

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518519

智慧校园车路协同视域下无人车调度系统研究^{*}

杨 茲 张传伟

(西安科技大学机械工程学院 西安 710054)

摘要:以校园智慧化建设为背景,针对校园三岔路口无人运输车易发生交通拥堵从而导致校园安全事故等问题,提出一种基于车路协同环境的校园无人车速度诱导策略,优化校园三岔路口无人车的运行状态。首先,制定无人运输车在校园内安全行驶所要遵守的行车规则,并设计信号灯在三岔路口的布置和指示规则。其次,定义和假设车辆动力学模型,确定车速诱导区域的范围,设计不同信号灯情况下校园无人车的车速诱导控制策略。采用S型加减速算法,调节校园无人车速度,提高经过车速诱导的校园无人车速度曲线的平滑度。最后,设计VISSIM仿真分析平台,建立校园无人车车速诱导模型。采用所设计的VISSIM仿真分析平台,搭建校园三岔路口的路网模型,根据校园无人车的覆盖状况进行实验分析。实车实验结果表明,使用车速诱导策略进行调度后,校园无人车通过三岔路口时,行程时间、排队车辆数和延误时间分别减少19.3%、47.5%和24.3%。所提出基于车路协同环境的校园无人车速度诱导策略有效提高校园无人车的运输效率,可有效避免交通拥堵所引发的校园安全事故,实现智能调度的目标,满足校园智慧化建设需求。

关键词:智慧校园;校园无人车;车路协同;车辆调度;车速诱导

中图分类号: TN957; TP242 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1050

Research on unmanned vehicle scheduling system with the perspective of smart campus vehicle road collaboration

Yang Zhi Zhang Chuanwei

(School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: With the background of campus intelligence construction, a speed guidance strategy for campus unmanned vehicles based on vehicle road coordination environment is proposed to address the traffic congestion problem caused by unmanned transport vehicles at three-way intersections on campus, and adjust the operating status of campus unmanned vehicles at three-way intersections. Firstly, establish the driving rules that unmanned transport vehicles must follow for safe operation on campus, and design the layout and indication rules of traffic lights at three-way intersections. Secondly, define and assume the vehicle dynamics model, determine the range of the speed induction area, and design speed induction control strategies for campus unmanned vehicles under different signal light conditions. Adopting the S-shaped acceleration and deceleration algorithm to adjust the speed of campus unmanned vehicles and improve the smoothness of the speed curve of campus unmanned vehicles induced by vehicle speed. Finally, design a VISSIM simulation analysis platform and establish a campus unmanned vehicle speed induction model. Using the designed VISSIM simulation analysis platform, build a road network model of the campus three-way intersection, and conduct experimental analysis based on the coverage of unmanned vehicles on campus. The real vehicle experiment results show that after using the speed induction strategy for scheduling, the travel time, number of queued vehicles, and delay time of campus unmanned vehicles passing through three-way intersections are reduced by 19.3%, 47.5%, and 24.3%, respectively. The proposed campus unmanned vehicle speed guidance strategy based on vehicle road collaborative environment effectively improves the transportation efficiency of campus unmanned vehicles, which can effectively avoid campus safety accidents caused by traffic congestion, achieve the goal of intelligent scheduling, and meet the needs of campus smart construction.

Keywords: smart campus; campus unmanned vehicle; vehicle road collaboration; vehicle scheduling; vehicle speed guidance

0 引言

在中国教育现代化2035》、《教育信息化“十四五”规

划》、《教育信息化2.0行动计划》等一系列战略的指引和推动下,校园数智化转型与智慧校园建设已成为高等教育领域的核心议题和发展方向。随着大数据、人工智能等新兴

收稿日期:2025-04-05

*基金项目:国家自然科学基金(NSFC51974229)、国家重点研发计划重点专项(2018YFB1703402, 2018YFC0808203)、陕西省科技创新团队项目(2021TD-27)资助

数字技术的不断落地应用,校园无人驾驶运输车成为实现智慧化校园建设的重要手段,在运人运物、无人安防、主动应急、科研平台和移动宣传等方面发挥着重要的赋能作用^[1],将是校园智慧化建设的必然趋势。能否安全、高效地使校园无人车到达目的地是衡量校园无人车智慧化水平的重要指标之一。校园三岔路口是校园内重要的道路组成部分,校园无人车在此处的通行能力直接影响着其运输效率和校园安全^[2-3]。

当校园无人车无法获得三岔路口信号灯实时倒计时信息,在行驶过程中缺乏合理的速度诱导,导致校园无人车频繁加速、减速和停车^[4],导致交通堵塞^[5-7],从而三岔路口成为校园中关键的拥堵区域^[8-10],增加了校园安全隐患,降低运输效率。现有的校园无人车控制模型不考虑信号定时,没有将交叉口信号持续时间与车辆状态实时性有机地结合起来,存在严重的安全风险^[11-12]。智能交通控制是缓解校园道路拥堵、减少无人车延误的有效措施^[13-14]。作为校园道路的重要节点,三岔路口车路协同控制技术受到越来越多研究者的广泛关注,其改进成为校园无人运输车发展的重要载体^[15]。

随着智能交通技术的发展,特别是无人驾驶技术的不断成熟,国内外学者对车路协调环境中的车速诱导管理问题进行了大量研究。Deng 等^[16]建立了一个动态速度控制模型,可以实现不同道路基础设施配置条件和拥堵条件下车辆的实时调节。Varga 等^[17]根据车辆在交叉口的实时交通信号和排队长度,基于车辆的实时位置和到达下一站的预期时间,动态调整车辆速度,以确保车辆按照时间表行驶。Liu 等^[18]提出了两种基于优化单车或多辆车行驶时间的速度引导算法。结果表明,速度制导算法具有明显的效果。Gong 等^[19]研究了联网/非联网车辆混合车队的控制问题,基于纽威尔(Newell)模型预测了非联网车辆和联网车辆的实时轨迹数据,并构建了一个一步或多步模型预测控制算法,以实现混合车队的最优速度规划。Tang 等^[20]将速度引导策略引入到车辆跟驰模型中,有效地降低了单车道多信号交叉口的油耗和停车次数。Gao 等^[21]提出了一种针对货运车辆停车延误的速度引导和信号优先控制的联合优化方法。结果表明,联网卡车的运行延迟大大减少。Shi 等^[22]提出了一个两层框架来优化车辆速度。结果表明,所提出的优化策略可以降低能耗,是一种有效的车速引导优化策略。Wang 等^[23]提出了一种基于绿波场景的速度引导模型,该模型可以引导车辆在不停车的情况下通过十字路口,提高行驶效率。

从上述研究可以看出,车路协同环境下信号交叉口速度诱导问题的研究主要集中在城市地面交通上,没有考虑校园周围的外部环境,缺乏实用性。在结论验证方面,很难用一辆车作为评价标准来反映诱导策略对整个交叉口的整体效益。此外,基于车辆道路的协同环境,关于校园内三岔路口无人车之间运行的研究报道很少^[24]。因此,在分析以

