

# 基于 FAHP 的机械振动 WSN 均衡拓扑构建方法\*

汤宝平, 赵春华, 曾超, 肖鑫

(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆, 400030)

**摘要** 针对机械振动无线传感器网络因拓扑不均衡导致传输时延和网络传输能耗增加的问题, 提出了一种基于模糊层次分析(fuzzy analytic hierarchy process, 简称 FAHP)的均衡拓扑构建方法, 该方法由构建模糊判断矩阵和计算权重向量组成。首先, 传感器节点进行簇内通信获取信标广播信息, 将信标节点网络决策因子统一量纲化, 利用网络决策因子构建模糊判断矩阵; 其次, 检验模糊判断矩阵一致性, 采用行和归一化处理或拉格朗日最小二乘法计算权重向量; 最后, 传感器节点通过权重向量计算出各个信标节点综合权值, 关联最优信标节点为父节点加入网络, 将提出的模糊层次分析拓扑构建方法与基于链路质量单准则构建网络拓扑机制进行对比。实验结果表明, 该方法能有效改善传输时延和机械振动无线传感器节点网络寿命。

**关键词** 机械振动监测; 无线传感器网络; 均衡拓扑; 传输时延; 传输能耗

**中图分类号** TH17; TP274.2

## 引言

在机械振动无线传感器网络(wireless sensor networks, 简称 WSN)中传感器节点侦听信道时根据单准则构建网络拓扑<sup>[1-3]</sup>, 但在大多数情况下网络拓扑结构不均衡, 导致网络中部分路由由节点负载更重、数据传输时延变长和节点传输能耗上升等问题<sup>[4-6]</sup>, 特别是在大量机械振动数据传输时表现尤为显著, 使得无线传感器网络节点固有能量受限问题更加严峻<sup>[7]</sup>。因此, 如何构建拓扑均衡、节能的机械振动无线传感器网络是亟待解决的难题。

针对无线传感器网络均衡拓扑构建方法, 国内外学者进行了相关研究<sup>[8-9]</sup>。Guo 等<sup>[10]</sup>提出一种启发式拓扑控制算法, Gui 等<sup>[11]</sup>提出了分布式逻辑邻居调整拓扑控制算法, 改善了多跳网络端到端的传输能耗。Hao 等<sup>[12]</sup>提出结合链路质量和能量构建链路权重模型的分布式拓扑构建算法, 根据链路质量和能量组建网络, 提高了网络传输链路质量, 均衡了网络传输能耗。针对面向机械振动监测的网络拓扑构建方法, 文献<sup>[13]</sup>提出在网络自组织过程中, 节点根据接收信号强度选择父节点分组完成网络拓扑构建, 避免了节点需要大功率发射信号的情况。以上方法在构建机械振动无线传感器网络过程中没有考

虑节点度、网络深度等因素导致越靠近网关的节点转发任务越重和增加了数据传输时延。

笔者提出一种基于 FAHP 的机械振动 WSN 均衡拓扑构建方法。节点在构建网络过程中通过簇内通信获取信标节点自组网信标信息, 将节点电压, 节点度, 网络深度和链路质量指示(link quality indicator, 简称 LQI)作为构建网络的主要决策因子, 选择最优的信标节点作为父节点, 实现机械振动无线传感器网络拓扑均衡, 均衡路由节点传输负载, 缩短信号数据传输时延, 延长传感器节点网络寿命。

## 1 FAHP 的 WSN 均衡拓扑原理

多跳树形网络拓扑结构具有覆盖范围广、层次结构鲜明和鲁棒性强的特点<sup>[14-15]</sup>, 可以避免节点由于距离原因导致传输可靠性降低和能量消耗过大, 机械振动无线传感器网络拓扑结构的性能可以直接影响采集节点到网关的数据传输效率和能耗。但是在现有的单准则构建机械振动无线传感器网络拓扑方法<sup>[13]</sup>下, 传输大量机械振动数据时使部分路由节点中继数据负载严重, 导致数据传输时延变长、节点传输能耗增加的问题。为此, 引入多准则决策方法去均衡各个信标节点网络性能, 提出模糊层次分析的 WSN 均衡拓扑构建方法, 如图 1 所示。节点通

