

基于粒子群优化算法的电厂管道设备磨损预测 与检修计划模型研究

毕斯琴, 丁唯

中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉市武昌区中南二路 12 号 430064;

Research on Maintenance Scheme Model of Power Plant Pipeline and Equipment Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

BI Si-qin, DING Wei

Central Southern China Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group
Corporation, Wuhan.

摘要: 燃煤电厂输送管道及设备的运行健康状况影响着电厂的安全生产。目前, 国内外有关电厂管道及设备的磨损预测与检修管理技术仍然存在一些问题, 主要表现为: 故障诊断范围小、故障定位不准确、误报警率高、以阈值预测为主的测量不精确、定期检修计划缺乏判断标准等。针对以上问题, 本文提出了一种基于粒子群优化算法的电厂磨损预测与检修计划模型, 并验证了该方法的有效性。该算法对初值的要求低, 无需遗传算法的交叉变异等操作, 收敛速度快, 容易实现。与人工经验制定的检修方案相比, 所耗时间少, 能够快速寻找到所有可能方案中的最优方案并降低成本, 同时还能大大提升电厂检修效率, 为检修计划编制、管道及设备检修采购、检修资源的准备和调度计划等提供决策支持。

关键词: 电厂; 粒子群优化算法; 磨损预测; 检修计划

ABSTRACT: The operation health of transmission pipeline and equipment affects the safety production of coal-fired power plant. At present, there are still some problems in the wear prediction and maintenance management technology of power plant pipeline and equipment at home and abroad, which are mainly characterized by small fault diagnosis range, inaccurate fault location, high false alarm rate, inaccurate wear threshold prediction, and lack of judgment standards for regular maintenance plan. To solve the above problems, a model of power plant wear prediction and maintenance planning based on particle swarm optimization algorithm is proposed in this paper, and the effectiveness of this method is verified. The algorithm model has low requirement on initial value, no need of cross mutation operation of genetic algorithm, fast convergence speed and easy implementation. Compared with those maintenance plan developed by manual experiences, this algorithm consumes less time, which means the optimal solution will quickly be obtained and costs be reduced. Meanwhile, the maintenance efficiency of the power plant will be greatly improved, providing decision support for the preparation of maintenance plan, pipeline and equipment maintenance procurement, maintenance resource preparation and scheduling plan.

KEY WORD: power plant; particle swarm optimization algorithm; wear prediction; maintenance schedule

1 引言

目前, 国内外电厂检修计划普遍采用固定时间的计划检修模式, 即通过管道及设备定期检修或者更换保证电厂正常运行, 偏向于劳动力密集型的方式。这一方式主要存在故障诊断范围小、故障定位不准确、误报警率高、以阈值预测为主的测量不精确、定期检修计划缺乏判断标准等问题^[1]。

大部分电厂检修管理通常都采用人工用笔记录, 未能信息化和规范化。甚至一些电厂的有关工作人员对管道及设备的保养缺乏意识^[2], 专业知识不足, 导致不少设备早已超出其使用期限却仍在继续使用。再加上工作人员把部分原来出现故障或可能故障的设备直接投入电厂使用中, 而并未做好使用之前的检修, 以至设备在使用的过程中故障频发, 有时不得不在中途停炉。如果检修不合理, 不仅增加发电成本, 还会降低发电效率,

甚至危害生产^[3]。管道及设备在出现大的问题之后产生的检修费用，更是远远超出故障发生之前进行检修而产生的费用。

本文以基于粒子群优化算法的电厂管道及设备磨损预测与检修计划模型为主要研究内容^[4]，该模型与人工经验制定的检修方案相比，耗时少，能够快速寻找到所有可能方案中的最优方案降低成本，同时还大大提升电厂检修效率，为检修计划编制、管道及设备检修采购、检修资源的准备和调度计划^[5]等提供决策支持。并将推动检修模式从传统粗放式管理向精细化管理转变，实现电厂检修的“降本增效”。

2 检修计划模型搭建

根据实际磨损程度对应的检修计划对粒子进行编码，每个粒子代表一种对管道设备检修计划的预测情况，即在解空间中制定粒子的位置，粒子与解一一对应，模型的解为所有可能的检修计划方案^[6]。每个粒子的适应度值通过适应度评价函数确定，搜索方向和距离则是根据粒子速度决定，所有粒子跟踪当前的最优粒子获得解空间中的最优解。

