的局限性。上述两种现阶段有效方法均无法在智慧用电信息交互失效控制上发挥作用。基于上述问题与现

*基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(073000KK58200008)

收稿日期: 2023-12-19

状,以海南电网有限责任公司电力科学研究所的某楼宇用电智能监控与能效提升系统为例,提出一种可以适用于智慧用电信息交互失效控制,且在根源上解决现有问题的方法,并对方法实现过程进行详细论述。

1 数据驱动的引入与控制优化计算

1.1 建立基于数据驱动的用电扰动失效信息模型

为了更好地了解办公楼智慧用电信息交互失效控制参量,对其失效扰动数据进行模型建立,基于交互失效数据的驱动特征,计算采用数据驱动中DEH算法^[3-4]来完成。根据用电信息交互过程中电子信息链坐标系下扰动信息电磁同步交互方程如式(1)所示, $T_e(k)$ 、 $\psi_s(k)$ 、 $\delta_s(k)$ 、 p 、 ψ_f 与 L_d 分别代表即时状态下 k 时间点对应的交互信息流传输距离、初始信息交互链路幅值、数据切换频率及传输链路并发数量、正常信息链系数与 d 层交互信息之间的电感参数。

在不考虑电子信息链坐标系下差分电子信息流影响的条件下,对交互信息流中点电压系数进行矢量增幅,获得 $V_s(k)$ 并将其对应匹配到 Δt 时间下的电子信息链坐标系中的扰动链 $\psi_s(k+1)$ 如图1与式(2)所示,其中: α 代表增幅矢量电压系数与电子交互信息链坐标系扰动链 $\psi_s(k)$ 的生成位置点 θ_{ψ_s} 的驱动值; q 代表过程变量; $\Delta\theta_s$ 代表电压矢量激励下的扰动链驱动变化系数。

$$T_e(k) = \frac{3p\psi_f}{2L_d} \psi_s(k) \sin \delta(k) \quad (1)$$

$$\psi_s(k+1) = \psi_s(k) + V_s(k)\Delta t \quad (2)$$

不考虑扰动信息链自身衰减性^[5],根据余弦定理与正弦定理可以计算 $V_s(k)$ 驱动激励后第 $k+1$ 周期的扰动信息链的驱动值与扰动范围分别为:

$$\psi_s(k+1) = \psi_s(k) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \quad (3)$$

$$q = \frac{V_s(k)\Delta t}{\psi_s(k)}$$

$$\delta(k+1) = \delta(k) + \Delta\delta$$

$$= \delta(k) + \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}} \quad (4)$$

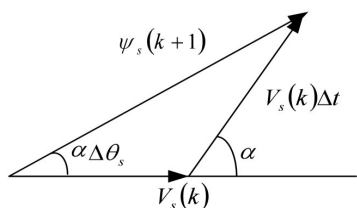


图1 链坐标系中扰动链运动变化过程

将式(3)与式(4)代入式(1)可得链路交互信道中扰动信息在链路输出层中的方程式,即基于数据驱动的用电

扰动失效信息模型为:

$$T_e(k+1) = \frac{3p\psi_f\psi_s(k)}{2L_d} \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \times \left[\sin \left[\delta(k) + \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}} \right] \right] \quad (5)$$

1.2 基于数据驱动的信息交互失效控制参量随机鲁棒优化

基于上述模型对其造成失效控制的参量进行进一步深度优化,考虑到失效控制扰动量具有随机性,因此在优化计算上采用驱动数据中的不确定性因素来完成计算。对于采用的不确定因素优化方案,其中核心优化变量为扰动控制系数的鲁棒系数,其具有扰动性与不确定性,直接反映控制优化效果的好与坏,因此又从交互控制过程信息决策入手,将电力信息调度资源量与实际接收调度量,转化为两阶段的驱动决策问题^[6-7],以此实现控制参量鲁棒系数的优化。基于数据驱动下不确定因素阶段问题的ARO算法^[8],可将优化过程中的两阶段调度问题描述为:

$$\min_{x \in X} g(x) + \max_{\xi \in U} \left(\min_{y \in \Omega(x, \xi)} f(y) \right) \quad (6)$$

