第 33 卷第 10 期　　电 子 与 信 息 学 报　　Vol.33No.10
2011 年 10 月　　Journal of Electronics & Information Technology　　Oct. 2011

一种能耗鲁棒性权衡的 3D-WSN 拓扑控制算法

郝晓辰*　贾　楠　王丽丽　刘　彬
(燕山大学电气工程学院　秦皇岛　066004)

摘　要：该文针对 3 维无线传感器网络(3D-WSN)需兼顾能耗与鲁棒性的问题，建立了能耗鲁棒性权衡模型，利用 Lyapunov 稳定性理论证明了稳定平衡解的存在。进而提出了一种基于该模型的拓扑控制算法(TCA-TM)，获得了 3 维无线传感器网络的优化拓扑。实验结果表明，该拓扑结构不仅能够满足网络鲁棒性要求，还能有效地均衡网络能耗，延长网络生命期。

关键词：3 维无线传感器网络；拓扑控制算法；能耗鲁棒性权衡模型；Lyapunov 函数
中图分类号：TP393　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-5896(2011)10-2358-06
DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00275

A Topology Control Algorithm of 3D Wireless Sensor Networks Based on Energy Consumption and Robustness Trade-off

Hao Xiao-chen　Jia Nan　Wang Li-li　Liu Bin
(*Institute of Electrical Engineering*, *Yanshan University*, *Qinhuangdao* 066004, *China*)

Abstract: Considering the issue of energy consumption and robustness in three-Dimensional Wireless Sensor Networks (3D-WSN), this paper builds an energy consumption and robustness trade-off model, and proves that the model has a stable equilibrium solution with the Lyapunov stability theory, then a Topology Control Algorithm based on the Trade-off Model (TCA-TM) is proposed, the optimal topology of wireless sensor networks of 3D spatial distribution is obtained. Simulation analysis illustrates TCA-TM topology can meet the robustness requirement of networks, balance energy consumption and prolong the lifetime of networks effectively.

Key words: Three-Dimensional Wireless Sensor Networks (3D-WSN); Topology Control Algorithm (TCA); Energy consumption and robustness trade-off model; Lyapunov function

1　引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)由一组部署在监测区域的微型传感器节点组成。由于其能够协作实时监测、感知、采集网络分布区域内的各种环境或监测对象的信息，并对这些信息进行处理[1]，近年来，受到了越来越多的来自研究界和实际用户的关注[2]。

WSN 最突出的问题是能量受限，拓扑控制则凭借其能够在保证网络连通和有效覆盖的前提下通过调节节点的传输范围实现网络能效的优化[3,4]。针对 WSN 的节能优化问题已提出了一些有效的拓扑控制算法，如功率控制与路由协议相结合的 COMPOW[5]算法，基于节点度的 LMA/LMN[6]算法，基于几何图论的 DRNG/DLMST[7]以及 TopDisk[8]等算法。

上述拓扑控制算法都在一定程度上达到了降低网络能耗的目标，但主要是针对 2 维平面提出的，没有考虑 3 维空间中节点的分布特性。近年来，随着水下传感器网络[9,10]的兴起，3 维无线传感器网络(3D-WSN)越来越成为研究的热点。典型的 3D-WSN 拓扑控制算法主要有 XTC 算法[11]和 3D-CBTC 算法[12]。XTC 算法以接收信号强度作为邻居图构建的距离度量，而 3D-CBTC 算法则按顺序判断每一个圆锥区域内是否至少存在一个邻居节点。这些算法虽然考虑了能耗问题，却忽略了 3D-WSN 由于实际运行环境复杂，各种障碍物和强干扰的存在使得脆弱的网络拓扑结构并不适用[13]，这就要求 3D-WSN 的拓扑控制算法能够在降低网络能耗的同时兼顾提高网络的鲁棒性。

综上所述，本文针对 3D-WSN 需兼顾能耗与鲁棒性的问题，建立了网络的能耗鲁棒性权衡模型，

2011-03-23 收到，2011-06-27 改回
河北省自然科学基金(F2011203100)资助课题
*通信作者：郝晓辰　haoxiaochen@ysu.edu.cn

通过在模型中引入松弛变量将不等式约束条件转化为等式约束条件构建 Lyapunov 能量函数，证明了稳定平衡解的存在；进而，提出了一种基于能耗鲁棒性权衡模型的 3D-WSN 的拓扑控制算法，所获得的优化拓扑结构具有能耗均衡、鲁棒性强的特点。