模型首先设定粒子群的规模，具体数量以实际工况为准，本文的仿真模型将不同用途的管道及设备的检修方式组合设置为500种检修计划方案。接着设置最大迭代次数，每一次迭代过程中粒子追随本粒子已经寻到的最优解 P_m 和全局已经寻到的最优解 P_g 。在寻找最优解过程中粒子的位置受到限制条件的制约，接着根据所求的值优化本粒子的速度和位置，达到最大迭代次数后的全局最优解，即为最终的寻优结果，全局最优解的位置即代表最优的磨损程度预测。

基于粒子群算法的管道及设备磨损预测模型优化过程主要包括两个阶段，初始化阶段和寻优阶段。

2.1 初始化阶段

设每个粒子代表一种对管道设备检修计划的预测情况，粒子种群数量为 N ，初始化阶段需要对每个粒子进行编码。预测的管道及设备磨损程度、所有管道设备的数量以及磨损所对应的检修计划分别记为 N_e 、 N_r 、 N_d ，因此每个粒子的位置

矢量表示为 $Z_m=(Z_{m1}, Z_{m2}, \dots, Z_{mj})$, $j=N_e*N_r*N_d$ 。其中，每一个维度表示每一段电厂管道组 e 在第 i 天是否工作，若有工作，则该维度的值为1，否则该维度的值为0。

管道及设备组 e 在管道运输介质 r 上的取值，受限于当天管道内实际流过的介质及对应工作时间，即 e 只能表示该电厂每段运输对应介质的管道设备。由于实际工况各不相同，在进行管道及设备磨损预测时，需要基于磨损最严重的运输管道或设备的磨损程度进行检修提醒，基于各部分管道及设备磨损轻重制定不同的检修计划。

2.2 寻优阶段

通过更新粒子的位置，实现对检修计划的更新。每一轮迭代过程结束后，保存单个粒子的个体历史最优解 P_m 和全局已寻到的最优解 P_r ，寻优结束得到的全局最优解即为最终的检修计划方案。

根据 P_m 和 P_r 的取值，对粒子的速度进行更新，当介质的混合物粒径和质量占比发生改变时，对于本次工作的管道及设备，磨损程度更新公式如下：

$$d_{mj}^{(k+1)} = \omega^{(k)} d_{mj}^{(k)} + c_1 r_1 (p_{mj}^{(k)} - x_{mj}^{(k)}) + c_2 r_2 (p_{gj}^{(k)} - x_{mj}^{(k)}) \quad (1)$$

其中， $x_{mj}^{(k)}$ 表示第 m 个粒子在第 k 轮迭代时的位置， $p_{mj}^{(k)}$ 表示前 k 轮第 m 个粒子的历史最优值，

$p_{gj}^{(k)}$ 表示前 k 轮最优值， r_1 和 r_2 表示[0,1]之间的随机数， c_1 和 c_2 表示学习因子， $\omega^{(k)}$ 表示惯性权重， k 表示迭代次数。

本算法采用惯性权重随迭代次数小批量梯度下降方法更新 $\omega^{(k)}$ 的值，实现快速准确的搜索和优化，具体更新公式如下：

$$\omega^{(k)} = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{k_{\max}} \times k \quad (2)$$

其中， ω_{\max} 表示最大惯性权重， ω_{\min} 表示最小权重， k_{\max} 表示最大迭代次数，通常根据试验结果确定合理的取值。

粒子检修计划基数更新完毕后，粒子的空间根据新的介质或者管道进行调整。粒子在各个维

度上的取值是一个0~1的整数，因此，在满足各方面约束的情况下，可通过模糊函数和随机的方法对粒子在空间位置进行更新，更新公式如下：

$$x_{mj}^{(k+1)} = \begin{cases} 1, \rho < \text{sigmoid}(v_{mj}^{(k+1)}) \\ 0, \text{rand}(0,1) < \Psi \\ -1, \text{rand}(0,1) > \Psi \end{cases} \quad (3)$$

其中， ρ 为[0,1]之间的随机数， $\text{rand}(0,1)$ 是取值在[0,1]的随机函数， Ψ 为受损程度值， sigmoid 函数是一种常用的模糊函数，具体公式如下：

$$\text{sigmoid}(v_{mj}^{(k+1)}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{mj}^{(k)})} \quad (4)$$

