

文章编号:1005-0523(2019)04-0124-07

基于区间数学的接触网预防性机会维修方法研究

程宏波,汪兴,孙楠楠,张伟,王勋,伦利

(华东交通大学电气与自动化工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:接触网是一个由众多零部件组成的关联系统,对接触网进行维修时需考虑零部件相互之间的影响和差异。利用区间数学建立接触网预防性机会维修模型,并将其转化为基于可靠性灵敏度的维修决策优化问题,以维修费用最小为优化目标,以接触网整体运行可靠性指标为约束,对接触网不同零部件的机会维修区间进行优化求解。算例分析结果表明,基于区间数学方法建立的接触网维修优化模型,可在保证接触网系统可靠性的基础上,有效减少接触网的维修次数,降低接触网的维修费用,可为接触网的运营维护提供指导。

关键词:接触网;机会维修;区间数学;可靠度

中图分类号:TM922.5

文献标志码:A

接触网是铁路牵引供电系统的关键设备,担负着给电力机车供电的重要任务,并承受着电力机车受电弓的高速冲击,工作环境恶劣^[1]。接触网的可靠运行对保证电力机车的安全正点运行发挥着重要作用,保证接触网的正常运行是铁路供电部门的重要任务。在保证接触网安全可靠供电的前提下,降低现场维护人员的劳动强度,减小接触网的运营维护成本,在电气化铁路迅猛发展的今天,具有非常显著的现实意义^[2]。

目前,国内外针对接触网系统维修策略的研究成果较少,但随着高速铁路的快速发展,相关研究开始逐渐引起学者的关注与重视。如文献[3]在定量计算牵引供电系统可靠性的基础上,对周期性预防维修计划进行了分析,发现系统维修费用与可靠度约束之间为正相关。文献[4]通过定期维修和状态维修的配合,增加了部门维修的机动性,节约了维修成本。为提高接触网可靠性的同时降低维修费用,文献[5-7]建立了可靠度约束下的接触网预防性维修策略的优化模型,文献[5]采用混沌自适应多目标进化算法对模型求解分析,文献[6]设计了启发式遗传算法流程解决维修费用最小的优化问题,文献[7]则采用故障树对接触网的可靠性进行建模分析。文献[8]将接触网运行可靠性与故障损失综合进行考虑,以风险损失和维修资源限制为约束,建立了接触网维修计划优化模型。

作为一个由多种零部件组成的复杂系统,接触网中不同的零件所起的作用不同,零件可靠性的要求及其变化规律也不同,对接触网整体可靠性的影响也不一样;因此,将接触网作为一个整体来进行维修决策,不能体现接触网不同零部件之间的差异,无法实现有针对性的精细化检修,会产生较高的维修成本和维修费用。

在保证接触网运行可靠性的基础上,为降低接触网的维修成本,本文以不同零部件对接触网可靠性影响的差异为基础,将预防性维修与机会维修相结合,在接触网的某一零件进行预防性维修时,对其他满足一定条件的零部件也同时进行维修,实现针对接触网的预防性机会维修,以分摊维修过程中所产生的人力成本、设备成本以及供电损失等费用,同时减少接触网的维修次数和维修时间,从而提高铁路线路的利用率。

收稿日期:2019-01-30

基金项目:国家轨道交通电气化与自动化工程中心开放课题(NEEC-2018-B10);江西省教育厅科研资助项目(GJJ160498);南昌市科技支撑计划项目(2014HZZC012)

作者简介:程宏波(1979—),男,副教授,博士,研究方向为铁路牵引供电系统自动化与智能化、输变电设备的健康管理及故障诊断、电网的智能控制等。

1 基于区间数学的接触网预防性机会维修模型

接触网运行过程中会受到很多不确定性因素的影响,而且接触网本身也会存在着许多不确定性,如接触网中往往不存在明确的界限来显示什么时候需要维修,什么时候不需要维修。当前,为了应用的方便,我们多采用有效值或平均值对不确定性进行处理,以消除部分影响,但这种方法与实际情况之间也还存在一定的差异。为描述接触网维修界限的不确定性,利用区间数学对接触网的维修时机进行描述,将接触网的维修时机由传统的一个时间点拓展为一个时间区间,这样更符合接触网运行的实际,对接触网的运营维护可以起到更好的指导作用。

