

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201304025

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20130827.1118.003.html>

# 面向管道系统的无线传感器网络三维节点部署算法

余华平<sup>1</sup>, 郭梅<sup>2</sup>

(1. 长江大学 计算机科学学院, 湖北 荆州 434023; 2. 长江大学 科学技术处, 湖北 荆州 434023)

**摘要:**管道系统是事关国民经济发展的基础设施,而节点的三维部署问题是基于无线传感器网络的管道监控系统的基础性技术问题.首先把三维管道结构映射为XY和XZ 2个二维平面结构,分别对其进行传感器节点部署优化分析.然后在此基础上,设计了面向管道系统的三维传感器节点的部署算法.最后对算法进行了覆盖性能、连通性能以及能耗性能的评价,结果表明,该算法能有效解决管道系统节点三维部署问题,为超长油气管道、城市自来水管网及污水管网监测提供理论指导和实践依据.

**关键词:**三维节点部署;无线传感器网络;管道系统;覆盖;连通;能耗

**中图分类号:**TP393 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4785(2013)04-0333-06

中文引用格式:余华平,郭梅.面向管道系统的无线传感器网络三维节点部署算法[J].智能系统学报,2013,8(4):333-338.

英文引用格式:YU Huaping, GUO Mei. The research of three-dimensional node deployment of wireless sensor network for pipeline systems[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(4): 333-338.

## The research of three-dimensional node deployment of wireless sensor network for pipeline systems

YU Huaping<sup>1</sup>, GUO Mei<sup>2</sup>

(1. College of Computer Science, Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 2. Department of Science and Technology, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

**Abstract:** Pipeline systems are vital infrastructure to most national economies, while three-dimensional deployment problem of sensor nodes in wireless sensor networks (WSNs) for monitoring pipeline systems is a fundamental technical problem. This paper firstly analyzed the optimal deployment strategy in XY plane and XZ plane which were projected from three-dimensional pipeline structures, however, on this basis a three-dimensional sensor node deployment algorithm for pipeline systems was designed. And then, the sensor node deployment algorithm was discussed from the network coverage performance, connectivity performance and sensor node energy consumption. The analysis results show that the algorithm can efficiently solve the three-dimensional sensor node deployment problem and provide theoretical guidance and practical basis for the monitoring of super-long oil and gas pipeline, the city tap water pipe network and sewage pipe network.

**Keywords:** three-dimensional node deployment; wireless sensor network; pipeline system; coverage; connectivity; energy consumption

无线传感器网络(WSN)由大量资源受限的传感器节点组成.传感节点一般配置有感测单元、计算单元、存储单元和通讯单元等模块.传感器节点以随机部署或确定性部署的方式在监测目标区域内协作完成监测对象的感测、计算和数据传输任务,实现监

测区域的长时间、不间断监测<sup>[1-2]</sup>.目前,无线传感器网络已广泛应用在民用和军用等领域,如健康监测、环境监控、科学探索、工业控制以及战场监测等.

管道系统是事关国民经济发展的基础设施,它是运输石油、天然气、自来水、污水及化工产品等大量液体和气体的最经济方式<sup>[2]</sup>.与铁路运输、高速公路运输及轮船运输相比,管道运输具有低成本和高容量等明显优势.但是,随着管道长度的不断增加,

收稿日期:2013-04-15. 网络出版日期:2013-08-27.

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2012FFB00102).

通信作者:余华平. E-mail: yhpjz@126.com.

管道系统监控管理面临着巨大的压力,特别是在管道压力检测、流量监测、管道腐蚀、管道泄漏和环境污染等严重影响管道安全和传输效率方面.无线传感器网络以其低成本、可持续、无间断、安全有效地为管道系统提供监控管理,极大地提高管道系统的管理水平和经济社会效益<sup>[3]</sup>.