往研究成果和不足的基础上,为了提高校园无人车在运输过程中的效率和安全性,本文提出了一种基于车路协同的三岔路口校园无人车速度诱导策略。其目的是使校园无人车在尽可能不停车的前提下快速通过三岔路口,实现智能调度的目标,从而确保校园无人车的安全高效运输,提高校园智慧化水平。

1 校园三岔路口行车规则制定

由于校园环境复杂,道路宽窄不一、结构复杂、上下坡、拐弯多、行车时间不同、行驶路线多等因素的影响,无人车在校园行驶过程中,常常会发生碰撞等安全事故。分析车路协同系统的功能需求,在此基础上,对校园无人车的安全行车规则进行制定和信号灯的位置进行布置,保证校园无人车能够按照制定的规则有效行车。

1.1 车路协同系统功能需求

三岔路口是校园无人车运输过程的常见路段。校园无人车在行驶过程中,由于无法准确获取周围车辆和道路信息,因此,校园无人车经常产生车速频繁变化的现象,运输效率降低。三岔路口是严重限制校园无人车通行数量的主要区域,加上校园复杂环境和交通信号灯状态等因素的影响,使校园无人车在运输途中的决策难度进一步增大。因此三岔路口校园无人车行车速度会出现迅速增加、迅速降低甚至停车等待的现象,这样不仅造成了行车时间的延长,还存在校园安全事故隐患。图 1 所示为校园无人车车路协同系统结构示意图。

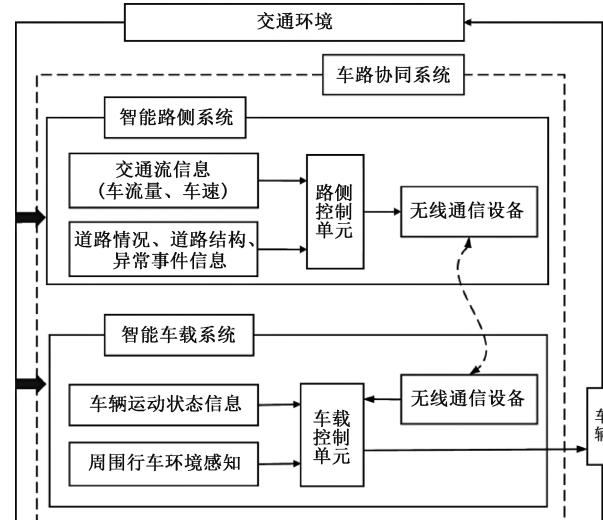


图 1 校园无人车车路协同系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of campus unmanned vehicle road collaboration system structure

从图 1 中可以看到,在车路协同环境下,智能车载系统可以采集行车状态信息和行车环境信息,然后将采集的信息传输至车载控制单元。同一期间,智能路侧系统利用传感器实时得到路网上精准收集的车流量、车速以及道路情

况、异常事件等信息,将获取信息传输到路侧控制单元。最终通过无线通信设备将车载控制单元和路侧控制单元的信息传输至车辆。

校园信号灯对无人车具有一定影响,尤其是三岔路口前的一部分路程是行车影响最严重区域。校园三岔路口车速诱导应用场景如图2所示。路侧单元主要分布在三岔路口各进口的车速诱导区域,中心控制单元设置在三岔路口的每个信号交叉口,车载单元需要安装在即将驶入三岔路口的所有车辆上。

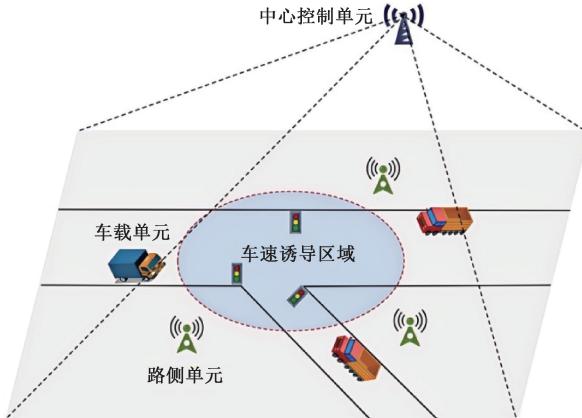


图2 校园三岔路口车速诱导应用场景

Fig. 2 Application scenarios of speed guidance at campus three-way intersections

1.2 校园无人车安全行车规则制定

为了促进校园无人车行车安全的准则更加标准化,推进无人驾驶运输车辆能够准确、合理、绿色在校园内通行。现参考国家普通高等学校校园安全工作规定的要求以及某高校对校园运输车辆的部分管理制度,主要制定宽道路行车规则和窄道路行车规则两部分。制定的行车规则如下:

1) 宽道路行车规则制定

根据普通高等学校校园安全工作规定和部分管理制度,现制定宽道路行车规则,具体规则如下:

(1)校园无人车辆在直行宽道路行驶过程中,运输物品的车辆最高行驶速度需要小于40 km/h,运输人员的无人车辆速度需要小于25 km/h;在转弯、有坡度的路段行驶时,校园无人车速度需要小于15 km/h;(2)校园无人车辆实行靠右行驶的原则;(3)入校方向无人车让行出校方向无人车;(4)当校园无人车处于相对方向需要汇车时,在距离50 m处,当前校园无人车需要变光降低行车速度。同时让行车辆需要减速为零并关灯实施停车等待操作,相对方向校园无人车行驶结束后,才能恢复正常行驶;(5)校园无人车禁止在陡坡、弯道处掉头;(6)当无人车在校园行驶过程中,前方道路有人员时,需要在50 m距离处降低速度并进行鸣笛操作,距离人员5 m时务必停车等待,确保人员进入安全位置时,才可以正常行驶;(7)当校园无人车处于道路交叉

口、会车位置处或者车辆行驶范围内视线不清时,最高行驶速度必须低于5 km/h,此时需要鸣笛,减速慢行;(8)车辆在直行宽道路中,可以双向行驶。

2) 窄道路行车规则制定

根据普通高等学校校园安全工作规定和部分管理制度,现制定窄道路行车规则,具体规则如下:

(1)校园无人车辆在直行窄道路行驶过程中,运输物品的车辆正常行驶速度需低于30 km/h,运输人员的无人车辆速度需要小于20 km/h;在转弯、有坡度的路段行驶时,校园无人车速度需低于10 km/h;在交叉路口时,校园无人车极限速度为5 km/h;(2)规定单向行驶的道路内无人车严禁逆行,遇特殊情况需要双向行驶或逆行时必须由随车安全员接管后方可行驶;(3)当校园无人车行驶过程中处于相同方向时,安全行车距离需要超过50 m;(4)校园内师生碰到校园无人车正在行驶的这种情况时,必须要主动进行避让;(5)校园无人车靠右行驶是单巷两方向行驶会车所需满足的基本条件,车辆需要让出校方向车辆先行;在会车时,下坡车辆进行让行,在会车时车辆距离50 m以上,需要变光降低速度,让行车辆需关灯实施减速为零操作,当相对方向车辆行驶结束后,才能恢复正常行驶;(6)校园无人车在直行窄巷道内,只能单向行驶;(7)校园无人车必须按照信号灯指引规则行驶,禁止随意停放拦截车辆。

