

车联网中 platoon 的动态稳定性

赵海, 许子文[†], 司帅宗, 彭海霞

(东北大学 计算机科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要: 车联网中 platoon 的稳定性直接决定了道路的安全性. 对于 platoon 编组而言, “稳定”意味着在受到干扰时 platoon 的结构能保持相对稳定, 并且干扰不会被放大. 对此, 研究 platoon 在受到干扰时的内部动态特性. 通过分析可知, 内部间距的变化符合阻尼运动, 并采用 SUMO(simulation of urban mobility) 仿真软件做了大量实验以证实分析结论. 此外, 还讨论了不同加速度对欠阻尼的影响, 总结出加速度与稳定性之间的关系.

关键词: platoon; 阻尼特性; 稳定性; 智能驾驶员模型

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Dynamic stability of platoon in VANET

ZHAO Hai, XU Zi-wen[†], SI Shuai-zong, PENG Hai-xia

(School of Computer Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The stability of platoon directly determine the safety of the road. For the platoon group, “stability” means that the structure of the platoon is relatively stable when it is disturbed, and the interference will not be amplified. Therefore, this paper studies the internal dynamic characteristics of platoon when it is disturbed. By the analysis, the variation of the internal spacing is consistent with the damping motion, and extensive simulation experiments are conducted by using SUMO(simulation of urban mobility), which validate the analysis conclusion. In addition, we also discuss the influence of different acceleration on the under damping, and sum up the relationship between the acceleration and stability.

Keywords: platoon; damping characteristics; stability; IDM

0 引言

随着社会的发展和人们经济水平的提高, 车辆数目在不断增加, 从而导致了一系列交通安全问题, 显然, 道路交通安全已成为一个难以处理且亟待解决的问题. 面对这些问题, 车辆组成 platoon 行驶是一种很好的解决方法. 车辆以 platoon 的模型行驶可以使车辆行驶更稳定, 有效提高道路的安全性.

近年来, 车载自组织网络 (VANET) 中关于 platoon 的研究越来越多. platoon 是指一组连续的车辆保持相同间距形成的结构^[1]. 关于 platoon 的研究主要可以分为两大类: 一类是基于已经存在的 platoon 的 VANET 研究, 例如 VANET 的连接以及路由协议等问题^[2]; 另一类是在 VANET 已经存在的情况下研究 platoon 的动态性能问题. Bernardo 等^[3]研究了通信的延迟和丢包率对 platoon 稳定性的影响; Rajamani 等^[4]研究了什么样的条件能使 platoon

稳定, 而且发现车辆能够同时与车辆和基础设施之间通信时稳定性最有保障.

本文针对 platoon 在受到干扰时的动态特性进行研究. 在车辆行驶过程中难免遇到干扰的情况, 这种干扰会使 platoon 的结构变得不稳定, 并且会影响后面一排车辆的行驶. 为了提高道路的安全性, 对干扰下的 platoon 的稳定性进行研究, 并通过仿真实验证实了所得结论, 同时给出了加速度与稳定性之间的关系.

1 platoon 体系架构

1.1 platoon 的角色定义

platoon 的驾驶方式通常是指一组需求相同的车辆一起合作的驾驶方式, 按照这种驾驶方式行驶的车辆可以与前车保持一个较近的间距, 并且后车跟随前车的轨迹行驶, 如图 1 所示.

收稿日期: 2016-04-08; 修回日期: 2016-07-28.

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAH82F00); 辽宁省科学技术计划项目 (2015401039).

作者简介: 赵海 (1959—), 男, 教授, 博士生导师, 从事车联网与计算机网络等研究; 许子文 (1991—), 男, 硕士生, 从事车联网与计算机网络的研究.

