

# 基于风险评估的电动汽车直流充电站运维策略

方华亮<sup>1</sup>, 廖家齐<sup>1</sup>, 徐彦<sup>1</sup>, 钱科军<sup>2</sup>, 周承科<sup>1</sup>, 丁煜蓉<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国网江苏省电力有限公司苏州供电分公司, 江苏 苏州 215000)

**摘要:**随着电动汽车保有量的迅速增长, 针对当前直流充电站运维工作的粗略性和低效率, 提出基于风险评估的电动汽车直流充电站运维方法。首先建立充电站运维体系, 定义充电桩故障事件给用户造成的后果为最小时间损失(LOT), 结合故障参数建立风险评估模型, 实现系统风险量化; 通过缺供电量(ENC)对充电站进行风险追踪, 评估各站风险水平并确定运维次序。其次, 建立用户行驶与充电模型, 采用动态交通模拟计算相关风险指标。最后, 构建以经济性与可靠性为目标的直流充电站优化运维模型, 确定各站运维时长。算例结果表明, 相较于当前运维工作, 该策略在满足运维要求的同时又能够显著提高系统的可靠性, 提高了整体运维效益。

**关键词:**直流充电站; 风险评估; 交通模拟; 优化运维

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.011 中图分类号: TM93 文章编号: 1673-9140(2021)01-0096-10

## Maintenance strategy research of DC charging stations for electric vehicle based on risk assessment

FANG Hualiang<sup>1</sup>, LIAO Jiaqi<sup>1</sup>, XU Yan<sup>1</sup>, QIAN Kejun<sup>2</sup>, ZHOU Chengke<sup>1</sup>, DING Yurong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Suzhou Power Supply Company, State Grid Corporation of China, Suzhou 215000, China)

**Abstract:** With the rapid growth of the number of electric vehicles, in view of the rough and inefficient operation and maintenance of the current DC charging station, a method based on risk assessment for the operation and maintenance of DC charging stations is proposed. Firstly, this paper establishes the operation and maintenance system. The consequences of the charging pile failure event to the user is defined as the loss of time (LOT) combining the fault parameters to establish the risk assessment model and realize system risk quantification. The risk tracking of the charging station is carried out by the energy not charged (ENC). The risk level of each station is evaluated while the operation and maintenance timing is determined. Secondly, the model of driving and charging of users is built. The dynamic traffic simulation is used to calculate risk indicators. Finally, the optimal operation and maintenance model of DC charging station aiming at economy and reliability is constructed to determine the maintenance duration of each station. The results is used to calculate the relevant risk indicators imitatively. Finally, a DC charging station optimization operation and maintenance model with the goal of economy and reliability is constructed to determine the operation and maintenance time of each station. The results of simulation examples show that compared with the current operation and maintenance work, this strategy can not only meet the operation and maintenance requirements, but al-

收稿日期: 2020-04-24; 修回日期: 2020-06-08

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0904200); 国网江苏省电力公司科技项目(J2018073)

通信作者: 方华亮(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统可靠性方面的研究; E-mail: hlfang@whu.edu.cn

so significantly improve the reliability of the system and improve the overall operation and maintenance efficiency.

**Key words:** DC charging station; risk assessment; traffic simulation; optimized operation and maintenance

随着能源紧缺与环境污染问题的日益突出,电动汽车作为“零排放”的新能源交通工具已进入快速发展阶段。据统计,截至2020年,中国电动汽车总量将超过500万辆<sup>[1]</sup>。近年来,电动汽车用户数量急剧上升,城市直流快充站的投入规模不断扩大。相较于结构简单、运行功率小的交流充电桩,直流充电桩由于组件较多,运行功率大且长期处于室外,导致故障因素多且故障率较高。另外,交流充电多用于私家车长时间充电,服务率远低于直流充电。而直流充电多服务于城市通勤车此类高服务率需求的用户,当有充电桩发生故障时,将会对大规模用户甚至正常交通运作造成较大影响。因此,国网电动汽车公司的运维对象均为直流充电站。在电动汽车交通服务行业的快速发展趋势下,未来直流大功率充电将充分保障城市服务类车辆的电力供给,因此可靠的充电基础设施是电动汽车规模化普及的必要条件。虽然目前已经开展了相应的运维工作,但是在编制运维计划时存在着制定方案粗略、依赖经验以及无针对性目标等问题,使得运维工作无显著效果,难以满足未来电动汽车的快速发展。

在电动汽车直流充电站的运维方面,目前已有的研究主要集中于站内充电设施的在线监测上。文献[2]通过系统需求分析与功能服务要求研究设计了充电设施监控系统,将监控系统分为系统平台层、支撑服务层、公共服务层以及应用层,实现对充电设施配电、充电、安全防护、计量等多方面监控;文献[3]建立了充电站系统模型、设备信息模型、通信模型,形成充电站监控系统建模方案,对充电站内设施的关键特征量进行监测;文献[4]设计了一种基于外部部件互联标准(peripheral component interconnect, PCI)总线的在线监测系统,实时收集充电设施共耦节点的电压与电流数据,分析设备运行状态与特性。

上述文献均是从监控系统的角度研究充电站的运维方法,而如何将监测结果与大规模电动汽车充电行为这两方面来综合制定可靠性运维策略,目前暂未展开研究。基于风险的设备运维(risk-based maintenance, RBM)是将设备故障带来的后果量化评估,并将其当作运维策略制定的依据<sup>[5]</sup>。目前,

RBM已广泛应用于运维方向:文献[6]提出了一种基于改进半马尔科夫链的状态模型,以前期维护成本和可靠性损失为目标求解最优化维护策略;文献[7]利用历史维护信息与故障记录建立贝叶斯分类器的预测模型,将维护可靠性与经济性作为风险指标,以最小综合风险作为优化目标,可有效制定27.5 kV真空断路器的RBM策略;文献[8]提出一种基于分段预白化模糊预测的高压输电线路自动运维风险评估方法,通过大数据特征分类与模糊聚类处理实现风险评估与运维优化。对于配电设备,可依据设备健康度指数,采用馈线分区法计算平均实时故障率;依据各设备风险损失成本,制定差异化维护策略<sup>[9]</sup>。