传感器节点部署一般分为随机部署和确定性部署 2 类.在保证网络无缝覆盖和网络连通的前提下,追求传感器节点覆盖效率最大化是无线传感器网络应用的基本要求.近年来,节点部署研究主要集中在二维平面问题上,现有的三维节点部署也主要集中在开阔空间的节点部署上,对有固定结构特征的(诸如管道系统)的三维节点覆盖问题研究较少.李莉等<sup>[4]</sup>基于覆盖性能提出了一种无线地下三维传感器网络节点覆盖算法 MCC3D,但该算法是面向开阔空间结构设计的,对管道系统不能达到最优;文献[5]中论述了一种面向窄长空间结构特征的三维节点部署算法,其算法核心思想是把窄长空间划分成 2 个二维平面进行分析优化,但该算法对于具有固定特征的管道系统并不能达到最优部署;王璐超等<sup>[6]</sup>针对矩形立体仓库结构特点,讨论了矩形立体仓库三维节点部署方案.目前也还没有发现专门针对管道系统节点三维部署的研究.现有的面向开阔空间,或是面向窄长空间和矩形结构的三维节点部署方案不能完全适应管道结构空间,因此,开展管道系统节点部署研究具有重要的现实意义和应用价值.

## 1 管道结构与网络模型

### 1.1 管道空间结构

管道一般由铁质、水泥及塑料制成,管道内径从 0.1~10 m<sup>[2]</sup>.根据其结构特征,为方便分析,把管道三维结构投射到 XY 平面和 XZ 2 个二维平面结构进行分析<sup>[4]</sup>,如图 1 所示.在管道系统中,无线传感器节点只能部署在管道侧壁上,从拓扑图形的角度看,节点位置在 XY 平面上的投影全部位于圆形边上,在 XZ 平面上的投影位于矩形的 2 条长边上.

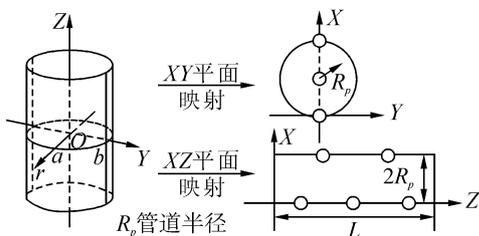


图 1 管道系统的空间结构

Fig.1 The spatial structure of pipeline system

在研究节点部署算法时,首先确定节点在 XY

轴方向上的最优部署位置,再研究节点在 Z 轴方向上的优化部署策略.

### 1.2 网络模型

为了保证管道系统的监测性能,采用 3 层传感器网络,如图 2 所示<sup>[3]</sup>.在第 3 层,传感器节点部署在管道表面,实现管道的无缝完全覆盖.这些节点具有有限的能量、计算和存储资源,节点能量不能及时补充,节点之间通过短距离无线通讯传输数据,其主要作用是采集管道的运行状态数据,并把数据上传到上层节点.在第 2 层,传感器节点主要部署在地面上如管道系统的中转站、分流站、加压站等地方.此层节点的计算、存储资源比第 3 层节点明显增强,能量一般可补充,节点间可通过卫星、无线基站及有线网络通讯.主要负责收集第 3 层节点数据,进行初步的分析整合后上传到最上层的管道系统的监控中心.

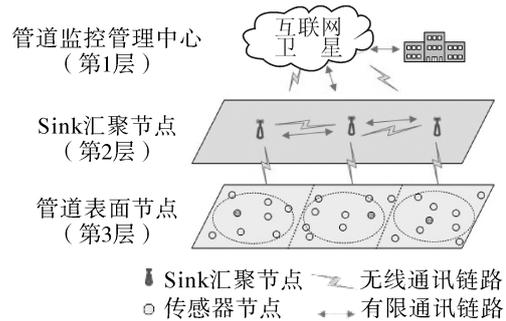


图 2 3 层网络体系结构

Fig.2 Three-layer network architecture

## 2 传感器节点三维部署算法

为了便于描述,约定用  $R_p$  表示管道的半径(一般指外径半径), $L$  表示管道的长度, $R_s$  表示传感器节点的传感半径.在研究中,把三维管道结构投影到 XY 和 XZ 2 个二维平面上进行分析.

