

FCFS 充电调度策略的性能通常较低,可以以 FCFS 作为参考来分析 ESAOC 的性能.我们通过以下 3 个指标对上述 4 种策略进行性能分析.

- 饥饿节点比率:定义为饥饿失效的待充电节点数量与请求充电的节点总数量之比.饥饿节点比率是评价充电策略性能的最重要指标之一,饥饿节点比率越小,说明充电策略效率越高、公平性越好;
- 充电延迟:定义为节点发送充电请求消息的时间与节点开始被 MC 充电的时间之间的时间间隔;
- 充电代价:由于 MC 需要在网络中不停移动为传感器节点充电,而 MC 在移动过程中需要消耗能量, MC 移动得越远,相应消耗的能量也就越大,因此,充电代价定义为 MC 在充电过程中移动的总距离.

在仿真实验中,设仿真区域为半径 $D=200\text{m}$ 的圆形区域中随机分布了 100 个传感器节点,假设每个传感器节点的数据产生过程遵循平均到达时间间隔为 50s 的泊松过程,网络带宽为 10Kbps.移动充电器 MC 在充电时以 5m/s 的速度在仿真区域中移动,整个仿真持续时间为 72 000s,其他网络参数以及相应的缺省值见表 1.

Table 1 Default parameters

表 1 默认参数表

默认参数	取值
E	10 000mJ
发送一个数据的能耗 E_{send}	0.502 5mJ
接收一个数据的能耗 $E_{receive}$	0.4mJ
E_{thred}	$0.4 \times E$
传感器节点半径 R	25m
MC 移动单位距离能耗 c	4mJ
充电效率 η	200mJ/s
MC 移动速度 v	5m/s
移动充电器携带的能量 P	5 000J
Δ	10s

4.1 充电效率对性能的影响

本组实验研究移动充电器的充电效率对策略性能的影响.令其他参数保持默认值,充电效率从 100mJ/s 到 300mJ/s 逐渐变化,各策略性能变化如图 5(a)~图 5(c)所示.

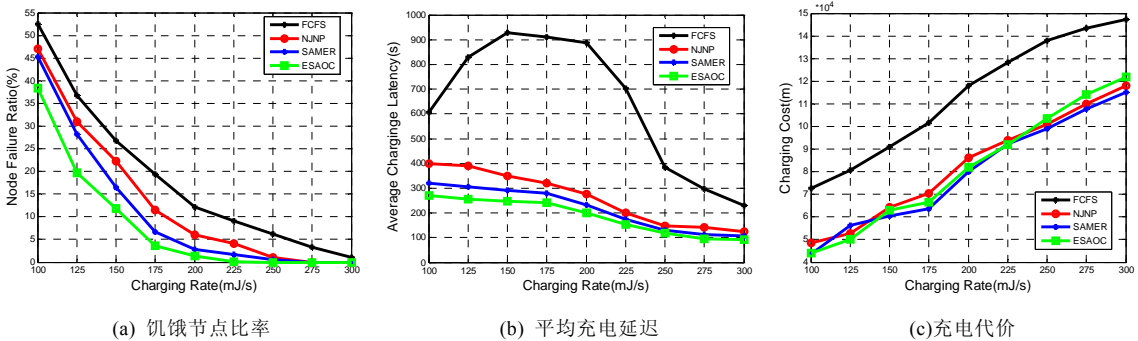


Fig.5 Different charging rates to network performance

图 5 不同充电效率下的网络性能

为无线可充电传感器网络进行无线充电的最主要目标是防止传感器节点陷入能量饥饿来延长网络的生存时间.图 5(a)显示:当移动充电器的充电效率提高时,4 种策略的饥饿节点比率均呈下降趋势.这是因为充电效率提高使得移动充电器单位时间内能够服务的待充电节点数量增加,那么请求充电节点在它们的最大充电容忍延迟内被充电的概率增大引起的.随着充电效率变化,ESAOC 的饥饿节点比率始终低于其他 3 种策略,原因在于两个方面:首先,ESAOC 对节点能量消耗率进行合理估计,能量消耗率的估计过程既考虑了节点能量消耗的历史统计,又保证了节点能量消耗具有实时性,合理能量消耗率为下一步规划 MC 的移动路径提供了基础;其次,ESAOC 根据各节点当前能量消耗率计算节点的当前最大充电容忍延迟和最短充电等待时间,通过比较这两

