

低功耗有损网络RPL目标函数研究综述

王智群^{1, 2}, 周鑫¹, 张波¹, 朱明贺¹

(1.湖州师范学院信息工程学院, 浙江 湖州 313000;

2.湖州学院理工学院, 浙江 湖州 313000)

✉hwzq@zjhu.edu.cn; zhouxin19970322@163.com; 349794465@qq.com; 635532370@qq.com



摘要: 低功耗有损网络(Low-power and Lossy Network, LLN)的RPL(无线传感网络)路由协议因其适用资源受限的网络而受到关注。为了研究如何通过优化目标函数(Objective Function, OF)提高资源利用率, 回顾和梳理近几年相关文献中提出的设计方案, 从路由度量的角度归纳了两类优化思路, 并论述了不同方案的优势与不足之处。研究结果显示, 尽管多数针对路由指标的优化可以改善网络质量, 均衡能耗, 但存在性能指标检测不全、受到环境约束、可拓展性低等问题。针对以上问题, 总结了三个无线传感网络路由优化方面值得被关注的要点, 期望能为该领域的研究人员提供优化思路。

关键词: 低功耗有损网络; RPL; 目标函数; 路由度量

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

Review of RPL Objective Function Research in Low-power and Lossy Network

WANG Zhiquan^{1,2}, ZHOU Xin¹, ZHANG Bo¹, ZHU Minghe¹

(1.College of Information Engineering, Huzhou University, Huzhou 313000, China;

2.College of Science and Engineering, Huzhou College, Huzhou 313000, China)

✉hwzq@zjhu.edu.cn; zhouxin19970322@163.com; 349794465@qq.com; 635532370@qq.com

Abstract: RPL (Routing Protocol, a wireless sensor network) for Low-power and Lossy Network (LLN) has received attention because of its applicability to resource-constrained network. In order to study how to improve the resource utilization by optimizing the Objective Function (OF), this paper proposes to review and sort out the design schemes proposed in the related literature in recent years, summarize two types of optimization ideas from the perspective of routing metrics, and discuss the advantages and shortcomings of different schemes. The results show that although most of the optimization for routing metrics can improve network quality and balance energy consumption, there are problems such as incomplete detection of performance metrics, environmental constraints, and low scalability. To address the above issues, three key points of wireless sensor network routing optimization that deserve attention are summarized, which are expected to provide optimization ideas for researchers in this field.

Keywords: low-power and lossy network; RPL; objective function; routing metric

1 引言(Introduction)

近年来, 物联网(Internet of Things, IoT)的快速发展使无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)覆盖到医疗、军事、工业、监控、构建智能家居等多个领域^[1]。无线传感器网络属于一种典型的低功耗有损网络(Low-power and Lossy Network, LLN), 网络中部署的传感器节点具有低功耗、通信能力弱、能源受限等特点, 一般由电池供电^[2], 这就产生了对LLN路由协议的实质性需求。因为传统网络的路由

协议无法满足LLN的要求, 所以互联网工程专责小组(Internet Engineering Task Force, IETF)中的RoLL(Routing over Low power and Lossy network)工作组提出了一种用于LLN的IPv6协议, 称为RPL(Routing Protocol for LLN))的低功耗和有损网络的路由协议。RPL能够满足诸如低功耗、平衡负载等要求, 并且便于管理和修改网络拓扑结构^[3]。如何选择一条优质的路径是目前RPL协议需解决的一个主要问题, 设计目标函数的目的便是寻找到达目的地的最优路径, 对此科

研人员做了大量的研究,提出了不同的改良方案,但改良方案可能会影响网络的扩展性能、移动性能和安全性等^[4]。本文选择目标函数作为重点研究对象进行探讨,期望为相关研究人员提供路由优化设计的思路与参考。

2 标准目标函数分类及特性(Standard objective function classification and characteristics)

目标函数的原理是通过Rank值选择下一跳的目的地,节点的Rank值属性可以理解节点相对于根节点的距离或者位置,节点通过目标函数使用的路由度量(ETX、ENERGY等)计算其所在网络中的Rank值^[5]。在同一个RPL实例中,所有节点都被要求使用相同的目标函数,目前ROLL工作组在征求意见稿(Requests For Comment, RFC)中定义了两种目标函数供使用者选择,分别是目标函数零OF0(Object Function Zero)和带有滞后功能的目标函数MRHOF(Minimum Rank with Hysteresis Objective Function)^[6]。

