

doi: 10.7690/bgzd.2025.04.011

基于次优解搜索算法的输电线路监测优化方法研究

王 帅, 李建伟, 万全龙, 王建阳, 韩嘉程, 沈振峰, 李新峰

(北京送变电有限公司输电施工二分公司, 北京 100240)

摘要: 为解决现有输电线路监测时成本高、通信时延和动态调整计算时间长等问题, 提出一种基于物联网的架空输电线路监测系统。建立考虑广域和非广域通信的输电线路通信模型和基于伦琴衰减的输电线路信道模型; 考虑成功传输率、延迟和鲁棒性等通信服务质量, 建立架空输电线路非线性整数规划优化模型; 提出一种寻找次优解算法, 根据网络图中输电塔之间信道质量的变化近实时计算优化解。实验阶段, 与最优化方法相比, 所提模型较 A^* 和遗传算法等路径决策算法的计算时间更优, 分别缩短 10 倍和 2.25 倍。结果表明, 所提系统为架空输电线路的连续监测时动态热额定值、实时结构感知和精确故障定位提供重要的数据支撑。

关键词: 智能电网; 输电线路; 监测系统; 物联网; 通信服务质量; 整数规划; 优化

中图分类号: TM72 **文献标志码:** A

Research on Transmission Line Monitoring Optimization Method Based on Suboptimal Solution Search Algorithm

Wang Shuai, Li Jianwei, Wan Quanlong, Wang Jianyang, Han Jiacheng, Shen Zhenfeng, Li Xinfeng

(No. 2 Branch Transmission Construction Co., Ltd., Beijing Power Transmission and Transformation Co., Ltd., Beijing 100240, China)

Abstract: In order to solve the problems of high cost, communication delay and long dynamic adjustment calculation time in the existing transmission line monitoring, an overhead transmission line monitoring system based on the Internet of Things (IoT) is proposed. A transmission line communication model considering wide area and non-wide area communication and a transmission line channel model based on roentgen attenuation are established; a nonlinear integer programming optimization model of the overhead transmission line is established by considering communication service quality such as successful transmission rate, delay, robustness and the like; and a suboptimal solution finding algorithm is proposed, and an optimal solution is calculated in near real time according to the change of the channel quality between transmission towers in a network graph. In the experimental stage, compared with the optimization method, the computing time of the proposed model is better than that of the path decision algorithms such as A^* and genetic algorithm, which is 10 times and 2.25 times shorter, respectively. The results show that the proposed system provides important data support for dynamic thermal rating, real-time structure sensing and accurate fault location of overhead transmission lines during continuous monitoring.

Keywords: smart grid; transmission line; monitoring system; Internet of Things; communication quality of service; integer programming; optimization

0 引言

随着通信、计算机、物联网、网络^[1-3]等技术兴起, 智能电网迎来了飞速发展时期。智能电网^[4]是一种利用先进信息和通信技术的电网, 确保能源供应商和消费者之间的信息和电力双向流动, 从而提高电力系统运行效率、可靠性和安全性。作为智能电网的一个组成部分, 架空输电线路的连续监测对于动态热额定值、实时结构感知和精确故障定位至关重要。

输电塔通常用于在一定设计距离内支撑架空输电线路的重量。在每个输电塔上, 可利用多组传感

器组成的物联网监测传输线路。物联网中的传感器执行测量并将收集的数据传输到专用变电站。在变电站, 接收到的数据通过网络^[5](如光纤、无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)、广域网(wide area network, WAN)转发到控制中心, 从而实现分析数据, 以确定输电线路的运行状态。对于输电线路的连续监测, 收集的数据必须在一定延迟内到达控制中心, 同时满足预定延迟和可靠性阈值等通信服务质量(quality of service, QoS)要求。文献[6]基于覆冰期输电塔线的监测数据采用主成分分析法客观地确定评估指标的权重, 并结合模糊综

收稿日期: 2024-08-10; 修回日期: 2024-09-07

第一作者: 王 帅(1986—), 男, 北京人。

合评价法设计了输电塔线体系的安全状态评估模型。文献[7]使用合成孔径雷达影像,应用永久散射体差分干涉测量技术对高压输电塔结构及其沿线地表进行形变监测。文献[8]提出了采用以光纤通信为主、WiFi 和 4G 通信为辅的混合自组网新型通信模式。文献[9]设计了一种以 STM32 为控核心,基于 ZigBee 与 GPRS 技术的输电杆塔实时监测预警系统。上述工作大都采用 WSN 或 WAN 异构网络进行智能电网中的架空输电线路监测,但缺乏根据输电塔之间时变链路质量的变化动态激活塔上 WAN 模块的研究。同时,许多研究未考虑 WAN 模块安装时成本的问题。