1.3 校园无人车信号灯布置

校园无人车信号灯的设置不仅提高三岔路口的运输效率,还可以在一定程度上减少车辆停车等待频率,使车辆调度变得更加快捷,促进校园无人车安全行驶,因此校园无人车信号灯需要布置在合理的空间内。

为了实现校园无人车在行驶过程中能够明显查看到前方信号灯,校园无人车信号灯普遍设置在车辆行驶方向的右侧道沿位置处。此外,校园中两个行车区段间也需要布置交通信号灯。最重要的是由于靠右行驶的行车规则,以当前校园无人车行驶方向为基准,需要在右侧道沿上方布置校园无人车信号灯,方便可以清楚的观察到信号灯。

如果道路是直行宽道路,交通信号灯需要设置于错车位置中,具体位置在道沿的左右两侧。信号灯负责指引和其相对的车辆方向。如果道路是直行窄道路,由于此道路只允许车辆在同一方向行驶,校园无人车信号灯需要布置在错车区域内。

当道路区间是三岔路口时,由于道路上下坡、拐弯较多,每个方向都可能会有无人车行驶,很难及时发现周围车辆,容易发生碰撞、追尾。为了减少无人车因不能及时避让而引发的交通事故,需要在3个方向分别设置交通信号灯并加以时间配置来引导车辆行驶。当看到前方信号灯为绿灯,则可以进行通行并要结合当前绿灯的剩余时间进行适当的加速或减速;当看到信号灯变为红灯时,则需要根据红灯剩余时长,进行速度变更甚至进行停车等待,避免交通事故的发生。

由于研究的重点是校园三岔道路,因此将主要围绕校园内三岔道路的特殊结构对三岔路口位置的信号灯布置图进行设计,如图 3 所示。

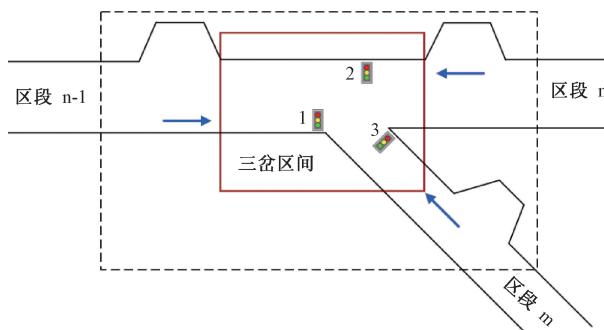


图 3 信号灯布置图

Fig. 3 Signal light layout diagram

由图 3 中可以看出,箭头指向为当前道路的行车方向,信号灯 1、2、3 分别布置在当前行车方向道路右侧道沿上方位置处,信号灯 1 控制宽道路西进口方向的校园无人车;信号灯 2 控制宽道路东进口的校园无人车,并指引该道路校园无人车直行;信号灯 3 控制窄道路的校园无人车,指引该道路的无人车进入宽巷道的左拐和右拐。当校园无人车进入三岔路口诱导区域时,系统会根据提前设置的行车控制策略、信号灯所处状态和剩余时长,以合理的速度引导该校园无人车在三岔路口位置处顺利通行,提高校园无人车在三岔路口的行车效率。

2 校园三岔路口无人车车速诱导策略

2.1 校园三岔路口无人车通行状态分析

假设距离三岔路口 L_0 处有一辆校园无人车将要通过,如果校园无人车继续以当前速度继续行驶,该校园无人车将会在 T_e 时刻到达三岔路口,此时绿灯在 T_g 时刻已经结束,红灯开始,校园无人车将会停车等待,严重影响通行效率。在车路协同环境下,校园无人车与三岔路口处的信号灯可以进行双向信息交流,适当地控制校园无人车加速或减速可以实现校园无人车不停车通过三岔路口的目的。三岔路口校园无人车通行示意图如图 4 所示。

从图 4 中可以看到,当校园无人车在三岔路口行驶时,诱导校园无人车的速度由 v_0 加速到 v_1 ,校园无人车可以在绿灯期间顺利通过三岔路口。

在车路协同这个复杂的场景下,当校园无人车进入三岔路口车速诱导区间时,智能车载设备通过 5G 网络的连接可以将校园无人车在当前区间行驶过程中的速度、位置等有效信息传递给智能路侧设备,然后将获取的信号灯的状态、剩余时长、当前校园无人车位置以及车速传递给中心控制单元进行计算优化,最终通过计算优化得到最佳车速诱导速度变更决策,在通信设备的连接下,进而可以将得到的车速决策传递给智能车载设备。

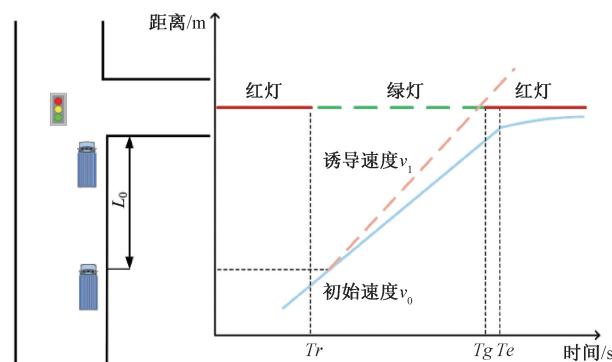


图 4 三岔路口校园无人车通行示意图

Fig. 4 Schematic diagram of campus unmanned vehicle passage at three-way intersection

2.2 校园三岔路口车速诱导策略设计

由于校园三岔路口的特殊环境,在车辆接近三岔路口时,校园无人车在行驶过程中可能会出现加速、减速、停车等待等情况,且速度波动较大。此时必须提前根据信号灯的状态及配时情况为校园无人车在校园三岔路口设计车速诱导策略,并根据三岔路口的信号相位信息、车辆行驶过程中的实际车速、交叉口与车辆之间的距离等基本信息进行计算分析。

1) 车辆动力学模型定义和假设

为了便于表达车辆动力学模型,表 1 中定义了模型中使用的主要变量。

表 1 主要变量的定义

Table 1 Definition of main variables

变量	定义
i	系统状态,包括交通状态和控制变量
q	交通状况,包括当前系统中所有车辆的状态
r	功能参数
m	控制变量,包括引导速度和交通灯信息
m (0 代表红灯,1 代表绿灯)	(0 代表红灯,1 代表绿灯)
z	车辆位置状态的向量,包括当前速度、位置和等待时间
a	加速度(假设为常数,加速时为正,减速时为负)
l	当前位置到停车线的距离
x	行程时间(当前时刻与离开停止线之间的时间间隔)
v	诱导速度
v_0	当前速度
w	在等候区等待的总时间