\* 国家自然科学基金资助项目(51675067, 51775065)  
收稿日期: 2018-07-25; 修回日期: 2018-09-22

过扫描信道,侦听各个信标节点自组网信标信息,收集网络决策因子并统一量纲,构造模糊判断矩阵,检验其模糊一致性,采用行和归一化或拉格朗日最小二乘法计算网络决策因子权重向量和信标节点综合权值,选择最优的信标节点作为父节点加入网络。

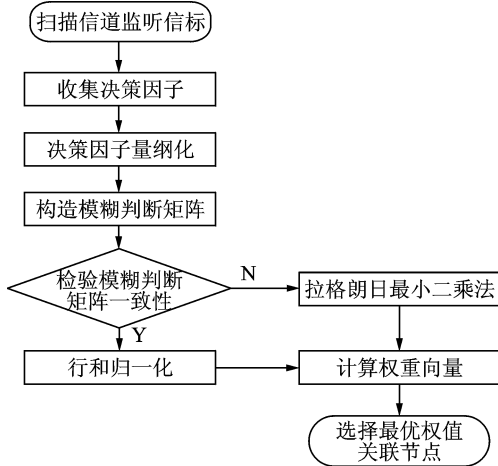


图1 模糊层次分析的 WSN 均衡拓扑原理

Fig. 1 Principle of WSN balance topology based on fuzzy analytic hierarchy process

## 2 FAHP 的 WSN 均衡拓扑构建

### 2.1 网络决策因子量纲统一

机械振动信号采集数据量大,内存资源受限的传感器网络节点无法一次性传输,为了避免由不均衡网络拓扑导致路由节点中继数据负载过重、传感器节点缓存溢出及丢失数据包,需要构建均衡网络拓扑平衡传感器节点传输负载。IEEE 802.15.4 协议采用载波侦听多路访问机制,节点监听各个信标节点的自组网信标信息。信标帧的信标载荷最大地址长度为 52 字节,可以通过将父节点网络决策因子信息载入信标来实现子节点低开销地获取决策因子信息广播机制。如图 2 所示,自组网信标载荷由自组网信标类型、网络深度、总路由数、路由退避时间、节点电压和节点度组成。节点可以侦听父节点周期广播的信标帧信息,获取的描述父节点网络状况参数包括:节点电压  $V$ 、父节点的节点度  $D$ 、父节点网络深度  $H$  和父节点网络链路质量指示等。节点由两节可充电锂电池供电,节点电压通过 TI CC2530 无线通信模块监测电源电压值获取。网络深度为信标节点到网关节点所路由的跳数,节点度为信标节点子网络中所包含的子节点数,父节点局部链路质量值可通过在自组网信标帧的帧控制域中获得。由于传感器节点各个参数决策因子量纲不一致,先将

每个网络决策因子统一量纲处理

$$\begin{cases} V'_k = \frac{V_k - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \\ D'_k = \frac{D_{\max} - D_k}{D_{\max}} \\ H'_k = \frac{H_{\max} - H_k}{H_{\max}} \\ LQI'_k = \frac{LQI_k - LQI_{\min}}{LQI_{\max} - LQI_{\min}} \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\{V'_k, D'_k, H'_k, LQI'_k\} \in [0, 1]$ , 为信标节点  $k$  的各个网络决策因子量纲统一后的大小;  $V'_k$  为信标节点  $k$  的剩余电压比率,表示节点剩余能量;  $D'_k$  为信标节点  $k$  的节点度比,表示信标节点的传输振动信号负载大小程度;  $H'_k$  为信标节点  $k$  到网关节点的网络深度,表示信标节点  $k$  传输原始振动信号到网关节点的中继次数;  $LQI'_k$  表示传感器网络节点间链路通信质量状况。