为解决现有输电线路监测时成本高、通信时延和动态调整计算时间长等问题,在建立了电力网络拓扑结构基础上,笔者提出一个优化问题,确定启用 WAN 的输电塔的数量和位置,在不影响延迟、连接性和带宽方面给定的多个 QoS 要求的情况下,降低电力系统监控模块安装数量,从而节省监控系统成本。

1 系统模型

1.1 模型介绍

笔者设计了由输电塔、输电线路和变电站组成的架空输电线路监测系统,其结构如图 1 所示。每个输电塔都有一个通信继电器,通过利用短程通信(≤ 100 m, 如 ZigBee)与同一塔上的传感器进行通信。每个继电器从传感器收集有关输电线路监测的信息,然后将聚合数据传输到附近杆塔上的另一个继电器,或通过利用远程通信(≥ 100 m, 例如 Wi-Fi)直接传输到变电站。

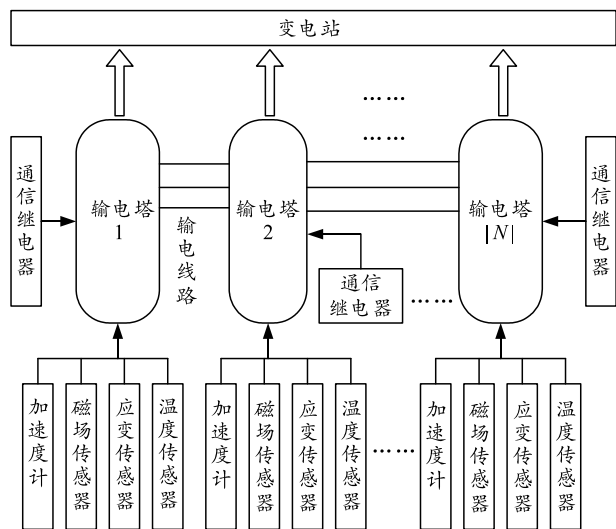


图 1 架空输电线路监测系统结构

令 $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, |\mathcal{N}|\}$ 为沿输电线路的所有输电塔的集合,其中 $|\mathcal{N}|$ 为沿线路的塔的总数。假设网络中的最后一个输电塔(即 $|\mathcal{N}|$)为虚拟塔,通过高速有线链路(例如光纤)连接到变电站的控制中心。令 L_{info} 为原始数据块中的位数,该数据块由安装在输电塔上的所有传感器生成,并传输到控制中心。同时,笔者采用基于时隙的媒体接入协议,这样初始数据块可划分为具有固定大小的 M 个分组:

$$L_{\text{pac}} = L_{\text{info}} / M. \quad (1)$$

式中 L_{pac} 为分组后数据块的大小。需注意,所有单个数据流都有其自己的通信 QoS 需求。

输电线路监测系统的通信网络^[10]定义如下:

$$\mathcal{G} = \{\mathcal{N}, \mathcal{L}\}. \quad (2)$$

式中: $\mathcal{G}$ 为通信网络图; $\mathcal{N}$ 为输电塔的集合; $\mathcal{L}$ 为输电塔间所有无线通信链路的集合。令 r_{ij} 为输电塔 i 和 j 之间的最大可达数据传输可达速率。当且仅当 $r_{ij} \geq r_{\min}$ 时,链路 l_{ij} 可以连接输电塔 i 和 j 。 $r_{\min}$ 传输大小为 L_{pac} 的数据包所需的最小数据传输可达速率。此外,链路 (i, j) 的数据传输率可定义如下:

$$r_{ij} = B \log(1 + g_{ij} p_{tx} / N_0). \quad (3)$$

式中: B 为信道的带宽; p_{tx} 为每个输电塔的中继发射功率; N_0 为噪声功率; g_{ij} 为链路 (i, j) 的信道质量。在网络图 $\mathcal{G}$ 中,令路径 p_i 为输电塔 i 和控制中心之间连接链路的无环序列,定义如下:

$$p_i = \{l_{ij}, l_{jk}, \dots, l_{q|\mathcal{N}|\}\} \subseteq \mathcal{L}. \quad (4)$$