作为电动汽车发展的关键环节,直流充电站(后文均称充电站)的科学运维方法亟待展开研究。该文以风险评估为基础,提出一种针对直流充电桩(后文均称充电桩)故障的电动汽车充电站风险评估方法,并采用风险追踪确定各站的运维优先级。其次,建立道路交通与用户行驶模型计算相关风险指标。最后以运维成本和系统可靠性增益为目标,建立充电站运维策略优化模型,规划各站的运维时长。通过算例中的仿真分析,验证了优化运维策略的有效性和必要性,可为运维工作提供参考。

## 1 电动汽车充电站运维体系

作为风险评估研究的基础,电动汽车用户的充电行为不仅取决于行车习惯,也与路网交通、站址分布以及充电设施有很大的关系。因此在构建基于风险分析的运维体系时,应考虑用户习惯、道路网络、充电站和充电桩多个方面的动态变化。随着社会信息化的快速发展,目前车联网已接入超过全社会80%的充电桩以及4万辆电动汽车,依托于实时交通路况、充电站设备运行以及用户出行此类基于群智感知的实时信息<sup>[10]</sup>,可制定同时考虑设备侧与用户侧的充电站运维体系,如图1所示。

针对该文的研究重点,运维工作的目的是降低电力设备的失效率,提高其可靠性以此减少对用户和社会的影响。充电桩的运行风险是要从其本身的

可靠性概率参数,以及该桩运行状态对于系统内用户的影响共同决定的。通过建立合理的风险评估模型,再从运维效益的方面进行运维策略的优化,能够有效提升运维工作的科学性与高效性。

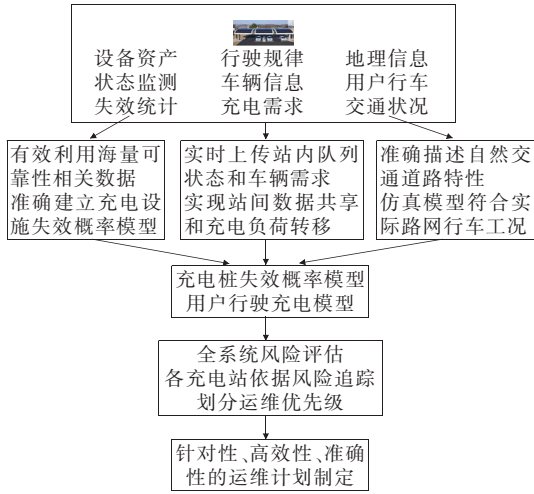


图1 电动汽车充电站运维体系

Figure 1 Maintenance architecture of EV charging station

## 2 电动汽车充电站风险评估

### 2.1 系统风险评估模型

首先将待评估区域内每一台充电桩的运行状态组合成为一种系统状态:

$$Q = \{q_{11}, \dots, q_{1j}, \dots, q_{1n_1}, \dots, q_{i1}, \dots, q_{ij}, \dots, q_{in_i}\} \quad (1)$$

式中  $n_i$  为第  $i$  个充电站的充电桩个数;  $q_{ij}$  为第  $i$  个充电站中第  $j$  台充电桩的运行状态,处于正常运行状态为 1,处于故障停运状态为 0。对于系统故障事件,其最直接的影响是延长用户充电服务的完成时间,即对用户的时间造成损失。因此可定义:在一个充电需求时段中,充电桩故障停运所造成的后果为损失时间(loss of time, LOT):

$$LOT = \sum_{k \in EV} (t_{sum,k}^Q - t_{sum,k}^{Q^*}) \quad (2)$$

式中  $Q^*$  为所有元素全为 1 的状态,代表系统内无故障充电桩;  $EV$  为评估时段中参与充电的电动汽车集合;  $t_{sum,k}^Q$  为在  $Q$  状态集下第  $k$  辆车从产生充电需求至完成充电所消耗的总时间。以故障事件发生概率和影响后果的乘积作为风险定义为基础,该系统的风险计算公式:

$$R_s = \sum_{z=1}^Z \{LOT_z \left[ \prod_{q_{ij} \in Q_z} P_{fault,ij}^{1-q_{ij}} (1 - P_{fault,ij})^{q_{ij}} \right]\} \quad (3)$$

式中  $Z$  为所有可能的状态的总数;  $Q_z$  为第  $z$  种状态;  $P_{fault,ij}$  为第  $i$  个充电站中第  $j$  台充电桩的故障率,其计算公式<sup>[11]</sup>:

$$P_{fault,ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_{ij} + \mu_{ij}} \quad (i \in CS, j \in CP_i) \quad (4)$$

式中  $\lambda_{ij}$  和  $\mu_{ij}$  分别为第  $i$  个充电站内第  $j$  台充电桩的失效率和修复率;  $CS$  为系统内充电站集合;  $CP_i$  为第  $i$  个充电站内充电桩集合。由于系统内充电桩数量较多,状态总数较为庞大,并且同一充电站内相同数量充电桩停用所导致的后果一致,因此采用状态枚举法会造成计算过程繁琐复杂。为简化计算过程并同时保证模拟的准确性,该文采用分层抽样法来拟合系统的所有状态。分层抽样是一种能够有效反映随机变量整体分布的方法,通过抽样的方式,依据随机变量的概率值生成若干个场景,这些场景能够较为精确地拟合出随机变量的概率分布。

根据《电动汽车非车载传导式充电机技术条件》<sup>[12]</sup>,为保证用户的充电安全或防止计费错误,当充电桩内有关键组件失效时,将不能被用户进行操作,直接进入停运状态。因此在建立系统层面的可靠性模型时,充电桩的正常状态和故障状态可看作服从 0-1 双参数的离散分布。在进行分层抽样之前,需先将充电桩运行状态离散分布函数构造为一个连续分布函数。分布曲线和分层抽样原理如图 2 所示。