根据上述变量定义,将系统的状态可以定义为 $i\{q, m\}, q$ 和 m 定义为:

$$q = \begin{bmatrix} z(1) \\ \vdots \\ z(N) \end{bmatrix}, m = \begin{bmatrix} m(1) \\ \vdots \\ m(N) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, N 为校园三岔路口中当前的无人车车辆总数。

校园无人车车辆的状态 z 向量可以表示为:

$$\mathbf{z}(n) = \begin{bmatrix} v_0 \\ l \\ w \end{bmatrix}, n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

控制变量 m 和 r 可以记为:

$$m(n) = [r(n), v(n)], n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$r(n) = \begin{cases} 1, & \text{第 } n \text{ 辆矿用车通过信号灯是绿色} \\ 0, & \text{第 } n \text{ 辆矿用车通过信号灯是绿色} \end{cases} \quad (4)$$

校园无人车通过三岔路口停车线的动力学方程可以表示为:

$$l = \int_0^x (v_0 + at) \quad (5)$$

当加速度 a 恒定时, 动力学方程可以表示为:

$$l = v_0 x + \frac{1}{2} a x^2 \quad (6)$$

因此, 可以得到行程时间的公式为:

$$x = \frac{-v_0 + \sqrt{v_0^2 + 2al}}{a}, (a \neq 0) \quad (7)$$

对于校园三岔路口区间处于停止状态的校园无人车, 行程时间 x 可通过式(8)计算:

$$\begin{cases} x = \frac{-v_0 + \sqrt{v_0^2 + 2al}}{a} + w, (a \neq 0) \\ v_0 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

为了便于问题研究, 突出本研究主要关注的校园三岔路口运行区间校园无人车速度诱导调度问题, 作出以下基本假设:

(1) 车载单元与路侧单元设施间的信息延时可以不计; (2) 不考虑校园无人车的具体尺寸; (3) 只考虑直行和拐弯情况, 不考虑车辆上下坡行驶; (4) 所研究的区域为单个交叉口, 不考虑其他交叉口的影响; (5) 校园无人车在行驶过程中必须服从安全跟车距离。

2) 车速诱导区域界定

校园无人车三岔路口车速诱导区域的界定方法如下:

最短距离区间必须确保校园无人车以任意速度进入车速诱导区域都具有充足时间调整车速; 最长距离区间必须确保校园无人车在信号灯的一个周期 C 内可以顺利通过三岔路口^[25]。故校园三岔路口车速诱导速度区域长度 L 的范围计算方式为:

$$\begin{cases} L < CV_{\min} \\ L \geq \max \left\{ \frac{V_{\max}^2 - V_{\min}^2}{2a}, \frac{V_{\min}^2 - V_{\max}^2}{2d} \right\} \\ L \subset \left[\max \left\{ \frac{V_{\max}^2 - V_{\min}^2}{2a}, \frac{V_{\min}^2 - V_{\max}^2}{2d} \right\}, CV_{\min} \right] \end{cases}$$

$$(a \neq 0, d \neq 0) \quad (9)$$

其中, V_{\max} 为校园内规定无人车的最大速度, V_{\min} 为校园内规定无人车的最小速度, a 为加速度, d 为减速度的绝对值。

3) 车速诱导控制策略设计

车速诱导策略指在位于路口交汇处一定距离设立探测器, 当行驶车辆驶入监测路段时, 按照当前行驶车辆处于监测路段的位置和下一路口交汇处的信号控制措施, 最终明确行驶车辆的速度控制策略。即行驶过程中是否需要速度增加、速度降低或保持初始速度, 保证车辆在绿灯信号可以顺利通过交叉口。图 5 所示为校园无人车车速诱导示意图。主要是指无人车在校园中根据车辆所处位置、行车速度和信号灯相位等数据信息计算合适的校园无人车诱导速度, 优化行车路线, 以实现校园无人车尽可能不停车经过前方三岔路口。

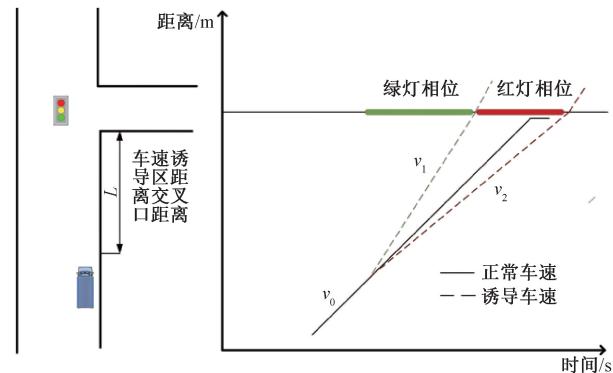


图 5 车速诱导示意图

Fig. 5 Vehicle speed induction diagram

从图 5 中可以看出, 在没有进行车速诱导, 校园无人车到三岔路口会不可避免地停车, 增大行车时间。在上游三岔路口对校园无人车进行车速诱导, 明显降低了通过三岔路口的行程时间。

其中, L 表示校园无人车距离三岔路口的距离; v_0 表示校园无人车的瞬时速度; v_1 表示车速诱导加速过程中的行车速度; v_2 表示车速诱导减速过程中的行车速度。

相对于单个交叉口, 这种控制方案的改善具有一定的优势, 但是, 整体的优化效果具有一定的局限性。为了实现校园无人车按照信号灯的相位信息, 以速度引导的方式有序通过三岔路口交叉口, 可以最大限度地达到减少停车等待次数和延误时间的目的。校园无人车在三岔路口行驶时, 需要在该行驶方向距离交叉口一定位置处设置速度诱导区。图 6 所示为三岔路口校园无人车车速诱导模型示意图。

在协同的车辆基础设施环境中, 车辆单元、路边定位单元和中央控制单元之间可以相互传输数据, 实现信息共享。在校园中车路协同环境中, 当校园无人车处于诱导区域中, 可以和信号设备信息交流, 从而及时得到距三岔路口的路程、信号灯相位及剩余时间等精准数据。该数据资源能够判断校园无人车在绿灯期间是否顺利经过三岔路口, 并按照判断结果实施速度控制。

当信号灯是绿灯相位时, 如果校园无人车依照原来的

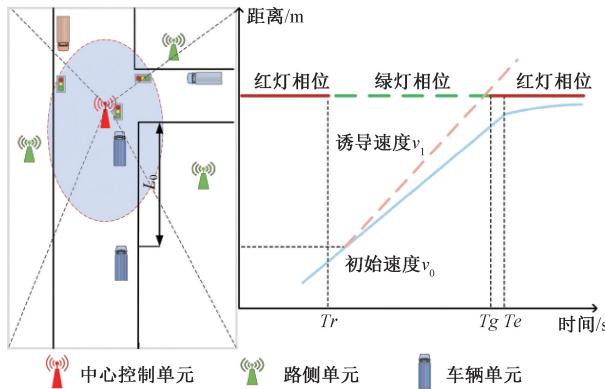


图 6 三岔路口校园无人车车速诱导模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the speed induction model for campus unmanned vehicles at three-way intersections

