

# 基于 5G 的输电线路在线监测网络建模方法研究

尚军利,袁文政,王宇博,罗璇,刘建勇

(国网陕西省电力公司渭南供电公司,陕西 渭南 724000)

**摘要:**输电线路在线监测系统是智能电网的重要组成部分。针对当前缺乏有效构建满足性能要求的在线监测网络模型的问题,提出一种基于代价函数的综合评价建模方法。模型融合短距 ZigBee 无线中继通信和长距 5G 通信,根据通信过程中的延迟和能耗两个指标对所有节点通过优化方式进行分组,使得传输数据的代价函数最优。实验结果表明,所提出的模型能够有效构建出性能优化的在线监测系统网络,有利于实现智能电网和双碳目标。

**关键词:**输电线路;在线监测;5G;网络模型;双碳

中图分类号:TN929.5;TM72

文献标识码:A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.212319

中文引用格式:尚军利,袁文政,王宇博,等.基于 5G 的输电线路在线监测网络建模方法研究[J].电子技术应用,2022,48(3):18-21.

英文引用格式:Shang Junli, Yuan Wenzheng, Wang Yubo, et al. A network modeling for 5G-based transmission line online monitoring system[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(3): 18-21.

## A network modeling for 5G-based transmission line online monitoring system

Shang Junli, Yuan Wenzheng, Wang Yubo, Luo Xuan, Liu Jianyong

(Shaanxi Power Company Weinan Power Supply Company, Weinan 724000, China)

**Abstract:** On-line monitoring system of transmission line is an important part of smart grid. In view of the lack of effective online monitoring network modeling to meet the performance requirements, a comprehensive evaluation modeling method based on cost function is proposed in this paper. The model integrates short-range ZigBee wireless relay communication and long-range 5G communication, and groups all nodes are grouped in an optimized way according to the two indicators of delay and energy consumption, so as to optimize the cost function in the communication process. The experimental results show that the modeling proposed in this paper can effectively build an online monitoring system network with optimized performance, which is conducive to the realization of smart grid and double carbon goal.

**Key words:** transmission line; online monitoring; 5G; network modeling; double carbon

### 0 引言

高压输电线路是电力系统的重要组成部分,其安全运行对电力的稳定传输至关重要。当前,常常采用在线监测系统来对输电线路的各方面指标进行监测<sup>[1-2]</sup>。前端采用无线传感网络(Wireless Sensor Network, WSN),采集设备安装在输电杆塔附近的高压输电设备上,以获取温湿度、电流、倾斜度等指标,采集到的数据通过无线中继的方式汇聚到变电站,变电站经过光纤网将所有数据传回到后端控制中心。

输电线路在线监测网络中,数据传输速率与传输时延是评价网络性能的主要指标。数据传输速率通常由所选择网络本身的参数确定,而传输时延则与所设计的检测网络结构有关。文献[3]构建了基于无线传感器网络及光纤网络的在线监测层次化通信网络,并提出了网络多目标规划模型及优化决策方法,以数据传输路径连通性和链路通信带宽为约束条件,建立了以通信网络建设

成本和数据传输延时为目标的多目标最优化模型;文献[4]设计了 4 种适用于输电线路状态监测的通信网络及其数据传输架构,包括无线 APN 专网、OPGW 光通信网、OPGW 光通信网+WiFi 等;文献[5]提出了一种评估监测网络可靠性的方法;文献[6]则从传感器位置的合理布置方面提出了优化改进模型;文献[7]探讨了 5G 在电力领域的典型应用场景;文献[8]设计了一种基于 5G 通信的泛在电力物联网架构,表明 5G 已经在智能电网建设中逐步得到应用。然而,这些研究对 5G 应用的讨论主要在框架层面,并未对网络模型进行详细的研究。

本文提出一种基于 5G 的输电线路在线监测网络模型,通过对输电杆塔进行自适应分组,使整个监测网络在时延和能耗方面达到平衡,以获得最优的综合性能。

### 1 输电线路在线监测数据传输

#### 1.1 WSN 数据采集网络

如图 1 所示,在线监测数据采集部分由各类传感器

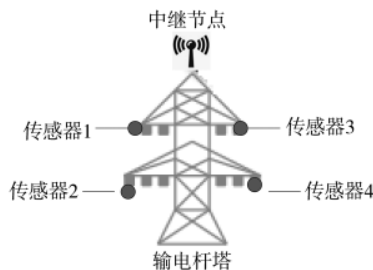


图1 WSN 数据采集示意图

组成,其通信协议一般采用 UART、RS485、RS232 等有线方式或者采用蓝牙、ZigBee 等低功耗无线方式。这些通信方式属于短距通信,有效距离一般在数米到数百米范围内。因此,传感器采集到的数据将汇聚到安装在杆塔顶部的中继节点。中继节点收到数据以后,将其向下一个中继节点转发,直到汇聚到变电站,最后在变电站通过光纤专网发回到后端控制中心。