2.1 OF0

默认情况下,OF0使用跳数作为路由度量,从候选节点中选择最佳父级^[7]。在DODAG(面向目的地的有向无环图)构造过程中,传感节点需要计算到达根节点的最小跳数,并选择该条路径作为最优路径。为了避免环路,从节点到根节点的Rank值向下递减^[8]。OF0的设计适用于低功耗有损的网络环境,但其仅使用跳数的路由度量有可能会提供较差的链路质量,这是因为节点会选择具有最小跳数的路径,该路径的链路质量可能并不高,这不仅会导致节点更多次的重复传,数据包的丢失率也会随之不断攀升。此外,选择最短跳数的路径也会出现多个节点故障的情况,一旦节点发生这种情况,就会严重影响整个网络的生命周期^[9]。

2.2 MRHOF

MRHOF用于解决静态度量问题,只有当链路发生变化,当前的节点才会选择候选节点作为自己的最优父节点。MRHOF支持附加指标,在默认情况下,MRHOF使用预期传输计数(ETX)作为路由度量来选择最佳路径^[10]。ETX表示成功接收数据包所需的最大重传次数。ETX值越低,则意味着路径质量越高。网络中一条链路的ETX值即成功传输数据包的次数,整条路由的ETX值则是每一条链路ETX值的总和^[11]。例如,一条传输成功率为50%的单跳路由,其ETX值为2,另一条传输成功率为100%的2跳路由,其ETX值为2。因此,ETX的路径成本是单跳ETX和多跳ETX的总和,最佳路径是提供了较低ETX值的路径。MRHOF的另一个度量指标是利用能量作为选择最佳路径的标准。在网络运行期间,节点会定期检查根节点的链接可靠性,这会导致节点消耗更多的能量。为了克服这个问题,MRHOF会选择剩余能量较高的父级节点。与带ETX的MRHOF相比,带能量的MRHOF可以提供更低的能量消耗和延迟^[12]。OF0和MRHOF的特性总结如表1所示。

表1 OF0和MRHOF的特性总结

Tab.1 Feature summary of OF0 and MRHOF

函数名称	路由度量	优点	缺点
OF0	跳数	适用于需要快速形成网络链路和低功耗的传感器网络	路由度量过于单一,在许多应用场景中存在局限性
MRHOF	ETX或ENERGY	在网络质量上优于OF0,适用于需要可靠网络中数据传输的传感器网络	

3 度量组合方法分析(Analysis of metric combination methods)

路由度量用于路径成本的评估,选择最优路径^[13]。目标函数的使用,使得路由度量的组合方式十分灵活。节点根据不同网络的需求选择不同的度量参数,例如ETX、节点能量、跳数等,这些参数信息在路由决策中起着重要的作用。目前,有许多研究人员为了克服使用单一度量的局限性,采用了多种路由度量的权重组合,这样可以确保函数度量约束的准确性。一些简单的目标函数实现只需要使用单个度量,而复杂的目标函数需要定义一组路由度量或约束。路由度量可以划分为节点或链路度量,度量还可以根据数量和质量、动态和静态进行进一步划分,这些指标可以在定义的OF中用作单个或组合的指标。此外,优质的度量需考虑另一个特征动态性,LIN网络中的链路或节点度量并不是稳定的,它们在网络运作期间容易发生变化^[14]。例如,考虑剩余能量作为选择路径的度量时,网络中运行的节点会持续降低其剩余能量,它是一个动态的变化过程。以下是常见的度量组合方式。

(1)词法度量组合:此组合包括两个路由度量,根据路由的需求优先被选择的度量将被视为目标函数使用的度量参数。倘若第一个度量的值相等,那么节点将选用第二个度量确定DODAG父级。例如,路由的需求是优先考虑跳数,则在该组合方式中只有跳数相同的前提下才会考虑其他路由度量。