[†]通讯作者. E-mail: xuziwen_0710@sina.com

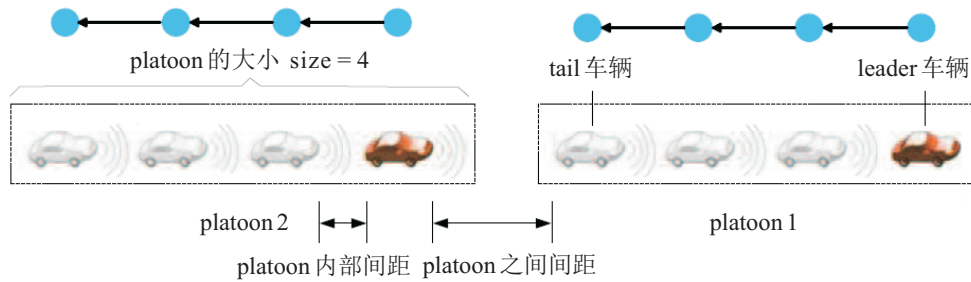


图1 platoon的结构

图1描述了两个内部车辆数为4的platoon. platoon车辆包括3种角色: leader、member和tail. 道路上还有没加入platoon的车辆,称之为free车辆.

leader: leader车辆是platoon的第1辆车,负责创建和管理platoon,决定着platoon的合并与分离,并且决定车辆的行驶路径,后面的车辆都跟随leader的路径行驶.

member: platoon中间的车辆为member车辆,它跟随leader车辆行驶. member负责转发数据,实现数据的共享.

tail: platoon中最后一辆车称为tail车辆,它主要负责与通信半径之内的后面车辆通信,尤其是与其他platoon的leader通信.

free: 没有加入platoon的单独车辆称为free车辆,从某种角度来说,free可以看作是大小为1的platoon.

1.2 platoon跟车模型

要保持platoon的结构行驶需要两个关键技术: VANET和CACC. VANET可以实现车辆与其他车辆交换道路交通信息,有助于platoon的形成和保持,并且可以实现数据共享;协同自适应巡航控制系统(CACC)^[5]使自动驾驶的车辆成为可能,CACC系统配备了激光和雷达传感器,可以获得前车的距离和速度,根据这些信息,车辆就可以控制自身的运动状态,实现车辆的自动化驾驶.

CACC技术采用的是智能驾驶员跟随模型(IDM)^[6], IDM是一种刺激反应模型,车辆的驾驶行为不仅取决于自己的位置和速度信息,还要考虑前面车辆对后面车辆的影响. 在智能交通领域, IDM模型是一种主流的研究模型,如文献[7-8]中使用的都是IDM模型. IDM模型的期望车间距离和加速度公式如下:

$$S_i^*(t) = s_0 + v_i(t)T_0 + \frac{v_i(t)\Delta v_i(t)}{2\sqrt{ab}}, \quad (1)$$

$$a_i(t) = a \left[1 - \left(\frac{v_i(t)}{v_0} \right)^4 - \left(\frac{S_i^*(t)}{S_i(t)} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

其中: $v_i(t)$ 为第 i 辆车的瞬时速度, $S_i(t)$ 为实际间

距, $\Delta v_i(t)$ 表示与前车的速度差, v_0 为最大行驶速度, s_0 和 T_0 分别为最小间距和时间间隔, a 和 b 分别为加速度和减速度. 根据式(1)和(2)可以得到实际间距 $S_i(t)$ 的表达式,即

$$S_i(t) = \frac{s_0 + v_i(t)T_0 + \frac{v_i(t)\Delta v_i(t)}{2\sqrt{ab}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_i(t)}{v_0} \right)^4 - \frac{a_i(t)}{a}}}. \quad (3)$$

2 platoon模型与动态特性

2.1 platoon通信模型

车辆在道路上行驶,可能会受到周围其他车辆运动状态的影响. 本文讨论platoon经过加速或减速platoon的动态变化,所以为了便于理解,只考虑前车对后车的影响. 前车可以将自己的速度、加速度信息发送给后车,后车则根据接收到的信息和自己的参数信息计算出下一时刻车辆行驶的信息. 如图1所示,platoon内部有4辆车,每辆车可以看成是一个节点,前一个节点的运动状态对后一个节点的运动状态有影响,而不考虑其他节点的影响.

2.2 platoon内部动态特性

platoon的内部动态特性主要体现在车辆的内部间距,内部间距的变化直接影响platoon的稳定性. 当platoon加速时,内部间距会变大,platoon的长度也会变大;当platoon减速时,内部间距会变小,platoon的长度也会缩短. 为了研究platoon的动态特性,在平衡点应用线性化的车辆跟随模型,这意味着platoon内部间距偏差变化可以被描述为一个典型的线性阻尼振荡过程. 基于这个方法,本文研究IDM模型下platoon经历不同加速、减速过程对系统稳定性的影响.