行车速度可以通过三岔路口，则该校园无人车无需车速诱导操作；若检测到的初始速度不能顺利通过三岔路口，首先依照加速至校园内规定的最高速度判断能否正常通过三岔路口，如果可以通过需要按照最高速度行驶，否则需要诱导该校园无人车速度降低通过或者减速停车。当信号灯是红灯相位时，需要根据校园无人车当前行车速度判断在信号灯变绿的状况下能否正常通过交叉口，如果可以通过，该校园无人车可以以当前车速正常行驶，否则需要降低速度或进行停车操作。

根据以上情况，具体可以分为以下两种：

(1) 当三岔路口处只有一个方向有校园无人车在行驶，该校园无人车直接根据信号灯状态进行行驶即可；

(2) 当三岔路口多个方向都有校园无人车行驶时，为了避免因为汇车发生碰撞而引发安全事故，此时需要根据校园无人车各自行驶过程中信号灯在三岔路口处状态进行行驶或等待，并且只能允许一个方向的校园无人车安全通过三岔道路后，另一方向的校园无人车才能根据当前行驶方向的信号灯所处状态进行后续速度操作。校园无人车在行驶过程中，必须严格遵守安全行车规则，行车速度必须保持在规定的速度范围内，并根据信号灯的状态和剩余时长，以合理的速度诱导当前校园无人车顺利通过三岔路口。

以不停车最快通过校园三岔路口为目标，校园无人车车速诱导模型根据信号灯的状态可分为以下两种，具体判断过程如下：

(1) 如果前方三岔路口为绿灯

当校园无人车以初速度 V_0 驶入三岔路口速度诱导区，并且距离三岔路口距离为 L ，行车方向的信号灯为绿灯，绿灯相位剩余时长为 T_g 。这种情况下，如果：

$$T_g \geq L/V_0 \quad (10)$$

则表示此刻信号灯剩余绿灯时间充足。当前无人车保持初始速度行驶能够在绿灯剩余时间内经过三岔路口。即匀速控制操作是当前校园无人车行车速度调整状态判断结果。

如果不满足式(10)，则分为以下两种情况：

第 1 种情况：为了实现校园无人车在三岔路口安全行驶，当前校园无人车以最大加速度 a_{\max} 加速至最大限制速度 V_{\max} 时，然后以校园内规定的最大限速能够在目前信号灯剩余时长结束前顺利通过三岔路口。这种情况下，如果：

$$\begin{cases} T_g < L/V_0 \\ \frac{V_{\max} - V_{\min}}{a_{\max}} + \left(L - \frac{V_{\max}^2 - V_{\min}^2}{2a_{\max}} \right) / V_{\max} \leq T_g \end{cases} \quad (11)$$

则表示此刻信号灯剩余绿灯时间较短。当前校园无人车继续保持匀速行驶无法正常通过，需要加速行驶才能在较短的绿灯剩余时长内通过三岔路口。即加速控制操作是当前校园无人车行车速度调整状态判断结果。

第 2 种情况：为了实现校园无人车在三岔路口安全行驶，当前校园无人车以最大加速度 a_{\max} 加速至最大限制速度 V_{\max} 时，然后以校园内规定的最大速度依旧在此刻信号灯剩余时间内不能顺利经过三岔路口。这种情况下，如果：

$$\frac{V_{\max} - V_0}{a_{\max}} + \left(L - \frac{V_{\max}^2 - V_0^2}{2a_{\max}} \right) / V_{\max} > T_g \quad (12)$$

则表示此刻信号灯剩余绿灯时间较短。当前校园无人车加速行驶至三岔路口停车线时，信号灯已从绿灯状态变为红灯，因此无法正常通过三岔路口。这时，缓慢减速，停车等待操作是当前校园无人车行车速度调整状态判断结果。

(2) 如果前方三岔路口是红灯

当校园无人车以初速度 V_0 驶入三岔路口速度诱导区，并且距离三岔路口距离为 L ，行车方向的信号灯为红灯状态，红灯相位剩余时长为 T_r 。这种情况下，如果：

$$T_r \leq L/V_0 \quad (13)$$

则表示此刻信号灯红灯剩余时间较短。当前校园无人车保持目前行车速度匀速行驶到三岔路口时，信号灯已经变为绿灯，因此当前校园无人车能够顺利通过三岔路口。即匀速控制操作是当前校园无人车行车速度调整状态判断结果。

如果不满足式(13)，则可以分为以下两种情况：

第 1 种情况：为了实现校园无人车在三岔路口安全行驶，当前校园无人车以最大减速度 d_{\max} 减速至最小速度 V_{\min} 时，然后以校园内限速行驶能够在此刻绿灯开始时，正常经过三岔道路信号交叉口。这种情况下，如果：

$$\begin{cases} T_r > L/V_0 \\ \frac{V_0 - V_{\min}}{d_{\max}} + \left(L - \frac{V_0^2 - V_{\min}^2}{2d_{\max}} \right) / V_{\min} \geq T_r \end{cases} \quad (14)$$

则表示此刻信号灯红灯剩余时间充足。当前校园无人车继续保持匀速行驶无法正常通过，需要减速行驶才能够在当前红灯剩余时长结束后变为绿灯时，顺利通过三岔路口。这时，即减速控制操作是当前校园无人车行车速度调整状态判断结果。

第 2 种情况：为了实现校园无人车在三岔路口安全行

驶,当前校园无人车以最大减速度 d_{\max} 减速至最小速度 V_{\min} 时,然后以校园内限速行驶至三岔道路停车线时,信号灯状态依旧是红灯。这种情况下,如果:

$$\frac{V_0 - V_{\min}}{d_{\max}} + \left(L - \frac{V_0^2 - V_{\min}^2}{2d_{\max}} \right) / V_{\min} < T_r \quad (15)$$

则表示此刻信号灯红灯剩余时长较长。当前校园无人车减速行驶至三岔路口停车线时,此时信号灯的红灯剩余时长还未结束,因此无法正常通过三岔路口。这时,缓慢减速,停车等待操作是当前校园无人车行车速度调整状态判断结果。

根据校园无人车在信号灯的两种状态下,通过三岔路口的速度变化情况,可以制定出关于校园三岔路口校园无人车车速诱导判断流程如图7所示。图7中展示了校园无人车在三岔路口行驶过程中速度调整的具体控制策略。