### 1.2 线性中继数据传输

线性中继数据传输模型与输电线路的布局特征十分吻合,沿着线路在每个输电杆塔上配置无线中继设备,线路的两端连接到变电站,如图2所示。若杆塔的总数为  $n$ ,则从中间划分,左右两边各有  $n/2$  个中继节点。左边的中继节点将向左边转发数据,右边的中继节点将向右边转发数据。在线性模型下完整的数据传输过程所用的时间总长为:

$$T_L = \frac{n(n+2)}{8} \frac{S_M}{R_1} + \frac{n}{2} \cdot t_c \quad (1)$$

其中,  $S_M$  为一个节点产生的监测数据量,单位为 B;  $R_1$  为中继节点采用的无线通信方式的数据传输速率;  $t_c$  为 CSMA/CA 机制信道访问等待时长。

若线路有 100 个中继节点,相互之间采用 ZigBee 通信,数据传输速率为 31.25 KB/s,信道访问等待时间为 41 ms,每个杆塔处采集的数据大小为 2 KB,则计算得到传输时长为  $T_L = \frac{100 \times 102}{8} \times \frac{2}{31.25} + \frac{100}{2} \times 0.041 = 82.85$  s。

可以看出,线性模型所产生的传输时延是很大的。

### 1.3 基于 5G 的全连接数据传输

由于 5G 通信技术具有高带宽、低延时、长传输距离的优良性能,因此可以采用 5G 技术来改善线性模型的不足之处。假设每个中继节点都安装 5G 通信设备,使其能够往控制中心直接传输数据,则整个网络的传输时延将只包含这一段长距离通信时长。设 5G 通信数据传输速率为  $R_2$ ,则传输时延为  $\frac{S_M}{R_2}$ 。若  $R_2 = 10$  MB/s,则传输

时间不到 1 ms。然而,这种全连接结构在实际中是难以实现的。首先在每个节点处配置 5G 通信模块的成本是很高的,其次文献[9]~[10]指出,5G 系统的能耗将会随着与控制中心直接通信的节点数量的增加而大幅增加,远大于 ZigBee 等短距通信方式,因此与当前节能减排双碳目标是不相符的。

### 2 基于 5G 的数据传输优化模型

本文设计了一种平衡线性模型和 5G 全连接模型的新模型,对所有节点自适应分组并选取其中部分节点作为 5G 通信代理节点。新模型将平衡延时和能耗,达到综合性能最优。

如图3所示,在提出的模型中,  $n$  个节点被分成  $k$  个组,编号为  $G_1 \sim G_k$ ,  $k \geq 2$ 。每组包含  $m_i$  个节点,于是有  $\sum_{i=1}^k m_i = n$ 。每组仅有一个代理节点通过 5G 通信与控制中心传输数据,组内的其他节点则通过短距无线通信方式将数据中继传到代理节点。在这样的分组中,两端与变电站相连的各有 1 个组,编号分别为  $G_1$  和  $G_k$ ;其余节点被分到  $k-2$  个组,编号为  $G_2 \sim G_{k-1}$ 。不失一般性,设  $G_1$  和  $G_k$  包含相同数量的节点,  $G_2 \sim G_{k-1}$  包含相同数量的节点,即有:

$$2m_1 + (k-2)m_2 = n \quad (2)$$

$G_1$  和  $G_k$  具有相同的时延和能耗,  $G_2 \sim G_{k-1}$  具有相同的时延和能耗。为了达到时延和功耗的综合最优,需要求解合适的  $k$ 、 $m_1$  和  $m_2$ 。