不同于传统方法将接触网的维修时机视作一个点,机会维修认为接触网的可靠性保持在某一合理范围内都是可行的。设接触网零件预防性维修的可靠度区间为

$$[R_{pi}] = [\kappa_i] R_{pi} = [\underline{\kappa}_i, \overline{\kappa}_i] R_{pi} = [1 - \kappa_i, 1 + \kappa_i] R_{pi} \tag{1}$$

式中: $[\kappa_i]$ 为区间值,表示接触网零件的维修可靠度变化区间; $\underline{\kappa}_i = 1 - \kappa_i$ 为零件 i 可以接受的变化范围下限; $\overline{\kappa}_i = 1 + \kappa_i$ 为零件 i 可以接受的变化范围上限; R_{pi} 为零件 i 可以接受的传统预防性维修的可靠度值; $[R_{pi}]$ 为接触网零件 i 可以接受的维修可靠度区间。由于不同零件在接触网系统中所起的作用不同,对整个接触网系统可靠性的影响也不同,因此,在确定不同零件的预防性维修可靠度区间 $[R_{pi}]$ 时,应在满足整个接触网系统可靠性要求的前提下,根据该零件与整个接触网系统可靠性的关系进行确定。

相应的,接触网零件对应的预防性维修时间为

$$[T_{pi}] = [\kappa_i] T_{pi} = [\underline{\kappa}_i, \overline{\kappa}_i] T_{pi} = [1 - \kappa_i, 1 + \kappa_i] T_{pi} \tag{2}$$

式中: $[\kappa_i]$ 为零件 i 对应的维修时间变化区间; T_{pi} 为由传统的预防性维修所确定的维修时间点; $[T_{pi}]$ 为零件 i 的预防性维修时间区间; $\underline{\kappa}_i = 1 - \kappa_i$ 为零件 i 可以接受的维修时间变化下限; $\overline{\kappa}_i = 1 + \kappa_i$ 为零件 i 可以接受的维修时间变化上限。

根据可靠性定义,二者之间的关系

$$[R_{pi}] = \exp\left(-\int_0^{[T_{pi}]} \lambda_i(t) dt\right) \tag{3}$$

其中: $\lambda_i(t)$ 为零件 i 的故障率函数,可由该零件的故障统计数据拟合得到。

设有零件 i, j, k , 其对应的预防性维修时机如图 1 所示。当零件 i, j 的预防性维修时机满足

$$\max(\underline{T}_{pi}, \underline{T}_{pj}) \leq \min(\overline{T}_{pi}, \overline{T}_{pj}) \tag{4}$$

说明零件 i, j 的维修区间存在着重叠,且重叠的区间范围为 $[\max(\underline{T}_{pi}, \underline{T}_{pj}), \min(\overline{T}_{pi}, \overline{T}_{pj})]$, 此时可将零件 i, j 的预防性维修安排在该区间内同时进行。

相应的,若零件 i, k 的预防性维修时机之间满足

$$\max(\underline{T}_{pi}, \underline{T}_{pk}) > \min(\overline{T}_{pi}, \overline{T}_{pk}) \tag{5}$$

则零件 i, k 之间不存在着维修区间的重叠,在对零件 i 进行维修时,将无法对零件 k 同时进行维修。

三者之间的关系如图 1 所示,其中斜线阴影部分表示零件之间可以相互配合的机会维修区间,在该时间区间内,可对满足条件的接触网零部件同时进行维修,从而达到预防性机会维修的目的。

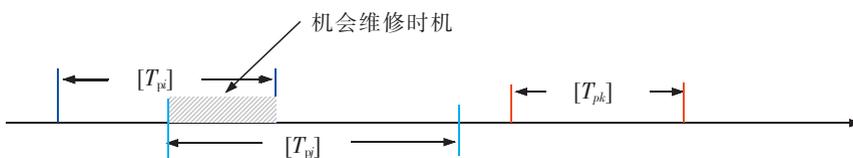


图 1 预防性维修与机会维修区间示意图

Fig.1 Diagram of preventive maintenance interval and opportunity maintenance interval