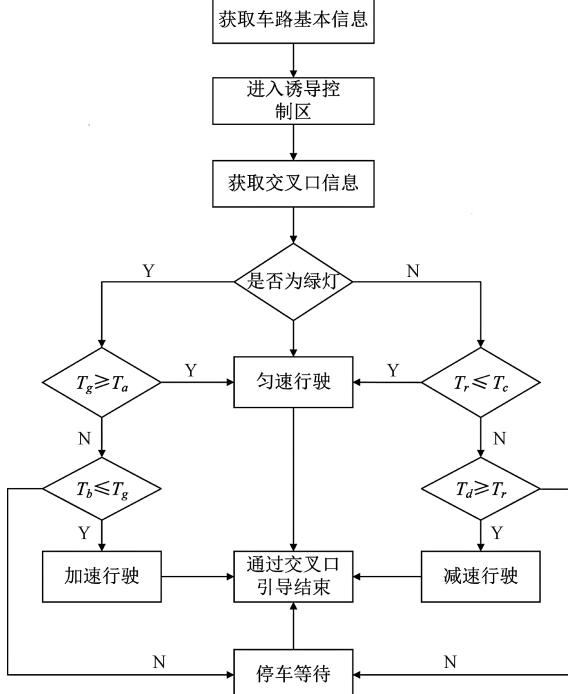


图7 三岔路口车速诱导控制策略流程图

Fig. 7 Flow chart of speed induction control strategy for three-way intersection

其中, T_a 指当信号灯为绿色时,校园无人车以当前速度通过三岔路口所需要的时间; T_b 指当信号灯为绿灯状态时,校园无人车以最大加速度 a_{\max} 加速到 V_{\max} 时,然后以校园内限速通过三岔路口的时间; T_c 指当信号灯为红色时,校园无人车以当前速度通过三岔路口所需的时间; T_d 指当信号灯为红色时,校园无人车以最大减速度 d_{\max} 减速到 V_{\min} 时,再以当前校园内限速行驶至三岔路口停车线的时间。

2.3 S型加减速算法速度优化

S型加减速算法由加加速、匀加速、减加速、匀速、加减速、匀减速、减减速这几部分构成。该算法大致包括加速算

法和减速算法两种类型,如图8(a)、(b)所示。其中,图8(a)为S型加速曲线图,图8(b)为S型减速曲线图。

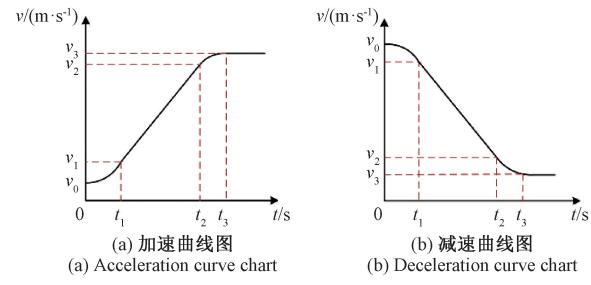


图8 S型加减速曲线图

Fig. 8 S-shaped acceleration and deceleration curve diagram

从图8中能够清楚看到,该算法可以使目标车辆的速度曲线相对平滑,因此可以减少行车过程中因速度波动过大产生安全事故。此外,从图中能够直观看到,加速度的变化过程是由开始的慢慢增加、匀速增加、最后加速度变为0。

为了将这种变化情况清晰的表示出来,加入新变量 J ,即加速度。

$$J = \frac{da}{dt} \quad (16)$$

由上式可以将加速过程中加速度 a 、速度 v 、距离 S 的公式可以推导出来。

加速度公式为:

$$a(t) = \begin{cases} Jt, 0 \leq t < t_1, a_{\max} = JT_1 \\ a_{\max}, t_1 \leq t < t_2 \\ a_{\max} - J(t - t_2), t_2 \leq t < t_3 \\ 0, t \geq t_3 \end{cases} \quad (17)$$

其中, a_{\max} 表示当前校园无人车最大加速度; t 表示当前时间; t_1 表示加加速结束的时间; t_2 表示匀加速结束的时间; t_3 表示减加速结束的时间; T_k 表示当前行车状态持续时间, $T_k = t_k - t_{k-1}$ 。

速度公式为:

$$v(t) = \begin{cases} v_0 + \frac{1}{2} J t_1^2, 0 \leq t < t_1 \\ v_1 + JT_1(t - t_1), t_1 \leq t < t_2 \\ v_2 + JT(t - t_2) - \frac{1}{2} J(t - t_2)^2, t_2 \leq t < t_3 \\ v_3, t \geq t_3 \end{cases} \quad (18)$$

其中, $v(t)$ 表示当前时间校园无人车的瞬时速度。

距离公式为:

$$S(t) = \begin{cases} v_0 t + \frac{1}{6} J t^3, 0 \leq t < t_1 \\ S_1 + v_1(t - t_1) + \frac{1}{2} JT_1(t - t_1)^2, t_1 \leq t < t_2 \\ S_2 + v_2(t - t_2) + \frac{1}{2} JT_1(t - t_2)^2 - \frac{1}{6} J(t - t_2)^3, t_2 \leq t < t_3 \\ S_3 + v_3(t - t_3), t \geq t_3 \end{cases} \quad (19)$$

其中, $S(t)$ 表示当前时间校园无人车的行车距离。

同理, 将减速过程中减速度 d 、速度 v 、距离 S 的公式可以推导出来。

减速度公式为:

$$d(t) = \begin{cases} -Jt, & 0 \leq t < t_1, \text{ 当 } t = t_1 \text{ 时}, d_{\max} = -JT_1 \\ d_{\max}, & t_1 \leq t < t_2 \\ d_{\max} + J(t - t_2), & t_2 \leq t < t_3 \\ 0, & t \geq t_3 \end{cases} \quad (20)$$

其中, d_{\max} 表示当前校园无人车最大减速度; t_1 表示减加速结束时间; t_2 表示匀减速结束时间; t_3 表示减减速结束时间; T_k 表示当前行车状态持续时间, $T_k = t_k - t_{k-1}$ 。

速度公式为:

$$v(t) = \begin{cases} v_0 - \frac{1}{2}Jt^2, & 0 \leq t < t_1 \\ v_1 - JT_1(t - t_1), & t_1 \leq t < t_2 \\ v_2 - JT_1(t - t_2) + \frac{1}{2}J(t - t_2)^2, & t_2 \leq t < t_3 \\ v_3, & t \geq t_3 \end{cases} \quad (21)$$

其中, $v(t)$ 表示当前时间校园无人车的行车速度。

距离公式为:

$$S(t) = \begin{cases} v_0 t - \frac{1}{6}Jt^3, & 0 \leq t < t_1 \\ S_1 + v_1(t - t_1) - \frac{1}{2}JT_1(t - t_1)^2, & t_1 \leq t < t_2 \\ S_2 + v_2(t - t_2) - \frac{1}{2}JT_1(t - t_2)^2 + \frac{1}{6}J(t - t_2)^3, & t_2 \leq t < t_3 \\ S_3 + v_3(t - t_3), & t \geq t_3 \end{cases} \quad (22)$$