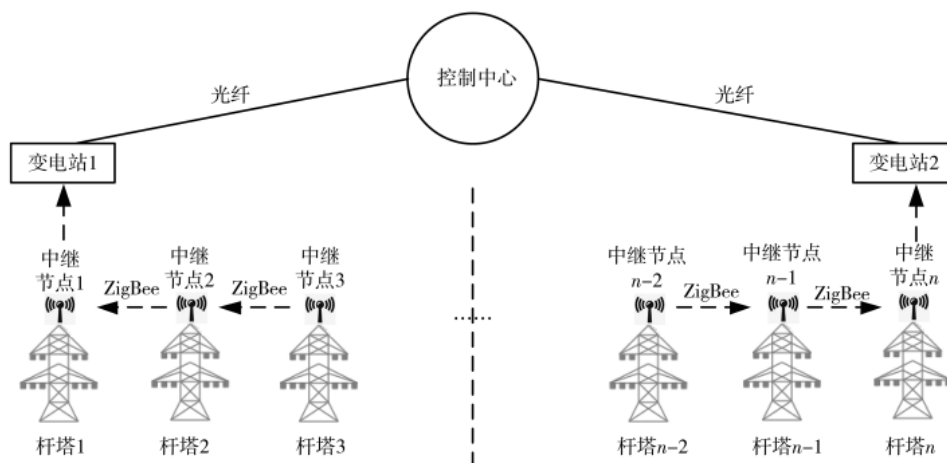


图2 监测网络线性中继模型示意图

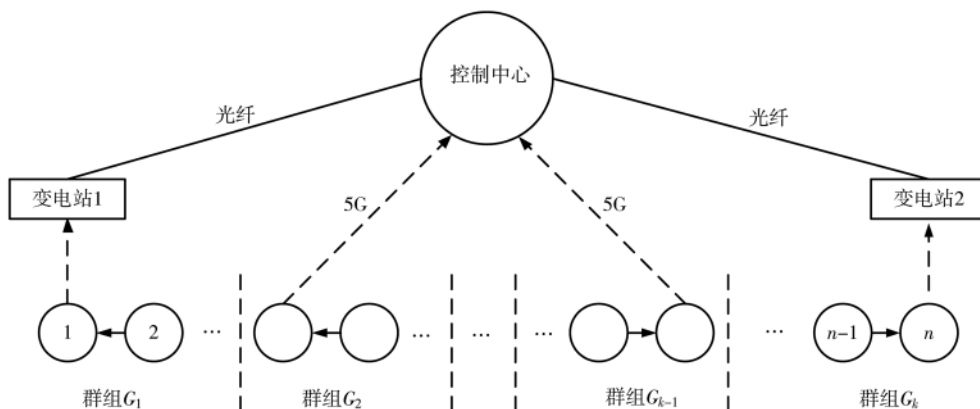


图3 优化的数据传输模型网络结构图

首先讨论群组  $G_1$  和  $G_2$  的时延。由于在  $G_1$  中, 每个节点通过线性中继转发数据到变电站, 因此, 总的数据传输时延为:

$$T_{G1} = \frac{m_1(m_1+1)}{2} \cdot \frac{S_M}{R_1} + m_1 \cdot t_c \quad (3)$$

式中, 第一项为传输数据需要的时间, 第二项为信道访问等待时间。

$G_2$  包含  $m_2$  个节点, 其中一个是与控制中心通信的代理节点, 位于群组的中间位置, 而其他节点通过线性中继模式将自身数据发送到代理节点。总的数据传输时延为:

$$T_{G2} = \frac{m_2(m_2+2)}{8} \cdot \frac{S_M}{R_1} + \frac{m_2}{2} \cdot t_c + \frac{m_2 \cdot S_M}{R_2} \quad (4)$$

式中, 第一项为传输数据需要的时间, 第二项为信道访问等待时间, 第三项为代理节点通过 5G 通信向控制中心传输数据需要的时间。

其次讨论群组发送数据产生的能耗。能耗与所发送到数据量和所采用无线通信方式有关。整条线路中继过程所消耗的能量为:

$$C_0 = E_P \times \left( m_1(m_1+1) \times S_M + (k-2) \times \frac{m_2(m_2+2)}{8} \times S_M \right) \quad (5)$$

其中,  $E_P$  为发送一个字节所消耗的能量, 括号中前一项表示  $G_1$  和  $G_2$  发送的数据总量, 后一项表示  $G_2 \sim G_{k-1}$  发送的数据总量。根据文献[11],  $E_P$  为 17.318 4  $\mu$ J。