2　能耗鲁棒性权衡模型

2.1 节点度与传输半径的关系

设 N 个节点随机部署在监测范围为 V 的区域内，节点的传输半径为 r，其通信范围为 $v=(4/3)\pi r^3$，若一个节点落在另一个节点的通信范围之内的概率服从二项分布，则任一节点的节点度(节点度是指可通信的邻居节点数目)为 n 的概率为

$$P(\xi=n)=\binom{N-1}{n}\left(\frac{v}{V}\right)^n\left(1-\frac{v}{V}\right)^{N-1-n} \tag{1}$$

对于 3D-WSN 来说，$N>>1$，同时由于节点随机部署，监测区域各处的节点密度近似相等，即 $\lambda=N/V$，则 $(N-1)/V\approx\lambda$ 且为常数，$(N-1)v/V$ 也为常数。当节点的通信范围满足 $v<<V$ 时，式(1)所示的任一节点的节点度 n 近似服从参数为 λv 的泊松分布，即

$$P(\xi=n)=\frac{(\lambda v)^n}{n!}e^{-\lambda v} \tag{2}$$

在泊松分布的情况下，任一节点 i 的节点度可以表示为节点度的期望值，即

$$\mathrm{num}(i)=E(\xi=n) \tag{3}$$

根据泊松分布的期望公式 $E(\xi=m)=\lambda$，可以得出任一节点 i 的节点度为

$$\mathrm{num}(i)=\lambda v=\lambda\cdot(4/3)\pi r_i^3 \tag{4}$$

其中 r_j 表示节点 i 的传输半径，本文用式(4)来表示任一节点的节点度。

2.2 能耗鲁棒性权衡模型建立

在 WSN 中，节点的节点度越高，网络的鲁棒性就越好，所以本文用节点度来表示鲁棒性，节点 i 的节点度用式(4)表示，3D-WSN 中，任一节点 i 的能耗可以用式(5)来表示，即

$$e(i)=2E_{\mathrm{elec}}+\varepsilon_{\mathrm{amp}}r_i^2 \tag{5}$$

式中 E_{elec} 表示发送或接收电路的能耗，$\varepsilon_{\mathrm{amp}}$ 表示在多径衰落模型下，发送放大电路在单位面积内传播的能耗。

一般而言，传输相同流量的数据，节点的传输半径越小，能耗越小，节点度越低，鲁棒性越差。由此可见，能耗与鲁棒性的变化是相反的，定义节点 i 的能耗鲁棒性权衡关系如下：

$$f_i=(2E_{\mathrm{elec}}+\varepsilon_{\mathrm{amp}}r_i^2)/((4/3)\lambda\pi r_i^3) \tag{6}$$

那么整个 3D-WSN 的能耗鲁棒性权衡关系可以表示为

$$F=\sum_{i=1}^{N}(2E_{\mathrm{elec}}+\varepsilon_{\mathrm{amp}}r_i^2)/((4/3)\lambda\pi r_i^3) \tag{7}$$

为了得到低能耗且健壮的网络拓扑结构，构造 3D-WSN 的能耗鲁棒性权衡模型如下：

$$\left.\begin{aligned}
&\min F=\sum_{i=1}^{N}\frac{2E_{\mathrm{elec}}+\varepsilon_{\mathrm{amp}}r_i^2}{\lambda(4/3)\pi r_i^3}\\
&\text{s.t.}\quad r_i-ds(i)\ge 0 \qquad i=1,2,\cdots,N\\
&\qquad\ r_i-\sqrt[3]{\frac{3}{2\lambda\pi}}\ge 0\\
&\qquad\ r_{\max}-r_i\ge 0
\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

其中 $r_i-ds(i)\ge 0$ 保证节点 i 的传输半径 r_i 必须大于节点 i 到邻居节点的最小距离 $ds(i)$；$r_i-\sqrt[3]{(3/2\lambda\pi)}\ge 0$ 是节点度的约束条件，保证节点度大于 2，从而推导出的关于节点 i 传输半径 r_i 的约束条件；$r_{\max}-r_i\ge 0$ 表示节点传输半径 r_i 必须小于最大传输半径 $r_{\max}$。