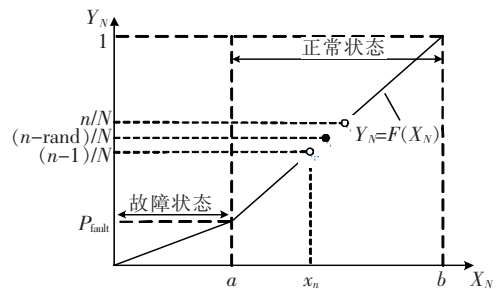


图2 分布曲线与分层抽样

Figure 2 Distribution curve and stratified sampling

图 2 中,  $X_N$  为抽样值,其值在  $(0, a)$  内表示故障状态,在  $(a, b)$  内表示正常状态。  $F(X_N)$  为充电桩故障累积概率分布函数,按照抽样场景数量  $N$  将概率分布曲线纵坐标等距分为  $N$  个区间,在每个区间内随机找一个点进行抽样。  $x_n$  为第  $n$  个抽样点

的抽样值。

在每个场景中对所有充电桩的运行状态进行抽样后,采用 Cholesky 分解<sup>[13]</sup>降低场景之间的相关性,保证每个场景的相对独立性和准确性。所有场景生成后,每个场景发生的概率为  $1/N$ ,系统风险计算公式修改为

$$R_s = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N LOT_n \quad (5)$$

## 2.2 电动汽车充电站风险追踪

由于运维工作的运维对象为充电站,因此需追踪各站对于系统产生风险的贡献程度。风险追踪方法可以追踪子系统对于某一故障状态下系统风险的贡献大小<sup>[14]</sup>。设定在  $Q^*$  状态下,  $EV$  内所有车辆完成充电服务的时刻为  $T_{fin}$ ,第  $i$  个站提供的充电电量为  $U_i^{Q^*}$ 。当有充电桩停运时,系统将无法在  $T_{fin}$  时刻满足正常的电量需求,站间的充电负荷也可能会发生转移,因此引入缺失充电电量(energy not charged, ENC)指标来追踪各充电站对系统风险的影响,即

$$ENC_i^{Q_z} = U_i^{Q^*} - U_i^{Q_z} \quad (i \in CS) \quad (6)$$

式中  $U_i^{Q_z}$  为第  $z$  种状态下第  $i$  个充电站从初始时刻至  $T_{fin}$  时刻所提供的电量;  $ENC_i^{Q_z}$  为在第  $z$  种状态下第  $i$  个充电站的缺失充电电量,若为正,则代表该站的服务能力下降;反之,则代表该站在满足正常充电需求的情况下可接纳邻近充电站无法满足的充电负荷。为适应风险追踪方法,以该状态下的最小 ENC 为基准进行差额计算:

$$SENC_i^{Q_z} = ENC_i^{Q_z} - \min\{ENC_1^{Q_z}, ENC_2^{Q_z}, \dots, ENC_M^{Q_z}\} \quad (7)$$

$$R_{cs,i} = \sum_{n=1}^N \frac{SENC_i^n R_{s,n}}{SENC_1^n + SENC_2^n + \dots + SENC_M^n} \quad (8)$$

式中  $M$  为系统内充电站个数;式(8)为适用于多场景的风险追踪方法,  $R_{s,n}$  为第  $n$  个场景的系统风险值;  $R_{cs,i}$  表示第  $i$  个充电站系统风险分配值。

## 2.3 用户行驶与充电建模

利用图论原理建立路网拓扑结构矩阵  $L$ 。  $L$  中的元素  $L_{ab}$  表示路网中第  $a$  个节点至第  $b$  个节点的路段长度。电动汽车用户通常会考虑距离当前所在

地最近的充电站进行充电,因此该文采用 Floyd 最短路算法来确定用户的目标充电站<sup>[15]</sup>。

然而,驾驶员在选择道路时也会考虑路段通行时间,因此在规划距离用户最近的充电站时,还应考虑各路段的行驶时长。将路段通行时间折算进入路段长度中记为  $a$  与  $b$  节点间新的加权距离<sup>[16]</sup>:

$$W_{ab} = L_{ab} + \sigma T_{ab} \quad (9)$$

式中  $\sigma$  为时间折算距离系数;  $T_{ab}$  为从路网中第  $a$  个节点到第  $b$  个节点的行驶时间。

路阻函数(bureau of public road, BPR)是用于量化道路阻抗对于出行者行车影响的计算方法,但是该函数主要用于公路网规划,在城市道路上使用会产生较大误差。因此该文采用考虑路段与节点的改进 BPR 模型,将道路等级、车流量、通行能力以及拥堵情况等诸多交通影响因素考虑在内。文献[17]对传统 BPR 模型中的路段饱和度  $\rho$  进行了修正:

$$\rho = 1 - \left[ 1 - \frac{\varphi(l_0 + l)}{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 n} \right]^2 \quad (10)$$

式中  $\varphi$  为路段平均车流密度;  $l_0$  为堵塞平均车车间距;  $l$  为平均车身长度;  $\eta_1$  为交叉口间隔影响系数;  $\eta_2$  为非机动车干扰影响系数;  $\eta_3$  为行人干扰影响系数;  $\eta_4$  为车道库宽度影响系数;  $n$  为单向车道数。若  $\rho \leq 0.8$ ,则路段为畅通状态;反之,路段为拥堵状态。修正后的畅通交通状态与拥堵交通状态下道路行驶时间:

$$T_{ab} = \begin{cases} z_{ab}(1 + \alpha\rho_{ab}^\beta) + \frac{9\xi(1-\lambda)^2}{20(1-\lambda\rho_{ab})} + \frac{9\rho_{ab}^2}{20f_{ab}(1-\lambda)} \\ z_{ab}(1 + \alpha\rho_{ab}^\beta) + \frac{\xi(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda\rho_{ab})} + \frac{1.5(\rho_{ab} - \gamma)}{2f_{ab}(1-\lambda)} \end{cases} \quad (11)$$