此外, 有  $k-2$  个 5G 代理节点, 其传输的数据总量为  $(k-2) \times m_2 \times S_M$ 。5G 通信消耗的能量为  $e_1(x) + e_2 t_1 + e_3 t_2$ , 其中  $e_1(x)$  表示传输  $x$  千字节所消耗的能量,  $e_2 t_1$  表示 5G 通信结束后系统转为低功耗的拖尾时间所消耗的能量,  $e_3 t_2$  表示系统在低功耗情况下维持物理层接口消耗的能量, 则代理节点 5G 通信所消耗的能量为:

$$C_1 = (k-2) \times (e_1(m_2 \times S_M) + e_2 t_1 + e_3 t_2) \quad (6)$$

因此, 整个网络发送数据消耗的能量为:

$$C = C_0 + C_1 \quad (7)$$

使时延和能耗综合最优, 得到代价函数模型为:

$$\Psi = \lambda T + (1-\lambda)C \quad \lambda \in [0, 1] \quad (8)$$

其中,  $\lambda$  为调控因子,  $T = \max(T_{G1}, T_{G2})$ 。 $\lambda=0$  时, 只考虑能耗指标,  $\lambda=1$  时, 只考虑时延指标。使  $\Psi$  最小化, 联立方程(2)~(8), 求解得到  $k$ 、 $m_1$  和  $m_2$  即可。

### 3 实验结果

实验条件设置为: 线路长度为 50 km, 共计 100 个节点, 两端节点连接变电站。每个节点处采集的数据量大小  $S_M$  分别设置为 2 KB/4 KB, 采集数据的周期为 20 s/次。中继节点采用 ZigBee 通信, 数据速率为 31.25 KB/s, 信道访问等待时长  $t_c=41$  ms。5G 数据传输速率设为 10 MB/s。5G 网络参数设置为:  $e_1=0.015$ ,  $e_2=1.2$  J/s,  $t_1=15$  s,  $e_3=0.015$  J/s,  $t_2$  为传输周期减去数据发送所用的时间。 $\lambda$  分别设为 0、0.2、0.5、0.8、1。通过模型求解, 可以得到不同参数设置下的解, 实验结果如表 1 所示。

表1 模型求解实验结果

$\lambda$	每次采集的数据量/KB	$k$	$m_1$	$m_2$	$T_{G2}/s$	$C/J$	$\Psi$
0	2	3	17	66	37.27	50.31	50.31
	4	4	10	40	27.716	78.115	78.115
0.2	2	3	22	56	27.143	51.568 6	46.684
	4	4	12	38	25.114	78.290	67.655
0.5	2	4	16	34	10.496	58.66	34.578
	4	5	11	26	12.191	87.635	49.913
0.8	2	5	11	26	6.362 2	71.268	19.343 3
	4	6	10	20	7.458	100.86	26.138 4
1	2	100	1	1	0.105	1 797	0.105
	4	100	1	1	0.169	1 802	0.169

从表 1 可以看出, 随着代价函数中参数  $\lambda$  的取值不同, 优化模型对时延和能耗的关注度也不同, 因此对节点的分组方案也有较大的不同。当  $\lambda$  较小时, 模型求解方案倾向于分配较少的组, 每组包含更多的节点, 能耗低、延迟大, 接近于线性中继模型; 当  $\lambda$  变大时, 模型求解方案倾向于分配更多的组, 每组包含更少的节点, 延迟低、能耗大, 特别是  $\lambda=1$  时获得分组方案即为 5G 全连接模型。可以看出, 全连接模型的延迟是非常小的, 约

为 0.1 s,但能耗是非常高的,约为 1 800 J,是其他分配方案的数十倍。

图 4 展示了当  $\lambda$  不同时,数据量  $S_M$  分别设置为 2 KB、4 KB、6 KB 时模型获得的不同方案对应的时延曲线图。可以看出,随着  $\lambda$  由小变大,时延逐渐减小。而  $S_M$  大小增加,对时延的影响是非常小的。

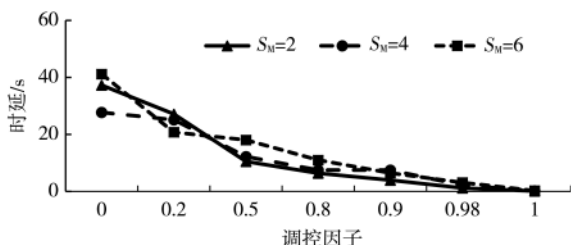


图 4 不同调控因子所给最优方案的时延比较

图 5 展示了当  $\lambda$  不同时,模型获得的不同方案对应的能耗曲线图。随着  $\lambda$  由小变大,能耗逐渐增大。由于当  $\lambda=1$  时能耗极速增大,远远超过其他数值,因此没有在同一张图里画出该点的值。