研究platoon的稳定性,首先要定义一个平衡位置 $e^{[9]}$. 对于所有platoon,如果内部车辆的速度差和加速度都等于0,内部间距均相等,则说明platoon处于平衡位置,此时有

$$a_i(t) = 0, \Delta v_i(t) = 0, v_i(t) = v_{i-1}(t) = v_e, \quad (4)$$

$$S_e = \frac{s_0 + v_e T_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_e}{v_0}\right)^4}} \quad (5)$$

当不在平衡位置时, $v_i(t)$ 可以被分为前车的速度 $v_{i-1}(t) = v_e$ 和速度差 $\Delta v_i(t)$, $S_i(t)$ 可以被分为平衡间距 S_e 和间距误差 $y_i(t)$, 即

$$v_i(t) = v_e + \Delta v_i(t), \quad (6)$$

$$S_i(t) = S_e + y_i(t). \quad (7)$$

由此, 可以得到一个关于内部间距偏差的二阶微分方程

$$\frac{d^2 y_i(t)}{dt^2} + 2\zeta\omega_0 \frac{dy_i(t)}{dt} + \omega_0^2 y_i(t) = 0. \quad (8)$$

其中: ω_0 是系统的固有频率, ζ 是系统的阻尼系数, 它们分别由下式计算:

$$\omega_0^2 = \left. \frac{\partial a_i}{\partial S_i} \right|_e, \quad (9)$$

$$\zeta\omega_0 = -\frac{1}{2} \left(\left. \frac{\partial a_i}{\partial v_i} \right|_e + \left. \frac{\partial a_i}{\partial \Delta v_i} \right|_e \right). \quad (10)$$

根据自动控制理论得到特征值 λ 的表达式为

$$\lambda = -\zeta\omega_0 \pm \sqrt{\omega_0^2(\zeta^2 - 1)}, \quad (11)$$

当 λ 的实部为负数时系统稳定. 又因为 IDM 模型的 ζ 和 ω_0 都是正数, 所以采用 IDM 模型行驶的车辆都不会将干扰放大. 根据 ζ 的取值可以分为过阻尼和欠阻尼状态.

1) 如果 $\zeta \geq 1$, 则会得到一对负实根, 为过阻尼状态. 在这种情况下, 波形没有超调量, 后面的车辆会经历一个单调的加速或减速过程, 且没有振动地缓慢返回平衡位置. 从交通流的角度来看, 车辆间距会单调变大或缩小, 直到平衡状态.

2) 如果 $0 < \zeta < 1$, 则会得到一对共轭复根, 为欠阻尼状态. 在这种情况下, 波形会有超调量并且会在平衡点附近以一定频率振动, 后面的车辆在返回平衡位置之前会经历几次的加速或减速过程. 从交通流的角度来看, 车辆间距会经历几次变大变小的过程, 再回到平衡位置.

显然, 阻尼系数在决定 platoon 的动态性能方面起着重要的作用. 由式 (2)、(9) 和 (10) 可以得到阻尼系数 ζ 与固有频率 ω_0 的表达式, 即

$$\omega_0^2 = \frac{2a \left(1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^4\right)^{\frac{3}{2}}}{S_0 + vT_0}, \quad (12)$$

$$\zeta\omega_0 = \frac{2av^3}{v_0^4} + aT_0 \frac{1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^4}{S_0 + vT_0} + \frac{v}{2} \sqrt{\frac{a}{b}} \frac{1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^4}{S_0 + vT_0}. \quad (13)$$

由式 (12) 和 (13) 可以得到阻尼系数 ζ 与加速度 a 随速度变化的曲线, 如图 2 所示, 其他参数设置分别为 $b = 2 \text{ m/s}^2$, $S_0 = 3 \text{ m}$, $T_0 = 1 \text{ s}$, $v_0 = 30 \text{ m/s}$.