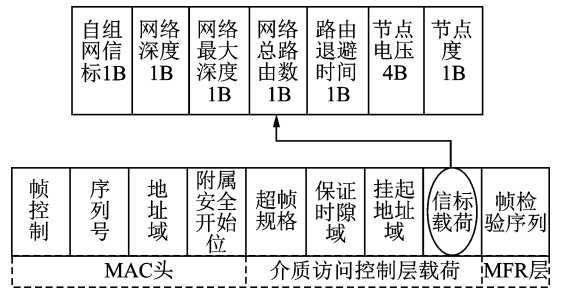


图2 自组网信标载荷格式

Fig. 2 The format of beacon payload for self-networking

### 2.2 构造模糊判断矩阵

传感器网络节点侦听通信信道获取信标节点的网络决策因子经过量纲统一后,得到信标节点  $k$  网络决策因子集合  $X_k = \{V'_{k1}, D'_{k2}, H'_{k3}, LQI'_{k4}\}$ , 信标节点  $k$  网络决策因子之间模糊权重关系为模糊判断矩阵

$$\mathbf{R}_k = (r_{ij})_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵  $\mathbf{R}_k$  中每列数据  $r_{ij}$  的大小由式(3)计算

$$r_{ij} = \begin{cases} 0.5 + \frac{\text{round}(10(X_{ki} - X_{kj}))}{20} \\ \quad (\text{round}() \text{ 为偶数}) \\ 0.5 + \frac{\text{round}(10(X_{ki} - X_{kj})) + 1}{20} \\ \quad (\text{round}() \text{ 为奇数}) \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $\text{round}(10(X_{ki} - X_{kj}))$  为  $10(X_{ki} - X_{kj})$  四舍五入的整数部分;  $r_{ij}$  表示信标节点  $k$  的网络决策因子  $i$  与  $j$  的权重差值大小,其中  $r_{ii} = 0.5$ 。

### 2.3 计算网络决策因子权重向量

为了保证传感器节点对网络决策因子权重的准确性,需检验模糊判断矩阵  $\mathbf{R}_k$  一致性。若模糊判断矩阵  $\mathbf{R}_k$  具有以下性质

$$\begin{cases} r_{ii} = 0.5 & (i=1,2,3,4) \\ r_{ij} = 1 - r_{ji} & (i,j=1,2,3,4) \\ r_{ij} = r_{im} - r_{jm} & (i,j,m=1,2,3,4) \end{cases} \quad (4)$$

则  $\mathbf{R}_k$  为模糊判断一致矩阵,反映了权重比较判断的一致性。对模糊一致矩阵进行归一化,得到信标节点网络决策因子权重向量  $\mathbf{W}$ ,计算公式为

$$\begin{cases} w_i = \frac{\sum_{j=1}^4 r_{ij}}{\sum_{j=1}^4 \sum_{j=1}^4 r_{ij}} \\ \mathbf{W} = (w_1, w_2, w_3, w_4)^T \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $\mathbf{W}_k = \{w_1, w_2, w_3, w_4\}$  分别信标节点  $k$  的网络决策因子节点电压、节点度、网络深度和链路质量指示的权重。

在实际机械振动无线传感器网络中,有时传感器节点根据式(3)构造模糊判断矩阵  $\mathbf{R}$  过程中的取整运算会使信标节点网络决策因子权重存在差异,导致模糊判断矩阵不具有一致性。因此采用  $w_i - w_j$  表征网络决策因子  $i$  比  $j$  的重要程度。 $r_{ij}$  与  $(w_i - w_j)$  可用函数  $f(x)$  表示,即

$$r_{ij} = f(w_i - w_j) \quad (-1 \leq w_i - w_j \leq 1) \quad (6)$$

假设  $f(x)$  具有多项式形式,即

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (-1 \leq x \leq 1) \quad (7)$$

由模糊判断矩阵  $\mathbf{R}_k$  的性质,式(4)可推导出

$$r_{ij} = 0.5 + a(w_i - w_j) \quad (-1 \leq w_i - w_j \leq 1; 0 < a \leq 0.5) \quad (8)$$