式中  $z_{ab}$  为该路段交通零流的通行时间,即路段长度与该道路等级对应的最高时速之比  $L_{ab}/V_{max}$ ;  $\xi$  为路口交通信号灯的周期;  $\lambda$  为绿灯时间占比;  $\rho_{ab}$  和  $f_{ab}$  分别为  $a$  节点与  $b$  节点之间交通饱和度和单车道车辆到达率;  $\gamma$  为车流饱和度临界值;  $\alpha$  与  $\beta$  为 BPR 函数中的标定参数,通常取值  $\alpha=0.15, \beta=4$ 。

在城市交通网络中,不同道路等级的路段,其道路交通属性均不相同。该文将道路网络中的路段分为 3 个道路等级:主干道、次干道与支路。上述交通属性在不同道路等级下的建议取值见表 1。



表 1 不同道路等级下交通属性取值

Table 1 Traffic attribute values under different road levels

道路	道路最高 时速/ (km·h <sup>-1</sup> )	单向 车道 数	交叉口 间隔影 响系数	非机动车 干扰影 响系数	行人干 扰影响 系数	车道宽 度影响 系数	路段平 均车流 密度	平均车 间间 距/m	平均车 身长 度/m	交通信 号灯 周期	绿灯时 间占比	单车道 车辆到 达率
主干道	40	4	(0.6,0.75)	1	(0.9,1)	2.14	(0.25,0.3)	(1.5,2)	(4,5)	(100,150)	(0.4,0.6)	(0.3,0.6)
次干道	30	3	(0.55,0.6)	0.9	(0.7,0.8)	2.14	(0.2,0.25)	(1,1.5)	(3.5,4.5)	(80,120)	(0.4,0.6)	(0.3,0.5)
支路	30	2	(0.495,0.55)	0.85	(0.7,0.8)	2.14	(0.15,0.25)	(0.5,1.5)	(3.5,4)	(40,80)	(0.4,0.6)	(0.3,0.5)

电动汽车在行驶途中会根据行驶长度消耗电池的电量。对于第  $k$  辆车,从出发点至充电站损耗电量百分比的计算公式:

$$\Delta SOC_k = -\frac{p_{con}}{B_k} \sum_{a,b \in S_k} L_{ab} e_{ab} \quad (12)$$

式中  $p_{con}$  为每公里耗电量;  $S_k$  为该车访问的道路节点集合;  $e_{ab}$  为路径决策量,若驶经  $ab$  路段则为 1,否则为 0;  $B_k$  为该车的电池最大容量。

当电动汽车用户抵达充电站时,会首先进入排队状态。该文采用 D/D/S/FCFS 的排队模型,即确定到达时间,确定服务时间的多服务台排队系统,满足先到先得 (first come first serve, FCFS) 服务模式。用户在陆续到达充电站后,按单队列进行排队,站内排队顺序如图 3 所示。

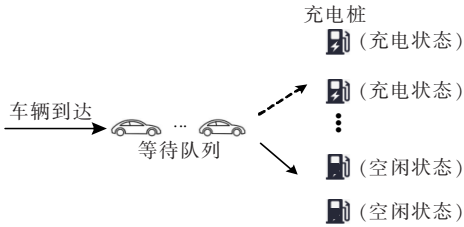


图 3 站内排队示意

Figure 3 Schematic diagram of queue in station

用户从抵达充电站到开始进行充电的等待时间取决于前方等待队列中的车辆充电需求时间以及处于充电状态的车辆的剩余充电时间<sup>[18]</sup>,计算公式:

$$T_{w0} =$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{n_w+1} T_i, T_i \in \{T_{ci,1}, \dots, T_{ci,n_c}, T_{cq,1}, \dots, T_{cq,n_w}\} \\ & \{T_1 \leq T_2 \leq \dots \leq T_i \leq \dots \leq T_n, n_c = n_p, n_w \neq 0 \\ & \min\{T_{ci,1}, T_{ci,2}, \dots, T_{ci,n_c}\}, n_c = n_p, n_w = 0 \\ & \{0, n_c < n_p, n_w = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

式中  $n_w$  为前方等待队列中的车辆数;  $n_c$  为正在

使用充电桩进行充电的车辆数;  $n_p$  为充电站内充电桩的总个数;  $T_{ci,k}$  ( $k=1,2,\dots,n_c$ ) 为正在充电的第  $k$  辆车的剩余充电时间;  $T_{cq,k}$  ( $k=1,2,\dots,n_w$ ) 为队列中第  $k$  辆车充电所需时间,其计算公式为

$$T_{cq,k} = \frac{(0.95 - SOC_{arrive,k}) B_k}{P_k} \quad (14)$$

式中  $SOC_{arrive,k}$  为第  $k$  辆车到达充电站时剩余的电池百分比;  $P_k$  为该车的额定充电功率。该文考虑到电池寿命,默认电动汽车充电至 SOC 为 0.95<sup>[19]</sup>。

在实际运行工况中依照驾驶特性,若电量充裕且用户获知邻站排队时间较短时,部分电动汽车用户会考虑更换站点。考虑到用户不会过远离当前范围,该文设置仅判别最邻站且用户只能更换一次站点,换站用户比例为  $cr\%$ 。

$$\begin{cases} \delta_1 T_{w0,k}^{present} \geq T_{w0,k}^{nearest} + T_{road,k}^{p2n} \\ SOC_{arrive,k} \geq \delta_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中  $\delta_1$  和  $\delta_2$  分别为时间判别系数和电量判别系数,取值均在 0 到 1 之间;  $T_{w0,k}^{present}$ 、 $T_{w0,k}^{nearest}$  和  $T_{road,k}^{p2n}$  分别表示当前站排队时间、最邻站排队时间及行驶至最邻站时间。若换站用户在到达首个充电站时满足式(15)的条件,其将重新进入行驶车辆队列,驶向下一充电站。综上所述,第  $k$  辆车从产生充电需求到完成充电所需要的总时间<sup>[20]</sup>:

$$t_{sum,k} = \sum_{a,b \in S_k} T_{ab} e_{ab} + T_{w0,k} + T_{cq,k} \quad (16)$$