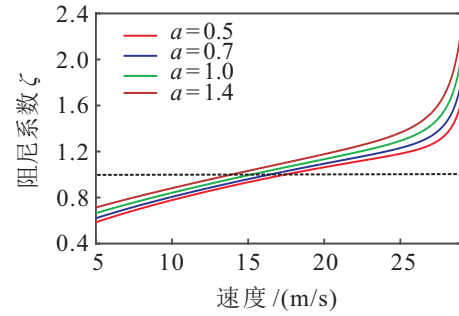


图 2 速度 v 与阻尼系数 ζ 的关系

从图 2 中可以清楚地看到: 速度越大, ζ 越大; 在速度一定的情况下, a 越大, ζ 的值越大. 当 $\zeta = 1$ 时为临界阻尼状态, 此时的速度为临界速度 v_c ; 速度大于 v_c 时为过阻尼状态; 速度小于 v_c 时为欠阻尼状态. 当速度等于 v_c 时为临界状态, 此时车辆会以最快的速度到达平衡状态且没有抖动.

3 实验仿真

在这里, 使用 SUMO(simulation of urban mobility) 仿真软件进行模拟仿真. SUMO 是一种道路交通仿真软件, 其微观特征包括允许车辆之间发生碰撞、丰富的车辆跟随模型以及支持单车路由.

利用 SUMO 来仿真基于 IDM 跟车模型的车辆动态变化, 模拟 platoon 中有 10 辆车在经过加速减速过程中速度和间距的变化情况. 车辆先以稳定速度 v_{sb} 行驶, 经过一个减速过程到 v_{min} , 保持一段时间后, 再经历一个加速过程回到稳定速度 v_{sb} . 采用这种方法来模拟车辆在行驶过程中受到干扰的情况. 首先讨论加速度 $a = 1.4$ 的情况, 由图 2 可知临界速度 $v_c = 14.5$, 此时 $\zeta = 1$, 所以 $v > 14.5$ 时是过阻尼状态, $v < 14.5$ 时是欠阻尼状态.

case1: $v_{sb} = 14 \text{ m/s}$, $\zeta_{stb} = 0.98$; $v_{min} = 4 \text{ m/s}$, $\zeta_{min} = 0.70$. 图 3 给出了速度和内部间距随时间的变化曲线, 可以看出: 波形在平衡点附近有振动, 有超调量, 并且越往后的车辆超调量越大; 因为 $v_{min} < v_{sb} < v_c = 14.5$, 处于欠阻尼状态, 所以波形会经过几次振动过程才回到平衡状态. 车辆在道路上行驶会出现像弹簧抖动一样的现象.

case2: $v_{sb} = 24 \text{ m/s}$, $\zeta_{stb} = 1.37$; $v_{min} = 5 \text{ m/s}$, $\zeta_{min} = 0.74$. 此时, $v_{min} < v_c < v_{sb}$, 处于中间状态, 从图 4 可以看出, 波形有超调量但是没有振动, 并且越往后的车辆超调量越小.

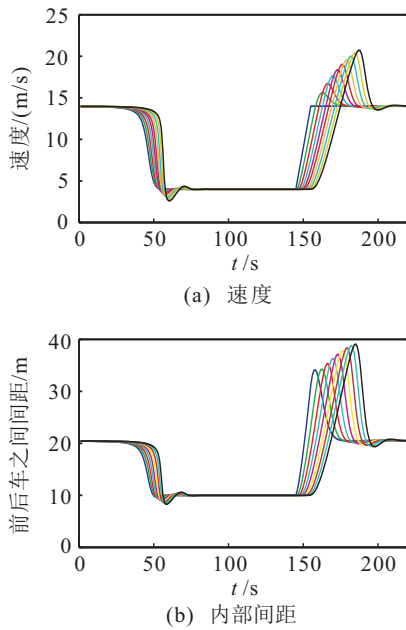


图3 欠阻尼状态下的速度和间距变化

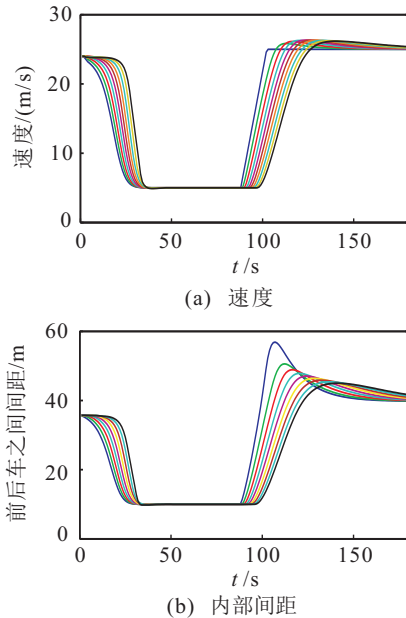


图4 中间状态下的速度和间距变化

case3: $v_{sb} = 25 \text{ m/s}$, $\zeta_{stb} = 1.41$; $v_{min} = 15 \text{ m/s}$, $\zeta_{min} = 1.09$. 此时, $v_c < v_{min} < v_{sb}$, 处于过阻尼状态, 如图5所示, 波形没有振动, 平滑地回到平衡点且没有超调量, 也就是车辆间距会逐渐地变大或变小, 不会发生抖动的现象.