式中: U 代表动态系数 ξ 的不确定因素系数值的集合。

由式(6)可知,上述不确定因素集合的设定直接影响失效控制鲁棒系数的优化效果,因此对其中的多维度不确定性因素进行全局表达,即:

$$U = \left\{ \xi \mid \xi_i = \mu_i + \Delta\xi_i z_i, \quad -1 \leq z_i \leq 1, \sum_i |z_i| \leq \Gamma, \forall i \right\} \quad (7)$$

式中: ξ_i 代表第 i 个动态系数; μ_i 代表 ξ_i 的优化期望系数; $\Delta\xi_i$ 是 ξ_i 所对应系数中的最大变化幅度; z_i 代表变量系数整数值; Γ 代表不确定性因素优化系数数量,通过改变 Γ 随影下数值大小可以实现优化不确定因素对应系数性集合大小的效果。

基于上述计算可知,鲁棒策略优化关键在于失效信息控制中不确定性因素的转变的两个阶段,因此提出优化着重对其两个阶段参量进行优化,具体如下。

(1) 多维度不确定因素的全局集合优化

对多维度不确定因素的全局集合进行高精度参量局部差分建模,根据1.1部分建立的模型,通过数据驱动分布的差分特征^[9-10],将动态变量系数对应的数据与时间动态时序进行耦合^[11],得到数据驱动的动态不确定性集合为:

$$U \left\{ \xi_t \mid \underline{\xi}_t(\xi_{t-1}) \leq \xi_t \leq \bar{\xi}_t(\xi_{t-1}) \quad \forall t \right\} \quad (8)$$

式中: ξ_t 代表 t 时间点对应的动态系数值; $\bar{\xi}_t$ 与 $\underline{\xi}_t$ 分别代表 t 时间点对应的动态系数值 ξ_t 的最大值与最小值,其值与 $t-1$ 时间点对应的动态系数值相互影响。

利用差分密度函数,对其不确定性集合进行优化函数转换,即:

$$U = \left\{ \xi \left| \begin{array}{l} F_i(\alpha) \leq \xi_i \leq F_i(1-\alpha) \\ \sum_i (1-\eta_i \Gamma) \mu_i \leq \sum_i \xi_i \leq \sum_i (1+\eta_i \Gamma) \mu_i \end{array} \right. \forall i \right\} \quad (9)$$

式中: $F_i(\alpha)$ 代表可靠系数 α 下 ξ_i 对应函数值的差分位数; η_i 代表 ξ_i 的相对误差值。

考虑到第一阶段后期控制参量不确定性因素集合中不同个体变量系数精度存在标准差异^[12-13],将集合中存在差异的个体进行重新集合,得到新的不确定性因素系数差异集合 U_j ,与原始集合进行并集得到:

$$U = U_1 \cup U_2 \cup \dots \cup U_j \cup \dots \cup U_J \quad (10)$$

其中,新的不确定性因素系数差异集合 $U_j(j=1,2,\dots,J)$ 为:

$$U_j = \left\{ \xi_j \mid \xi_j = \mu_j + s_j \sqrt{\psi_j} \Lambda_j \delta \quad \|\delta\|_\infty \leq 1, \|\delta\|_1 \leq \Gamma_j \right\} \quad (11)$$

式中: ξ_j 代表新的不确定性因素系数差异集合 U_j 中的动态系数; μ_j 代表新的不确定性因素系数差异集合 ξ_j 的优化目标值; s_j 与 ψ_j 代表第 j 个新的不确定性因素系数差异集合的参数; Λ_j 代表标准统一优化比例值; δ 代表随机扰动残值; $\|\cdot\|_\infty$ 与 $\|\cdot\|_1$ 分别代表无穷范数与1范数函数; Γ_j 代表新的不确定性因素系数差异集合 U_j 的不确定因素优化量,通过改变 Γ_j 系数大小控制 δ 的扰动范围,从而调整新的不确定性因素系数差异集合标准量优化范围的大小。

