

文章编号：1005-8451（2013）04-0049-06

无线Mesh网络中基于中继转发的定价问题研究

姜 浩，李兴华，霍 炎

（北京交通大学 电子信息与工程学院，北京 100044）

摘要：无线多跳中继转发方式是一种保证无线网络连接质量的方法，它可以让一些离中心网络较远的节点把别的节点当作中继节点，帮忙转发自己的数据。但是在多跳合作转发的过程中，中继节点因为转发别人的数据会对自身的数据传送造成不良影响，所以这就需要一种激励机制来鼓励这种中继节点的转发行为了。本文研究并归纳了目前网络中常见的节点间中继转发的合作行为和需要被转发数据的节点向中继节点付费的问题，即基于节点间数据转发的定价问题。

关键词：移动互联网；无线多跳网络；Mesh网络；中继定价

中图分类号：U285 : TP39 **文献标识码：**A

Research on multi-hop relay pricing in wireless Mesh network

JIANG Hao, LI Xinghua, HU Yan

(School of Electronics Information & Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Wireless multi-hop relaying was a good way to solve these connecting problems, remote nodes in the network could turn to nodes which were more close to the backbone network for relaying, and help to transfer the data. In cooperating activities like this, center nodes might suffer from helping remote nodes to transfer their data, then incentive mechanisms are necessary to encourage users in network to cooperate. In this paper, it was focused on issues about finding good approaches to encourage cooperation behaviors between nodes, discussed how to allocate relay bandwidth for all the nodes and how these nodes been helped should pay to those relaying nodes, this was the problem of multi-hop relay pricing in wireless Mesh network.

Key words: mobile Internet; wireless multi-hop network; Mesh network; relay pricing

无线网络给人们的日常生活和工作提供了很多便利，目前，常见的无线网络有：WLAN、Ad Hoc、WMN^[1]（Wireless Mesh Network）等。这些无线局域网常部署在如教室、办公楼等公共区域内，无线Mesh网络^[2]（又称作WMN网络）以其独特的自组织性、健壮性、部署简易、成本低以及与其它网络良好的兼容性等优点而在近年来得到广泛的关注。

1 Mesh网络

Mesh网络结构如图1所示，它主要由3层结构组成：第1层由网关(Gateway)等设备组成；第2层主要由一些路由器(Routers)等设备组成，负责寻找路由和为网路中的设备转发数据；第3

层则是一些连接到网络中的终端节点(Clients)组成。第1层和第2层又一起组成Mesh骨干网络(Wireless Mesh Backbone)。

随着Mesh网络的发展，它在越来越多的场景中得到使用，Mesh网络在家庭、企业和公共场所等众多领域都具有广阔的应用前景。同时它还可以与蜂窝移动通信网络相结合，有效地扩大目前的传统网络和信号强度受限的无线网络的覆盖范围，从而为普通用户提供更加完美的网络接入服务。

无线多跳方式是一种保证无线网络连接质量的方法，它可以让一些离主干网络较远的节点把别的节点当作中继节点，用其帮忙转发自己的数据。但是在这样的多跳合作转发过程中，作为中继的节点因为转发别人的数据会对自身的数据传送造成不良影响。Felegyhazi^[3]指出在某些特殊条件下，不需要激励机制的作用，用户之间也可

收稿日期：2012-09-17

作者简介：姜 浩，在读硕士研究生；李兴华，副教授。



图 1 Mesh 网络结构图

以有合理的中继转发数据的关系。但是通常情况下，还是需要通过一定的激励机制来鼓励离中心网络比较近的节点转发边缘节点的数据。Ad Hoc-VCG^[4]就是一个行之有效的激励机制，它鼓励被转发数据的节点提供给转发者（中继节点）一定的补偿。文献[5]中归纳了几种其它的方法，例如：引入一种计数器来鼓励节点帮助其他节点转发数据包^[6]；Sorite 协议^[7]中，中间节点通过信用凭证作为转发合作奖惩的依据。

本文主要考虑关于无线多跳 Mesh 网络中节点间的合作问题，网络中不同节点可能会组成一个中继联盟，这里引入经济学中的概念，考虑在什么定价模型下，中继节点在转发数据时得到的报酬（或者利益）能够最大化，并讨论基于此的激励机制及定价问题。