其中:  $a$  为传感器节点对信标节点网络决策因子间权重差异程度。

对多组机械振动无线传感器网络拓扑构建过程进行统计分析,将  $a$  的经验初值设置为 0.5,利用最小二乘法计算信标节点的网络决策因子。

$$\begin{cases} \min Y = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 [0.5 + a(w_i - w_j) - r_{ij}]^2 \\ \sum_{i=1}^4 w_i = 1 \quad (0 \leq w_i \leq 1) \end{cases} \quad (9)$$

由拉格朗日乘子法可知,约束规划问题转化为如下无约束规划问题

$$\min L(w, \lambda) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 [0.5 + a(w_i - w_j) - r_{ij}]^2 + 2\lambda \left( \sum_{i=1}^4 w_i - 1 \right) \quad (10)$$

权重系数  $w_1, w_2, w_3, w_4$  的值为以下方程组的解

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w_i} = 2a^2 \sum_{j=1}^4 (w_i - w_j) + a \sum_{j=1}^4 (r_{ji} - r_{ij}) + \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^4 w_i - 1 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

求解式(11),得到权重系数  $w_1, w_2, w_3, w_4$  值为

$$w_i = \frac{8a + 3 \sum_{j=1}^4 (r_{ij} - r_{ji}) - \sum_{m=1, m \neq i}^4 \sum_{j=1}^4 (r_{mj} - r_{jm})}{32a} \quad (i=1,2,3,4) \quad (12)$$

通过式(12)可求得信标节点  $k$  网络决策因子权重向量  $\mathbf{W}_k = \{w_1, w_2, w_3, w_4\}$ 。利用式(13)计算出每个信标节点的综合权值。

$$\begin{cases} y_k = w_1 V_k' + w_2 D_k' + w_3 H_k' + w_4 LQI_k' \\ w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1 \end{cases} \quad (13)$$

其中:权重向量  $\mathbf{W}_k = \{w_1, w_2, w_3, w_4\}$  为信标节点  $k$  对应网络决策因子的权重;  $y_k$  为信标节点  $k$  的综合权值。

选择最优综合权值作为节点申请加入信标节点网络的依据,实现机械振动无线传感器网络负载均衡拓扑。

### 3 性能验证与分析

在无线传感器网络节点 WSN4 的无线通信模块 TI CC2530 上实现模糊层次分析方法,实现机械振动 WSN 负载均衡拓扑构建。为验证本研究方法的性能,与文献[13]中的方法进行对比。WSN4 采集节点采用双核架构,由 ARM Cortex M4 内核的 STM32F405 微控制器和无线通信模块 TI CC2530 集成的增强型 8051 微处理器组成,节点支持 IEPE 传感器,采用噪声较低的 IEPE 传感器采集机械振动信号。WSN4 路由节点由无线通信模块 TI CC2530 组成,并外扩容量为 128 Mbit 的 Flash 芯片作为数据缓存区域,采集节点与路由节点由两节 3.7 V, 1 200 mA 的可充电锂电池供电。若电压低于 4.6 V, 节点则不能正常工作,实物如图 3 所示。采集完毕后,实验 1,3 通过笔者所提模糊层次分析方法构建机械振动无线传感器网络拓扑将原始数据通过路由节点 1,2 中继传输至网关节点 0,同时通过串口上传至上位机管理系统,实验 2,4 则采用文献[13]中的方法进行组建网络以及振动数据传输。实验 1,2 的实验条件为无齿轮箱遮挡的环境,实验 3,4 的实验条件为齿轮箱遮挡的环境,节点在实验测试平台布置如图 4 所示。将多个 WSN4 节点组建多跳树形网络,如图 5,6 所示。图 5 为本研究方法和文献[13]方法在无齿轮箱遮挡环境所构建

的拓扑结构。图6为本研究方法和文献[13]方法在齿轮箱遮挡环境所构建的拓扑结构。

WSNG4采集节点分别对动力传动故障诊断综合实验台平行轴齿轮箱输入轴和输出轴两个相互垂直方向的机械振动信号进行周期性采样,采样频率为25 600 Hz,单周期采样长度为51.2 kB。采样间隔为10 min。记录采集节点分别在无齿轮箱遮挡、