从以上3种情况可以看出, 处于过阻尼状态时速度和间距的曲线变化比较平滑, 处于欠阻尼状态时速度和间距的曲线变化有振动和超调量.

因为过阻尼状态的 platoon 行驶比较平稳, 而欠阻尼状态下的 platoon 发生抖动现象, 所以本文讨论在欠阻尼情况下不同加速度对 platoon 稳定性的影响. 图6给出了加速度分别为0.5、0.7和1时 platoon 平均速度的变化曲线(平均速度是指在某一时刻 platoon 内部10辆车的平均速度), 速度变化都是从

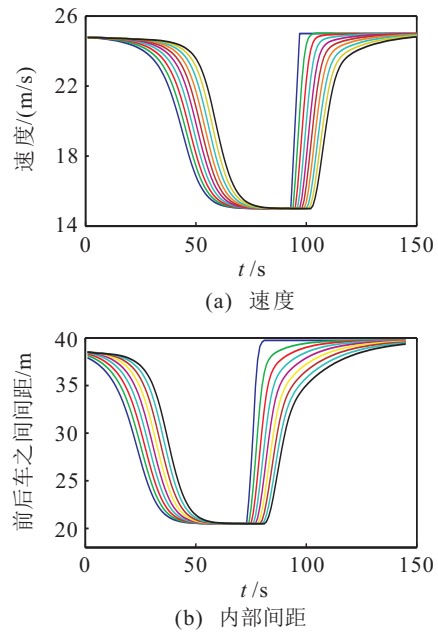


图5 过阻尼状态下的速度和间距变化

15 m/s 减速到 5 m/s, 再加速到 15 m/s. 由于在速度刚减到 v_{min} 时的欠阻尼状态最具有代表性, 这里只计算这一部分的平均速度与稳定速度的速度差. 从图6中可以看出: $a = 0.5$ 的曲线衰减幅度最大, 超调量也最大; $a = 1$ 的曲线衰减幅度最小, 超调量最小. 由此可以得到结论: 随着加速度的增加波形趋于平稳, 平均速度误差越小, platoon 越稳定. 这是因为在欠阻尼状态下, 加速度越大, ζ 越大, 特征值距离虚轴越远, 系统就越稳定.

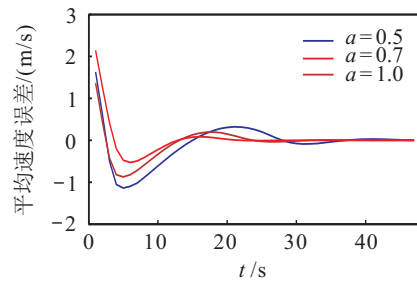


图6 不同加速度下 platoon 平均速度变化误差

图7给出了相同速度变化情况下, 不同加速度对整个 platoon 长度的影响. 当加速回到 v_{sb} 时也可以得出类似的结论: 欠阻尼状态下加速度越小, 超调量越大, platoon 的变化越大, 越不稳定.

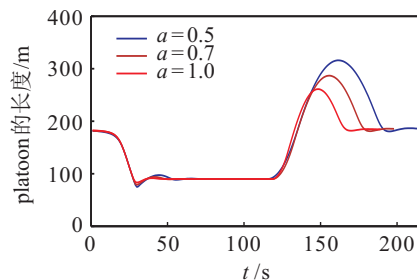


图7 不同加速度下 platoon 长度的变化

4 结论

本文对不同干扰情况下的 platoon 动态特性进行了研究, 经过分析, platoon 动态变化符合阻尼运动的特点, 并通过实验验证了这一点. 另外, 还从平均速度变化误差和 platoon 长度的角度研究了欠阻尼情况下加速度与稳定性的关系. 为了减少交通干扰对 platoon 带来的不利影响, 需要设计出合理的参数值, 提高 platoon 的稳定性, 使道路交通更加安全.