3　能耗鲁棒性权衡模型的稳定性分析

本文通过引入松弛变量 s_i,q_i,u_i 将模型中的不等式约束转化为等式约束，转换结果如下：

$$\left.\begin{aligned}
&\min F=\sum_{i=1}^{N}\frac{2E_{\mathrm{elec}}+\varepsilon_{\mathrm{amp}}r_i^2}{\lambda(4/3)\pi r_i^3}\\
&\text{s.t.}\quad r_i-ds(i)-s_i^2=0 \qquad i=1,2,\cdots,N\\
&\qquad\ r_i-\sqrt[3]{\frac{3}{2\lambda\pi}}-q_i^2=0\\
&\qquad\ r_{\max}-r_i-u_i^2=0
\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

那么，利用拉格朗日乘子法将式(9)表示成拉格朗日函数如式(10)所示。

$$\begin{aligned}
L(r_i,\alpha_i,\beta_i,\theta_i)=&\sum_{i=1}^{N}\frac{2E_{\mathrm{elec}}+\varepsilon_{\mathrm{amp}}r_i^2}{\lambda(4/3)\pi r_i^3}\\
&+\sum_{i=1}^{N}\alpha_i(r_i-ds(i)-s_i^2)\\
&+\sum_{i=1}^{N}\beta_i\left(r_i-\sqrt[3]{\frac{3}{2\lambda\pi}}-q_i^2\right)\\
&+\sum_{i=1}^{N}\theta_i(r_{\max}-r_i-u_i^2)
\end{aligned} \tag{10}$$

进一步可得到式(10)的系统动力学方程组如式(11)所示。

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\mathrm{d}\mu_i}{\mathrm{d}t} &= -\nabla_{r_i} L(r,\alpha,\beta,\theta,s,q,u) \\
&= -\sum_{i=1}^{N}\frac{\partial F}{\partial r_i} - \sum_{i=1}^{N}\alpha_i - \sum_{i=1}^{N}\beta_i + \sum_{i=1}^{N}\theta_i \\
\frac{\mathrm{d}\mu_{2i}}{\mathrm{d}t} &= -\nabla_{\alpha} L(r,\alpha,\beta,\theta,s,q,u) = -r_i + ds(i) + s_i^2 \\
\frac{\mathrm{d}\mu_{3j}}{\mathrm{d}t} &= -\nabla_{\beta} L(r,\alpha,\beta,\theta,s,q,u) = -r_i + \sqrt[3]{\frac{3}{2\lambda\pi}} + q_i^2 \\
\frac{\mathrm{d}\mu_{4j}}{\mathrm{d}t} &= -\nabla_{\theta} L(r,\alpha,\beta,\theta,s,q,u) = r_i - r_{\max} + u_i^2 \\
\frac{\mathrm{d}\mu_{5i}}{\mathrm{d}t} &= -\nabla_{s} L(r,\alpha,\beta,\theta,s,q,u) = 2\sum_{i=1}^{N}\alpha_i s_i \\
\frac{\mathrm{d}\mu_{6j}}{\mathrm{d}t} &= -\nabla_{q} L(r,\alpha,\beta,\theta,s,q,u) = 2\sum_{i=1}^{N}\beta_i q_i \\
\frac{\mathrm{d}\mu_{7j}}{\mathrm{d}t} &= -\nabla_{u} L(r,\alpha,\beta,\theta,s,q,u) = 2\sum_{i=1}^{N}\theta_i u_i
\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

其中 $r_i = g(\mu_i), \alpha_i = g(\mu_{2i}), \beta_i = g(\mu_{3i}), \theta_i = g(\mu_{4j}), s_i = g(\mu_{5i}), q_i = g(\mu_{6j}), u_i = g(\mu_{7j})$。 $g(\bullet)$ 表示自变量和因变量符合连续的函数关系。式(11)是式(9)对应的系统动力学方程，只要证明式(11)系统的稳定性，即可知能耗鲁棒性权衡模型是稳定的，其稳定状态所对应的解即为系统的稳定平衡解，下面证明式(11)的稳定性。

证明 根据 Lyapunov 稳定性理论，构造拉格朗日函数作为模型的 Lyapunov 能量函数

$$\begin{aligned}
&V(r,\alpha,\beta,\theta,s,q,u) \\
&= L(r,\alpha,\beta,\theta,s,q,u) \\
&= \sum_{i=1}^{N}\frac{(2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}} r_i^2)^a}{(\lambda(4/3)\pi r_i^3)^b} + \sum_{i=1}^{N}\alpha_i(r_i - ds(i) - s_i^2) \\
&\quad + \sum_{i=1}^{N}\beta_i\left(r_i - \sqrt[3]{\frac{3}{2\lambda\pi}} - q_i^2\right) + \sum_{i=1}^{N}\theta_i(r_{\max} - r_i - u_i^2)
\end{aligned} \tag{12}$$