### 2.1 XY 平面节点部署分析

从宏观上看,管道系统的传感器节点呈线型分布,网络的拓扑结构由节点在 Z 轴方向上的位置所决定,节点在 XY 平面上的位置并不影响网络性能,因此在确定节点在 XY 平面上的位置时,主要考虑节点的有效覆盖效率和节点间的有效冗余关系.根据传感器节点感测半径与管道半径之间的关系: $R_s \geq 2R_p$ 、 $\sqrt{2}R_p \leq R_s < 2R_p$ 、 $R_p = R_s < \sqrt{2}R_p$  和  $R_s < R_p$  4 种情况进行讨论,其最优覆盖如图 3 所示.在图 3 中,可以看到,当  $R_s \geq 2R_p$  时,在 XY 平面上仅用一个传感器节点就可以全覆盖;当  $2R_p > R_s \geq \sqrt{2}R_p$ ,需要用 2 个传感器节点实现全覆盖;当  $\sqrt{2}R_p > R_s \geq R_p$ ,则需要

3 个传感器节点实现全覆盖;如果  $R_s < R_p$ , 则无论怎么放置传感器节点, 均不能全覆盖管道。

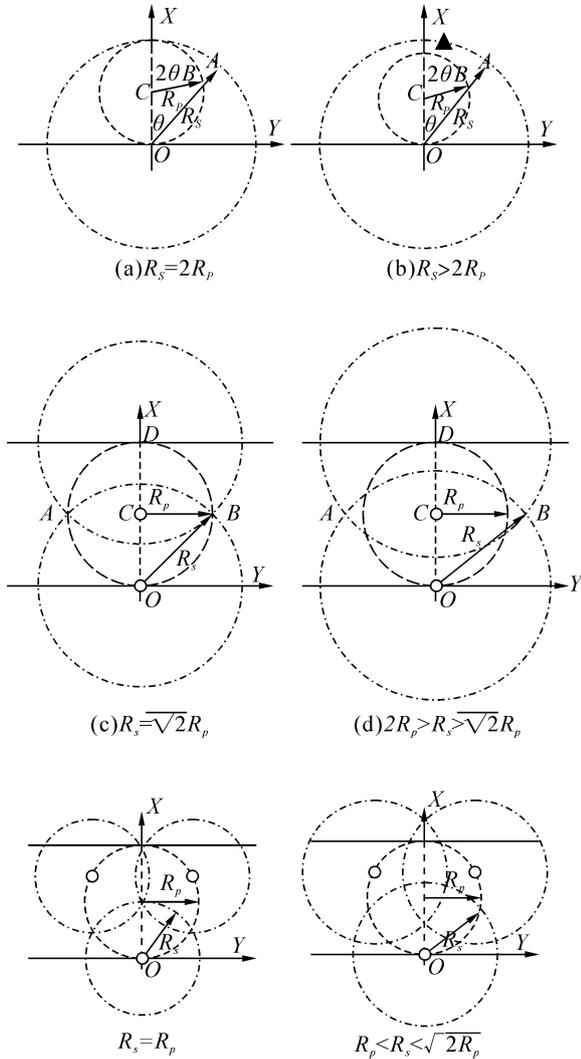


图 3 XY 平面传感器节点覆盖

Fig.3 Sensors coverage in XY plane

2.2 平面节点部署分析

传感器节点在 Z 轴方向上的位置决定了网络的覆盖特性和拓扑结构, 因此在考虑节点在 XY 轴方向上最优部署的前提下, 在 Z 轴方向上最优覆盖部署如图 4 所示。