2 网络模型和相关定义

对于离骨干网络比较远的节点，它需要靠网络中心节点帮助转发和接收数据，使它和网络中其它节点以及异构网络中的节点进行通信。而网络中节点（中继节点）在转发其它节点的数据时，自身的通信带宽会变小，同时由于需要替其它节点做数据处理，其 CPU 的额外开支也会增大，这些都会对通信质量和服务造成影响。所以网络边缘节点需要向中继节点支付一定数量的货币（注：本文中提到的货币是一种货币和报酬概念的虚拟化，即虚拟的货币报酬）。同时一个节点向其它节点支付的货币数额应该与它所接收的服务有直接

的关系^[8]，本文把边缘节点（也叫做客户端节点）得到的由中继节点给它分配的带宽作为其接受到服务的度量标准。以下是本文中很重要的定义。

定义 1：客户端节点的接入带宽，客户在一个单位时间内所传输的数据总量定义为客户的接入带宽。

客户根据所获的带宽多少，付给中继相应的数额。但是这里的接入带宽与所需交付的金额不是简单的线性关系。以下定义一个价格函数来描述它们之间的关系。

定义 2：客户的价格函数，定义 $f_i(B)$ 为客户 C_i 的价格函数，其中 B 是客户从中继所获得的带宽， $f_i(B)$ 是客户所能接受支付给中继的最大金额。

价格函数如图 2 所示。

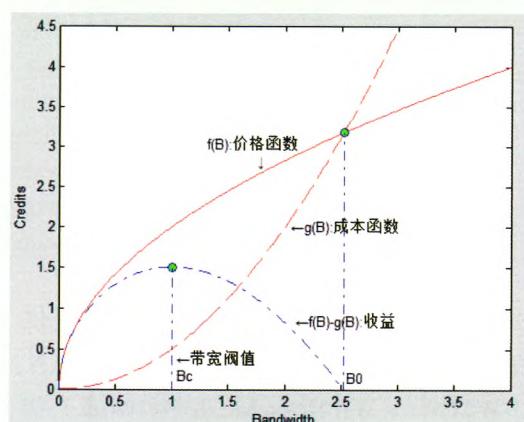


图 2 价格函数和成本函数

边际效应递减法则^[9]，客户端节点的价格函数是一个凸函数，随着带宽增加，它的服务满意度慢慢下降。

定义 3：中继的服务带宽，中继节点为所有客户端提供服务的数据总量为中继的服务带宽。

一个中继节点可能同时为一个或多个客户端节点提供数据转发服务，所以中继节点的总服务带宽应是与它连接的所有客户端节点所被分配带宽的总和。

定义 4：中继的成本函数，以 $g_i(B)$ 表示中继 r_j 的成本函数，其中 B 是中继的服务带宽， $g_i(B)$ 是为客户节点提供带宽 B 所需的成本。

定义5：中继的利润，中继 r_j 的利润 p_j 定义为它总的收益与提供带宽服务的成本之差。

3 不同模型下的定价策略

3.1 单中继单客户模型

首先讨论最简单的模型，只有一个客户端节点和一个中继节点的情况即单中继单客户(SRSC)定价策略。

从图2中可以看出中继的利润函数在服务带宽超过某个阀值 B_c 时开始下降。所以中继必须设定一个截止带宽来限制客户的最大接入带宽。

定义6：客户的截止带宽，定义客户 c_i 的截止带宽为所能接入的最大带宽，用 B_c^i 表示，其最大值根据中继设定。

定义7：中继的截止带宽，定义中继 r_j 的截止带宽为它所服务客户的截止带宽的总和，用 B_{cr}^j 表示。

同时，设 $f_i(B_c)$ 为客户 c_i 的边际效用的临界值，即客户的价格函数在其截止带宽时的边际效用；设 $g_j(B_{cr})$ 为中继节点的边际成本。

定理1：在单中继单客户的情形中，当中继的临界边际成本与客户的临界边际效用相等时，即 $f_i(B_c^i)=g_j(B_{cr}^j)$ ，中继的利润为最大。

证明：因为要使得中继的利润最大，即 $p_j=f_i(B_c^i)-g_j(B_{cr}^j)$ 最大，所以只需要对 p_j 求导数，并且令它等于0，此时的极值点 B_c^i 满足 $f_i'(B_c^i)=g_j'(B_{cr}^j)$ ，只有一个客户节点和，所以 $B_c^i=B_{cr}^j$ ，从而 $f_i'(B_c^i)=g_j'(B_{cr}^j)$ 成立。