(2) 根据上述计算参量状态,进入第二阶段优化,根据数据驱动不确定性因素优化情况,引入椭圆不确定性集合对其进行输出参量关系整理,得到失效控制参量的不确定性因素优化关系集合,即:

$$U = \left\{ \xi \mid (\xi - \mu_0)^T \Sigma_0^{-1} (\xi - \mu_0) \leq \Gamma \right\} \quad (12)$$

式中: μ_0 代表动态系数 ξ 的优化输出目标量; Σ_0 代表动态系数 ξ 的实际优化输出矩阵。

1.3 电力信息失效控制参量的更新输出

完成链路控制器参量的输出优化后,优化参量转存至链路滤波器,在滤波器中数据信号会经过信息模糊处理^[16],在数据驱动差分作用下,信息流会被划分为2个等级,分别对应指标常规数据与无效数据,指标函数关系式为:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\} \quad (13)$$

数据判定指标的评定关系式为:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} \quad (14)$$

根据正常数据控制交互下的正态属性,将滤波器中优化量进行正态信息差分计算,通过滤波器自身的模糊属性,结合正态差分特征^[14-15],完成失效控制量的提取,提取用到的正态模糊隶属函数为:

$$r(u) = e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (15)$$

式中, $r(u)$ 代表正态属性变量 u 的隶属度, μ 代表差分分布目标系数, σ 代表高斯函数宽度。

将识别划分函数与失效控制系数隶属度函数进行关联计算,得到两个关于指标判定的函数描述解析式为:

$$r_{abnormal}(u) = \begin{cases} 0 & u \leq 0 \\ e^{-\frac{u^2}{2\sigma_0^2}} & 0 < u \leq \mu_1 \end{cases} \quad \sigma_0 = \frac{\mu_1}{3} \quad (16)$$

$$r_{careful}(u) = \begin{cases} e^{-\frac{(\mu_2-u)^2}{2\sigma_{21}^2}} & \mu_1 < u \leq \mu_2 \\ e^{-\frac{(\mu_2-u)^2}{2\sigma_{22}^2}} & \mu_1 < u \leq \mu_2 \end{cases} \quad \sigma_{21} = \frac{\mu_2 - \mu_1}{3} \quad \sigma_{22} = \frac{\mu_3 - \mu_2}{3} \quad (17)$$

若包含 n 个互相独立的决策单元 FZU_j ,每个决策单元分别对应包含 m 种输入 $x_j=(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$ 及 s 种输出 $y_j=(y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj})^T$,那么第 k 个决策单元的对应失效控制判定模型为:

$$\begin{cases} \max \frac{u^T y_k}{v^T x_k} = E_k \\ s.t. \frac{u^T y_j}{v^T x_j} \leq 1, j=1,2,\dots,n \\ u \geq 0, v \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中, v 与 u 依次代表输入及输出加权值, E_k 代表 FZU_k 所对应失效控制系数的有效影响指数, $0 \leq E_k \leq 1$ 。式(18)是一个局部失效控制分量判定模型,计算过程较为复杂,当

$t = \frac{1}{v^T x_k}, \xi = tv, \mu = tu$ 时,将式(18)转变为一个等价数据驱动线性控制模型:

$$\begin{cases} \max \mu^T y_k = E_k \\ s.t. \xi^T x_j - \mu^T y_j \geq 0, j=1,2,\dots,n \\ \xi^T x_k = 1 \\ \xi \geq 0, \mu \geq 0 \end{cases} \quad (19)$$

将一组加权系数导入上述模型中,并予以导出可得失效控制模型的模糊收敛关系模型:

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^m \omega_i \bar{y}_{ik} = E_k \\ s.t. \sum_{i=1}^m \omega_i \bar{y}_{ij} \leq 1, j=1,2,\dots,n \\ C \cdot \omega = b \\ \omega_i \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中, \bar{y}_{ij} 代表模糊输出参数, $\omega=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$ 代表每个控制个体系数加权后的参量值, C 为 $c \times m$ 维的优化矩阵, $b=(b_1, b_2, \dots, b_m)^T$ 代表优化矢量系数。

至此,提出的控制方法全部计算过程完成计算,所得控制关系即为优化后的电力信息失效控制关系,根据输

出关系,可对实际交互信息失效函数进行修正,进而实现对失效控制量的控制。

2 应用测试

测试采用对比方式得出测试结论,其中数据样本来源于实际应用实例数据,通过仿真测试工具在无人扰动因素的环境下完成。为了更为直观地展现测试结果,引入基于神经网络的电力信息交互失效控制方法、基于随机森林算法的信息交互失效控制方法分别为对照A组、对照B组,提出方法为测试I组,对比实例样本环境条件下,3种不同控制方法的控制指标。

2.1 设置测试条件

为了达到测试无人扰动测试要求,测试过程在Onos 3.6.1控制器为核心的智能电路信息控制操作系统下完成,其中样本数据环境作业面由mininet 2.6.0提供保障,数据测试过程中的数据监控采用仿真工具VMware15作为数据记录载体。

由无人值守测试工具在实例数据中抽取的电力信息交互数据无效控制样本采样,如图2所示。

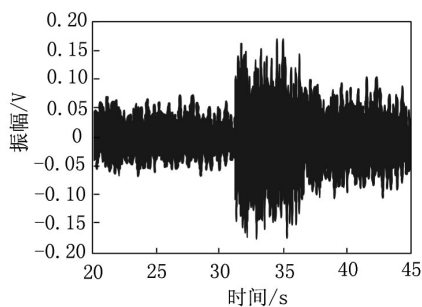


图2 电力信息交互数据无效控制样本采样

图2中,信号被分为若干量化级,生成样本采集幅度即将决定取值的过程量化,在45s的交互数据无效控制样本采样时间内,量化后的样本幅度为离散的量级值,展现样本幅值特征。

2.2 交互信息无效数据识别精准度性能指标测试

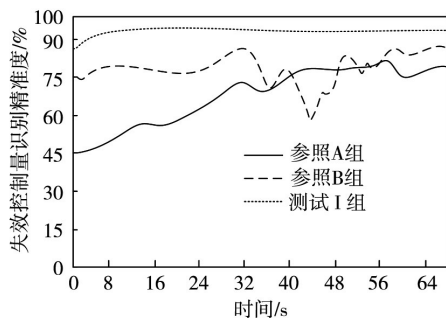


图3 交互信息无效数据识别精准度性能指标测试结果

以生成的无效信息交互样本采样数据为测试源,对三种不同控制方法进行无效数据识别测试,根据每种方

法对无效信息数据识别的结果对比分析,得出测试结果,测试结果如图3所示。

根据图3的测试结果可知,在相同测试环境下3种不同控制方法对失效控制参数的识别效果各不相同,经过统计,参照A组的初始识别精准度为45%,随着时间的推移,控制方法中神经网络发挥作用,识别精准度一路飙升,但整体增长并不稳定,且最终终止时的识别精准度为71.4%;参照B组相较参照A组,整体波动较大,说明其方法对失效信息量的识别存在缺陷,虽然初始识别率优于参照组A,为75%;但是最终识别率与参照组A仅差9.7%;测试I组同上述两种方法相比,在整体稳定上具有较好的指标数值,从初始数值上看,87.6%的识别率远高于参照A组与参照B组的初始数值,并且经过稳定输出后,终止识别率依然可以保持在93.6%,说明测试I组的各项指标均达到该环节测试指标,且表现最佳。