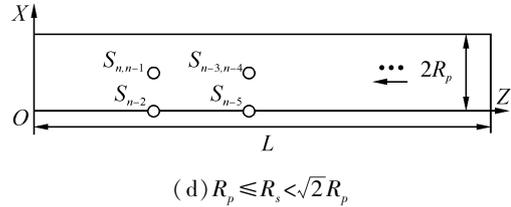
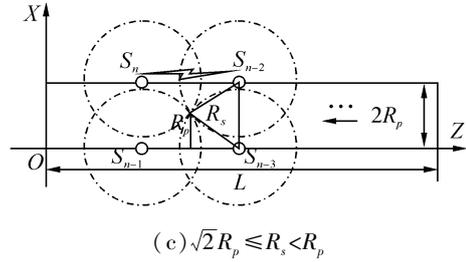
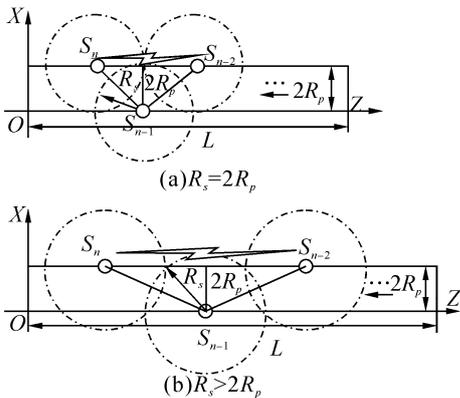


图 4 XZ 平面传感器节点部署

Fig.4 Sensors coverage in XZ plane

2.3 三维节点部署算法

综合节点在 XYZ 轴上的部署分析, 能够得到管道系统传感器节点三维部署算法. 节点部署算法流程图如图 5 所示。

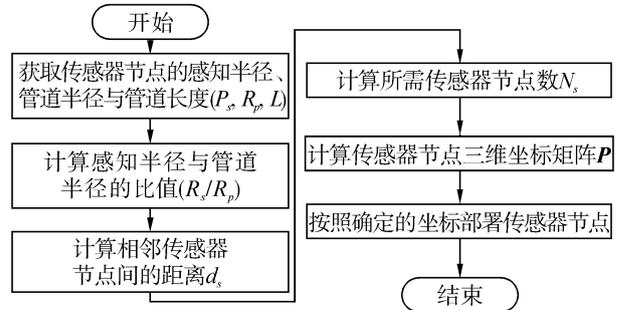


图 5 传感器节点三维部署算法流程

Fig.5 Flow chart of sensors three-dimensional deployment

其中, 相邻传感器节点间的距离  $d_s$  按下列方式进行计算确定: 当  $R_s/R_p \geq 2$  时, 相邻传感器节点间的距离  $d_s = |S_n S_{n-2}| = 2(R_s + \sqrt{R_s^2 - 4R_p^2})$ ; 当  $2 > R_s/R_p \geq \sqrt{2}$  时, 相邻传感器节点间的距离  $d_s = |S_n S_{n-2}| = 2(\sqrt{R_s^2 - R_p^2})$ ; 当  $\sqrt{2} > R_s/R_p \geq 1$  时, 相邻传感器节点间的距离  $d_s = |S_{n-2} S_{n-5}| = 2(\sqrt{R_s^2 - 9/16R_p^2})$ 。

同理, 所需传感器节点数  $N_s$  为: 当  $R_s/R_p \geq 2$  时, 所需传感器节点数  $N_s = \lfloor 2L/2(R_s + \sqrt{R_s^2 - 4R_p^2}) \rfloor + 1$ ; 当  $2 > R_s/R_p \geq \sqrt{2}$  时, 所需传感器节点数  $N_s = \lfloor 2L/2(\sqrt{R_s^2 - R_p^2}) \rfloor + 1$ ; 当  $\sqrt{2} > R_s/R_p \geq 1$  时, 所需传感器节点数  $N_s = \lfloor 3L/2(\sqrt{R_s^2 - 9/16R_p^2}) \rfloor + 1$ 。

在部署算法中, 传感器节点的三维坐标用  $N_s \times 3$  矩阵  $P$  表示: 即  $P[N_s][0]$  为 X 轴坐标,  $P[N_s][1]$  为 Y 轴坐标,  $P[N_s][2]$  为 Z 轴坐标。

1)  $R_s/R_p \geq 2$ .