个时间值,统计选择任意节点为下一充电节点时,网络中失效节点的总数量,并始终选择使其他待充电节点饥饿数量最少的节点作为下一充电节点.下一充电节点选择算法以最小化饥饿节点数量为目标,保证了 ESAOC 具有较低的饥饿节点比率.FCFS 的饥饿节点比率最高,因为该算法中移动充电器消耗大量时间在网络中不断来回往复移动,使得节点等待充电的时间增长,节点容易饥饿.图 5(b)中,NJNP,SAMER 和 ESAOC 的平均充电延迟随着充电效率提高不断下降,而 FCFS 却先增大后减小.FCFS 的平均充电延迟开始时增大是因为充电效率提高使得 MC 能够服务的节点数量增多,MC 来回往返的运动增多,使得节点等待充电的时间增长.随着充电效率继续增大,MC 为节点充电的速度更快,使得充电延迟逐渐减小.ESAOOC 的平均充电延迟略低于 SAMER 和 NJNP,这是因为 ESAOC 在下一充电节点选择算法中最先选择完成充电所需时间最短的节点为下一充电节点,这使得其他待充电节点等待充电的时间缩短的原因.随着充电效率继续提高,ESAOOC 在完成充电服务的节点数量增多后可能选择较远的节点作为下一充电节点,以使其他待充电节点饿死的几率最小,因此,该策略的平均充电延迟在充电效率高时接近 SAMER 和 NJNP 算法.如图 5(c)所示,4 种策略的充电代价均会随着充电效率提高增大.因为充电效率越大为节点充电的速度就越快,那么移动充电器移动的总距离就会越远来为完成更多的充电请求.ESAOOC 在充电效率较高时充电代价略高于 NJNP 和 SAMER,因为根据下一充电节点选择算法,此时 ESAOC 可能选择的下一充电节点距离 MC 所在位置较远,以使得网络中由于饥饿而失效的节点数量最小,这会使移动充电器移动距离增大造成充电代价升高.

4.2 节点数量对性能的影响

本组实验讨论节点数量对各策略性能的影响,我们把传感器节点数量由 25 个逐渐增长到 200,各策略的性能变化如图 6(a)~图 6(c)所示.