3.2 单中继多客户模型

本节中考虑的是单个中继节点为多个客户节点转发数据的情况。中继为 r_j ，客户数为N，用 $C=\{c_1, c_2, c_3, \dots, c_{N-1}, c_N\}$ 表示。要使得这里中继节点的利润最大化，最关键的问题是怎么确定这些客户节点的截止带宽 $B_c^1, B_c^2, B_c^3, \dots, B_c^N$ 。

3.2.1 无限带宽需求模型

先考虑一种理想的情况，即不用管客户端节点对带宽需求的大小，带宽大小由中继节点指定，即假设客户节点对带宽的需求永远是无穷大的，它始终有数据需要传输。此时中继的利润为：

$$p=\sum_{i=1}^N f_i(B_c^i)-g(B_{cr}) \quad (1)$$

其中， $B_{cr}=\sum_{i=1}^N B_c^i$ 是中继节点的中继总带宽。这里要解决的问题就是确定各个客户节点的截止带宽 B_c^i ($i=1, 2, \dots, N$)，它们应该使得中继的利润最大化，即：

$$\begin{aligned} & \max_{\{B_c^i\}} P \\ & \text{s.t. } B_c^i \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

定理2：在无限带宽需求模型下，当每一个客户的临界边际效用都等于中继的临界边际成本时，中继节点取得最大收益。

证明：最佳的截止带宽是式(2)的解。对中继的利润表达式(1)求极值，即：

$$p(\{B_c^i\})=\sum_{i=1}^N f_i(B_c^i)-g(B_{cr}) \text{ 的最大值。}$$

直接对上式中各个自变量 B_c^i 求偏导数，并令其等于0。由

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^N f_i(B_c^i)}{\partial B_c^i}=\frac{df_i(B_c^i)}{dB_c^i}, \quad 1 \leq i \leq N$$

$$\frac{\partial g(B_{cr})}{\partial B_c^i}=\frac{dg(B_{cr})}{dB_{cr}} \cdot \frac{dB_{cr}}{dB_c^i}=\frac{dg(B_{cr})}{dB_{cr}},$$

$1 \leq i \leq N$ ，可以知道

$$\frac{dg(B_{cr})}{dB_{cr}}=\frac{df_i(B_c^i)}{dB_c^i} \quad (3)$$

这里的 $df_i(B_c^i)/dB_c^i$ 就是客户节点的临界边际效用， $dg(B_{cr})/dB_{cr}$ 就是中继节点的临界边际成本。至此，证明完毕。

下面以一个简单的例子来说明，假设有一个中继节点负责为3个客户节点转发数据。中继节点的成本函数为 $g(B)=b \cdot B^2$ ， $b=0.005$ ；而3个客户节点的价格函数为 $f(B_c^i)=a_i \cdot B_c^{i1/2}$ ，其中 a_i 为常数，分别等于0.5、1和2。根据式(3)得到3个等式，将上面的系数代入后可以解出各个节点截止带宽以及中继节点的利润，结果如表1所示。

中继节点的临界边际成本值等于各个客户节点的临界边际效用，值为0.2359。相应地可以算出此时中继节点的利润值最大为10.991。图3可以比较直观地表现定理2的内容，在4个点分别得到一条切线并相互平行，这就意味着 $f_1'(B_c^1)=f_2'(B_c^2)=f_3'(B_c^3)=g'(B_{cr})$ ，从而直接证明了定理2的结论。

3.2.2 动态带宽需求模型

在实际的网络传输中，客户的带宽需求因其不同的数据传送要求而经常随时间变动。对一个

表1 节点截止带宽与利润

参数	表达式	测试值
B_c^1	$\frac{a_1^2}{\sqrt[3]{16b^2(a_1^2+a_2^2+a_3^2)^2}}$	1.1233
B_c^2	$\frac{a_2^2}{\sqrt[3]{16b^2(a_1^2+a_2^2+a_3^2)^2}}$	4.4930
B_c^3	$\frac{a_3^2}{\sqrt[3]{16b^2(a_1^2+a_2^2+a_3^2)^2}}$	17.972
B_{cr}	$\sqrt[3]{\frac{a_1^2+a_2^2+a_3^2}{16b^2}}$	23.588
边际效用	$\sqrt[3]{4b(a_1^2+a_2^2+a_3^2)/2}$	0.2359