传感器节点编号  $i$  为奇数的传感器节点的  $X$  轴坐标为 0, 即  $P[i-1][0] = 0$ ;  $Y$  轴坐标为 0, 即  $P[i-1][1] = 0$ ;  $Z$  轴坐标为  $(i-1) \times d_s/2$ , 即  $P[i-1][2] = (i-1) \times d_s/2$ .

传感器节点编号  $i$  为偶数的传感器节点的  $X$  轴坐标为  $2R_p$ , 即  $P[i-1][0] = 2R_p$ ;  $Y$  轴坐标为 0, 即  $P[i-1][1] = 0$ ;  $Z$  轴坐标为  $(i-1) \times d_s/2$ , 即  $P[i-1][2] = (i-1) \times d_s/2$ .

2)  $2 > R_s/R_p \geq \sqrt{2}$ .

传感器节点编号  $i$  为奇数的传感器节点的  $X$  轴坐标为 0, 即  $P[i-1][0] = 0$ ;  $Y$  轴坐标为 0, 即  $P[i-1][1] = 0$ ;  $Z$  轴坐标为  $(i-1) \times d_s/2$ , 即  $P[i-1][2] = (i-1) \times d_s/2$ ;

传感器节点编号  $i$  为偶数的传感器节点的  $X$  轴坐标为  $2R_p$ , 即  $P[i-1][0] = 2R_p$ ;  $Y$  轴坐标为 0, 即  $P[i-1][1] = 0$ ;  $Z$  轴坐标为  $(i-2) \times d_s/2$ , 即  $P[i-1][2] = (i-2) \times d_s/2$ .

3)  $\sqrt{2} > R_s/R_p \geq 1$ .

传感器节点编号  $i$  为 3 的倍数时, 传感器节点的  $X$  轴坐标为 0, 即  $P[i-1][0] = 0$ ;  $Y$  轴坐标为 0, 即  $P[i-1][1] = 0$ ;  $Z$  轴坐标为  $(\text{int}(i/3)-1) \times d_s$ , 即  $P[i-1][2] = (\text{int}(i/3)-1) \times d_s$ .

传感器节点编号  $i$  为偶数时, 传感器节点的  $X$  轴坐标为  $1.5 \times R_p$ , 即  $P[i-1][0] = 1.5 \times R_p$ ;  $Y$  轴坐标为  $-3R_p/(2\sqrt{5})$ , 即  $P[i-1][1] = -3R_p/(2\sqrt{5})$ ;  $Z$  轴坐标为  $\text{int}(i/3) \times d_s$ , 即  $P[i-1][2] = \text{int}(i/3) \times d_s$ .

传感器节点编号  $i$  为其他编号时, 传感器节点的  $X$  轴坐标为  $1.5R_p$ , 即  $P[i-1][0] = 1.5R_p$ ;  $Y$  轴坐标为  $3R_p/(2\sqrt{5})$ , 即  $P[i-1][1] = 3R_p/(2\sqrt{5})$ ;  $Z$  轴坐标为  $\text{int}(i/3) \times d_s$ , 即  $P[i-1][2] = \text{int}(i/3) \times d_s$ .

### 3 算法性能分析

#### 3.1 覆盖性能

##### 3.1.1 网络有效覆盖效率

定义为传感器节点的实际覆盖体积与传感器节点的最大有效覆盖体积的比值<sup>[5]</sup>, 即为  $\tau = V_s(R_s)/V_m(R_s)$ . 对管道系统而言, 网络有效覆盖效率为:

$$\tau = \frac{\pi R_p^2 L}{4 N_s \pi R_s^3 / 3} = \frac{3 R_p^2 L}{4 N_s R_s^3}$$

网络的有效覆盖率和管道半径和传感器节点感测半径的比值有直接关系, 其关系如图 6 所示. 图 6 中, 当  $R_p = R_s$  时, 网络的有效覆盖率约为 75%; 当  $R_p = 0.5R_s$  时, 网络的有效覆盖率约为 10%. 因此, 为

了最大化网络有效覆盖效率, 应选择  $R_s$  与  $R_p$  接近的传感器节点.