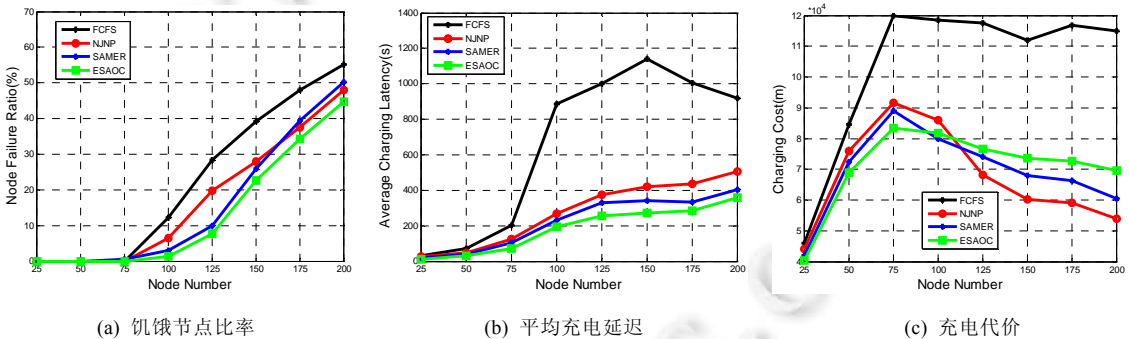


Fig.6 Different node number to network performance

图 6 不同节点数量下的网络性能

从图 6(a)可见:当传感器节点数量较少时,由于此时网络中请求充电的节点数量较少,MC 能够较快为数量不多的待充电节点补充能量,因此,4 种策略的饥饿节点比率均不大.随着网络中节点数量继续增大,这 4 种策略的饥饿节点比率均增大,因为节点数量越多,MC 的充电负担越重,当请求服务的节点数量超过 MC 的服务能力时,各策略的饥饿节点比率增长迅速.本文策略始终获得低于其他 3 种策略的饥饿节点比率,这主要因为本策略在合理设置充电请求发送门限值的前提下,合理估计各节点当前能量消耗率;之后,在每次选择下一充电节点时,根据能量消耗率计算并比较待充电节点的当前最大充电容忍延迟和这些待充电节点得到充电服务的最短等待时间,始终选择使其他待充电节点死亡数量最少的节点作为下一充电候选节点,因此能够最大程度保证网络中失效的节点数量最少.SAMER 的饥饿节点比率在节点数量大于 150 时高于 NJNP,主要是当节点数量较多时,SAMER 很难在网络中找到符合条件的候选充电节点造成的.如图 6(b)所示:随着节点数量增大,NJNP, SAMER 和 ESAOC 的平均充电延迟变化规律类似,且 ESAOC 的平均充电延迟略低于 NJNP 和 SAMER.这主要是因为 ESAOC 偏向于选择最快完成充电的节点为下一充电节点,该下一充电节点选择策略能最小化网络中其他节点等待充电服务的时间.FCFS 的平均充电延迟在节点数量高于 75 时增长迅速,主要由于该策略中当节点

数量增大时,移动充电器 MC 在网络中来回移动显著增多,MC 运动到节点的延迟增加了,因此节点等待充电的时间延长了.图 6(c)中,NJNP,SAMER 和 ESAOC 的充电代价先增大后减小.充电代价减小是因为当节点数量达到一定程度时,充电请求数量也明显增加,这样,MC 在较近的距离内发现满足条件的待充电节点的概率增大,MC 此时就来不及响应距离自己较远的充电请求,一直在为自己周围的请求充电节点充电,所以 MC 移动总距离小了.从图 6(a)可以看到,此时饥饿节点比率也快速增加.从图 6(c)中还可以看到:网络中节点数量低于 125 时,ESAOOC 的性能优于其他策略;之后,随着节点数量继续增多.由于 ESAOC 可能选择距离 MC 较远的待充电节点以最小化网络中饥饿节点数量,且 ESAOC 服务的节点数量最多,而 NJNP 和 SAMER 公平性差,偏向于选择距离 MC 较近的节点进行充电,因此 ESAOC 的充电代价大于 NJNP 和 SAMER.

4.3 MC 移动速度对性能的影响

本组实验研究移动充电器的运动速度对策略性能的影响.图 7(a)显示,4 种策略的饥饿节点比率均随着移动充电器的速度增加呈下降趋势.因为 MC 速度增加后,它能够以更快的效率为等待充电传感器节点充电,降低了节点因等待其他节点的充电服务而饿死的几率.在 MC 运动速度变化过程中,FCFS 的饥饿节点比率最大,因为 FCFS 需要在网络中来回往复运动为节点充电,使节点等待充电的时间增长.由于 ESAOC 在合理的充电请求门限值范围内发送充电请求,并合理估计当前能量消耗率及通过高效的下一充电节点选择算法避免节点能量饥饿,ESAOOC 的饥饿节点比率始终小于其他 3 种策略,显示了 ESAOC 的优越性能.图 7(b)中,MC 的移动速度增加后,FCFS 的平均充电延迟先略增大后减小.FCFS 的平均充电延迟增大是因为 MC 移动速度增大使 MC 服务的传感器节点数量增加了,MC 需要在网络中来回运动为传感器节点充电,来回往返的运动延长了节点等待充电的时间.之后,随着 MC 移动速度继续增长,待充电节点完成充电服务的时间进一步缩短,因此充电延迟减小.由于待充电节点等待服务的时间缩短,NJNP,SAMER 和 ESAOC 的充电延迟均随着 MC 移动速度增长不断下降.如图 7(c)中,由于 MC 移动速度越快移动充电器的服务能力越强,MC 能够为更多的待充电节点完成充电,因此 MC 的移动总距离增加,导致充电代价也增加了.随着 MC 移动速度增加,SAMER 的充电代价逐渐接近 NJNP.因为随着服务的待充电节点数量增多,两者均选择距离 MC 较近的节点为下一充电节点的缘故.为使陷入饥饿的节点数量最少,ESAOOC 可能选择的下一充电节点并不是距离 MC 最近的节点,因此在 MC 移动速度较高时,ESAOOC 的充电代价高于 NJNP 和 SAMER.