此外,可将时间划分为多个时隙,同时时隙可组织为周期性时分复用(time-division multiple access, TDMA)帧。令每个时隙适合传输大小为 L_{pac} 的数据包,则有:

$$T_s = L_{\text{pac}} / r_{\min}. \quad (5)$$

式中 T_s 为每个 TDMA 帧具有的固定持续时间。同时,将 TDMA 帧的长度设置为:

$$T_f = \delta T_s; \quad (6)$$

$$\delta = r_{\min} T_f / L_{\text{pac}}. \quad (7)$$

式中 T_f 为 TDMA 帧的长度。

为从每个输电塔向控制中心进行可靠的数据传输,笔者采用了基于喷泉码(fountain code, FC)的传输机制。具体步骤如下:首先,在每个输电线路监测输电塔处生成的原始流 L_{info} (以位为单位)将划分为 M 个数据包,则固定大小为 L_{pac} (式(1),以位为单位);其次,将链路 (i, j) 通过应用 FC 编码为 M'_{ij} ($M'_{ij} \geq M$),并经由链路 (i, j) 进行传输(即由输电塔

i 至输电塔 j)。同时, 当且仅当成功解码分组 M'_{ij} 中的 M 个分组时, 接收机可以成功解码原始流。注意, 编码分组的数目 $M'_{ij} \in [M, M'_{\max}]$ 可以根据所选链路的信道质量和时间实例而变化, 从而保证所需的通信 QoS 约束。其中 $M'_{\max}$ 信息流的最大允许编码分组数。假设在每个输电塔的 TDMA 帧中, 仅为每个输电塔的信息流分配一个时隙; 因此, 信息流的服务率下限定义如下:

$$f_a = 1/T_f M'_{\max} \quad (8)$$

式中 f_a 为输电塔信息流的服务率下限。

同时, 笔者假定在每个输电塔上, 不同的信息流随机独立到达。为确保排队系统的稳定性, 信息流的服务率应大于其到达率:

$$f_a = 1/T_f M'_{\max} \geq \lambda \quad (9)$$

式中 λ 为信息流的到达率。因此, TDMA 帧的长度满足以下等式:

$$T_f = 1/\lambda M'_{\max} \quad (10)$$

1.2 信道模型

令输电塔 i 和 j 之间的无线通信链路记为链路 (i, j) 。在时间 t 时, 链路 (i, j) 的信道质量由 $g_{ij}(t)$ 表示。 $g_{ij}(t)$ 包括大尺度路径损耗和小尺度衰落, 具体定义如下:

$$g_{ij}(t) = \bar{g}_{ij}(t) |h_{ij}(t)|^2 \quad (11)$$

式中: $\bar{g}_{ij}(t)$ 为信道的大尺度分量; $h_{ij}(t)$ 为信道的小尺度分量。假设同一输电线路中的所有输电塔都在彼此的视线距离 (line-of-sight, LoS) 内。大尺度路径损耗定义如下:

$$\bar{g}_{ij}(t) = \kappa (d_{ij}/d_0)^\eta \quad (12)$$

$$\kappa = \frac{G_T G_R \mu^2}{(4\pi d_0)^2 L} \quad (13)$$

式中: κ 为无单位常数, 取决于天线特性等因素; d_{ij} 为输电塔 i 和 j 之间的距离; d_0 为固定参考距离; η 为路径损耗指数, 自由空间传播模型下 $\eta=2$; G_T 和 G_R 分别为发射器和接收器的天线增益; μ 为载波波长; L 为与传播无关的系统损耗因子, 通常有 $L \geq 1$ 。

对于多径衰落问题, 考虑到通信信道的服务水平特性, 笔者采用伦琴衰减模型; 因此, 小尺度系数的概率密度函数 (probability density function, PDF) 可以定义如下:

$$f_{\text{rice}}(h_{ij}) = \frac{h_{ij}}{\sigma_{ij}^2} \exp\left(-\frac{h_{ij}^2 + s_{ij}^2}{2\sigma_{ij}^2}\right) I_0\left(\frac{h_{ij}s_{ij}}{\sigma_{ij}^2}\right) \quad (14)$$