依据上述的粒子群编码及迭代策略，不断地优化管道及设备磨损预测与检修计划模型，最终得到近似的最优方案。

基于粒子群优化算法的电厂管道及设备磨损预测与检修计划模型的基本流程如图1所示。

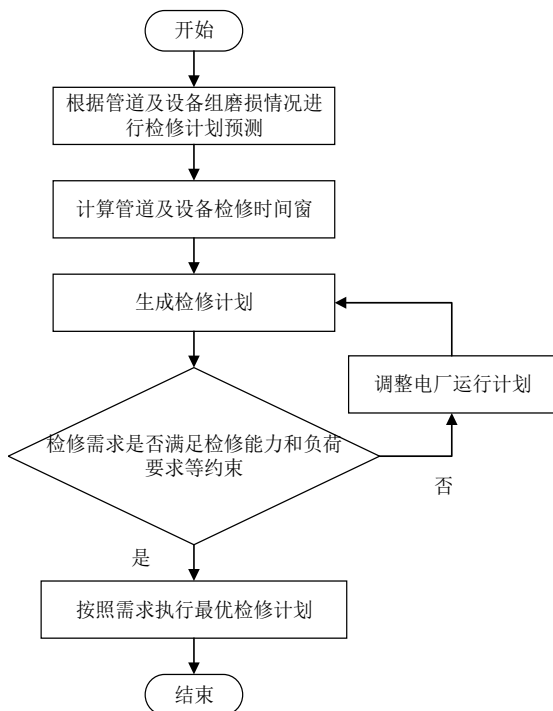


图1 基于粒子群算法的磨损检修计划流程

具体描述如下：

①根据电厂管道及设备组的使用情况和运用检修规程要求，计算设备组检修时间窗，生成初始的检修计划，在无需调整检修计划的情况下，确定电厂检修计划达到检修规范要求的周期时间分布。

②根据检修科室的检修资源和能力，以及执

行各类检修任务对应的实际检修时长，计算检修科室能够提供检修的设备组数量随时间的分布。

③根据①和②的计算结果，确定在检修科室可提供检修服务的时间区间内，达到检修规程要求的电厂设备组数量，计算可检修电厂设备组数量与需要检修的设备组数量的差值。

④当所计算的差值不小于零时，检修科室可接收的管道设备组数量达到检修条件的管道设备组数量。这表示检修科室的检修资源充足，接下来，可将全部满足检修规程规定要求的电厂设备组纳入检修科室开展相应的检修。

⑤当所计算差值小于零时，检修科室可接收的电厂设备组数量小于达到检修条件的设备组数量。这表示检修科室的检修资源不足以处理全部的满足规程要求的设备组，为提高检修效率，需对部分待检修设备组的调度计划进行调整。需启动调度计划调整算法模型，给出最佳调整计划，以确保被调动的设备组在检修资源足够的情况下，达到检修规程规定的运营时间。这样做可减少设备组的检修等待时间，同时保证电厂设备运行效率和安全。

3 仿真结果

为了验证所提方法对电厂检修计划问题的适用性，提出适应度评价函数 $F(x)$ 作为检修计划的评价指标。基于上述粒子群算法，结合设定电厂初始化信息，本次仿真采用10个粒子，进行300次迭代实验。

表1为某电厂3月份检修计划，将其作为初始信息，根据不同检修等级，调整所需时间差量上下限，计算各管道及设备最早进行检修日期和最晚进行检修日期。表2为模型参数。

表1 某电厂3月份检修计划1

管道及设备编号	检修等级	介质	最早检修日期	最迟检修日期
P-01	A	水	3月8日	3月21日
P-02	B	蒸汽	3月2日	3月15日
P-03	A	水	3月8日	3月23日
P-04	C	浆液	3月18日	4月3日
P-05	D	煤粉	3月1日	3月17日
P-06	A	油	3月10日	3月22日
P-07	B	水	3月16日	3月29日
P-08	A	蒸汽	3月3日	3月15日