站内等待充电模型可记录充电桩的使用状态和输出功率。首先在  $Q^*$  状态集下进行仿真,求得时刻  $T_{fin}$  与各站  $U_i^{Q^*}$ ,再计算在第  $z$  种状态下各站的  $U_i^{Q^z}$ :

$$U_i^{Q^z} = \sum_{d=1}^{T_{fin}} \sum_{j \in CP_i} P_{c_j,d} (i \in CS) \quad (17)$$

式中  $P_{c_j,d}$  为第  $j$  个充电桩在第  $d$  个仿真步长时的输出功率。根据式(3)和式(6)可计算指标  $LOT$

和ENC,具体计算流程见图4所示:

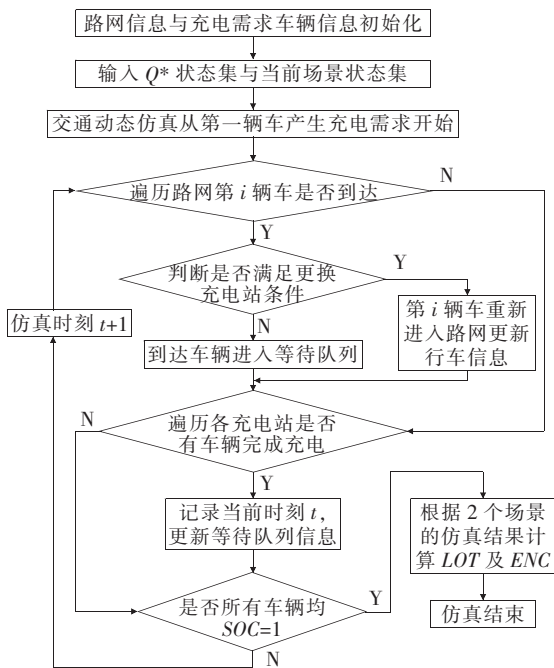


图4 风险指标计算流程

Figure 4 Risk index calculation process

### 3 电动汽车充电站优化运维

结合当前运维现状和上述研究内容,对现有的运维计划与该文所提的运维优化模型进行说明。

1) 运维顺序分为常规顺序运维和按风险次序运维。其中,常规顺序运维指按照由远及近顺序或按照充电站投入年限顺序来规划运维工作;按风险次序运维指根据该文提出的风险评估方法,对各站按风险值高低确定运维优先次序。

2) 运维时长分为等时段运维和优化时段运维。等时段运维指对所有充电站平等处理,等同于在运维周期内平分运维工作量;优化时段运维指该文所提出的考虑运维成本和可靠性增益,以运维总费用最小为目标逐站分配运维工作量,对运维时段进行优化。

根据实地调研情况,现有运维计划即等时段常规顺序运维,按照常规顺序对每个充电站无差别运维。而该文所提的运维策略优化方法在于根据风险水平确定各站的运维顺序后,在满足运维要求的同时,对运维时长进行优化。

#### 3.1 目标函数

该文针对运维成本和可靠性增益2个方面考虑

电动汽车充电站优化运维策略的目标函数<sup>[21]</sup>:

$$\min F(\mathbf{X}) = f_c(\mathbf{X}) + f_r(\mathbf{X}) \quad (18)$$

式中  $F(\mathbf{X})$  为总目标函数; $\mathbf{X}$  为决策向量; $\mathbf{X}$  中的元素  $x_m$  为第  $m$  个运维的充电站的运维时段数。以国网某市电动汽车充电站运维工作为例,每周工作时长为5日,单日工作时间为上午8:00—12:00,下午14:00—18:00,因此该文考虑运维周期为一周,一个运维时段为2h,时段内包括行车时间、运维时间以及信息登记时间、休息时间。

1)  $f_c(\mathbf{X})$  表示经济性目标函数,包括在运维期间内所耗费的资源成本:

$$f_c(\mathbf{X}) = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^{T_s} c_{m,t} \quad (19)$$

式中  $T_s$  为运维周期总时段数; $M$  为充电站总数; $c_{m,t}$  为第  $t$  个时段第  $m$  个充电站的运维耗资。

2)  $f_r(\mathbf{X})$  表示系统风险期望费用,由于运维的目的是降低系统风险,因此每运维一个时段后按式(5)计算一次系统风险并累加,并将时间损失转化为经济损失:

$$f_r(\mathbf{X}) = \sum_{t=1}^{T_s} \sum_{n=1}^N g \frac{LOT_t(n)}{N} \quad (20)$$

式中  $N$  为场景数量; $LOT_t(n)$  为运维  $t$  时段后第  $n$  个场景中用户损失时间; $g$  为单位时间用户损失时间成本折算系数<sup>[22]</sup>。

#### 3.2 约束条件

依据电动汽车充电站运维工作的特点,设定下列相关约束条件。

1) 每个站至少运维一个时段,考虑单个充电站运维时长约束:

$$x_m \geq 1 \quad (m \in CS) \quad (21)$$

2) 运维时序性约束:

$$y_{m+1} = y_m + x_m \quad (m, m+1 \in CS) \quad (22)$$

3) 系统内所有充电站都是非同时运维,考虑运维总时段约束:

$$\sum_{m \in CS} x_m = T_s \quad (23)$$

4) 运维资源约束条件:

$$\sum_{x=1}^{x_m} r_{m,x} \leq Y_{m,\max} \quad (m \in CS) \quad (24)$$

式中  $y_m$  为第  $m$  个充电站的运维起始时刻; $r_{m,x}$  为第  $m$  个充电站在  $x$  时段所需要的运维资源; $Y_{m,\max}$  为第  $m$  个充电站可投入的最大运维资源。