式中: s_{ij} 为链路 (i, j) 非视距多径分量的镜面反射振幅; σ_{ij}^2 为平均功率; I_0 为零阶修正贝塞尔函数。当监测数据在伦琴衰落信道上从输电塔 i 传输到输电塔 j 时, 差分相干检测的误码率定义如下:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + K_{ij}}{1 + K_{ij} + \gamma_{ij}} \right) \exp\left(-\frac{K_{ij}\gamma_{ij}}{1 + K_{ij} + \gamma_{ij}}\right); \quad (15)$$

$$K_{ij} = s_{ij}^2 / 2\sigma_{ij}^2 \quad (16)$$

式中 K_{ij} 为伦琴因子。由于假设每条链路在未授权频段中利用单独的信道, 因此笔者忽略来自其他中继的干扰。

2 输电线路监测优化模型

2.1 约束条件

2.1.1 基于 FC 的成功传输概率

令 β_{ij} 为链路 (i, j) 的成功分组传输概率, 其定义如下:

$$\beta_{ij} = (1 - e_{ij})^{L_{\text{pac}}} \quad (17)$$

式中 e_{ij} 为链路的误码率。同时, 基于 FC 的链路 (i, j) 成功传输概率可定义为发送 M'_{ij} 数据包时接收至少 M 个数据包的概率, 具体模型如下:

$$P_{ij}(M'_{ij}) = \sum_{m=M}^{M'_{ij}} \binom{M'_{ij}}{m} \beta_{ij}^m (1 - \beta_{ij})^{M'_{ij}-m} \quad (18)$$

式中: 随着 M'_{ij} 数量增加, 基于 FC 的传输成功的概率增加; 同时, M'_{ij} 增加将导致输电塔 i 和 j 之间成功传递初始 M 个分组所需的总传输时间增加。

综上, 输电塔 i 和 j 之间基于 FC 的成功传输概率可定义为以下优化问题:

$$\min_{l_{ij} \in \mathcal{L}} M'_{ij} \text{ s.t. } P(M'_{ij}) \geq P^* \quad (19)$$

式中 P^* 为预定义的阈值。

2.1.2 基于 FC 的延迟

建立每个输电塔信息流的端到端延迟模型。令给定 M'_{ij} 下链路 (i, j) 的延迟为 τ_{ij} 。当输电塔 i 传输数据包时, 由于网络阻塞等问题可能存在通信等待时间。该等待时间是一个随机变量, 服从 $[0, T_f]$ 的均匀分布, 因此平均等待时间为 $T_f/2$ 。进一步, 可将传输 M'_{ij} 的链路 (i, j) 的链路延迟定义如下:

$$\tau_{ij}(M'_{ij}) = \frac{T_f}{2} + (M'_{ij} - 1)T_f + \sum_{i=1}^{\delta} \frac{1}{\delta} \left[(i-1)T_s + \frac{L_{pac}}{r_{ij}} \right]; \quad (20)$$

$$r_{ij} \geq r_{\min}. \quad (21)$$

式中：第 1 项为传输 M'_{ij} 的平均等待时间；第 2 项为传输 $M'_{ij} - 1$ 个包的传输时间；第 3 项为最后一个包的平均传输时间。同时，式(20)可进一步推导为：

$$\tau_{ij}(M'_{ij}) = \frac{T_f}{2} + (M'_{ij} - 1)T_f + \frac{L_{pac}}{r_{ij}} + \frac{T_s(\delta - 1)}{2}. \quad (22)$$

同理，路径 p_i 定义为从输电塔 i 到控制中心的连接链路的无环序列，则其形式化定义表示如下：

$$p_i = \{l_{ij}, l_{jk}, \dots, l_{q|N|}\}. \quad (23)$$

通过式(22)和(23)，在给定路径 p_i 下从输电塔 i 向控制中心传输数据包的端到端延迟 $D_i(p_i)$ 定义如下所示：

$$D_i(p_i) = \sum_{l_{ij} \in p_i} \tau_{ij}. \quad (24)$$

可以设置通信中继条件，即输电塔 i 的端到端延迟应小于预定阈值 D^* ，具体定义如下：

$$D_i(p_i) \leq D^*. \quad (25)$$

2.1.3 鲁棒性

考虑到电力系统中物理设备故障和来自其他无线网络的严重干扰导致所选路径上的特定链路突然故障，为保证网络之间实现无缝数据传输，引入电力系统鲁棒性指标。鲁棒性确保每个输电塔与其目的地(即变电站)之间的多条不相交路径满足预定的端到端延迟要，从而确保多条不相交路径的通信安全。