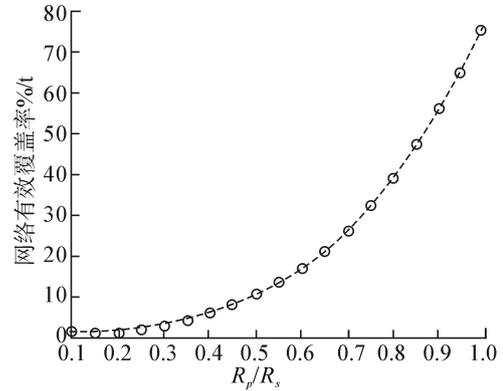


图 6  $R_p/R_s$  比值对网络有效覆盖率的影响

Fig.6 The impact of network effective coverage by ratios of  $R_p/R_s$ .

根据上文分析, 分别对管道半径与传感器节点感测半径比值为  $R_s/R_p \geq 2$ 、 $2 > R_s/R_p \geq \sqrt{2}$  和  $\sqrt{2} > R_s/R_p \geq 1$  这 3 种情况进行仿真分析, 结果如图 7 所示.

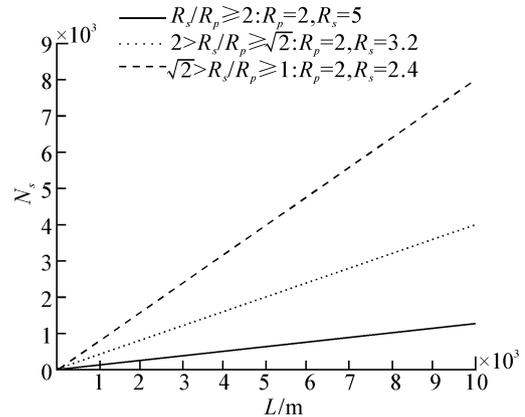


图 7 所需传感器节点数与管道长度关系

Fig.7 The relationship between number of nodes with pipeline length

##### 3.1.2 冗余覆盖

一般地, 描述传感器节点感知性能的模型可以分为布尔感知模型和概率感知模型<sup>[7]</sup>. 为了能有效地描述实际应用场景中传感器节点感知情况, 采用概率感知模型作为管道监测系统的无线传感器节点感知模型为

$$p(s_i, a_k) = \begin{cases} 1, & d(s_i - a_k) \leq R_{s1}; \\ \frac{E_{ir}}{E_i} e^{-\lambda d(s_i - a_k) - R_{e1}}, & R_{s1} < d(s_i - a_k) \leq R_{s2}; \\ 0, & R_{s2} < d(s_i - a_k). \end{cases}$$

式中:  $p(s_i, a_k)$  表示传感器节点  $s_i$  感知目标区域  $a_k$  的概率,  $E_{ir}$  表示节点  $s_i$  的剩余能量,  $E_i$  表示节点  $s_i$  的初始能量,  $R_{s1}$  为传感器节点不确定感知的起点半

径,  $R_{s_2}$  为传感器节点感知范围的最大半径,  $\lambda$  为传感器节点的物理特性参数  $d(s_i - a_k)$  表示节点  $s_i$  与目标  $a_k$  之间的欧式距离, 计算公式为

$$d(s_i - a_k) = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2}.$$

在实际应用环境中, 无线传感器节点对监测区域的覆盖往往是多重的, 即监测区域中任意一点同时被多个传感器节点覆盖, 节点间形成冗余关系<sup>[8]</sup>. 如果一个目标区域  $j$  同时被  $m$  个传感器节点覆盖, 则根据概率计算公式, 目标区域  $j$  的覆盖率为

$$p(j) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{ij}).$$

式中:  $p_{ij}$  为单个传感器节点覆盖目标对象时的覆盖概率.