(2)加法度量组合:此度量组合基于定义的OF,该OF组合了一组度量,在输出中提供一个公共度量,然后使用RPL控制消息通告此生成的度量。路由度量在整个路径中聚合,并包含在度量容器对象中,组合的方式可用下式举例说明:

$$\omega = (\alpha_1 \times \beta) + (\alpha_2 \times \gamma) \quad (1)$$

其中, β 与 γ 代表不同的路由度量, α_1 与 α_2 代表权重因子且满足两个条件: $0 \leq \alpha_1, \alpha_2 \leq 1, \alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。

(3)模糊逻辑组合:模糊逻辑使用语言变量确定路由度量之间的适用程度,例如剩余能量可以用少、中等、多表示,这些值在一个公共输出上被去模糊化和转换,从而使其具有不同的度量特征。良好的路由度量应该具备定义明确、稳定性好及可以有效避免环路等特点^[15]。

4 函数的构建分类和比较研究(Classification and comparative study of the construction of functions)

4.1 基于单一度量的目标函数

目标函数是RPL的主要组成部分,用于快速构建DODAG,实现可靠的数据传输和节能通信,针对单一度量

的性能优化,就有不少学者提出了方案。文献[16]提出了一个基于节点剩余能量的新目标函数OF-ENERGY(Objective Function-Energy)。剩余能量被用作下一个跃点的选择,节点实验结果显示与基于ETX的OF和基于跳数的OF相比,OF-ENERGY下节点运行时间更长,减少了能耗,延长了网络寿命。但是,该目标函数没有将链路质量考虑在内,不能突破单一指标带来的局限性。文献[17]提出了一种基于跳数的新目标函数选择首选的父级,这种优化在端到端延迟和数据包传递率方面提供了更好的性能,但提出的方案仅在传输效率和延迟上进行了测试,忽视了其他重要指标,如网络寿命、首选父级的数量等。从提升RPL提供的服务质量上考虑,文献[18]提出了一种基于连接状态ETX的新目标函数,称之为Best Friend-ETX(BF-ETX)。BF-ETX在功耗和网络延迟方面提高了网络性能。但是,此方案忽略了一些重要参数,例如收敛时间和ETX更新可能导致的父节点更改问题。为了提高节点接收确认信息的效率,文献[19]提出一种通过改变ContikiMAC(周期性休眠)无线占空比协议调节节点的唤醒和休眠时间的方法。与标准ETX相比,新的目标函数AVG_DEL(Average Delay)显著降低了端到端延迟。表2总结了单一度量下目标函数的优点和缺点。

表2 基于单一度量目标函数的相关研究

Tab.2 Relevant research on objective function based on a single metric

目标函数	路由度量	优点	缺点	仿真实验	节点实验
OF-ENERGY	剩余能量	均衡网络节点的能量分配,延长网络寿命	忽略链路质量,仅同标准目标函数对比,提升效果有限	×	✓
OF0	跳数	更低的端到端延迟,数据包传递率更高	仅将其与标准函数进行比较,忽略其他重要指标	✓	×
BF-ETX	预期传输计数	减少功耗,改善网络延迟	考虑的网络参数较少	✓	×
AVG_DEL	时间延迟	降低端到端延迟	忽略了其他重要指标	✓	×

4.2 基于复合度量的目标函数

使用单一度量会导致一些限制。例如,需要良好可靠性的目标函数会选择提供低ETX的父节点。相比之下,使用低ETX进行父节点选择可能会促使节点消耗更多的能量,因而衍生出多种度量相结合的方案。文献[20]提出了一个由ETX、能耗和队列长度通过Add组合的目标函数EEQ(ETX, Energy consumption, Queue length),其能保护过度耗能的节点以便于将数据包发送至根节点。EEQ与标准的MRHOF和OF0相比,减少了控制消息的开销。文献[21]考虑了使用ETX度量及能耗的复合路由度量,称之为L2AM(Lifetime and Latency Aggregateable Metric),该函数允许在DODAG构建期间平衡能量消耗,延长了网络寿命。与标准ETX相比,节点耗能