令 R_i 为输电塔 i 和控制中心之间的所有节点不相交路径的集合；因此，电力系统鲁棒性约束定义如下：

$$|R_i| \geq R^*. \quad (26)$$

式中： $|R_i|$ 为输电塔 i 和控制中心之间的节点不相交路径的数量； R^* 为鲁棒性预定阈值。

2.2 模型求解

2.2.1 目标函数

令 $x_i, i \in |N|$ 为 WAN 模块状态二进制变量。如果输电塔 i 处的 WAN 模块激活，则 $x_i = 1$ ，否则 $x_i = 0$ 。同时，假设如果第 1 个输电塔的 WAN 模块激活，其将通过链路直接将原始 M 个数据包(无 FC)传输到控制中心。同时，该输电塔可作为中继，通过非

广域网链接从其他输电塔传输数据包。更具体地说，由于其他输电塔的分组传输，在其 TDMA 帧内没有可用时隙的输电塔激活其 WAN 模块以仅传输其自己的数据。然而，即使没有可用的时隙，其也不会激活 WAN 模块传输其他输电塔的数据包。也就是说，每个输电塔可以激活其 WAN 模块，以仅传输其自身的数据。这一假设主要是考虑通过广域网链路(如卫星和蜂窝链路)的数据传输随着发送更多信息而明显增加了资金成本。此外，如果 $x_i = 1$ ，则需考虑通信 QoS 和鲁棒性要求。

综上，输电线路连续监测模型可定义为在满足所有通信 QoS 约束的同时，最小化安装输电塔上的激活 WAN 模块的数量的目标函数定义如下：

$$\left. \begin{array}{l} \min_{l_{ij} \in \mathcal{L}} M'_{ij} \\ \text{s.t. } P(M'_{ij}) \geq P^* \\ D_i \leq D^* \\ |R_i| \geq R^* \\ x_i \in \{0, 1\} \end{array} \right\}. \quad (27)$$

2.2.2 次优解搜索算法

非线性整数规划^[11]问题由于约束限制，无法实时找到问题的最优解。为此，笔者提出一种寻找次优解算法，从而根据网络图 $\mathcal{G}$ 中输电塔之间信道质量的变化近实时求解优化问题。为向控制中心发送监控信息，按距离控制中心最远的输电塔的顺序依次确定路径，从而保证所考虑的通信 QoS 约束。同时，不能满足约束条件的输电塔应打开其 WAN 模块进行广域网通信。所提次优解搜索算法流程如图 2 所示。

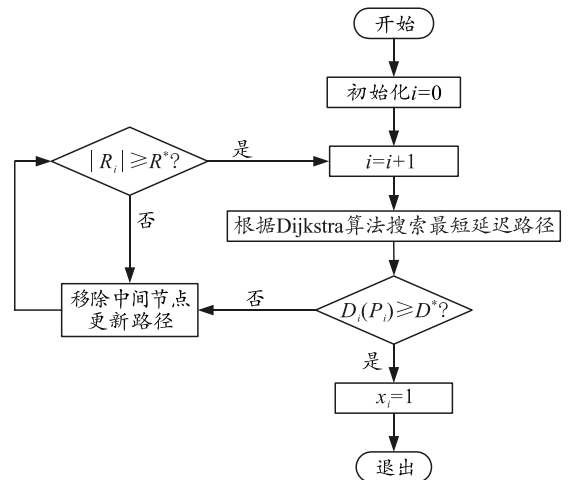


图 2 次优解搜索算法流程

所提次优解搜索算法的关键思想是路径(即，是

否使用 WAN 模块)按照距离控制中心最近的输电塔的顺序确定。主要原因是解决优化问题式(27)时,主要困难是难以确定满足优化问题中描述的端到端的延迟约束。例如,尽管在候选路径上的每个链路上都有足够的可用时隙,但如果不满足端到端延迟约束,则应打开 WAN 模块。随着输电塔离控制中心越来越远,这种现象更加明显;因此,通过按距离控制中心最近的输电塔的顺序检查通信 QoS 约束,所提次优解搜索算法可以满足通信 QoS 约束条