### 3.3 优化算法

该文研究的运维策略优化属于非线性整数规划问题,使用解析法难以求得结果,因此采用免疫克隆选择算法(immune clonal selection algorithm, IC-SA)进行求解<sup>[23]</sup>。该算法相较于传统免疫算法,引入了克隆扩增算子与克隆变异算子,在迭代过程中实现优质种群的扩大并淘汰劣质种群,能够有效提高算法的收敛速度。在 IC-SA 中,抗体、抗原和亲和力分别代表优化问题中的解集、目标函数适应度以及解集与目标函数的匹配程度。

该文所提的充电站运维策略主要分为风险评估、风险追踪和优化运维 3 个部分。首先基于充电桩与路网计算系统的风险值,其次采用风险追踪确定各站的运维优先次序,最后以运维经济费用与风险期望费用为目标,采用 IC-SA 算法求解各站的运维时段数。运维策略优化流程如图 5 所示。

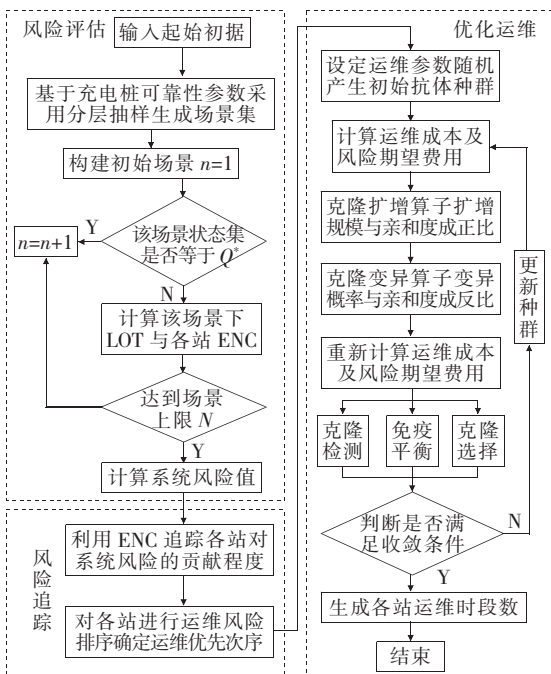


图 5 运维策略优化流程

Figure 5 Operation and maintenance strategy optimization process

## 4 算例分析

### 4.1 交通网络及参数设置

该文以苏州市某区域内交通网络为例对研究内容进行分析,道路网络和充电站站址分布如图 6 所

示。该道路网络共含有 132 个节点,194 条道路。目前该市在图中所标出的 10 个重要交通节点已投运了部分充电站,该文将其全部设置为相同类型的直流充电站,参照当前国内已建设投运的充电站,各站设置 10 个充电桩,充电功率为 30 kW,各站编号是按照运维路程由远及近进行编制的。由于该文研究重点在于运维策略,因此在算例中采用历史故障率参数。根据国网苏州供电公司统计的近 2 年来投入使用充电桩的失效率 and 修复率以及各站的投运年限和设备资料,结合仿真模型,获取各个充电桩的故障率参数。此外,道路网络中的各交通参数属性将以道路等级进行取值。

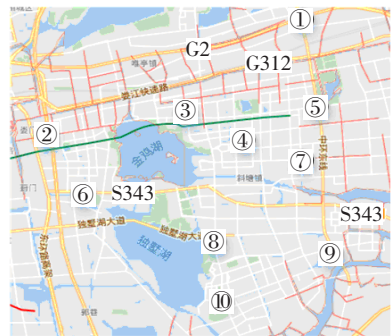


图 6 道路网络和充电站站址分布

Figure 6 Road network and distribution of charging station sites

电动汽车以采用直流快速充电的小型车为主,考虑到私家车虽然数量多但大都采用固定地点交流充电,而公务车、出租车以及目前逐渐普及的个人营运车等由于工作需求都是采用直流充电,因此设置私家车和城市通勤车的比例为 1:5。为满足充电负荷分布的动态性和随机性,该文在一天的充电高峰期中午 12:00—14:00 的时间段设置 120 辆有充电需求的车辆行驶于路网上<sup>[24]</sup>,60 辆车处于站内等待状态或正在充电状态,进行系统可靠性评估。车辆起始位置分布、需求产生时刻及初始 SOC 参见文献<sup>[25]</sup>。车辆电池容量均采用 25 kW·h,仿真时段内仿真步长设置为 0.5 min,仿真时间为第一辆行驶车辆产生充电需求时刻至最后一辆车完成充电时刻。在该文的计算中,设定充电站内的所有充电桩每运维一个时段,降低一半失效率。

### 4.2 风险计算和运维策略

结合系统内各充电桩的故障概率,采用分层抽样共抽样 3 000 次获得相应场景,所有场景的初始

车辆信息均相同。对于每个场景,分别进行  $Q^*$  状态与当前抽样状态的道路交通仿真,获取各辆电动汽车完成充电的时间以及各站提供的电量,根据式(2)、(5)计算出系统风险值,其次根据式(6)计算出各站 ENC 后,根据式(8)将风险归算到每个充电站,并依据各站风险水平进行运维次序的排序,如表 2 所示。

该文首先在当前实际运维工作的基础上,对运维时段进行优化;其次,对按风险次序运维的运维方式分别采用等时段和优化时段进行计算和分析。常规顺序运维的等时段与优化时段运维信息如图 7 所示。

表 2 充电站运维次序

Table 2 Classification of charging station risk level

充电站编号	风险值	运维次序
3	11.683 0	1
6	10.551 8	2
7	7.455 7	3
9	7.398 7	4
10	7.358 6	5
5	7.240 9	6
1	7.176 4	7
8	5.699 6	8
2	3.853 4	9
4	2.469 8	10