### 3.2 连通性能

连通性是衡量实际网络环境中节点间连通性能的指标. 其模型也分为布尔模型和概率模型 2 种. 其中, 概率模型更能反映实际网络环境中节点间的通信质量. 因此采用概率模型, 传感器节点  $i$  与节点  $j$  间的的连通性能可表示为:

$$C(s_i, s_j) = \begin{cases} 1, & 0 \leq d(s_i, s_j) \leq R_{c1}; \\ \frac{E_{ir}}{E_i} e^{-\tau(d(s_i, s_j) - R_{c1})}, & R_{c1} < d(s_i, s_j) \leq R_{c2}; \\ 0, & R_{c2} < d(s_i, s_j). \end{cases}$$

式中:  $p_{ij}$  表示传感器节点  $s_i$  和  $s_j$  的连通强度,  $R_{c1}$ 、 $R_{c2}$  表示通信范围的门限值,  $\tau$  表示通信强度随距离增大的衰减程度,  $E_{ir}$  表示节点  $s_i$  的剩余能量,  $E_i$  表示节点  $s_i$  的初始能量. 如果传感器节点  $s_i$  有  $m$  个邻居传感器节点可以相互通讯, 则节点  $s_i$  的连通性能可表示为  $C_i = (\sum_{j=1}^m C(s_i, s_j)) / m$ , 进一步地, 整个网络的连通性能可计算如下:

$$C_i = (\sum_{i=1}^{N_s} C_i) / N_s.$$

一般地, 对于传感器节点全覆盖的区域, 只要满足  $R_c \geq 2R_s$ , 则整个网络就是完全连通的<sup>[9]</sup>.

### 3.3 传感器节点能耗对覆盖和连通性能的影响

在无线传感器网络中, 节点消耗能量的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块. 典型的传感器节点能量消耗分布见图 8<sup>[10]</sup>. 从图 8 中可以看出, 通讯能耗是最主要的能耗单元.

在网络开始运行时, 所有的传感器节点的初始能量( $E_i$ ) 都是相同的. 但是随着网络运行时间不断增加, 传感器节点的剩余能量就会越来越少, 从而传感器节点的感知半径( $R_s$ ) 和通讯半径( $R_c$ ) 就会受到影响, 进而影响节点的覆盖率和节点的连通性. 网络运

行时间越久, 传感器节点的剩余能量就越少, 当运行时间达到一个阈值时(或者说当传感器节点的舌根难于能量少于一个阈值时), 网络的覆盖性能和连通性能就会大幅度下降, 如图 9 所示.

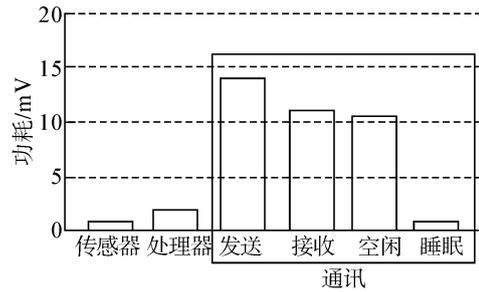


图 8 传感器节点的能量消耗分布

Fig. 8 Distribution of energy consumption of sensor nodes

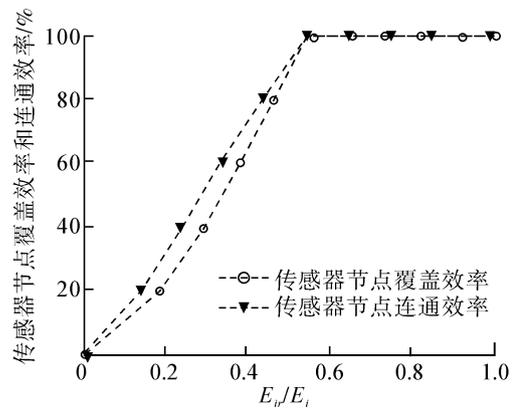


图 9 传感器节点剩余能量对网络有效覆盖率的影响

Fig. 9 The influence of network effective coverage by remainder energy consumption of sensor nodes