其中, $S(t)$ 表示当前时刻校园无人车的行车距离。

这一阶段, 主要是为了校园无人车在交叉路口行驶过程中速度保持相对的平稳。使得诱导速度的各个环节尽可能平稳, 避免车辆速度发生骤变的现象。相对而言, 这一模型下形成的诱导车速曲线更加稳定、光滑。此外, 在减速过程和加速过程中也不会出现短时间的剧烈变化现象。

3 校园三岔路口无人车车速诱导模型建立

构建三岔路口车速诱导模型, 必须根据提前设计的车速诱导策略计算最优速度, 车速诱导策略框架如图 9 所示。通过给校园无人车搭载智能车载设备, 以合理的速度引导其通过三岔路口, 最后与视觉模拟软件(PTV-VISSION, VISSION)的 COM 接口进行连接, 实现车速诱导控制策略的使用, 从而验证是否完成智能调度所需的目标。

通过加载 VISSION 的 COM 接口和车速诱导策略相结合, 建立车速诱导模型。包括五部分, 即导入路网模型、信

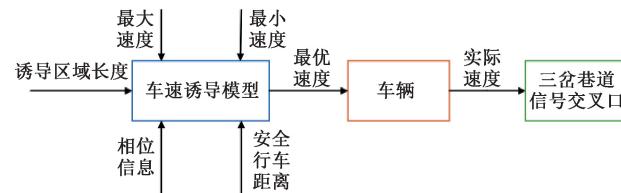


图 9 三岔路口车速诱导框架

Fig. 9 Speed guidance framework for three-way intersections

号灯的控制、评价指标的选取、车速诱导计算、车速诱导速度变更。

3.1 导入路网

将没有进行车速诱导的路网模型导入程序, 首先需要通过 VISSION 的 COM 接口将 PYTHON 进行连接, 然后通过加载三岔路口路网模型建立仿真对象。

3.2 信号灯的控制

控制校园三岔路口信号灯, 进行两相位放行。三岔路口直行宽道路中的东进口和西进口两方向的信号灯处于相对方向, 控制当前道路校园无人车直行。直行窄道路的信号灯控制当前道路校园无人车左转。在进行信号灯时长分配时, 参考城市道路信号灯配时制定方法, 根据某校园无人车在固定时间内, 当前行车方向的最大通行量确定信号灯时长。图 10 为校园三岔道路西进口的信号灯设置图。

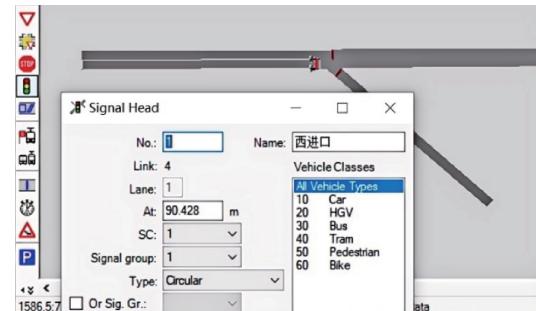


图 10 信号灯设置图

Fig. 10 Signal light setting diagram

3.3 评价指标的选取

根据选取的行程时间、延误时间、排队车辆数三个指标激活相对应的检测器。通过激活相对应的检测器, 配置评价文件可以获取校园无人车在三岔路口的行车信息。通过行程时间检测器, 可以获得校园无人车在三岔路口的行程时间等数据。同理, 通过延误时间、排队车辆数检测器可以获得校园无人车在三岔路口的延误时间、排队车辆数等重要行车数据。在设置检测器时, 需要对评价指标配置文件进行选取至关重要。在选取配置指标文件时, 主要包括行程时间、延误时间、排队车辆数 3 部分。

3.4 车速诱导计算

智能车载设备根据设计的车速诱导策略来对通过校园三岔路口的无人车进行判断, 计算需要引导的速度, 然后将此速度传递给校园无人车。

3.5 车速诱导速度变更

校园无人车进入车速诱导区域根据当前信号灯所处的状态变更速度,车辆位于三岔路口时的当前车速能否在诱导状况下满足条件,需要依靠车载设备的判断方可实现。信号灯的相位以及车辆状况作为关键影响因素,车载设备会根据相关信息做出判断,当前无人车从三岔路口通过需要速度增加还是降低速度进行等待。并且根据速度的计算值对其传递车速建议要求,发布车辆的速度值。

如果信号灯处于绿灯状态时,当前的行车状态可以满足载人车、载物车正常通过三岔路口,为了减少行程时间,则在当前时刻可以直接引导载物车、载人车以各自最大速度通过路口;若无法满足校园无人车顺利通过,则需要在保证行车安全的前提下,根据式(10)~(15)计算并判断车辆的速度变更情况,是否需要加速、减速还是停车等待操作。同理,如果信号灯处于红灯状态时,根据当前距离以及红灯信号剩余时长进行判断并计算出所需车速,需要进行匀速、加速、减速还是停车等待操作。具体的速度变更决策主要通过 PYTHON 和 VISSIM 的 COM 函数接口连接而实现。

4 校园三岔路口无人车车速诱导实验与分析

4.1 路网模型搭建

为了对校园无人车车速诱导策略的有效性和正确性进行分析与验证,选取西安某高校内三岔路口部分路网作为研究场景构建实验环境,进行实验分析,三岔路口结构简图如图 11 所示。三岔路口为校园内运输的必经之路,图 11 中东西走向为直行宽道路,可双向行车,南北走向为直行窄道路,仅能单向行车。

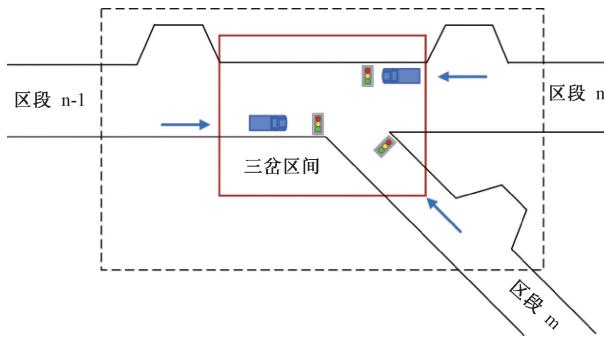


图 11 三岔路口结构简图

Fig. 11 Structural diagram of three-way intersection

根据图 11 三岔道路结构,在 PTV VISSIM4.3 软件中搭建基于校园内的三岔道路路网模型,如图 12 所示。图中选取了仿真过程中的动态图作为参考,图中展示了三岔道路两个方向的校园无人车和信号灯。

4.2 实验与分析

以 PTV VISSIM 微观交通仿真软件作为仿真实验平台,借助 PYTHON 编程语言和 VISSIM 的 COM 接口实现二次开发。图 13 为设计的仿真实验平台示意图。并利用