将该能量函数对时间进行微分并将式(9)代入得出

$$\begin{aligned}
\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} &= \sum_{i=1}^{N}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}r_i}\cdot\frac{\mathrm{d}r_i}{\mathrm{d}t} + \sum_{i=1}^{N}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}\alpha_i}\cdot\frac{\mathrm{d}\alpha_i}{\mathrm{d}t} + \sum_{i=1}^{N}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}\beta_i}\cdot\frac{\mathrm{d}\beta_i}{\mathrm{d}t} \\
&\quad + \sum_{i=1}^{N}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}\theta_i}\cdot\frac{\mathrm{d}\theta_i}{\mathrm{d}t} + \sum_{i=1}^{N}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}s_i}\cdot\frac{\mathrm{d}s_i}{\mathrm{d}t} + \sum_{i=1}^{N}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}q_i}\cdot\frac{\mathrm{d}q_i}{\mathrm{d}t} \\
&\quad + \sum_{i=1}^{N}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}u_i}\cdot\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t} = \sum_{i=1}^{N}\left(-\frac{\mathrm{d}\mu_i}{\mathrm{d}t}\cdot\frac{\mathrm{d}r_i}{\mathrm{d}t}\right) \\
&\quad + \sum_{i=1}^{N}\left(-\frac{\mathrm{d}\mu_{2i}}{\mathrm{d}t}\cdot\frac{\mathrm{d}\alpha_i}{\mathrm{d}t}\right) + \sum_{i=1}^{N}\left(-\frac{\mathrm{d}\mu_{3i}}{\mathrm{d}t}\cdot\frac{\mathrm{d}\beta_i}{\mathrm{d}t}\right) \\
&\quad + \sum_{i=1}^{N}\left(-\frac{\mathrm{d}\mu_{4i}}{\mathrm{d}t}\cdot\frac{\mathrm{d}\theta_i}{\mathrm{d}t}\right) + \sum_{i=1}^{N}\left(-\frac{\mathrm{d}\mu_{5i}}{\mathrm{d}t}\cdot\frac{\mathrm{d}s_i}{\mathrm{d}t}\right) \\
&\quad + \sum_{i=1}^{N}\left(-\frac{\mathrm{d}\mu_{6i}}{\mathrm{d}t}\cdot\frac{\mathrm{d}q_i}{\mathrm{d}t}\right) + \sum_{i=1}^{N}\left(-\frac{\mathrm{d}\mu_{7i}}{\mathrm{d}t}\cdot\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t}\right) \\
&= \sum_{i=1}^{N}\left(-g'\left(\frac{\mathrm{d}\mu_i}{\mathrm{d}t}\right)^2\right) + \sum_{i=1}^{N}(-g'(-r_i + ds(i) + s_i^2)^2) \\
&\quad + \sum_{i=1}^{N}\left(-g'\left(-r_i + \sqrt[3]{\frac{3}{2\lambda\pi}} + q_i^2\right)^2\right) \\
&\quad + \sum_{i=1}^{N}(-g'(r_i - r_{\max} + u_i^2)^2) + \sum_{i=1}^{N}\left(-g'\left(2\sum_{i=1}^{N}\alpha_i s_i\right)^2\right) \\
&\quad + \sum_{i=1}^{N}\left(-g'\left(2\sum_{i=1}^{N}\beta_i q_i\right)^2\right) + \sum_{i=1}^{N}\left(-g'\left(2\sum_{i=1}^{N}\theta_i u_i\right)^2\right) \\
&= -g'\left[\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\mathrm{d}\mu_i}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \sum_{i=1}^{N}(-r_i + ds(i) + s_i^2)^2\right. \\
&\quad + \sum_{i=1}^{N}\left(-r_i + \sqrt[3]{\frac{3}{2\lambda\pi}} + q_i^2\right)^2 + \sum_{i=1}^{N}(r_i - r_{\max} - u_i^2)^2 \\
&\quad + \sum_{i=1}^{N}\left(2\sum_{i=1}^{N}\alpha_i s_i\right)^2 + \sum_{i=1}^{N}\left(2\sum_{i=1}^{N}\beta_i q_i\right)^2 \\
&\quad \left. + \sum_{i=1}^{N}\left(2\sum_{i=1}^{N}\theta_i u_i\right)^2\right] \le 0
\end{aligned} \tag{13}$$