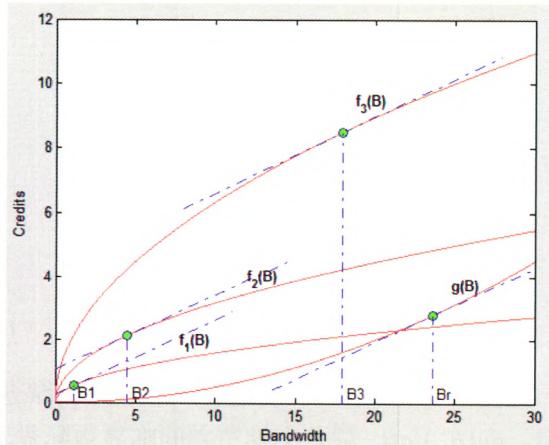


图3 定理2的实例图

客户节点 c_i , 假设动态带宽需求服从某一个特定的概率密度函数 $q_i(B)$ 的连续随机分布。中继根据成本函数与价格函数, 计算出相应的截止带宽 B_c^i 并分配给该客户节点。

在动态带宽分配的情况下, 中继节点从客户节点 c_i 处获得的收益用期望的形式来表达:

$$\int_0^{B_c^i} f_i(B) q_i(B) dB + \int_{B_c^i}^{\infty} f_i(B) q_i(B) dB$$

所以中继节点的总收益的期望和总的中继带宽如公式(4)和(5)。

$$E_{charge} = \sum_{i=1}^N \left(\int_0^{B_c^i} f_i(B) q_i(B) dB + \int_{B_c^i}^{\infty} f_i(B) q_i(B) dB \right) \quad (4)$$

$$E_{bs} = \sum_{i=1}^N \left(\int_0^{B_c^i} B q_i(B) dB + \int_{B_c^i}^{\infty} B_c^i q_i(B) dB \right) \quad (5)$$

因此中继节点总的中继成本期望可以表示

为 $E_{cost}=g(E_{bs})$, 中继利润的期望值为 $E_p=E_{charge}-E_{cost}$ 。

定理3: 在动态带宽需求模型及最佳截止带宽分配的条件下, 中继的临界边际成本等于客户的临界边际效用。

证明: 分别对 E_p 关于 B_c^i 求偏导, 并令它们等于 0, 即:

$$\frac{\partial E_p}{\partial B_c^i} = \frac{\partial E_{charge}}{\partial B_c^i} - \frac{\partial E_{cost}}{\partial B_c^i} = 0, \quad 1 \leq i \leq N$$

又由于

$$\frac{\partial E_{charge}}{\partial B_c^i} = \frac{df_i(B_c^i)}{dB_c^i} \int_{B_c^i}^{\infty} q_i(B) dB$$

$$\frac{\partial E_{cost}}{\partial B_c^i} = \frac{dg(E_{bs})}{dE_{bs}} \int_{B_c^i}^{\infty} q_i(B) dB$$

$$\text{所以有 } \frac{f_i(B_c^i)}{dB_c^i} = \frac{dg(E_{bs})}{dE_{bs}}, \quad 1 \leq i \leq N$$

至此, 证明完毕。而且由此定理求出的各个客户节点的截止带宽 $B_c^i, 1 \leq i \leq N$ 就是最佳带宽。

3.2.3 最大中继带宽上限和最小客户带宽下限的模型

在实际情况中, 中继节点都有一定的可分配的中继带宽上限, 而每个客户节点也都有各自能接受的最小带宽, 即最小带宽下限。用 B_{max} 表示中继的带宽上限, B_{min} 表示客户节点的最低带宽需求。这两个限制条件使该模型更符合实际情况。所以求解客户最佳截止带宽分配的问题可以用如下式子表示:

$\max_{\{B_c^i\}} p$, 其中 $B_c^i \geq B_{min}, B_{cr} \leq B_{max}$, 通过设计一个“单中继多客户”的算法可以计算最佳带宽分配。

下面的算法是关于中继节点、各个客户端节点、每个客户节点的最低带宽需求、中继节点的最大中继带宽、客户的价格函数以及中继的成本函数作为输入算法, 最后输出的是客户的截止带宽分配。算法中, 当分配给各个客户节点的截止带宽之和超过中继节点的最大中继带宽上限时, 此时中继节点就不能为全部的客户节点转发数据, 中继节点会选择对总体利润贡献最小的节点, 断开和它们的连接。算法中, δ_i 表示每个客户节点对中继收益的贡献大小:

$$\delta_i = f_i(B_c^i) - (g(B_{cr}) - g(B_{cr} - B_c^i)) \quad (6)$$

如果是动态的带宽需求模型，计算公式为：

$$\delta_i = E_{charge}^i - (g(E_{bs}) - g(E_{bs} - E_b^i)) \quad (7)$$

4 算法仿真及研究结论

通过仿真实验评估算法效果，单中继单客户节点的情况比较简单，结果都可以直接算出来，所以这里只对单中继多个客户节点的情况进行仿真。

无限带宽需求模型的仿真结果如图4和图5所示。

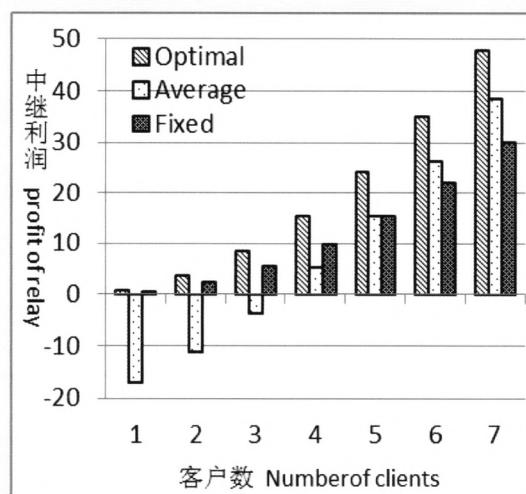


图4 价格/成本函数为多项式

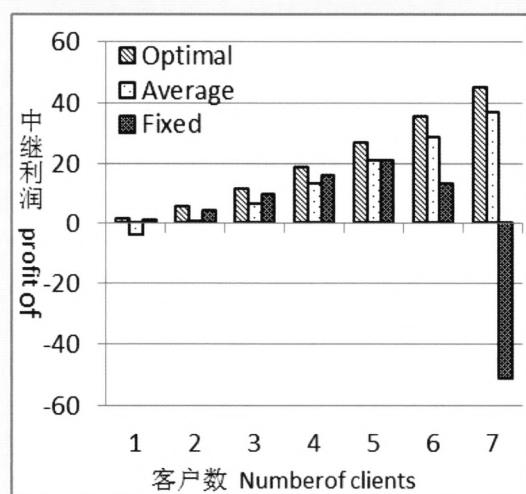


图5 价格/成本函数为log/exp

图4中，中继节点的成本函数是 $0.2 \cdot B^2$ ，7个客户节点的价格函数分别是 $\sqrt{B}, 3\sqrt{B}, 5\sqrt{B}, \dots$,

$13\sqrt{B}$ ；图5中，中继节点的成本函数是 $0.0004 \cdot (2^{B+4} - 1)$ ，7个客户节点的价格函数是 $\log(B+1), 3\log(B+1), 5\log(B+1), \dots, 13\log(B+1)$ 。图中的“Optimal”表示最佳截止带宽分配，而“Average”和“Fixed”作为最佳分配的对比，其中，“Average”是中继的10 M带宽平均分配给所有客户，“Fixed”是中继分配给所有客户固定的2 M带宽。

动态带宽需求模型的仿真结果如下，仿真中价格函数与图4和图5一样，而成本函数分别为 $0.4B^2$ 和 $0.25B^2$ ，在图6中，假设客户的带宽需求服从 [0~5] Mbps 范围内的均匀分布，在图7中，假设客户的带宽需求服从 $\delta=2, \mu=4$ 的正态分布。从上面的仿真图中可以看出，采用最佳截止带宽分配策略时的中继利润最高，无论客户数多少，比其他两种带宽分配策略都高。