2 预防性机会维修模型的优化

通过前面的分析可以看出,预防性机会维修实施的关键在于不同零部件维修时机之间的配合,当不同零件的预防性维修区域越大时,相互之间重叠的可能性就越大,预防性机会维修的时机就多,接触网的维修费用就低。但相应的,零部件的可靠性波动范围就越大,接触网的整体可靠性就难以得到保障。因此,需针对不同的接触网零部件确定合适的预防性维修时机,在保证接触网可靠性的基础上,实现维修费用的最低。

2.1 接触网零系统的可靠性灵敏度分析

接触网中零部件众多,各零部件所起的作用各不相同。因而,不同零部件可靠性变化对整个接触网系统可靠性的影响程度也不相同。

设接触网系统的可靠性为

$$R(x)=R(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (6)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_n 为接触网系统中不同零部件的可靠性参数,以区间数形式表示为

$$[x]=([x_1], [x_2], \dots, [x_n]) \quad (7)$$

根据区间数学中区间扩展的性质,对区间参数 $[x_i]=([x_{i0}-\Delta x_i, x_{i0}+\Delta x_i])$, $i=1, 2, \dots, n$ 扩展得

$$[R_x]=[R(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, [x_i], x_{i+1}, \dots, x_n)] \quad (8)$$

式中: $[x_i]=([x_{i0}-\Delta x_i, x_{i0}+\Delta x_i])$, $i=1, 2, \dots, n$; Δx_{i0} 为参数 x_i 的中心值; Δx_i 为零件 i 允许的可靠度波动范围。

因此,相对区间表示的接触网可靠性灵敏度为

$$r(R_{x_i})=\frac{\Delta R_{x_i}}{\Delta x_i}=\frac{\bar{R}_{x_i}-R_{x_i}}{x_i-\underline{x}_i} \quad (9)$$

式(9)描述了接触网整体可靠性随某一零件可靠性参数变化的情况,体现了接触网系统可靠性对该零件的灵敏度。

可以看到,不同零件可靠性的变化对接触网系统的可靠性影响是不同的。在保证接触网整体可靠性的前提下,接触网不同零件所允许的可靠性变化范围会各不相同,而且,该范围与接触网系统对该零件的灵敏度相关。因而零件 i 的维修可靠度区间修正系数 κ_i 是灵敏度 $r(R_{x_i})$ 的函数,即

$$\kappa_i=K(r(R_{x_i})) \quad (10)$$

2.2 接触网零部件预防性维修区间的优化

在制定维修计划时,对接触网系统可靠性影响较大的,即可靠性灵敏度高的零部件,应加强对它们的维修。但过多的维修将导致维修成本的增加,因此,为达到接触网运行可靠性和维修经济性的平衡,需确定接触网各零部件合理的维修区间。

建立以接触网可靠性要求为约束,以接触网维修费用最小为目标的接触网预防性机会维修优化模型

$$\min C_{op}([R_p])=\sum_{i=1}^N \{c([M_o^{(i)}]) \cdot C_p^{(i)}+c([M_p^{(i)}]) \cdot (C_p^{(i)}+C_f+C_d)\} \quad (11)$$

s.t.:

$$\prod_{i=1}^N [R_p] \geq [R_s] \quad (12)$$

$$[R_p]=r(R_{x_i}) \sum_{i=1}^N [R_p] \quad (13)$$

其中:式(11)为优化的目标函数; $\min C_{op}([R_p])$ 表示整体维修费用最小; $[M_o^{(i)}]$ 为零件 i 的机会维修次数; $[M_p^{(i)}]$ 为零件 i 的预防性维修次数;由于优化计算出来的结果 $[M_o^{(i)}]$ 和 $[M_p^{(i)}]$ 可能为小数,而实际维修次数必然为整数,因此采用 $c(\cdot)$ 进行向上进位取整运算,即取不小于该数字的最小整数; $C_p^{(i)}$ 为零件 i 的预防性维修费用; C_f 为每次维修所需的固定维修费用,和基本维修成本有关; C_d 为由于接触网维修停电而导致的铁路

运输服务损失费用。

式(12)表示接触网维修的整体可靠性约束,即维修计划必须保证系统的可靠性不能小于正常运行所需的最低可靠性指标。式中, $[R_s]=[\underline{R}_s, \bar{R}_s]$ 为维修所要达到的接触网系统可靠性指标区间,可根据铁路线路的等级及对供电可靠性的要求分别进行设定。