根据 Lyapunov 稳定性理论，式(13)说明本文提出的能耗鲁棒性权衡模型存在稳定的平衡解。

4 TCA-TM 算法的详细描述

鉴于直接对能耗鲁棒性权衡模型求精确解析解存在一定难度，本文利用遗传算法[14,15]在解决约束优化问题时具有收敛快，计算时间少，鲁棒性高等优势对 3D-WSN 进行优化，求解性能较好的可行数值解，算法实现过程可以分为以下几步：

步骤 1 信息交换：节点以最大发射功率发送‘Hello’消息，并且转发接收到的邻居节点信息，如果某个节点接收到来自另外某个节点的多个信息包，选择其接收到的第 1 个信息包进行转发，最终基站接收到网络中所有节点的信息，包括节点间距离，初始节点度等；

步骤 2 种群初始化：基站根据收集到的信息对所有节点的发射功率进行随机初始化，进化代数设为 t；

步骤 3 适应度函数：根据权衡模型的目标函数及约束条件确定每个节点的适应度函数为

$$f(i,t) = \frac{r_{\max} - r(i,t)}{\left[\dfrac{E(i,t)}{N(i,t)}\cdot\left(r(i,t) - ds(i)\right)\left(r(i,t) - \sqrt[3]{(3/2\lambda\pi)}\right)\right]} \tag{14}$$

其中 $E(i,t)$ 表示节点 i 的能耗； $N(i,t)$ 为节点 i 的节点度；可以看出节点的能耗越小，节点度越大，适应值越大； $(r(i,t)-ds(i))(r(i,t)-\sqrt[3]{(3/2\lambda\pi)})$ 和 $(r_{\max} - r(i,t))$ 表示对 $r(i,t)$ 的约束， $r(i,t)$ 是第 t 代时节点

i 的传输半径，$ds(i)$ 表示节点 i 到邻居节点的最小距离，$\sqrt[3]{(3/2\lambda\pi)}$ 表示节点度等于 2 时推导出的 $r(i,t)$ 的取值，$r_{\max}$ 表示节点的最大传输半径，将 $r(i,t)$ 的这些约束条件加到节点 i 的适应度函数中，保证 $r(i,t)$ 的值总是在满足约束条件的范围内；

步骤 4　选择操作：根据各个节点的适应度函数可以得到每个节点的选择概率为

$$P(i,t)=\frac{f(i,t)}{\sum_{i=1}^{N} f(i,t)} \tag{15}$$

当任一节点的选择概率大于给定随机数时，节点进行遗传操作，否则，该节点的状态保持不变，根据经验，本文取给定随机数为 0.3；

步骤 5　交叉和变异：被选择的节点进行交叉和变异，由于固定的交叉概率 pc 和变异概率 pm 严重影响算法的收敛性能。本文采用一种自适应调整的交叉和变异概率

$$\mathrm{pc}=\begin{cases} k_{13}, & |f'-f_{\max}|\le\varepsilon \\ \dfrac{k_1(f_{\max}-f')}{f_{\max}-\overline{f}}, & f'\ge\overline{f} \\ k_3, & f'<\overline{f} \end{cases} \tag{16}$$

$$\mathrm{pm}=\begin{cases} k_{24}, & |f-f_{\max}|\le\varepsilon \\ \dfrac{k_2(f_{\max}-f)}{f_{\max}-\overline{f}}, & f'\ge\overline{f} \\ k_4, & f'<\overline{f} \end{cases} \tag{17}$$

其中 $k_1=1$；$k_3=1$；$k_{13}=0.5$；$\varepsilon=0.001$；$k_2=0.5$；$k_4=0.5$；$k_{24}=0.6$；$\varepsilon=0.001$；这些参数是通过 4 个测试函数做 10 组实验得到的，具有一定的普遍性；$f_{\max}$ 为最大适应值；f' 是两个要交叉的个体中较大的适应值；$\overline{f}$ 是平均适应值；f 是要变异个体的适应值。

采用算术交叉算子，则交叉后两个节点的相应分量为

$$\left.\begin{aligned} r(i,t+1)&=\alpha\cdot r(i,t)+(1-\alpha)\cdot r(j,t)\\ r(j,t+1)&=\alpha\cdot r(j,t)+(1-\alpha)\cdot r(i,t)\end{aligned}\right\} \tag{18}$$