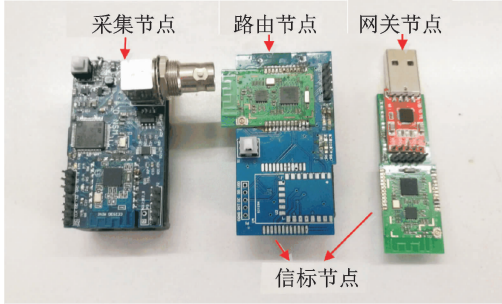


图3 WSNG4节点实物图

Fig. 3 The prototype of WSNG4

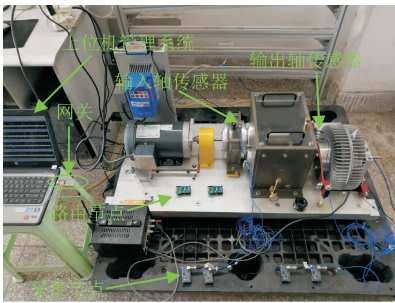
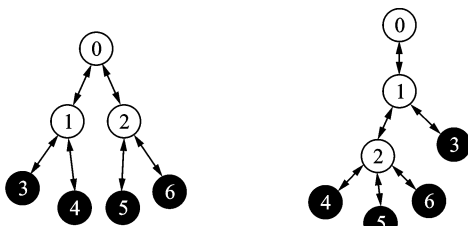


图4 实验测试平台照片

Fig. 4 The photo of comparative experiment test platform



(a) 本研究方法

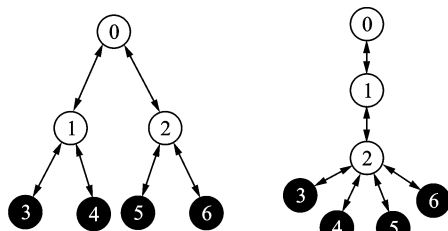
(a) The proposed method

(b) 文献[13]方法

(b) Method of reference[13]

图5 实验1与实验2拓扑结构

Fig. 5 Topology structure between experiment 1 and 2



(a) 本研究方法

(a) The proposed method

(b) 文献[13]方法

(b) Method of reference[13]

图6 实验3与实验4拓扑结构

Fig. 6 Topology structure between experiment 3 and 4

有齿轮箱遮挡环境的实验条件下,4组不同网络拓扑下的单周期采样数据传输时间进行对比,结果如表1所示。

表1 两种拓扑构建方法的单周期传输耗时比较

Tab. 1 Time-consuming comparison in two topology construction methods in cycle

节点编号	传输耗时/s			
	实验1	实验2	实验3	实验4
3	8.13	14.56	8.09	14.87
4	7.97	14.09	8.24	15.14
5	8.29	15.21	7.94	15.38
6	7.81	14.89	8.31	14.91
平均	8.05	14.69	8.15	15.08
节约时间/%	45.20	45.95		

实验1,3每个采集节点在均衡网络拓扑传输51.2 kB原始数据平均耗时分别为8.05 s和8.15 s,与实验2,4构建网络拓扑相比,分别节约45.20%和45.95%的时间。由此可知,齿轮箱遮挡的环境下对传输耗时有微小的增加。由于WSN信道带宽资源有限,在不均衡的树形网络拓扑中,数据传输速率会进一步受限,这时采用提出的模糊层次分析方法可以减少数据传输时延。

此外,由于网关节点由监测中心供电,可不考虑其能耗,采集节点对网关节点的网络深度设置为1。节点1、节点2为路由节点,其功能为中继数据传输,不包含采集过程。根据前期计算能耗方法<sup>[7]</sup>利用NI9234采集并记录WSNG4节点在运行过程中的电流变化情况,计算节点能耗,计算公式为

$$E = \int_{N_1}^{N_2} \frac{IU}{f_s} dN \quad (14)$$

其中: $E$ 分别为节点采样、传输和空闲状态能耗; $I$ 为节点运行过程中的变化电流; $U$ 为节点工作电压; $f_s$ 为NI9234采样频率; $N_1, N_2$ 分别对应于节点采样、传输和空闲状态起始与结束点数。