更平均,能够提供更长的网络寿命。同样为了延长网络整体寿命,文献[22]设计了一种能量感知和负载平衡的目标函数EL-RPL(Energy and Load aware RPL),其由网络负载、电池耗能指数(BDI)和ETX三个指标进行组合,数值更低的路线被视为到达目的地的最佳路径。因为使用了模糊逻辑的组合方法,所以与Add方法相比需要更多的计算过程。从改善端到端延迟的角度,文献[23]提出了一种增强端到端延迟估计的RPL自适应机制RA-EEDEM(RPL Adaptation of End-to-End Delay Estimation Mechanism),旨在提高端到端延迟(EED)估计的准确性。使用的OF基于两个主要的路由度量相加组合,即处理延迟度量和路径延迟度量。第一个度量表示到接收器的累积处理延迟,而第二个度量是到接收器的累积链路延迟。结果表明,使用的OF除降低平均EED和提高数据包接收率(PRR)之外,还提高了EED估计精度。但是,该方案没有考虑收敛时间和能耗等指标。网络拥塞是RPL的问题之一,为了克服这一问题,文献[24]提出了一种新的拥塞感知路由CoAR(Congestion-Aware Routing)协议。为了检测拥塞情况,CoAR采用了一种基于当前队列占用率和负载变化的自适应机制,它使用一个新的拥塞感知目标函数CoA-OF选择最佳的父级。这种新的CoA-OF采用多个准则决策技术,该函数考虑了三个主要指标,即CoA、队列利用率和剩余能量。通过这种方式,节点可以选择通往目的地的备选路径,从而避免拥塞情况。此外,它改善了端到端延迟、吞吐量、PDR(数据包交付率)、数据包丢失和能耗。相比之下,CoAR只支持静态网络,这使得它不适合移动环境。基于复合度量目标函数的优点和缺点总结如表3所示。

表3 基于复合度量目标函数的相关研究

Tab.3 Relevant research on objective function based on composite metrics

目标函数	路由度量	优点	缺点	仿真实验	节点实验
EEQ	ETX、能量、队列长度	减少控制消息开销、均衡负载	仅与标准函数相比,进行评估的参数较少	✓	×
L2AM	ETX、能耗	延长网络寿命	仅与标准ETX进行比较	✓	×
EL-RPL	负载、电池能耗指数(BDI)、ETX	提高PDR、延长网络寿命	数据计算量更大	✓	×
RA-EEDEM	处理延迟度量、路径延迟度量	提高EED估计精度、提高数据包接收率(PRR)	不考虑收敛时间和能耗	✓	×
CoA-OF	CoA、队列利用率、剩余能量	改善了延迟、PDR、数据包丢失、吞吐量和能耗等方面的问题	不适用于移动环境	✓	×

5 面临的挑战和未来的研究方向(Challenges and future research directions)

5.1 缺少大规模的真实测试平台

通过分析表2和表3的实验测试平台不难发现,只有少数设计方案使用真实的节点实验进行测试评估,基于仿真实验

的评估虽然有用,但是不能完全反映真实环境的各个方面。因此,为克服RPL的局限性,研究工作旨在使用真实的大规模测试平台评估设计方案,反映现实生活中的应用场景。

5.2 性能指标缺乏标准化

以上的研究方案中,因为对RPL性能的提升程度没有一个明确的标准,所以研究学者们只能采用几种性能指标评估他们提出的方案,多数方案仅同标准的目标函数进行对比,所体现出的优势有限,并且所提出的方案在某方面还存在不足之处,并且多数提议方案都使用PDR和节点能量进行评估,而更重要和准确的指标,如网络负载分布和网络负载平衡还未关注。因此,急需设计一套标准的评估指标,以便有效地评估和比较方案的设计优势。

5.3 度量指标的组合

采用单个路由度量优化RPL性能,实际应用中会有很大的局限性,组合多个指标实现多个应用十分重要,但是在设计复合度量时需要考虑许多因素。首先,指标的数量应尽可能地少,因为指标越多,控制消息的信息内容就越大,容易增大路由出现错误的风险。其次,对于加法度量的组合,随着指标数量的增加,分配权重的过程也会变得更复杂。所以,在复合度量的设计中更偏向于采用较为简单的词法度量的组合。最后,目前已有一些跨层次的度量设计,例如物理层与数据链路层度量相组合,这类设计可以满足LLN路由负载平衡、能量效率的需求提供优质的解决方案,或许能为未来解决负载均衡和能耗问题提供思路。