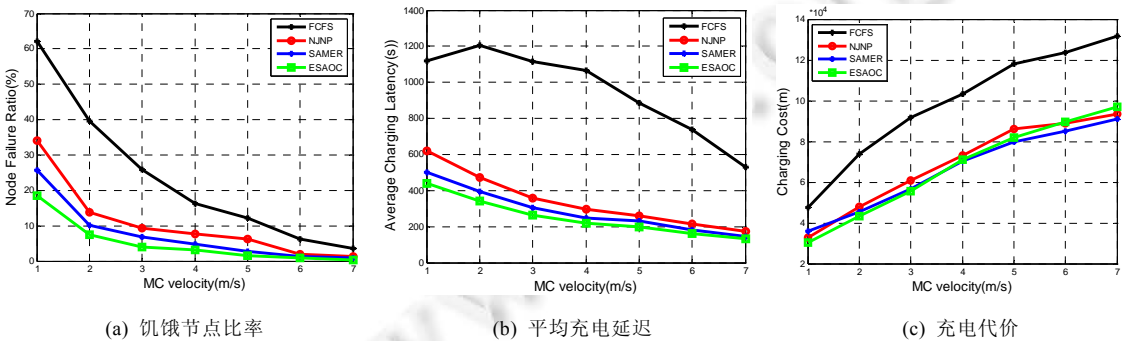


Fig.7 Different MC moving speed to network performance

图 7 不同移动充电器运动速度的影响

4.4 MC 携带的能量对性能的影响

移动充电器的能量容量会影响策略的性能,为此,本组实验讨论 MC 的能量容量对各策略性能的影响.图 8(a)中,4 种策略的饥饿节点比率均随着 MC 能量容量变大而逐渐减小.这是因为能量容量大时 MC 能为更多的节点充电,相应地,由于 MC 能量不足导致节点不能及时充电而引起节点饥饿的概率减小了,因此节点饥饿比率降低.ESAOOC 策略的饥饿节点比率最低,这主要由于 ESAOC 始终选择令其他节点饥饿数量最少的待充电节

点为下一充电节点的原因.FCFS 的饥饿节点比率在 4 种策略中最高,因为首先 FCFS 在网络中来回往复运动浪费了 MC 的能量,其次,FCFS 的来回运动使节点等待充电的时间增长,那么节点在有限的充电容忍延迟内失效的概率增大了.如图 8(b)所示:4 种策略的平均充电延迟在 MC 能量容量低时较小,随着 MC 能量容量不断增大,原来由于 MC 能量不足失效的节点能够被充电了,而这部分节点等待充电的延迟较长,导致 4 种策略的充电延迟增大.ESAOC 的充电延迟始终低于其他 3 种策略,因为 ESAOC 偏向选择最快完成充电的节点为下一充电服务节点,使其他节点等待服务的时间缩短.图 8(c)表明,MC 能量容量增大使 4 种策略的充电代价提高.因为 MC 能够服务的节点数量增多了,为此,MC 移动的距离也就越远以便服务更多的节点.随着 MC 携带的能量增大,因为 ESAOC 服务的节点数量最多且 ESAOC 可能下一跳选择的节点距离 MC 当前位置稍远,因此当 MC 能量容量较大时,ESAOC 的充电代价稍高于 SAMER,接近 NJNP.