采集节点单周期时间内总功耗 $E'$ 为

$$E' = E_a + E_t + E_s \quad (15)$$

其中: $E'$ 为单周期时间内节点总功耗; $E_a$ 为单周期时间内采集过程节点功耗; $E_t$ 为单周期时间内传输过程节点功耗; $E_s$ 为单周期时间内空闲过程节点功耗。

单周期采集、传输和空闲能耗如表2~7所示。

表2 实验1采集节点能耗

Tab. 2 Experiment 1 acquisition node energy consumption

采集节点编号	mJ			
	采集	传输	空闲	总能耗
3	86.9	839.7	13 583.9	14 510.5
4	92.4	816.2	13 642.7	14 551.3
5	89.6	796.3	13 693.3	14 579.2
6	88.3	807.6	13 655.1	14 551.0

表 3 实验 2 采集节点能耗

Tab. 3 Experiment 2 acquisition node energy consumption

采集节点编号	采集	传输	空闲	总能耗
3	90.2	1 047.1	13 675.3	14 812.6
4	87.4	1 071.9	13 575.2	14 734.5
5	88.1	1 045.8	13 509.6	14 643.5
6	87.9	1 063.9	13 703.2	14 855.0

表 4 实验 1,2 两组实验路由节点能耗对比

Tab. 4 Comparison of energy consumption of router node between experiment 1 and experiment 2

路由节点状态	实验 1 网络拓扑		实验 2 网络拓扑	
	节点 1	节点 2	节点 1	节点 2
传输	1 596.5	1 607.2	3 386.7	2 689.9
空闲	7 087.7	7 099.9	7 104.3	7 069.2
总能耗	8 684.2	8 707.1	10 491.0	9 759.1

表 5 实验 3 采集节点能耗

Tab. 5 Experiment 3 acquisition node energy consumption

采集节点编号	采集	传输	空闲	总能耗
3	90.6	846.7	13 603.2	14 540.5
4	95.1	831.9	13 636.5	14 563.5
5	86.2	863.1	13 674.8	14 624.1
6	89.7	842.6	13 642.4	14 574.7

表 6 实验 4 采集节点能耗

Tab. 6 Experiment 4 acquisition node energy consumption

采集节点编号	采集	传输	空闲	总能耗
3	92.4	1 195.4	13 573.9	14 861.7
4	86.2	1 204.8	13 643.2	14 934.2
5	89.8	1 186.1	13 589.3	14 865.2
6	90.3	1 215.5	13 691.8	14 997.6

表 7 实验 3,4 两组实验路由节点能耗对比

Tab. 7 Comparison of energy consumption of router node between experiment 3 and experiment 4

路由节点状态	实验 1 网络拓扑		实验 2 网络拓扑	
	节点 1	节点 2	节点 1	节点 2
传输	1 627.2	1 611.4	3 403.5	3 435.8
空闲	7 112.6	7 130.8	7 375.4	7 048.9
总能耗	8 739.8	8 742.2	10 778.9	10 484.7

4 组节点在采集和空闲过程能耗基本相等,但在传输过程中,实验 1 与实验 2 相比采集节点平均传输功耗降低了 22.91%;实验 3 与实验 4 相比采集节点平均传输功耗降低了 29.52%;路由节点 1 与路由节点 2 平均传输功耗分别降低了 52.86% 和 40.25%。此外,节点总电压为  $V$ ,工作最低电压为  $V_{\min}$ ,电池容量为  $C$ ,则节点可工作的总能量  $E_{\text{total}}$  为

$$E_{\text{total}} = (V - V_{\min})C/3\ 600 \quad (16)$$

其中:  $E_{\text{total}}$  为节点可工作的总能量;  $V$  为节点总电压;  $V_{\min}$  为节点可工作的最低电压;  $C$  为电池容量。