式(13)表示零件维修区间的约束条件,要求确定的零件预防性维修可靠度区间应与该零件的可靠性灵敏度一致。

2.3 接触网预防性机会维修区间的求解

上述优化模型是一个组合规划问题,关于此类问题求解方法的研究较多^[9-11]。考虑接触网预防性机会维修优化模型的特点,采取的求解算法流程如图 2 所示。基本求解思路如下:首先将接触网各个零部件的维修优化模型分开考虑,针对各零件分别求解独立的零部件维修优化模型;然后在此基础上计算整个接触网系统的可靠度是否满足接触网安全运行的约束条件,如不满足则再进行调整,重复上述过程,直至满足要求为止;最终得到接触网不同零件优化之后的维修区间。

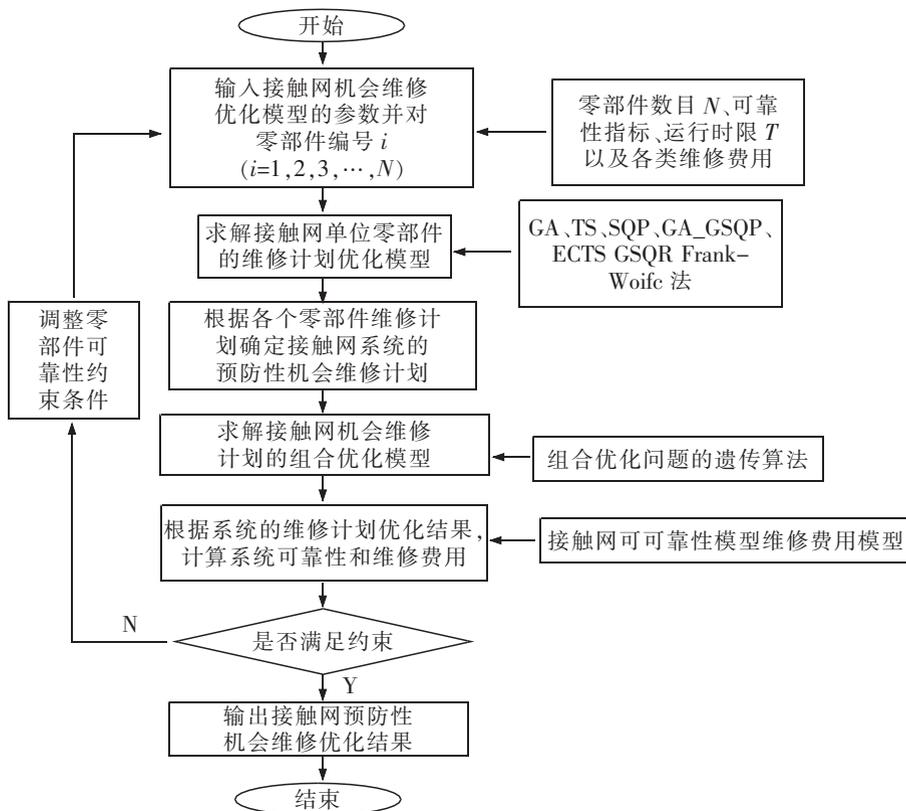


图 2 接触网预防性机会维修区间优化算法的流程

Fig.2 Flow of optimized algorithm for catenary preventive opportunity maintenance interval

3 算例分析

选取某线路 2008 年 8 月到 2010 年 3 月的接触网运行记录数据,对预防性机会维修模型进行分析。选取接触导线、承力索、绝缘子、电联结、补偿装置共 5 个主要零件作为接触网中的重要零件,利用其故障统计数据对各零件的可靠性进行建模^[12-13],取接触网的规划运行年限为 168 个月(14 年),接触网的固定维修成本取 1.7 万元,维修造成的停电损失取 3.5 万元^[14-16],根据接触网故障记录数据得到的接触网各零件的可靠性参数及维修费用如表 1 所示。

表1 各零部件的可靠性参数及维修参数

Tab.1 Reliability parameters and maintenance parameters of components of catenary

零部件	可靠性尺度参数 α	可靠性形状参数 β	预防性维修费用 C_p /千元
接触导线	1.67×10^6	0.37	12
承力索	1.29×10^6	0.48	11
绝缘子	1 583.57	0.86	8
电联结	4 320.50	0.76	3
补偿装置	6.54×10^4	0.43	5.5