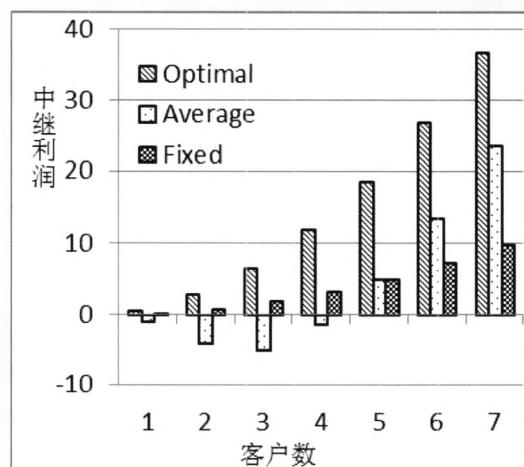


图6 服从均匀分布的模型

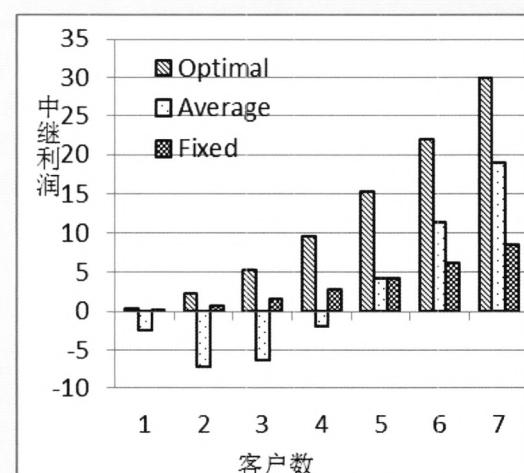


图7 服从正态分布的模型

5 结束语

本文提出了一个在公共区域的无线 Mesh 局域网中基于虚拟货币的中继转发行为的定价策略。首先考虑无限带宽需求的理想情况，再考虑客户节点带宽需求在动态变化的情况，最后考虑中继带宽存在上限和客户带宽存在下限的情况。在这些情况下，通过上面的仿真结果可以发现，简单地平均分配带宽或固定给每个节点一定带宽的算法计算出的结果更好。

参考文献：

- [1] 董瑞峰. 无线 mesh 网络的起源与演进 [J]. 科技资讯, 2010 (5).
- [2] Ian F. Akyildiz, Xudong Wang, Weilin Wang. Wireless mesh networks: a survey [J]. Computer Networks, 2005(47): 445-487.
- [3] M. Felegyhazi, J. Hubaux, and L. Buttyan, Nash equilibria of packet forwarding strategies in wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 5, no. 5, p. 463, 2006.
- [4] L. Anderegg and S. Eidenbenz, “Ad hoc-VCG: a truthful and cost efficient routing protocol for mobile ad hoc networks with selfish agents” [C]. Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM, 2003: 245-259.
- [5] 何明, 袁杭萍, 肖登海, 饶丽萍. 新一代无线 Mesh 网络 [J]. 电信科学, 2009 (1): 62-65.
- [6] Buttyan L, Hubaux J. Stimulating cooperation in selforganizing mobile ad hoc networks [J]. ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications, 2003, 8(5): 579-592.
- [7] Zhong S, Chen J, Yang Y R. Sprite: A simple cheat-proof credit-based system for mobile ad hoc networks [C]. Proc of the IEEE INFOCOM 2003. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003: 1987-1997.
- [8] 杨飞. 一种新的无线 Mesh 网络计费方案的设计和分析 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [9] 郝身永, 董海龙. 准确把握和应用边际效用递减规律 [J]. 梧州学院学报, 2007, 17 (1): 25-28.

责任编辑 陈蓉

征稿启事

本刊征集并择优刊登以下内容稿件

(1) 研究与应用：铁路、城市轨道交通领域、交通运输中反映信息化建设的研究课题，科研成果，推广与应用，学术发展述评以及专项课题综述。内容包括：计算机在铁路运输及经济、机车车辆、通信信号、电气工程、铁路工务工程、节能环保、经营管理、城市轨道交通、交通运输等领域的应用；
 (2) 技术方法：以刊登广大基层科技人员在实际工作中的技术改革，技术创新，经验介绍，应用技巧等方面的文章，本栏目的文章可不提供英文摘要；
 (3) 信息化领域中的市场信息、新技术、新产品、新理论、国内外技术动态等。

来稿要求

(1) 稿件内容应有独创性，论文式文章阐述的研究技术成果主题突出，论证充分，观点、数据结论准确，文字通顺简练，每篇论文字数为 3 000 字~5 000 字，论文使用 Word97 (含) 以上版本编辑，插图及照片用标准图像格式插入；(2) 来

稿格式为：文章题目，全部作者姓名，工作单位全称及所在省市，邮政编码，中文摘要及关键词，英文的题目、摘要及关键词、工作单位，论文内容，参考文献。a. 中文题目在 20 字以内；b. 摘要要求 200 字~300 字；c. 关键词要求规范的科技名词 3 个~5 个；d. 参考文献应注明主要责任者，文献题名，出版项（出版地、出版者、出版年、期刊应注明年卷期），文献起止页码，文献标准编号（标准号、专利号等）。文后参考文献采用顺序编码著录。综述、论文的文献数一般不少于 10 条/篇；(3) 属研究课题及基金项目，应注明文章主要背景、课题名称、基金项目名称及编号；(4) 作者所行使著作权，不得违反国家保密法和著作权法，请在投稿前应审定其内容是否存在泄密或违规。作者稿件中的图例和图片应符合印刷用精度。

投稿邮箱

tljsj@rails.cn

本刊编辑部