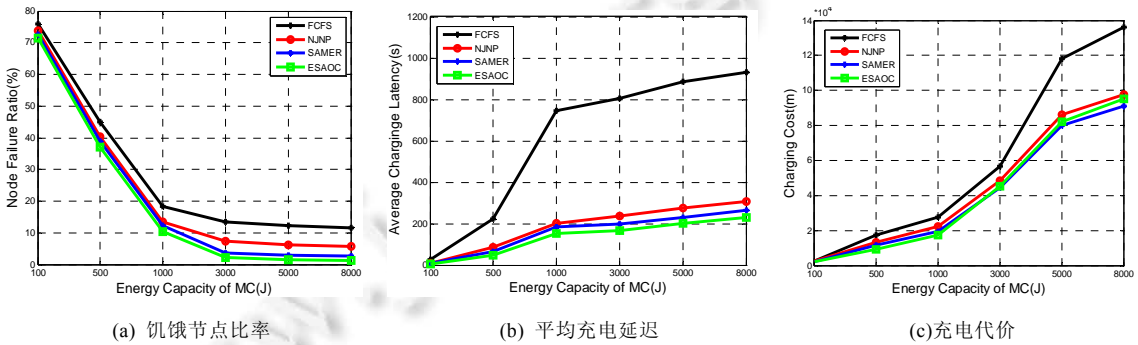


Fig.8 Different MC energy capacity to network performance

图 8 移动充电器能量容量的影响

4.5 门限值对性能的影响

门限值的设置影响策略的性能,为此,本组实验讨论节点的充电门限值 E_{thred} 的设置对 NJNP,SAMER 和 ESAOC 性能的影响.实验中,我们把节点的充电门限值分别设置为 0.1E~0.6E,得实验结果如图 9 所示.

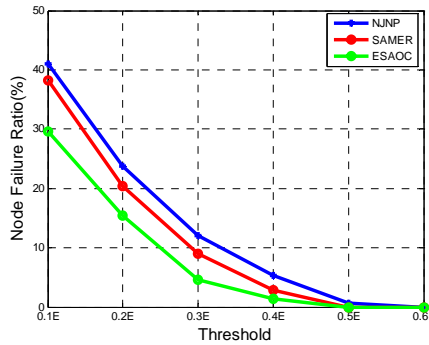


Fig.9 Impact of threshold to node failure rate

图 9 门限值对饥饿节点比率的影响

图 9 显示,3 种策略的饥饿节点比率均随着 E_{thred} 变大不断减小.这是合理的,因为门限值越大,表明节点的充电请求发送越早,节点发送充电请求时的剩余能量就越多,那么留给 MC 运动到待充电节点并在节点能量全部消耗完之前为节点充电的时间就比较充足.相反,充电门限值越小,待充电节点的最大充电容忍延迟就会越短,待充电节点就越容易在等到 MC 服务前死亡.此外,无论 E_{thred} 值如何变化,ESAOC 的饥饿节点比率始终低于 SAMER 和 NJNP,显示了本文策略在饥饿避免方面的优越性,能够尽量避免节点陷入饿死,从而延长了网络寿命.

此外,为了验证阈值的理论分析是否合理,我们在节点部署后确定节点的位置,之后根据各节点位置计算得 d ;此外,根据节点的能量消耗情况计算能量消耗率,并根据各节点能量消耗率统计平均能量消耗率 R ,在已知 R, d, N, E, c, η 和各节点能量消耗率后,通过公式(8)、公式(13)和公式(17)计算门限值 E_{threds} ,当设置 $\alpha=0.9$ 时,最终得门限值下限约为 $0.37E$ 。从图 9 可以看出:当门限值大于 $0.37E$ 时,NJNP,SAMER 和 ESAOC 的饥饿节点比率均较低,表明门限值下限的分析是合理的。