2.3 失效控制数据的驱动控制测试

为了进一步验证本文提出方法的可靠性,对上述测试数据进行连续循环压力测试,测试样本循环次数为15次,样本数据参量保持不变,测试对象为参照A组、参照B组、测试I组,测试项目为失效控制数据的驱动控制测试,测试记录目标数据为各参测方法的控制误差数据,并对其进行比较统计,结果如表1所示。

表1 失效控制数据的驱动控制测试结果

| 循环次数/次 | 对照A组控制误差/ $\mu \cdot V_m$ | 对照B组控制误差/ $\mu \cdot V_m$ | 测试I组控制误差/ $\mu \cdot V_m$ |
|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 2.26 | 2.41 | 1.62 |
| 2 | 2.26 | 2.41 | 1.62 |
| 3 | 2.26 | 2.43 | 1.35 |
| 4 | 2.26 | 2.28 | 1.35 |
| 5 | 2.26 | 2.56 | 1.26 |
| 6 | 2.26 | 2.27 | 1.24 |
| 7 | 2.26 | 2.59 | 1.18 |
| 8 | 2.45 | 2.61 | 1.18 |
| 9 | 2.45 | 2.26 | 1.06 |
| 10 | 2.47 | 2.61 | 1.04 |
| 11 | 2.61 | 2.61 | 0.87 |
| 12 | 2.68 | 2.54 | 0.84 |
| 13 | 2.68 | 2.58 | 0.82 |
| 14 | 2.68 | 2.56 | 0.73 |
| 15 | 2.68 | 2.54 | 0.71 |

根据表1所示三种不同控制方法对失效控制参数的驱动控制误差值可知,测试I组的控制效果最好,虽然在控制稳定方面存在不足,但是整体对失效控制参数的抑制作用发挥良好,能够将失效数据驱动量影响控制在最小范围,即误差最小值。由此可以得到测试I组的控制性能具有较高的可靠度,满足实际应用标准。

3 结束语

通过对智慧办公楼用电信息失效数据交互特征分析,锁定影响正常链路交互的失效信息控制参量,通过利用数据驱动算法,对失效数据进行参量梳理,并成功实现对失效控制参量的更新优化,改善整体控制效果,解决控制误差偏大,整体控制质量偏低问题的同时,为数据驱动技术在电力信息交互领域的应用,提供了实例数据。但是从实验中可以看到提出方法在控制稳定性方面还不完善,需要通过相关参量的约束才能使其具有更好的稳定效果,因此在日后研究中可以侧重稳定条件参量匹配方向,对其进行升级优化,使方法更加完善。

参考文献:

- [1] 许娇,吕飞鹏.扰动激励下智能变电站保护信息交互失效控制[J].计算机仿真,2022,39(4):71-75.
- [2] 杨杰,郭逸豪,郭创新,等.考虑模型与数据双重驱动的电力信息物理系统动态安全防护研究综述[J].电力系统保护与控制,2022,50(7):176-187.
- [3] 陈家琪,王琦,汤奕,等.考虑双侧特征的电力信息物理系统异常检测方法[J].电网技术,2022,46(6):2339-2348.
- [4] 张雅维,马霄鹏.智慧配电管理系统中的负荷重要性分析[J].智能建筑电气技术,2021,15(4):25-27.
- [5] 刘文霞,富梦迪,李涵深,等.计及信息失效的柔性配电系统集中分散协调控制策略优化[J].电工技术学报,2021,36(22):4749-4759.
- [6] 许平静.基于大数据的智慧用电系统设计[J].电子技术与软件工程,2021(11):181-182.
- [7] 刘靖雯,谭阳红,邓勇.面向电力信息物理系统的端边云雾

协同模型[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(11):74-81.

[8] 邓勇,彭敏放,刘靖雯.电力信息物理系统建模和信息攻击机制分析[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(10):10-17.