根据铁路接触网运行管理与检修规程,设定接触网的运行可靠性指标 $[R_s]=[0.88,0.90]$,得到上述5个零件相对接触网的可靠性灵敏度如表2所示。

将表1和表2中接触网各零件的参数代入接触网预防性机会维修优化模型,利用遗传算法进行优化求解,遗传算法求解的收敛精度为0.001,经过50次迭代运算后结果已经收敛,优化后的具体求解结果如表3所示。

利用表3所求得的结果,针对该段接触网的不同零部件,分别求得各零件在预防性维修以及预防性机会维修两种方式下的维修次数及对应的维修费用情况如表4所示。

表3 费用优化模型求解结果

Tab.3 Solution results of cost optimization model

零部件	维修可靠度区间 $[R_p]$	维修时间区间 $[T_p]$
接触导线	[0.989 1, 0.987 9]	[9.27, 12.29]
承力索	[0.995 9, 0.994 7]	[13.02, 22.23]
绝缘子	[0.973 1, 0.972 0]	[23.47, 24.60]
电联结	[0.968 1, 0.967 1]	[46.38, 48.33]
补偿装置	[0.969 1, 0.968 2]	[19.34, 20.71]

表4 接触网零件的维修次数与总维修费用

Tab.4 Maintenance number and maintenance cost of catenary

零部件	预防性维修		预防性机会维修		
	M_p /次	C_p /万元	M_o /次	M_o /次	C_o /万元
接触导线	12		9	3	
承力索	6		0	6	
绝缘子	6	201.6	3	3	139.2
电联结	3		3	0	
补偿装置	6		6	0	

根据表4的维修优化结果,可看到在14年的运行周期里,采用预防性机会维修,总维修次数为21次,总维修费用为139.2万元;而如果不采取机会维修的话,总维修次数为33次,总维修费用为201.6万元。相比于单独进行预防性维修,机会维修次数减少了36.4%,维修费用降低了30.95%,因而在降低人员劳动强度,减少接触网维修费用方面效果显著。

在预防性机会维修情况下,接触导线和绝缘子各减少了3次预防性维修,而承力索的维修也都是在其他零件维修时同时进行,采用机会维修后,该段接触网的具体维修方案如图3所示。

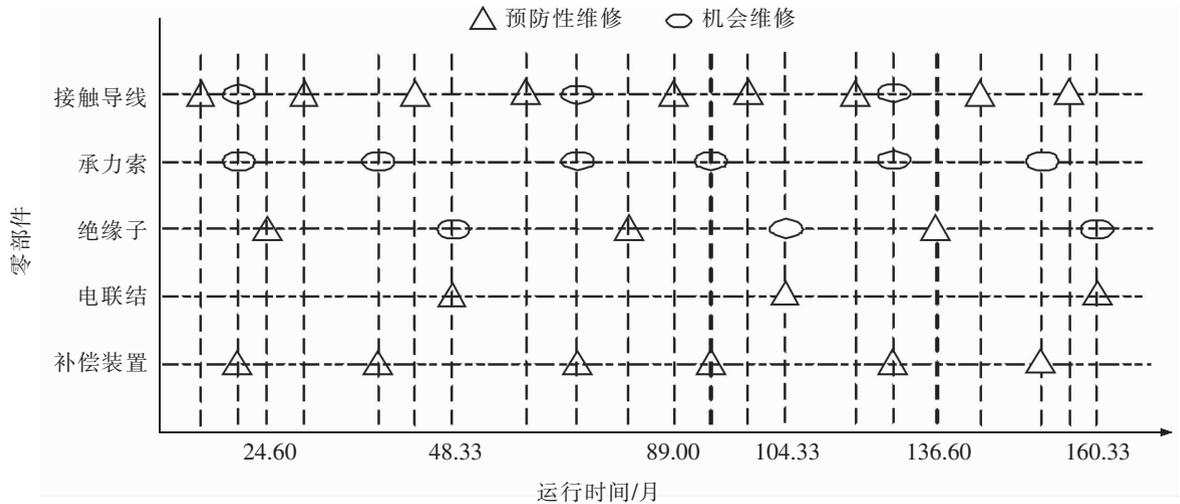


图3 接触网预防性机会维修实施方案示意图

Fig.3 Scheme of implementation of preventive opportunity maintenance for catenary