4.6 节点能量消耗率对性能的影响

节点的能量消耗率影响各策略的性能,为了分析能量消耗率对性能产生的影响,我们把传感器节点数据产生的平均到达时间间隔分别调整为 30s,40s,60s,70s 和 80s。随着数据的到达间隔不同,网络中节点的能量消耗率会发生变化。我们得到 4 种策略的饥饿节点比率随数据产生的平均到达时间间隔变化如图 10 所示。图中显示:平均数据到达间隔减小,使 4 种策略的饥饿节点比率不断增大。引起这种现象的原因是:数据到达间隔越小,则节点能量消耗率越大,那么节点能量消耗就越快,致使单位时间提出充电请求的节点数量增多。由于 MC 的服务能力有限,当提出充电请求的节点数量不断增多时,不能被及时充电而失效的节点数量也增多了,造成饥饿节点比率增大。由于始终选择使网络中饥饿节点数量最少的节点作为下一充电节点,在数据到达间隔变化使得节点能量消耗率变化过程中,ESAOOC 的饥饿节点比率始终低于另外 3 种策略,表明 ESAOC 在避免节点失效方面非常有效。

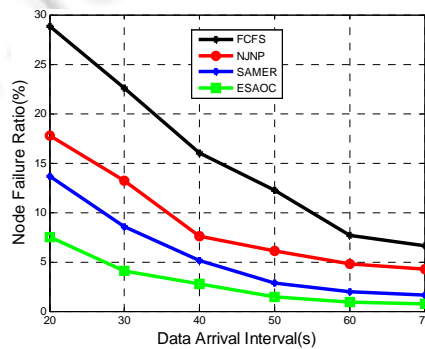


Fig.10 Impact of energy consumed rateto node failure rate

图 10 能量消耗率对饥饿节点比率的影响

5 结 论

本文研究无线可充电传感器网络的在线动态充电问题,并提出了能量饥饿避免的在线充电策略 ESAOC。ESAOC 不仅能够适应实际环境中传感器节点能量消耗的动态性和多样性,还充分考虑了充电过程的公平性,通过合理地选择 MC 服务的下一充电节点,尽量避免请求充电节点陷入能量饥饿。仿真实验中,我们通过分析饥饿节点比率、充电延迟和充电代价来评估所提策略的性能。实验结果表明:ESAOOC 能够有效降低饥饿节点比率,并且能够及时有效地为网络中的待充电节点补充能量。

References:

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey on environmental monitoring. *Computer Networks*, 2002,38(4):393–422.
- [2] Yu L, Wang N, Meng X. Real-Time forest fire detection with wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. New York: IEEE Press, 2005. 1214–1217.
- [3] Liu M, Gong GH, Wen YG, Chen GH, Cao JN. The last minute: Efficient data evacuation strategy for sensor networks in post-disaster applications. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM*. New York: IEEE Press, 2011. 1–5.