件;因此,所提模型可以显著减少找到可行解所需的计算时间。更重要的是,与最优解算法(即完全搜索算法)识别的路径相比,所提算法发现的路径没有显著的性能差异。

3 仿真与分析

3.1 环境与实验设置

图 3 为单变电站线性网络拓扑结构,共包含 20 个电力塔和 1 个变电站。

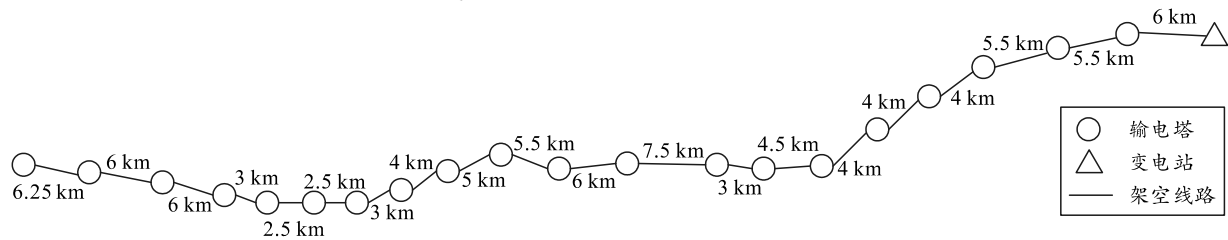


图 3 单变电站线性网络拓扑结构

为验证所提算法有效性,将所提算法与最优解搜索算法进行比较。所提算法中 Dijkstra 算法在网络图 $\mathcal{G}$ 中搜索端到端延迟最小的路径。为确定 Dijkstra 算法的有效性,实验时 A^* 算法与遗传算法等路径决策算法进行对比。此外,实验时相关参数设置如下: L_{info} 为 1 024 bits,信息流的到达率 λ 为 100%/s,信息流的最大允许编码分组数 M'_{max} 为 10,最小数据传输可达速率 r_{min} 为 1 Mbps,鲁棒性预定阈值 R^* 为 2,伦琴因子 K_{ij} 为 5 dB,信道的带宽 B 为 1 MHz,电力塔数量根据具体实验设置,且 $|\mathcal{N}| \in [1, 20]$ 。

3.2 对比与分析

3.2.1 计算时间对比

表 1 所示为输电塔数量变化时算法计算时间对比结果。可以看出,随着输电塔数量的增加,无论选择何种路径规划算法,最优解算法的计算时间都远大于所提算法;同时,所提算法随着输电塔数量增加计算时间比较稳定。分析原因,随着输电塔数量不断增加,最优解算法的所有可行解在 $2^{|\mathcal{N}|}$ 的尺度上呈指数增长。所提算法为次优解搜索算法,不需要搜索整个路径空间。此外,所提算法下,

采用 Dijkstra 路径规划算法平均时间为 0.09 s,较 A^* 和遗传算法等路径决策算法的计算时间更优,分别缩短 10 倍和 2.25 倍。

3.2.2 通信 QoS 对比

对 3 种实验环境下输电塔通信 QoS 进行对比,即延迟 D^* 和传输成功率 P^* 。实验环境 1 为输电塔数量 12,传输成功率阈值 99.99%,延迟阈值 200 ms;实验环境 2 为输电塔数量 18,传输成功率阈值 99.995%,延迟阈值 300 ms;实验环境 3 为输电塔数量 18,传输成功率阈值 99.995%,延迟阈值 200 ms。对比算法分别选取 Dijkstra 路径规划下所提算法和最优解算法。对比指标选取算法求解结果(表征哪些输电塔基于 WAN 网络直接与变电站相连)、最大时延和计算时间。表 2 所示为不同环境实验对比结果。

表 1 输电塔数量变化时算法计算时间对比结果 s

算法	输电塔个数			
	10	12	18	20
最优化算法(遗传算法)	104.90	850.30	1 230.50	6 440.3
最优化算法(A^*)	9.90	29.60	89.90	129.9
最优化算法(Dijkstra)	0.90	5.60	12.90	87.4
所提算法(遗传算法)	0.90	1.10	1.20	1.2
所提算法(A^*)	0.40	0.40	0.40	0.5
所提算法(Dijkstra)	0.09	0.09	0.09	0.1

表 2 不同环境实验对比结果

指标	实验 1		实验 2		实验 3	
	所提算法	最优解算法	所提算法	最优解算法	所提算法	最优解算法
求解结果	1, 2, 3, 11	1, 2, 3, 11	1~6, 14, 16	1~6, 14, 17	1~10, 16	1~10, 17
最大时延/ms	197	197	285	285	187	187
计算时间/s	0.09	5.6	0.09	12.9	0.10	87.4