表2 模型参数

名称	数量
种群数量	10
进化迭代次数	300

根据原始检修计划结果初始化，代入检修计划模型并生成检修计划集合。 A_{ij} 表示的是第 i 组管道及设备内在第 j 天所通过的介质类型 id ， B_{ij} 表示的是第 i 组管道及设备在第 j 天进行的检修项目 id ， C_{ij} 表示的是第 i 组管道及设备在第 j 天所工作的时间， D_{ij} 表示的是第 i 组管道及设备在第 j 天进行检修的项目进度， $Time$ 表示的是每一天所指代的具体日期， P_i 表示的是设备的初始检修项目级别， M 表示的是初始设备组集合， N 表示的是管道中介质组集合， $totalTime_{ij}$ 表示的是第 i 组管道及设备在第 j 天累计工作时间。

去掉不可用的管道及设备组，得到可用管道及设备组的集合 E 。其中，不可用管道及设备组集合包括三种类型：第一种为管道及设备组所在运输通道处于停工状态，在此情况下更新管道及设备组集合 E 、介质集合 R 、管道及设备组工作时间 C_{ij} 、介质类型 A_{ij} 、累计工作时间 $totalTime_{ij}$ ；第二种为正处于检修状态的设备，更新管道及设备组集合 E 、进行检修的项目进度 D_{ij} 、进行的检修项目 B_{ij} ；第三种为达到检修状态或者临时事故，马上要进行检修的管道及设备组。更新管道及设备组集合 E 、进行检修的项目进度 D_{ij} 、进行的检修项目 B_{ij} 、累计工作时间 $totalTime_{ij}$ 。

生成管道的运输介质集合 R ，完成管道及设备组的分配，并择优选择可用管道及设备组 E 中的设备进行分配，更新设备组集合 E 、设备组工作时间 C_{ij} 、介质类型 A_{ij} 、累计工作时间 $totalTime_{ij}$ 。

更新惩罚因子，若管道及设备组 E 运输介质的能力少于实际需要运输介质 R 的值，使用 N_1 表示未分配到的管道及设备组数量。若管道及设备组当天检修数量超过检修能力，使用 N_2 表示超过检修能力的次数，并计算管道及设备组所应该通过介质值损失值，以及每一组管道及设备进行检修前实际累计工作时间与规定工作时间的差值。

通过粒子群算法模型，随机生成多种解决方案，每一种方案都有其对应的适应度函数值，根据以上设计思路，迭代更新粒子的位置和速度，持续优化算法的个体最优解和全局最优解，直至

迭代完成，全局最优解即为最理想的解决方案。根据全局最优值，得出调度管道及设备组运行对应介质方案 A_{ij} 和管道及设备组进行检修项目 B_{ij} 。然后合并 A 和 B ，得到最优检修计划方案。

本次仿真设定的检修阈值为待检修管道及设备组历史工作情况。管道及设备组调度方案可作为电厂制定调度计划的参考文件，在满足电厂生产要求以及设备组运行安全的前提下，指导设备组运用方案。根据调度方案优化后的检修计划表格如表3所示，该电厂3月份进行检修设备组数量从8组调整为5组，下降37.5%，其余的3组设备组的入修日期调整至3月份之后。

经粒子群算法结果如图2、图3所示，从图2可以看出，在迭代次数不到20次时，该模型搜索到了最优方案。

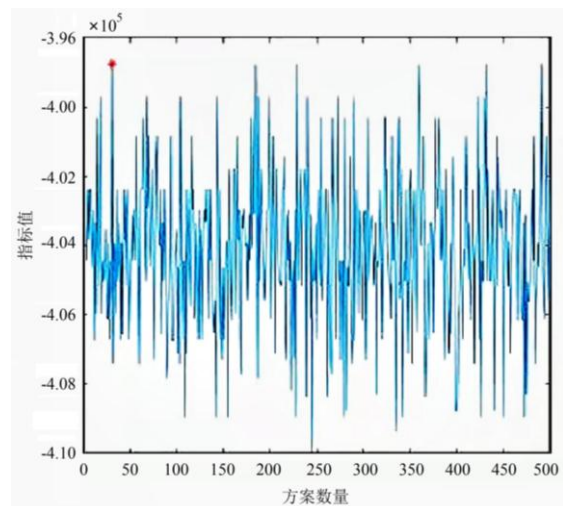
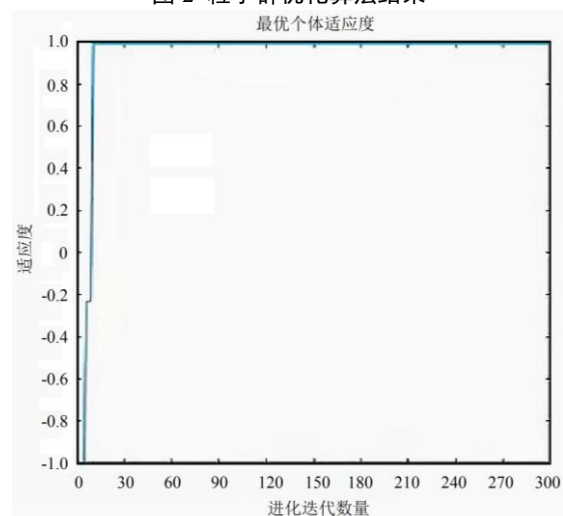
图2 粒子群优化算法结果
最优个体适应度