利用表 2~7 中测出的节点单周期能耗可计算出每个节点的网络寿命

$$\begin{cases} T_{\text{life}} = \frac{E_{\text{total}}}{E'}T \\ T = T_a + T_t + T_s \end{cases} \quad (17)$$

其中:  $T_{\text{life}}$  为节点寿命周期时间;  $T$  为单周期时间;  $T_a$  为单周期采集时间;  $T_t$  为单周期传输时间;  $T_s$  为单周期空闲时间。

由于网络节点第 1 次出现“死亡”会引起节点振动数据不能上传到监测管理系统,因此以网络中的最小节点寿命为网络的整体寿命。实验 1,2,3,4 节点寿命周期对比结果如图 7,8 所示,相比无齿轮箱遮挡环境下,在齿轮箱遮挡环境下采集节点和路由节点的网络寿命会略有下降,这是由于实验环境的影响导致构建的网络拓扑结构进一步不均衡,使数据传输冲突加大,传输能耗增加。以上实验说明该方法可优化机械振动无线传感器网络传输时延和网络节点寿命周期。

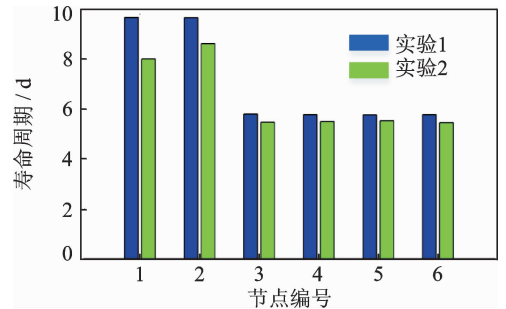


图 7 实验 1,2 节点寿命周期对比

Fig. 7 The node lifetime of comparative experiment 1 and 2

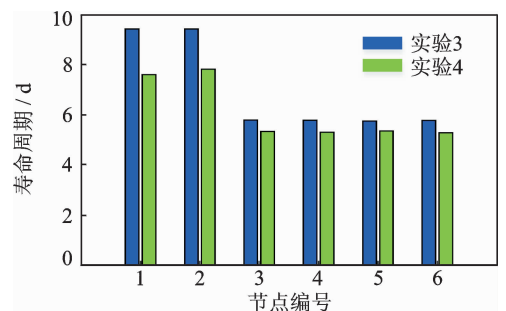


图 8 实验 3,4 节点寿命周期对比

Fig. 8 The node lifetime of comparative experiment 3 and 4

## 4 结束语

提出一种基于 FAHP 的机械振动均衡网络拓扑构建方法。通过信标广播方式获取信标节点网络

决策因子并统一量纲处理,构造模糊判断矩阵、检验其一致性,采用行和归一化或拉格朗日最小二乘法计算出权重向量和信标节点综合权值,选择最优父节点加入网络,构建均衡网络拓扑。实验结果表明,采用该方法构建的均衡网络拓扑优化了振动数据传输路径,减轻了路由节点数据传输负载,降低了路由节点数据缓存压力,使各个路由节点传输负载更为均衡,可有效改善固有能量受限的机械振动 WSN 传输时延和节点网络寿命。