[9] 张希弘,赵奇,陈中,等.考虑信息失效的有源配电网两阶段随机性控制方法[J].电力系统自动化,2021,45(20):67-75.

[10] 罗涛,孙阔,张章,等.多能源数据驱动的电力信息物理系统综合态势感知模型[J].可再生能源,2021,39(3):395-400.

[11] 闫承秉.基于大数据的电力信息系统网络安全分析[J].石化技术,2020,27(7):162-163.

[12] 李存斌,计丽妍,赵德福,等.基于数据驱动的电力系统灾变演化及防控研究与展望[J].电力系统自动化,2020,44(9):1-11.

[13] 刘文霞,韩辉.多重控制信息失效下配电网电压波动性的评估[J].电力系统自动化,2020,44(9):69-77.

[14] 丁晓,江明.双网隔离环境下电力物联网内外信息交互设计[J].信息技术,2020,44(3):130-133,138.

[15] 邢积超,陈楚湘,朱兆梁,等.双层相依网络化指挥信息系统级联失效研究[J].控制与决策,2020,35(12):3017-3025.

[16] 王磊,樊博,张晓东,等.基于云平台的电力用户远程网络充值应急处理服务系统[J].自动化技术与应用,2023,42(6):82-86.

作者简介:方铭(1988-),女,本科,工程师,研究方向:电测仪表、智慧用电量测分析。

(上接第51页)

参考文献:

- [1] 谭祺钰,赖喜德,陈小明,等.基于人工蜂群算法的供水泵站多目标优化与决策[J].水电能源科学,2022,40(7):124-127,92.
- [2] 王阳,李志鹏,刘灿,等.基于人工蜂群算法的供水泵站运行优化研究[J].流体机械,2021,49(2):71-76.
- [3] 张明惠,董胜刚,贡文明,等.一种燃气蒸汽联合循环机组自启停控制系统[J].工业控制计算机,2022,35(10):15-16.
- [4] 申宏伟.汽轮机启动控制系统优化设计及应用[J].机械研究与应用,2021,34(1):161-163.
- [5] 朱博文,龚懿,陈再扬,等.基于Pareto最优解的跨流域调水泵站多目标优化运行研究[J].灌溉排水学报,2022,41(2):131-139.
- [6] 穆锦标,穆继亮,邹杰,等.低功耗自供电机机械设备状态监测系统[J].中北大学学报:自然科学版,2021,42(4):355-360.
- [7] 林伟强,杨楠,林孜敏,等.斯里兰卡阿塔纳水厂取水泵站工程设计及优化运行[J].中国给水排水,2021,37(2):56-60.
- [8] 李穆寅,曹志远,李佳旭,等.计及供电—供水系统耦合关系的配电网故障恢复优化决策方法[J].电力建设,2021,42(3):54-60.
- [9] 徐维甲.城市轨道交通供电设备智能运维系统[J].城市轨道交通研究,2021,24(9):212-215,219.
- [10] 刘宛秦,秦博宇,张若微,等.模块化多电平换流器型多端高压直流输电控制参数优化方法[J].电机与控制学报,2021,25(2):

10-18,27.

[11] 徐瑞兰,徐磊,陆林广,等.泵站超大扩散角压力前池立柱阵列整流的优化设计[J].水利水电技术,2021,52(2):134-145.

[12] 林圣,李楠,杨超,等.基于可线性化Wiener过程的牵引供电设备状态检修决策研究[J].铁道学报,2021,43(4):51-59.

[13] 张钢,郝峰杰,王运达,等.城轨柔性牵引供电系统及优化控制研究[J].电工技术学报,2022,37(S1):153-162.

[14] 李军.城市轨道交通供电设备运维智能管控系统研究[J].都市轨道交通,2021,34(1):149-154.

作者简介:徐玲玉(1980-),女,本科,高级工程师,研究方向:水利行业电气设计。