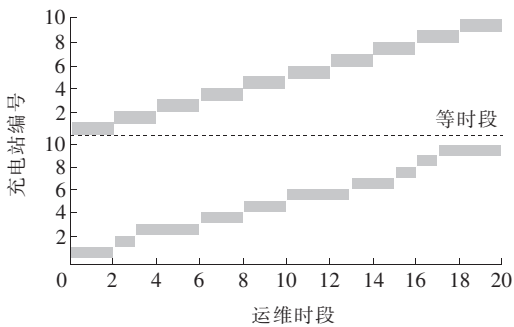


图 7 充电站常规顺序运维计划

Figure 7 Regular sequential operation and maintenance scheduling for charging station

由图 7 可以看出,将运维时长优化后,风险水平最高的 3 号站提高了运维时长,而风险水平较低的 2、8 号站降低了运维时长。同时为优化运维成本,其余站的运维时长适当作出了调整,但由于运维资源和时长约束的限制,运维时长均只作一个时段的调整。常规顺序运维的等时段与优化时段运维总费用如表 3 所示。

表 3 不同运维方式下的运维费用

Table 3 Costs under different maintenance strategies

决策方式	元		
	运维成本	系统风险期望	总费用
等时段运维	1 109.8	1 324.4	2 434.2
优化时段运维	1 016.2	1 078.6	2 114.8

相较于等时段,优化时段的运维成本 and 系统期望风险分别较等时段下降了 6.63% 和 18.56%,取得了更好的运维效益。按风险次序运维的等时段与优化时段运维信息如图 8 所示。

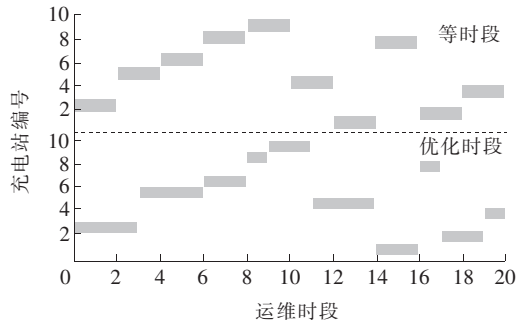


图 8 充电站按风险次序运维计划

Figure 8 Operation and maintenance plan for charging stations in order of risk

从图 8 可以看出,对于按风险次序运维的运维计划,为降低运维总费用,优化时段相较于等时段同样对部分充电站的运维时长进行了调整。按风险次序运维的等时段与优化时段运维总费用如表 4 所示。相比 2 种运维顺序,对于系统风险期望费用,按风险次序运维在等时段运维和优化时段运维上分别降低了 34.79% 和 35.67%,可推知按照风险水平来排列运维顺序能够显著改善系统整体可靠性,减少用户的损失。而相较于当前的常规顺序等时段运维,按风险次序优化时段运维在保持运维成本的同时在总费用上降低了 28.82%,有效提高了整体运维效益。

表 4 不同运维方式下的运维费用

Table 4 Costs under different maintenance strategies

运维方式	元		
	运维成本	系统风险期望	总费用
等时段运维	1 191.6	823.6	2 015.2
优化时段运维	1 038.7	693.9	1 732.6

## 5 结语

该文为解决当前电动汽车充电站运维工作存在



的不足,以科学高效的运维策略为目标展开了相关研究。

1)以风险评估为基础,将充电桩停运对电动汽车用户造成的时间损失作为故障事件的影响后果,利用有效数据量化分析系统风险,采用风险追踪模型分析各站对系统风险的贡献程度。

2)为准确评估风险水平并确保运维工作符合实际,考虑电动汽车用户的行驶习惯、充电习惯以及多种道路交通因素,建立了动态仿真模型来定量计算可靠性相关指标。

3)综合考虑运维成本和可靠性增益,建立电动汽车直流充电站运维策略优化模型,依据风险水平确定各充电站运维时序,求解出在运维周期内各站的运维时长。

通过风险评估和优化运维模型制定的运维策略克服了现有运维方式的盲目性和低效性,显著提高了系统的整体运维效益,保障了充电设施的运行可靠性。在后续的研究工作中,将考虑电动汽车的充电功率特性,以及更为准确、全面的交通属性来完善电动汽车充电站运维模型。

## 参考文献:

[1] 程杉,吴思源,孙伟斌.考虑电压稳定性和充电服务质量的电动汽车充电站规划[J].电力系统保护与控制,2019,47(7):12-21.  
CHENG Shan,WU Siyuan,SUN Weibin. Optimal planning of charging stations for electric vehicles considering voltage stability of distribution system and the quality of service[J]. Power System Protection and Control,2019,47(7):12-21.

[2] 赵明宇,王刚,汪映辉,等.电动汽车充电设施监控系统设计与实现[J].电力系统自动化,2011,35(10):65-69.  
ZHAO Mingyu,WANG Gang,WANG Yinghui, et al. Design and implementation of a supervisory and control system for charging facilities of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(10):65-69.

[3] 胡勇,郭子健,刘奇峰,等.基于 IEC 61970/61850 的电动汽车充电站监控系统建模方案[J].电力系统自动化,2013,37(2):91-96.  
HU Yong,GUO Zijian,LIU Qifeng, et al. Modeling scheme of supervisory control system for electric vehicle charging station based on IEC 61970 and IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(2):91-96.

[4] NIE Xiaoyong, LIU Jieyi, XUAN Liang, et al. Online monitoring and integrated analysis system for EV charging station[C]//2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Kowloon, Hong Kong, China; IEEE, 2013.