参考文献(References)

- [1] Yousefi S, Altman E, El-Azouzi R. Study of connectivity in vehicular ad hoc networks[C]. Int Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks and Workshops. IEEE, 2008: 1-6.
- [2] Sadatpour V, Fathy M, Yousefi S, et al. Scheduling algorithm for beacon safety message dissemination in vehicular Ad-Hoc networks[J]. Communications in Computer & Information Science, 2009, 56: 133-140.
- [3] Bernardo M D, Salvi A, Santini S. Distributed consensus strategy for platooning of vehicles in the presence of time-varying heterogeneous communication delays[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(1): 102-112.
- [4] Rajamani R, Tan H S, Law B, et al. Demonstration

of integrated lateral and longitudinal control for the operation of automated vehicles in platoons[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2000, 8(4): 695-708.

- [5] Jiang Y, Li S, Shamo D E. A platoon-based traffic signal timing algorithm for major-minor intersection types[J]. Transportation Research, Part B: Methodological, 2006, 40(7): 543-562.
- [6] Treiber M, Hennecke A. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. Physical Review E, 2000, 62(2): 1805-1824.
- [7] Fernandes P, Nunes U. Platooning with IVC-enabled autonomous vehicles: Strategies to mitigate communication delays, improve safety and traffic flow[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(1): 91-106.
- [8] Fernandes P, Nunes U. Multiplatooning leaders positioning and cooperative behavior algorithms of communicant automated vehicles for high traffic capacity[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(3): 1172-1187.
- [9] Larson J, Liang K Y, Johansson K H. A distributed framework for coordinated heavy-duty vehicle platooning[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(1): 419-429.

(责任编辑: 李君玲)

第30届中国控制与决策会议(2018CCDC)征文通知

第30届中国控制与决策会议(2018CCDC)将于2018年6月9日~11日在中国沈阳举行. 会议由东北大学和中国自动化学会信息物理系统控制与决策专业委员会主办.

第30届中国控制与决策会议论文集集中的英文论文将进入 IEEE Xplore Data Base, 被EI检索.

第30届中国控制与决策会议将涉及理论与应用两方面, 主要涵盖系统、控制与决策相关课题. 征文范围如下:

控制与决策: 自适应控制; 复杂系统与复杂网络; 控制系统应用; 控制工程教育; 协同控制; 信号处理; 数据处理; 数据驱动控制; 决策理论与方法; 决策支持系统; 管控一体化; 时滞系统; 离散事件系统; 分布控制系统; 分布参数系统; 故障诊断与容错控制; 模糊系统; 对策论; 混杂系统; 系统辨识与参数估计; 智能系统; 知识管理与知识工程; 管理信息系统与企业信息化; 供应链与物流管理; 电子商务建模与优化; 运动控制; 网络控制系统; 神经网络; 非线性系统; 优化控制; 过程控制; 生产计划与调度; 鲁棒控制; 传感器网络; 社会经济系统; 随机系统; 变结构控制; 控制与仿真.

自动化: CIMS与制造系统; 工厂建模与仿真; 家

庭、实验室及服务自动化; 仪器仪表系统; 智能自动化; 人机交互; 纳米自动化与装配; 基于网络的系统; 计划、调度与协调; 过程自动化.

机器人: 以人为中心的人机系统; 医用机器人与生物机器人学; 微机器人与微操作; 移动机器人学; 移动传感器网络; 感知系统; 机器人控制; 机器人传感与数据融合; 搜寻、援救与野外机器人学; 人机交互; 空间与水下机器人; 遥控机器人; 视觉伺服; 多足机器人系统.

新兴技术领域: 信息物理系统; 智能电网; 再生能源; 能源管理系统; 集成系统与过程; 微机电系统; 电动车辆与智能交通; 交通控制; 暖通系统优化和控制; 生物系统建模.

除分组报告外, 会议另设有邀请专题, 特别专题, 特邀大会报告和杰出讲座.

会议投稿者请于2017年10月31日前提交全文. 录用文章的作者需要注册并到会宣讲论文. 请登陆 <http://www.ccdc.neu.edu.cn> 了解具体事宜并投稿. 同时也可通过E-mail向大会秘书(secretary_ccdc@ise.neu.edu.cn)咨询.

中国控制与决策会议秘书处