- [4] Kim S, Pakzad S, Culler D, Demmel J, Fennes G, Glaser S, Turon M. Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks. In: Proc. of the Information Processing in Sensor Networks. New York: IEEE Press, 2007. 254–263.
- [5] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, Joannopoulos JD, Fisher PMS. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*, 2007,317(5834):83–86.
- [6] Kang K, Meng YS, Bfeger J, Grey CP, Ceder G. Electrodes with high power and high capacity for rechargeable lithium batteries. *Science*, 2006,311(5763):977–980.
- [7] Kar K, Krishnamurthy A, Jaggi N. Dynamic node activation in networks of rechargeable sensor. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2006,14(1):15–26.
- [8] Liu RS, Sinha P, Koksall CE. Joint energy management and resource allocation in rechargeable sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2010. 1–5.
- [9] He S, Chen J, Jiang F, *et al.* Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2013,12(10):1931–1942.
- [10] Bhuiyan MZA, Wang GJ, Cao JN, Wu J. Energy and bandwidth-efficient wireless sensor networks for monitoring high-frequency events. In: Proc. of the IEEE SECON. New York: IEEE Press, 2013. 24–27.
- [11] He L, Gu Y, Pan J, Zhu T. On-Demand charging in wireless sensor networks: Theories and applications. In: Proc. of the IEEE MASS. New York: IEEE Press, 2013. 28–36.
- [12] Fu L, Cheng P, Gu Y, Chen J, He T. Minimizing charging delay in wireless rechargeable sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2013.
- [13] Chiu TC, Shih YY, Pang AC, *et al.* Mobility-Aware charger deployment for wireless rechargeable sensor networks. In: Proc. of the Network Operations and Management Symp. (APNOMS). New York: IEEE Press, 2012. 1–7.
- [14] Xie LG, Shi Y, Thomas HY, *et al.* Bundling mobile base station and wireless energy transfer: Modeling and optimization. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2013. 1684–1692.
- [15] Peng Y, Li Z, Zhang W, Qiao D. Prolonging sensor network lifetime through wireless charging. In: Proc. of the IEEE Real-Time Systems Symp. (RTSS). New York: IEEE Press, 2010. 129–139.
- [16] Li Z, Peng Y, Zhang W, Qiao D. Study of joint routing and wireless charging strategies in sensor networks. In: Proc. of the Wireless Algorithms, Systems, and Applications. Springer-Verlag, 2010. 125–135.
- [17] Shi Y, Xie L, Hou YT, *et al.* On renewable sensor networks with wireless energy transfer. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2011. 1350–1358.
- [18] Zhao M, Li J, Yang YY. Joint mobile energy replenishment and data gathering in wireless rechargeable sensor networks. In: Proc. of the IEEE ITC. New York: IEEE Press, 2011. 238–245.
- [19] Wu J. Collaborative mobile charging and coverage. *Journal of Computer Science and Technology*, 2014,29(4):550–561.
- [20] Guo ST, Wang C, Yang YY. Mobile data gathering with wireless energy replenishment in rechargeable sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2013. 1932–1940.
- [21] Fu LK, Peng C, Yu G, *et al.* Optimal charging in wireless rechargeable sensor networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2016,65(1):278–291.
- [22] Lin C, Wu YK, Liu ZC, *et al.* GTCharge: A game theoretical collaborative charging scheme for wireless rechargeable sensor networks. *Journal of Systems and Software*, 2016,121(2006):88–104.
- [23] Han GJ, Qian AH, Jiang JF, *et al.* A grid-based joint routing and charging algorithm for industrial wireless rechargeable sensor networks. *Computer Networks*, 2016,101(4):19–28.
- [24] Chen FY, Zhao ZW, Min GY, *et al.* Speed control of mobile chargers serving wireless rechargeable networks. In: Proc. of the Future Generation Computer Systems. 2016. 1–19.
- [25] Wang C, Yang Y, Li J. Stochastic mobile energy replenishment and adaptive sensor activation for perpetual wireless rechargeable sensor networks. In: Proc. of the IEEE WCNC. New York: IEEE Press, 2013. 974–979.
- [26] Feng Y, Liu NB, Feng W, *et al.* Starvation avoidance mobile energy replenishment for wireless rechargeable sensor networks. In: Proc. of the IEEE ICC. New York: IEEE Press, 2016.

- [27] Wang C, Li J, Ye F, Yang YY. A mobile data gathering framework for wireless rechargeable sensor networks with vehicle movement costs and capacity constraints. IEEE Trans. on Computers, 2016,65(8):2411–2427.
- [28] https://en.wikipedia.org/wiki/Weighted_arithmetic_mean
- [29] https://en.wikipedia.org/wiki/First-come,_first-served



朱金奇(1980—),女,天津人,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络,车联网,智能感知.



刘明(1972—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为无线传感器网络,智能感知,深度学习.



冯勇(1975—),男,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为无线传感器网络,移动计算.



张兆年(1994—),男,学士,主要研究领域为无线网络,物联网.



孙华志(1961—),男,博士,教授,主要研究领域为分布式计算.

WWW.JOS.ORG

WWW.JOS.ORG.CN