[5] 许沛东,方华亮,王海鸣,等.基于风险评估与灵敏度聚类的输电线路逐级运维策略[J].电网技术,2018,42(9):3024-3032.  
XU Peidong,FANG Hualiang,WANG Haiming, et al. Progressive maintenance scheduling strategy of transmission lines based on risk assessment and sensitivity clustering[J]. Power System Technology,2018,42(9):3024-3032.

[6] Heo J H, Kim M K, Park G P, et al. A reliability-centered approach to an optimal maintenance strategy in transmission systems using a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2171-2179.

[7] Feng D, Lin S, He Z Y, et al. Optimization method with prediction-based maintenance strategy for traction power supply equipment based on risk quantification[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(4): 961-970.

[8] 彭福先.高压输电线路自动运维风险评估方法研究[J].自动化与仪器仪表,2019(1):64-67.  
PENG Fuxian. Research on risk assessment method for automatic operation and maintenance of high voltage transmission lines[J]. Automation and Instrumentation, 2019(1):64-67.

[9] 梁朔,秦丽文,李春华,等.基于风险评估的配电设备状态检修决策方法[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(1):47-52.  
LIANG Shuo,QIN Liwen,LI Chunhua, et al. Condition-based maintenance decision-making method for distribution equipment based on risk assessment[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2019,31(1):47-52.

[10] 李晓辉,李磊,刘伟东,等.基于动态交通信息的电动汽车充电负荷时空分布预测[J].电力系统保护与控制,2020,48(1):117-125.  
LI Xiaohui,LI Lei,LIU Weidong, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging load for electric vehicles based on dynamic traffic information[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 117-125.

[11] 李文沅.电力系统风险评估模型、方法和应用[M].北

- 京:科学出版社,2006.
- [12] NB/T 33001-2018. 电动汽车非车载传导式充电机技术条件[S].
- [13] 蒋程,王硕,王宝庆,等. 基于拉丁超立方采样的含风电电力系统的概率可靠性评估[J]. 电工技术学报,2016,31(10):193-206.  
JIANG Cheng, WANG Shuo, WANG Baoqing, et al. Probabilistic reliability assessment of power system containing wind power based on latin hypercube sampling[J]. Transactions of China Electrotechnical society, 2016, 31(10):193-206.
- [14] 邓彬,郭创新,王越,等. 基于 well-being 分析的电网设备重要度评估与排序方法[J]. 电网技术,2013,37(12):3489-3498.  
DENG Bin, GUO Chuangxin, WANG Yue, et al. An assessment and ranking method for component importance based on well-being analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(12):3489-3498.
- [15] 蒋怡静,于艾清,黄敏丽. 考虑用户满意度的电动汽车时空双尺度有序充电引导策略[J]. 中国电力,2020,53(4):122-130.  
JIANG Yijing, YU Aiqing, HUANG Minli. Coordinated charging guiding strategy for electric vehicles in temporal-spatial dimension considering user satisfaction degree[J]. Electric Power, 2020, 53(4):122-130.
- [16] 张海燕,王东,樊平,等. 基于加权 Voronoi 图和 GA-PSO 的电动汽车充电站最优规划[J]. 电网与清洁能源,2019,35(5):77-82.  
ZHANG Haiyan, WANG Dong, FAN Ping, et al. Optimal planning of electric vehicle charging stations based on weighted voronoi diagram and GA-PSO[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(5):77-82.
- [17] 潘义勇,余婷,马健霄. 基于路段与节点的城市道路阻抗函数改进[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2017,36(8):76-81.  
PAN Yiyong, YU Ting, MA Jianxiao. Improvement of urban road impedance function based on section impedance and node impedance[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2017, 36(8):76-81.
- [18] 曾成碧,刘广,苗虹,等. 考虑城市交通流的电动汽车充电站规划[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(4):101-107.  
ZENG Chengbi, LIU Guang, MIAO Hong, et al. Planning of electric vehicle charging station considering urban traffic flows[J]. Journal of electric power science and technology, 2019, 34(4):101-107.
- [19] 熊波,舒征宇,郭晨,等. 基于社会效益视角的充电站优化规划研究[J]. 智慧电力,2019,47(12):78-84.  
XIONG Bo, SHU Zhengyu, GUO Chen, et al. Charging station optimization planning from the perspective of social benefits[J]. Smart Power, 2019, 47(12):78-84.
- [20] 戴水东,夏克文. 一种宽电压范围充电机混合控制策略[J]. 高压电器,2019,55(12):168-174.  
DAI Shuidong, XIA Kewen. Hybrid control strategy of charger with wide voltage range[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12):168-174.
- [21] 张端鸿,史一炜,冯冬涵,等. 含多类型充电设施的城市电动汽车充电站群协同规划方法[J]. 电测与仪表,2020,57(20):60-66.  
ZHANG Duanhong, SHI Yiwei, FENG Donghan, et al. A cooperative planning method of urban electric vehicle charging station group with multi-type charging facilities[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(20):60-66.
- [22] 李宏仲,强伟,高宇男,等. 考虑用户出行特性和配电网线路可用裕度的充电站规划[J]. 电力系统自动化,2018,42(23):48-56.  
LI Hongzhong, QIANG Wei, GAO Yunan, et al. Charging station planning considering users' travel characteristics and line availability of distribution network[J]. Automation of Electric Power System, 2018, 42(23):48-56.
- [23] 许国根. 最优化方法及其 MATLAB 实现[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2018.
- [24] 葛少云,李荣,韩俊,等. 考虑电动出租车随机概率行为特性的充电站规划[J]. 电力系统自动化,2016,40(4):50-58.  
GE Shaoyun, LI Rong, HAN Jun, et al. Charging station planning considering probability behavior characteristic of electric taxi[J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(4):50-58.
- [25] 姜欣,冯永涛,熊虎,等. 基于出行概率矩阵的电动汽车充电站规划[J]. 电工技术学报,2019,34(S1):272-281.  
JIANG Xin, FENG Yongtao, XIONG Hu, et al. Electric vehicle charging station planning based on travel probability matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1):272-281.