### 参 考 文 献

- [1] GOMES R D, QUEIROZ D V, FILHO A C L, et al. Real-time link quality estimation for industrial wireless sensor networks using dedicated nodes[J]. *Ad Hoc Networks*, 2017, 59:116-133.
- [2] AN J, QI L, GUI X, et al. Joint design of hierarchical topology control and routing design for heterogeneous wireless sensor networks[J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2017, 51:63-70.
- [3] GHERBI C, ALIOUAT Z, BENMOHAMMED M. An adaptive clustering approach to dynamic load balancing and energy efficiency in wireless sensor networks[J]. *Energy*, 2016, 114:647-662.
- [4] LEE C Y, SHIU L C, LIN F T, et al. Distributed topology control algorithm on broadcasting in wireless sensor network[J]. *Journal of Network & Computer Applications*, 2013, 36(4):1186-1195.
- [5] SHIU L C, LIN F T, LEE C Y, et al. A distributed reliable and energy-efficient topology control algorithm in wireless sensor network[C]// *International Conference on Information Science and Applications*. [S. l.]: IEEE, 2012:1-6.
- [6] GUI J, ZHOU K. Flexible adjustments between energy and capacity for topology control in heterogeneous wireless multi-hop networks[J]. *Journal of Network and Systems Management*, 2016, 24(4):789-812.
- [7] 曾超, 邓蕾, 张又进, 等. 机械振动无线传感器网络数据分块大小研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(7):1556-1563.
- ZENG Chao, DENG Lei, ZHANG Youjin, et al. Research on the data block size of mechanical vibration wireless sensor networks[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(7):1556-1563. (in Chinese)
- [8] LI M, LI Z, VASILAKOS A V. A survey on topology control in wireless sensor networks: taxonomy, comparative study, and open issues[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(12):2538-2557.
- [9] CHU X, SETHU H. Cooperative topology control with adaptation for improved lifetime in wireless ad hoc networks [C] // *INFOCOM*, 2012 *Proceedings IEEE*. [S. l.]: IEEE, 2012:262-270.
- [10] GUO S, ZHAO H, WANG X, et al. Energy-efficient topology control algorithm for maximizing network lifetime in wireless sensor networks with mobile sink [J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 34(S):539-550.
- [11] GUI J, ZENG Z. Joint network lifetime and delay optimization for topology control in heterogeneous wireless multi-hop networks[J]. *Computer Communications*, 2015, 59:24-36.
- [12] HAO X, LIU W, YAO N, et al. Distributed topology construction algorithm to improve link quality and energy efficiency for wireless sensor networks[J]. *Journal of Network & Computer Applications*, 2016, 72:162-170.
- [13] 汤宝平, 贺超, 曹小佳. 面向机械振动监测的无线传感器网络结构[J]. *振动、测试与诊断*, 2010, 30(2):357-361.
- TANG Baoping, HE Chao, CAO Xiaojia, et al. Structure of wireless sensor network for mechanical vibration monitoring[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2010, 30(2):357-361. (in Chinese)
- [14] 马晨明, 王万良, 洪榛. 异构无线传感器网络中基于CDS树的拓扑控制方法[J]. *传感技术学报*, 2014(6):814-820.
- MA Chenming, WANG Wanliang, HONG Zhen. A topology control method based on CDS tree in heterogeneous wireless sensor network[J]. *Chinese Journal of Sensors & Actuators*, 2014(6):814-820. (in Chinese)
- [15] 汤宝平, 邓兵, 邓蕾, 等. 无线传感器网络多级融合的机械故障诊断方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2016(1):92-96.
- TANG Baoping, DENG Bing, DENG Lei, et al. Mechanical fault diagnosis method based on multi-level fusion in wireless sensor networks[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016(1):92-96. (in Chinese)



**第一作者简介:**汤宝平,男,1971年9月生,博士、教授、博士生导师。享受国务院政府特殊津贴专家,国家级有突出贡献中青年专家,入选“百千万人才工程”国家级人选、教育部新世纪优秀人才、重庆市百千万工程领军人才培养计划,获中国机械工程学会青年科技成就奖、重庆市杰出青年基金、霍英东青年教师基金、重庆市有突出贡献的中青年专家、第13届“重庆青年五四奖章”获得者。兼任全国高校机械工程测试技术研究会副理事长,中国振动工程学会动态测试专委会副主任。主要研究方向为机电装备安全服役与寿命预测、测试计量技术及虚拟仪器和无线传感器网络。主持国家自然科学基金、国家“863”计划、国防军工计划等30余项科研项目。发表论文160余篇,出版专著1部,获发明专利6项。作为主要完成人,荣获国家技术发明二等奖1项、国家科技进步二等奖1项、国家级教学成果二等奖1项、省部级科技进步一等奖5项。

E-mail: bptang@cqu.edu.cn