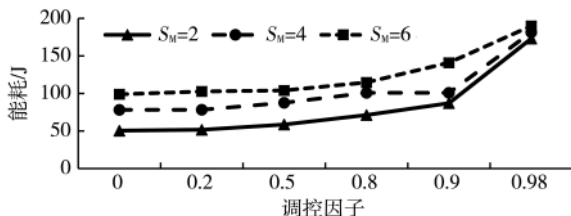


图 5 不同调控因子所给最优方案的能耗比较

图 6 展示了  $\lambda=0.5$  时不同分组方案的综合性能比较。可以看出,在随机选择的 11 组分配方案中,模型所给分组方案(4, 16, 34)的代价函数达到最小值,而其他分组方案得到的代价函数值都更大,证明所提出的模型是非常有效的。结合表 1 可知,当  $\lambda$  等于其他值时,模型均可以给出最优的分组方案。

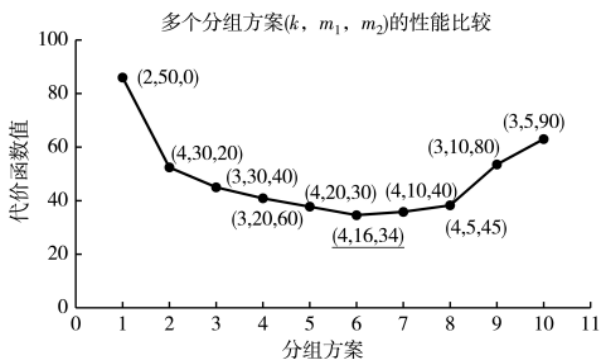


图 6 不同分组方案的综合性能比较

## 4 结论

输电线路在线监测系统的延时和能耗是非常重要的指标。本文提出基于 5G 的输电线路在线监测系统建模方法,可调整系统对延时和能耗关注度的不同权重,给出最优的节点分组方案,从而获得延时和能耗综合性能最优的传输网络。提出的模型可以方便地构建输电线路在线监测系统方案,有助于智能电网达成双碳节能目标。

## 参考文献

- [1] 张君艳.输电线路监测中无线传感器网络路由跨层优化的研究[D].保定:华北电力大学,2011.
  - [2] 李国宾.架空高压输电线路状态监测研究[D].长春:长春工业大学,2016.
  - [3] 余斌,尹项根,吴小忠,等.输电线路在线监测的层次化通信网络规划模型[J].中国电力,2019,52(3):161-168.
  - [4] 田毅,黄新波,袁正康,等.输电线路在线监测通信网络的设计与改进[J].西安工程大学学报,2020,34(4):72-79.
  - [5] 马冀,田锦,林尚静.基于深度学习的智能电网通信网可靠性评估方法[J].电力信息与通信技术,2021,19(10):72-77.
  - [6] 陈海军,韦鹏,吕金华,等.电气设备在线振动监测中传感器布置位置的优化研究[J].机械制造与自动化,2019,48(5):193-195,214.
  - [7] 赵玉坤,代冀阳,应进,等.基于 5G 通信的泛在电力物联网的设计与研究[J].现代电子技术,2021,44(21):6-10.
  - [8] 王甜甜,杨鸿珍,毛秀伟,等.基于 5G 电力虚拟专网的电力业务典型应用[J].电力信息与通信技术,2021,19(9):38-44.
  - [9] AL-MAITAH K, AL-KHRIESAT B, AL-ODIENAT A. Monitoring high voltage power lines using efficient WSN[J]. Advances in Energy and Power, 2020, 7(1): 10-19.
  - [10] ROURAY S K, SHARMILA K P. Green initiatives in 5G[C]// 2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics(AEEICB), 2016: 617-621.
  - [11] WU Y C, CHEUNG L F, LUI K S, et al. Efficient communication of sensors monitoring overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1130-1136.
- (收稿日期:2021-11-11)

## 作者简介:

尚军利(1973-),男,本科,高级工程师,主要研究方向:输电线路运维与检修。

袁文政(1970-),男,本科,工程师,主要研究方向:输电线路安全管理。

王宇博(1993-),男,本科,工程师,主要研究方向:电气工程。



扫码下载电子文档



## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所