6 结论(Conclusion)

随着互联网的不断发展,越来越多的传感节点不断接入网络,路由的效率就显得尤为重要,目前还没有一种完美的适应不同环境,解决负载不均衡的路由决策方案。RPL路由指标和目标函数的优化可能带来的收益很小,因此需要研究新技术进一步推动该领域的发展,诸如利用多个实例或使用基于AI的方法进行自动度量生成和阈值确定等,目前RPL仍是一个具有很大应用前景的物联网路由协议。本文围绕RPL目标函数的优化创新,梳理了相关领域的研究进展,期望能为RPL路由技术的发展提供有益借鉴。

参考文献(References)

- [1] 郭戈.物联网RPL协议安全研究综述[J].电子世界,2020(22):16-17.
- [2] 李祝红,杨安东,杜炳,等.物联网路由协议中的能量和延迟感知数据聚合[J].信息技术,2020,44(12):96-101.
- [3] 张伟康,曾凡平,陶禹帆,等.物联网无线协议安全综述[J].信息安全学报,2022,7(02):59-71.
- [4] 仇英辉,陈玲.基于普通节点负载均衡的RPL路由协议[J].传感技术学报,2016,29(07):1077-1082.
- [5] 胡保华,黄同成,李平,等.6LoWPAN无线心电传感网络架构与RPL优化仿真[J].计算机测量与控制,2021,29(10):239-243,255.
- [6] 严利民,张健,王峰.改进的基于网络寿命的RPL路由协议[J].计算机工程与设计,2020,41(1):1-6.
- [7] 李志佳.低功耗有损网络路由协议目标函数OF0优化研究[J].工业控制计算机,2017,30(05):11-13.
- [8] 胡芹艳,尹长川.无线传感网络中的RPL路由协议研究[J].物联网技术,2014,4(1):57-59,62.
- [9] HADAYA N N, ALABADY S A. Improved RPL Protocol for Low-Power and Lossy Network for IoT Environment[J]. SN Computer Science, 2021, 2(5):1-11.
- [10] ABUEIN Q Q, YASSEIN M B, SHATNAWI M Q, et al. Performance Evaluation of Routing Protocol (RPL) for Internet of Things[J]. International Journal of Advance Research in Computer Science & Management, 2016, 7(7):17-20.
- [11] KRISHNA G G, KRISHNA G, BHALAJI N. Analysis of routing protocol for low-power and lossy networks in IoT real time applications[J]. Procedia Computer Science, 2016, 87:270-274.
- [12] SAAIDAH A, ALMOMANI O, AL-QAISI L, et al. An efficient design of RPL objective function for routing in internet of things using fuzzy logic[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2019, 10(8):184-190.
- [13] JEONG S, PARK E, WOO D, et al. MAPLE: Mobility support using asymmetric transmit power in low-power and lossy networks[J]. Journal of Communications and Networks, 2018, 20(4):414-424.
- [14] KIM H S, KO J, CULLER D E, et al. Challenging the IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks (RPL): A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4):2502-2525.
- [15] KHARRUFA H, AL-KASHOASH H A A, KEMP A H. RPL-based routing protocols in IoT applications: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(15):5952-5967.
- [16] KABILAN K, BHALAJI N, SELVARAJ C, et al. Performance analysis of IoT protocol under different mobility models[J]. Computers & Electrical Engineering, 2018, 72:154-168.
- [17] PARNIAN A R, KHARAZMI M R, JAVIDAN R. RPL routing protocol in smart grid communication[J]. Journal of Systems and Software, 2014, 4(5):128-132.
- [18] SANMARTIN P, JABBA D, SIERRA R, et al. Objective function BF-ETX for RPL routing protocol[J]. IEEE Latin America Transactions, 2018, 16(8):2275-2281.
- [19] GONIZZI P, MONICA R, FERRARI G. Design and