其中 α 为 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数。

交叉后的个体进行多重非均匀变异，则变异后的个体分量为

$$r(i,t+1)=\begin{cases} r(i,t)+\left(r_{\max}-r(i,t)\right)\left(1-\mathrm{rad}^{(1-t/T)^b}\right), \\ \qquad\qquad \mathrm{pm}<\mathrm{rand}(1) \\ r(i,t)-\left(r(i,t)-\max\left(ds(i),\sqrt[3]{(3/2\lambda\pi)}\right)\right) \\ \quad\cdot\left(1-\mathrm{rad}^{(1-t/T)^b}\right),\ \mathrm{pm}\ge\mathrm{rand}(1) \end{cases} \tag{19}$$

式(19)中，rand(1)为决定个体变异规律的值，当节点变异概率小于、大于等于 rand(1)时，个体按不同规律进行变异，本文取 rand(1)为 0.55；rad 为 $[0,1]$ 间均匀分布的随机数；T 为最大进化代数；b 为系统参数，一般取值为 2；

步骤 6　精英保留：当 t 代的最大适应度大于 t+1 代的最大适应度时，直接将 t 代中适应度大于 t+1 代最大适应度的个体保留，这些个体将不再参加其它遗传操作，转至步骤 3；

步骤 7　终止条件：当进化代数达到最大进化代数 T 时，进化终止，最终得到一组均衡能耗和鲁棒性的最优解；

步骤 8　连通维护：根据图论中基于邻接矩阵图的连通性判定原则对得到的这组最优解进行连通性判断，如果保证连通，则基站直接将这组最优发射功率配置通知各个节点；如果存在不连通的节点，则将不连通节点的传输半径调整为它到最远邻居的距离之后，将修改后的发射功率配置通知各个节点。

5　仿真实验与性能分析

为评估本文算法的性能，采用 MATLAB 仿真进行了试验，以所获拓扑结构为主要的性能指标，并和 XTC 算法以及 3D-CBTC 算法进行比较，分析本文 TCA-TM 算法的性能。

仿真配置如下：设 60 个节点随机部署在 100 m ×100 m×100 m 的 3 维空间区域内；每个节点发送/接收电路处理每比特数据的能耗为 50 nJ，节点的发送放大电路在单位面积内发送单位比特数据的能耗为 10 pJ；每个节点的最大传输半径 $r_{\max}$ 为 60 m，最大进化代数 T 为 100。

当每个节点都以最大发射功率工作时，形成的原始拓扑如图 1 所示，3D-CBTC 算法，XTC 算法以及 TCA-TM 算法形成的拓扑分别如图 2，图 3，图 4 所示。

可以看出，TCA-TM 拓扑中的链路数少于原始拓扑和 3D-CBTC 拓扑，有效降低了 3D-WSN 的能耗，但是 TCA-TM 拓扑中的链路数多于 XTC 拓扑，这是因为 TCA-TM 拓扑不是最小能耗拓扑，而是在降低能耗的同时保证了网络满足一定的鲁棒性要求。

考虑到拓扑结构图仅为网络特性的直观反映，为了定量的评价 TCA-TM 算法有效性，下面首先对算法的收敛性进行分析，然后分别从节能、鲁棒性和能耗均衡性 3 方面进行比较。

(1)TCA-TM 算法的收敛性分析　本文提出的遗传算法满足以下 3 个要求：(1)交叉概率 $\mathrm{pc}\in(0,1)$；

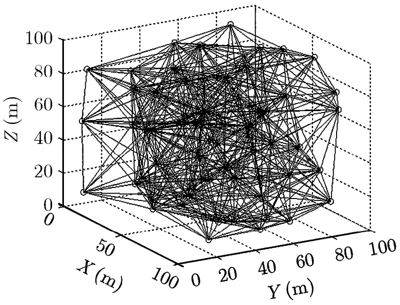

图 1 原始拓扑

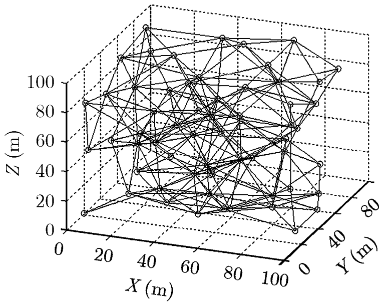

图 2 3D-CBTC 拓扑

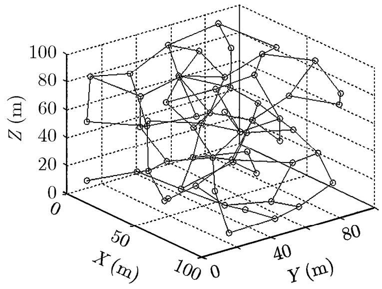

图 3 XTC 拓扑

(2)变异概率 $pm \in [0,1]$；(3)进行选择运算并且在选择前保留最优个体。根据文献[16]中的定理 2.7 可知，本文提出的遗传算法能够收敛到全局最优解。但是求全局最优解的时间复杂度很大，本算法意在求出一个性能较好的可行解。目标函数值随进化代数的变化趋势如图 5 所示，可以看出当进化代数为 6 时，目标函数值已经趋于稳定，并且之后连续 4 次的变化非常小，可以认为此时已经找到了一个性能较好的可行解，本算法收敛速度较快。