## 4 结束语

管道系统是关乎国民经济发展的基础设施. 建立基于无线传感器网络的管道监控系统具有重要的经济意义和社会意义. 本文把管道三维空间结构映射成 2 个二维平面结构分别进行优化部署策略分析, 详细描述了节点三维部署算法, 并对算法的评价方法进行了讨论, 该算法能有效地解决管道系统的三维节点部署问题. 在本文提出的部署算法的基础上引入  $K$  重冗余覆盖<sup>[11]</sup> 参数是下一步要完成的工作.

## 参考文献:

[1] YICK J, MUKHERJEE B, GHOSAL D. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292-2330.  
 [2] WIKIPEDIA Y. Pipeline transport [EB/OL]. [2012-10-09]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Oil\\_pipeline#For\\_oil\\_](http://en.wikipedia.org/wiki/Oil_pipeline#For_oil_)

or\_natural\_gas.

[3] YU Huaping, GUO Mei. An efficient oil and gas pipeline monitoring systems based on wireless sensor networks[C]// Proc of the Information Security and Intelligent Control. Yunlin, China, 2012: 188-193.

[4] 李莉, 刘元安. 无线地下传感器网络节点放置算法[J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2007, 25(6): 587-592.  
LI Li, LIU Yuan'an. Sensor deployment algorithm for wireless underground sensor network[J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2007, 25(6): 587-592.

[5] 周公博. 面向窄长空间的无线传感器网络可靠性关键技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2010: 17-40.  
ZHOU Gongbo. The reliability supported technologies of wireless sensor networks in long-narrow region[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2010: 17-40.

[6] 王璐超, 刘军. 矩形立体仓库环境监测的 WSN 节点三维部署研究[J]. 物流技术, 2010, 11: 128-129.  
WANG Luchao, LIU Jun. WSN 3D deployment in environmental monitoring of rectangular stereoscopic warehouses [J]. Logistics Technology, 2010, 11: 128-129.

[7] HOSSAIN A, BISWAS P K, CHAKRABARTI S. Sensing models and its impact on network coverage in wireless sensor network[C]//Proc of the 2008 IEEE Region 10 Colloquium and the Third ICIS. Kharagpur, Indian, 2008: 1-5.

[8] ZHANG H H, HOU J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. Ad Hoc and Sensor Wireless Networks, 2005, 1(1/2): 89-124.

[9] 刘明, 曹建农, 郑源, 等. 无线传感器网络多重覆盖问题分析[J]. 软件学报, 2007, 18(1): 127-136.

LIU Ming, CAO Jiannong, ZHENG Yuan, et al. Analysis for multi-coverage problem in wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2007, 18(1): 127-136.

[10] 余华平, 邬春学, 郭梅. 移动 sinks 无线传感器网络的能量效率分析[J]. 计算机工程, 2009, 35(14): 127-129.  
YU Huaping, WU Chunxue, GUO Mei. Energy efficiency analysis for mobile wireless sensor network[J]. Computer Engineering, 2009, 35(14): 127-129.

[11] 蒋丽萍, 王良民, 熊书明, 等. 基于感知概率的无线传感器网络 K 重覆盖算法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(9): 3484-3486.  
JIANG Liping, WANG Liangmin, XIONG Shuming, et al. K-coverage algorithm based on probabilistic sensing model in WSN[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(9): 3484-3486.

作者简介:



余华平,男,1978年生,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、油气田安全检测与监测、网络控制系统.曾主持科研项目3项,参与省部级科研项目5项.发表学术论文26篇,其中被EI检索8篇.



郭梅,女,1981年生,讲师,主要研究方向为无线传感器网络、网络控制系统.近年来参与省部级科研项目5项,发表学术论文8篇.