- evaluation of a delay-efficient RPL routing metric[C]// International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. 2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Italy: Sardinia, IEEE, 2013:1573-1577.
- [20] SARWAR S, RAUF S, RASHEED R, et al. Energy-aware routing in internet of things (iot)[C]// International Conference on Communication, Computing and Digital Systems. 2019 2nd International Conference on Communication, Computing and Digital systems (C-CODE), Pakistan: Islamabad, IEEE, 2019:81-86.
- [21] CAPONE S, BRAMA R, ACCETTURA N, et al. An energy efficient and reliable composite metric for RPL organized networks[C]// Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2014 12th IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing, Italy: Milan, IEEE, 2014:178-184.
- [22] SANKAR S, SRINIVASAN P. Energy and load aware routing protocol for internet of things[J]. International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS), 2018, 7(3):255-264.
- [23] PINTO P, PINTO A, RICARDO M. RPL modifications to improve the end-to-end delay estimation in WSN[C]// Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS). Spain: Barcelona, IEEE, 2014:868-872.
- [24] BHANDARI K S, HOSEN A S M, CHO G H. CoAR: Congestion-aware routing protocol for low power and lossy networks for IoT applications[J]. Sensors, 2018, 18(11):3838.

作者简介:

王智群(1967-), 男, 硕士, 副教授. 研究领域: 无线传感网络, 算法设计.

周鑫(1997-), 男, 硕士生. 研究领域: 无线传感网络.

张波(1998-), 男, 硕士生. 研究领域: 无线传感网络.

朱明贺(1996-), 男, 硕士生. 研究领域: 无线传感网络.

(上接第8页)

方法与基于大数据分析的测评方法进行对比检验, 证明了此次研究设计成果的可行性, 但要真正地实现对此方法的推广使用, 还应在后续的研究中, 设计基于多维度的方法检验实验, 从更多的角度对此方法进行检验, 并选择多个传统方法作为对照组, 掌握本文设计方法的优势与缺陷, 为此方法的进一步推广使用提供帮助。

参考文献(References)

- [1] XIA Q, JIANG C X, YANG C, et al. A method towards smart manufacturing capabilities and performance measurement[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 39:851-858.
- [2] MICHELE S, SIMON S P, FRANK S, et al. High-resolution hydrogen-deuterium protection factors from sparse Mass spectrometry data validated by nuclear magnetic resonance measurements[J]. Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 2022, 33(5):813-822.
- [3] 陈金华, 何建, 刘俊, 等. 面向大数据的BEI2.0 “县·省”
- 级综合测评指标模型建构与验证[J]. 电化教育研究, 2021, 42(09):41-48.
- [4] ZHAO L, ZHANG W. Research on intelligent measurement and driving mechanism of influencing factors of building energy saving[J]. Measurement, 2022, 192:110793.
- [5] 殷文俊. 基于大数据分析的学生综合测评系统设计与实现[J]. 鞍山师范学院学报, 2020, 22(02):17-23.
- [6] 茆灵铤, 谢桂芳, 邵周伟, 等. 基于大数据的高校智慧校园学生综合测评系统设计与研究[J]. 软件工程, 2020, 23(05):43-45.
- [7] 禹云. 大数据时代背景下的高校学生综合测评系统设计与实现[J]. 科技创新与应用, 2020(30):37-38.
- [8] 尉译心. 基于大数据的信息系统安全路径测评工具及评估方法[J]. 信息系统工程, 2020(09):46-47.

作者简介:

刘佰明(1978-), 男, 硕士, 高级工程师/副教授. 研究领域: 元宇宙VR, 大数据, 人才测评, 创新创业领导力.

(上接第40页)

- [8] 夏自由. 报纸印刷生产计划与调度研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [9] 宋华宇. 数字经济背景下报刊企业印刷成本运行与管控研究[J]. 商业经济, 2021, 40(12):161-163.
- [10] 姚峰. 基于支持向量机的皮带机故障诊断与预测[D]. 安徽: 安徽理工大学, 2021.

作者简介:

彭来湖(1980-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 智能制造与车

间信息化技术, 智能装备与嵌入式控制技术.

孙海涛(1998-), 男, 硕士生. 研究领域: 智能制造与车间信息化技术.

李建强(1990-), 男, 博士, 博士后. 研究领域: 智能算法, 智能制造与车间信息化技术.

胡旭东(1959-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 现代纺织装备及控制技术, 机电控制及其自动化.