(2)节点平均能耗的对比　节点的平均能耗能够在一定程度上描述网络的生命期，设发送 1 bit 数据并且网络节点数取从 60 变化到 120 时，分别执行 TCA-TM 算法，XTC 算法以及 3D-CBTC 算法，得出节点平均能耗随节点数目变化的曲线如图 6 所示。由图可知，相同部署条件下 TCA-TM 网络的平均能耗低于 3D-CBTC 拓扑而高于 XTC 拓扑，这是因为 TCA-TM 拓扑构建的并不是最小能耗拓扑，而是构建同时满足能耗与鲁棒性要求的拓扑。

(3)平均节点度的对比　高节点度意味着网络的鲁棒性好，抗毁性强；低节点度会使端到端通信需要更长的传输路径，不但增加数据传输的时延还会降低网络的空间复用能力。3D-WSN 节点数目从 60 变化到 120，分别执行 TCA-TM 算法，XTC 算法和 3D-CBTC 算法，得到平均节点度随网络节点数的变化曲线，如图 7 所示。可以看出，TCA-TM 算法的鲁棒性要优于 XTC 算法，次于 3D-CBTC 算法，但是 3D-CBTC 拓扑过于稠密，能耗较高，因此 TCA-TM 算法在保证网络低能耗的同时满足一定的鲁棒性要求。

(4)节点能耗方差的对比　网络生命期的延长，不仅需要降低节点的能耗，还需要均衡各个节点的能耗，若部分节点的能量消耗过快，容易造成节点的提前死亡，从而造成网络不连通。节点能耗方差是反映网络能耗均衡程度的，方差越小也就说明能耗的均衡性越好。发送 1 bit 数据并且节点分别取 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 时执行 3D-CBTC 算法，TCA-TM 算法和 XTC 算法，得出节点能耗方差随节点数目变化的曲线如图 8 所示。可以看出，相同部署条件下 TCA-TM 网络拓扑的能耗均衡程度明显好于 XTC 算法和 3D-CBTC 算法。

6 结论

本文建立了一种 3D-WSN 的能耗与鲁棒性权衡模型，并通过构造模型的 Lyapunov 函数，证明了该模型具有稳定的平衡解，为 3D-WSN 拓扑结构的优化提供了依据。在能耗鲁棒性权衡模型基础上，提出了一种有效的 3D-WSN 拓扑控制算法 TCA-TM。该算法可构建出 3D-WSN 的低能耗高鲁棒网络拓扑结构，有效地解决了能耗与鲁棒性权衡问题。仿真结果还表明，TCA-TM 算法可得到平均能耗更低，鲁棒性更强的网络拓扑。