图3 迭代次数与最优个体适应度关系

表3 电厂3月份优化后检修计划2

管道及设备 编号	检修等 级	介质	最早检修 日期	最迟检修 日期
P-01	A	水	3月12日	3月18日
P-02	B	蒸汽	3月3日	3月11日
P-03	A	水	3月10日	3月23日
P-05	D	煤粉	3月4日	3月17日
P-08	A	蒸汽	3月5日	3月13日

为了验证本论文所提基于粒子群算法的检修计划方法的有效性,将所提方法与人工经验编制的检修计划方案进行对比分析,主要对比检修计划评价指标和计算时间两个指标,对比结果如表4所示,由上述仿真结果可知,基于粒子群优化算法编制检修计划方案和人工经验编制相比:评价指标明显更优,降低了37.5%以上;耗时大幅减少,前者耗时在10s,后者耗时1周。

表4 检修计划编制方案对比

名称	检修计划方案评价指标	耗时
基于粒子群优化 算法	3.95×10^5	10秒
人工经验编制方 法	6.31×10^5	1周

4 结语

智能、高效是电厂故障预测与检修管理技术的发展趋势,结合现有的物联网技术,开展电厂关键管道及设备智能检测,对推动电厂检修水平提升、构建智能检修体系具有重要意义。本文主要针对国内外电厂管道及设备磨损预测与检修管理方面存在的故障诊断范围小、故障定位不准确、误报警率高、以阈值预测为主的测量不精确、定期检修计划缺乏判断标准等问题,提出粒子群优化算法以提高电厂检修效率。

运用粒子群优化算法分析提取电厂历史检修数据特征,探索检修模式从“计划检修”向“计划检修+预测性检修”转变,这种转变能够对电厂检修的实际工程应用提供指导。

致谢

值此论文完成之际,首先向我的科室领导及前辈致以最真诚的谢意!在论文的选题立意、资料查询、理论分析、研究以及最后的审稿、定稿等方面的每个环节,给予我细致入微的指导和帮助,对此我谨致以最诚挚的谢意!

向我的家人、朋友及同事致以深深的谢意,在学习的时间里,家人、朋友及同事的关怀和支持是我努力学习的动力,也使我顺利地完成论文。我将在以后的学习和工作中,不断努力,积极向上,奋发进取。

参 考 文 献

- [1] 隗博闻. BJ 电厂检修部绩效考核体系优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [2] 潘曰志, 潘广旭. 燃煤电厂检修部门管理改善方法[J]. 电力设备管理, 2020, (01): 60-62.
- [3] 罗映梅, 谭志勇. 电厂检修隔离与管控系统的研究与应用[J]. 电气时代, 2020, (04): 72-75.
- [4] 苗建杰, 李德波, 李慧君, 等. 改进粒子群算法在燃煤电厂中的应用现状及展望[J]. 环境工程, 2023, 41(S1): 354-362.
- [5] 刘雨佳, 樊艳芳, 白雪岩, 等. 基于优化计算型区块链系统的虚拟电厂模型与调度策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 4178-4191.
- [6] 李丁师. 基于 KPCA-IDEPSO-PNN 的高加系统故障诊断研究[D]. 河北: 华北电力大学, 2021.

作者简介:

毕斯琴(1992-), 女, 湖北, 硕士研究生, 研究方向为人工智能。
丁唯(1999-), 女, 湖北, 硕士研究生, 研究方向为最优控制理论。