4 总结

1) 接触网是由多个零部件组成的复杂系统,各零部件之间相互关联、相互影响,接触网的维修计划应考虑这种关联的影响。

2) 区间数学可将接触网的维修时机由传统的时间点拓展为一个区间,从而使不同的接触网零件的维修时机之间出现相互配合的机会,为接触网机会维修的实施提供了条件。

3) 不同零部件对接触网系统的可靠性影响不同,可靠性灵敏度可以反映这种差异,可靠性灵敏度不同的接触网零件可以选取的预防性维修区间不同。

4) 机会维修可以考虑不同零部件相互之间的配合关系,有效降低接触网的维修次数,显著降低接触网的维修费用。

参考文献:

- [1] 何正友,程宏波. 高速铁路牵引供电系统健康管理及故障预警体系研究[J]. 电网技术,2012,36(10):259-264.
- [2] 李群湛,郭蕾,舒泽亮,等. 电气化铁路接触网在线防冰技术研究[J]. 铁道学报,2013,35(10):46-51.
- [3] 陈民武,李群湛,解绍锋. 牵引供电系统维修计划的优化与仿真[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2009,37(11):100-106.
- [4] 关金发,吴积钦,王旭东,等. 接触网 RCM 维修策略研究[J]. 铁道标准设计,2013(07):97-101.
- [5] 李雪,吴俊勇,杨媛,等. 高速铁路接触网悬挂系统维修计划的优化研究[J]. 铁道学报,2010,32(2):24-30.
- [6] 陈绍宽,王秀丹,柏赞,等. 基于费用最小的铁路牵引接触网维修计划优化模型[J]. 铁道学报,2013,35(12):37-42.
- [7] 刘欢,刘志刚,姜静. 基于可靠度约束的接触网系统预防性维修策略优化研究[J]. 机械强度,2016,38(1):74-79.
- [8] 刘琛,陈民武,宋雅琳,等. 高速铁路接触网系统风险评估与维修计划优化[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(2):205-213.
- [9] ANDERSON E J, FERRIS M C. Genetic Algorithms for Combinatorial Optimization: The Assemble Line Balancing Problem[J]. Inform Journal on Computing, 1993, 6(2):161-173.
- [10] 刘仕兵,曾聿田,刘欢,等. 基于支持向量机的弓网间电弧诊断策略[J]. 华东交通大学学报,2018,35(2):129-136.
- [11] JASZKIEWICZ A. Genetic local search for multi-objective combinatorial optimization[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 137(1):50-71.
- [12] 刘仕兵,仇智圣,马志方. 基于变权物元可拓模型的接触网健康状态综合评价[J]. 华东交通大学学报,2019,36(1):125-132.

- [13] 程宏波. 考虑不确定性的牵引供电系统健康管理及风险评估方法[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [14] 李雪. 京津城际接触网可靠性分析及维修管理系统的研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.
- [15] 韩帮军,范秀敏,马登哲. 基于可靠度约束的预防性维修策略的优化研究[J]. 机械工程学报,2003,39(6):102-105.
- [16] 孙楠楠. 以可靠性为中心的高铁接触网预防性机会维修研究[D]. 南昌:华东交通大学,2016.

Research on Preventive Opportunity Maintenance Method of Catenary Based on Interval Mathematics

Cheng Hongbo, Wang Xing, Sun Nannan, Zhang Wei, Wang Xun, Lun Li

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Since catenary is an associated system consisting of many components, the influence and difference between components should be taken into account in catenary maintenance. In this study, opportunistic maintenance model of catenary was established by interval mathematics, and it was transformed into a maintenance decision-making optimization problem based on reliability sensitivity. The objective of optimization was to minimize maintenance cost, and the constraints of reliability sensitivity of components and reliability index of catenary operation were taken as constraints. The optimal solution algorithm was used to optimize the opportunistic maintenance intervals of different components of the catenary. The results show that the optimization model of catenary maintenance based on interval mathematical method can effectively reduce the maintenance cost of catenary and provide guidance for catenary operation and maintenance on the basis of ensuring the reliability of the catenary system.

Key words: catenary system; opportunistic maintenance; interval mathematics; reliability