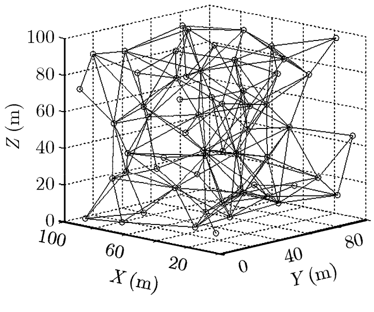

图 4 TCA-TM 拓扑

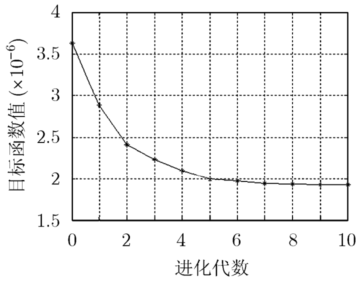

图 5 目标函数值随进化代数的变化

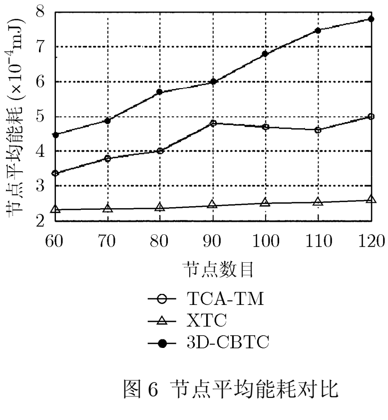

图 6 节点平均能耗对比

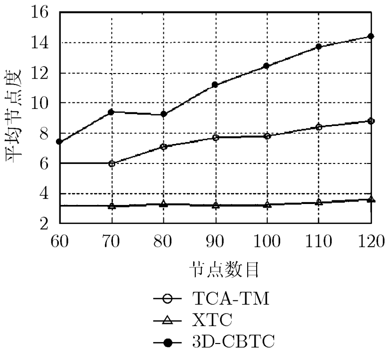

图 7 平均节点度对比

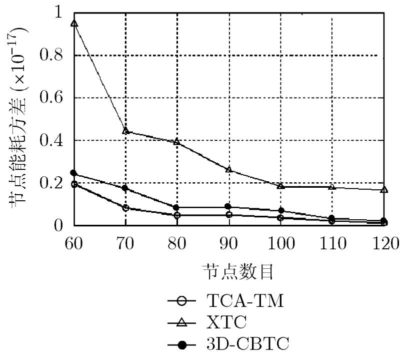

图 8 节点能耗方差对比

参 考 文 献

[1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, *et al.*. A survey on sensor networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102–114.

[2] Anastasi G, Conti M, Francesco D M, *et al.*. Energy conservation in wireless sensor networks: a survey [J]. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(3): 537–566.

[3] Üster H and Lin Hui. Integrated topology control and routing in wireless sensor networks for prolonged network lifetime [J]. *Ad Hoc Networks*, 2011, 9(5): 835–851.

[4] Bicakci K and Tavli B. Prolonging network lifetime with multi-domain cooperation strategies in wireless sensor networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2010, 8(6): 582–596.

[5] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas R S, *et al.*. Power control in Ad hoc networks: theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol[C]. Proceedings of the European Wireless Conference, Florence, 2002: 156–162.

[6] Kubisch M, Karl H, Wolisz A, *et al.*. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks[C]. Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), IEEE Press, New York, 2003: 16–20.

[7] Li N and Hou J C. Topology control in heterogeneous wireless networks: problems and solutions[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), New York: IEEE Press, 2004: 232–243.

[8] Deb B, Bhatnagar S, and Nath B. A topology discovery algorithm for sensor networks with applicationns to network management[R]. Technical Report, DCS-TR-441, Rutgers University, 2001: 1–11.

[9] Zhou Zhong, Cui Jun-hong, and Zhou Sheng-li. Efficient localization for large-scale underwater sensor networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2010, 8(3): 267–279.

[10] De S, Mandal P, and Chakraborty S S. On the characterization of Aloha in underwater wireless networks [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2011, 53(11/12): 2093–2107.

[11] Roger W and Aaron Z. XTC: a practical topology control algorithm for ad-hoc networks [C]. Proceedings-18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, IPDPS 2004(Abstracts and CD-ROM), Santa Fe, NM, United States, Apr. 26–30, 2004: 2969–2976.

[12] Bahramgiri M, Hajiaghayi M, and Mirrokni V S. Fault-tolerant and 3-dimensional distributed topology control algorithms in wireless multi-hop networks [J]. *Wireless Networks*, 2006, 12(2): 179–188.

[13] Hsu M Y, Wang C S, and Wang C K. A low power high reliability dual-path noise-cancelling LNA for WSN applications[C]. IEEE Custom Integrated Circuits Conference CICC, San Jose, CA, 2010: 19–22.

[14] Lau H C W, Chan T M, Tsui W T, *et al.*. Application of genetic algorithms to solve the multidepot vehicle routing problem[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2010, 7(2): 383–392.

[15] Hsieh Sheng-ta, Sun Tsung-ying, and Liu Chan-cheng. Potential offspring production strategies: an improved genetic algorithm for global numerical optimization [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(8): 11088–11098.

[16] 陈国良, 王煦法. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996: 13–95.

郝晓辰： 男，1980 年生，博士，研究方向为无线传感器网络拓扑控制.

贾　楠： 女，1986 年生，硕士生，研究方向为无线传感器网络拓扑控制.

王丽丽： 女，1986 年生，硕士生，研究方向为无线传感器网络拓扑控制.

刘　彬： 男，1953 年生，教授，博士生导师，研究方向为智能传感网络.