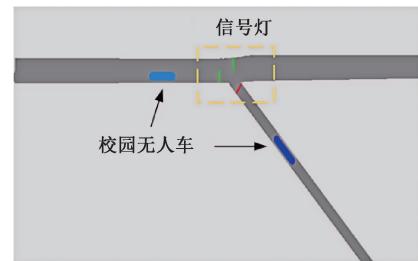


图 12 三岔道路路网模型

Fig. 12 Model of three forked road network

车辆控制系统接口、信号机控制系统接口、仿真控制系统接口等进行三岔道路车速诱导实验。

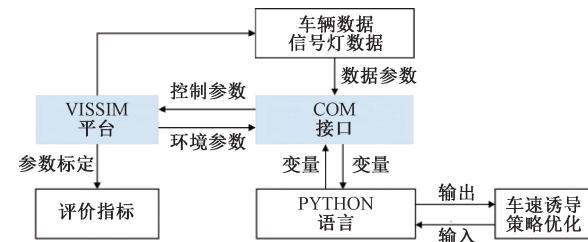


图 13 实验平台设计

Fig. 13 Experiment platform design

采用 VISSIM4.3 版本的仿真软件自带的 COM 函数接口功能,将 PYTHON 编写三岔道路车速诱导的程序导入其中,在此基础上,设计 VISSIM 仿真平台,实现在车路协同环境下校园无人车在三岔道路的通行仿真模拟情况。在车路协同环境下对三岔道路进行研究主要通过 PYTHON 将三岔道路中校园无人车的车速诱导行为、通行状况进行编程,从而,实现校园无人车行车速度和所处位置的变化。

仿真总时间确定为 3 600 s,为了使车辆运行更加平稳,选取仿真精度中间值每仿真秒 5 步,以 60 s 的时间间隔记录仿真实验中三岔道路校园无人车的行车路线、车辆速度以及信号灯颜色状态和时长等相关信息。车速诱导模型具体计算参数标定如表 2 所示。

表 2 实验主要参数

Table 2 Main parameters of the experiment

参数	取值
车速诱导区长度 L/m	60
载人车最大速度 $V_{\max}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	25
载人车最小速度 $V_{\min}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	20
载物车最大速度 $V'_{\max}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	40
载物车最小速度 $V'_{\min}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	30
最大加速度 $a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	2
最大减速度 $d/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	2
安全行车距离/m	50
实验时长/s	3 600

选取如图 14 所示的校园实际三岔路口场景进行实际道路实验,所选参数与仿真实验的参数保持一致。



图 14 校园实际三岔路口实验场景

Fig. 14 Experiment scene of actual three-way intersection on campus

1) 实验数据处理

选取 300 s 作为实验时间间隔,3 600 s 为实验总时长。每 300 s 结束计算一次所有校园无人车的行车数据。运行结束后,系统会根据提前选取的评价指标将实验所得到全部数据记录在配置文件里,最终生成与之对应的结果报告。分别对无车速诱导、文献[26]方法及有车速诱导效果进行数据结果处理。

校园无人车通过三岔路口的行程时间仿真如表 3 所示,表 3 中详细记录了在仿真时长 3 600 s,仿真间隔 300 s 的过程中,校园无人车在道路通行优化前、文献[26]方法和本文方法的行程时间各项计算数据结果。

表 3 行程时间仿真结果数据

Table 3 Travel time simulation result data

仿真时间/s	行程时间/s		
	优化前	文献[26]方法	本文方法
300	34.9	33.8	30.0
600	33.0	32.4	26.9
900	37.0	33.7	27.0
1 200	33.4	31.5	26.4
1 500	36.7	34.6	27.8
1 800	37.8	34.4	33.1
2 100	32.9	30.0	28.6
2 400	37.3	35.6	30.2
2 700	36.4	33.2	29.6
3 000	34.7	31.2	28.5
3 300	35.5	33.9	28.3
3 600	35.0	32.8	29.9

其中,优化前是仿真过程中没有进行车速诱导的行程时间结果数据。

校园无人车通过三岔路口的行程时间实际如表 4 所

示,表 4 中详细记录了在实车道路实验时长 3 600 s,实验间隔 300 s 的过程中,校园无人车在道路通行优化前、文献[26]方法和本文方法的行程时间各项计算数据结果。

表 4 行程时间实车实验结果数据

Table 4 Travel time real vehicle experiment results data

实验时间/s	行程时间/s		
	优化前	文献[26]方法	本文方法
300	34.4	33.6	29.9
600	32.6	32.5	26.4
900	36.8	33.3	26.8
1 200	33.6	31.7	26.2
1 500	36.8	34.8	27.3
1 800	36.8	34.1	32.7
2 100	33.4	30.2	28.1
2 400	36.9	35.3	30.1
2 700	37.1	33.0	29.0
3 000	34.5	31.5	28.3
3 300	36.1	33.2	28.1
3 600	34.8	32.1	29.2

其中,优化前是仿真过程中没有进行车速诱导的行程时间结果数据。

校园无人车通过三岔路口的排队车辆数如表 5 所示,表 5 中详细记录了在仿真时长 3 600 s,仿真间隔 300 s 的过程中,校园无人车在三岔道路通行优化前和优化后的排队车辆数各项计算数据结果。

表 5 排队车辆数仿真结果数据

Table 5 Simulation results of the number of queued vehicles

仿真时间/s	排队车辆数		
	优化前	文献[26]方法	本文方法
300	2	2	0
600	1	1	0
900	3	2	1
1 200	4	3	1
1 500	2	1	0
1 800	9	9	7
2 100	5	5	5
2 400	1	1	0
2 700	6	5	3
3 000	0	0	0
3 300	3	3	3
3 600	5	5	4

其中,优化前是仿真过程中没有进行车速诱导的排队车辆数结果数据。

校园无人车通过三岔路口的排队车辆数如表6所示,表6中详细记录了在实车道路实验时长3 600 s,实验间隔300 s的过程中,校园无人车在道路通行优化前、文献[26]方法和本文方法的排队车辆数各项计算数据结果。

表6 排队车辆数实车实验结果数据

Table 6 Number of queued vehicles real vehicle experiment results data

实验时间/s	排队车辆数		
	优化前	文献[26]方法	本文方法
300	2	2	0
600	1	1	0
900	3	2	1
1 200	4	3	1
1 500	2	1	0
1 800	9	9	6
2 100	5	5	4
2 400	1	1	0
2 700	5	5	2
3 000	0	0	0
3 300	3	3	2
3 600	5	4	3

校园无人车通过三岔路口的延误时间如表7所示,表7中详细记录了在仿真时长3 600 s,仿真间隔300 s的过程中,校园无人车在三岔道路通行优化前和优化后的延误时间各项计算数据结果。

表7 延误时间仿真结果数据

Table 7 Delay time simulation result data

仿真时间/s	延误时间/s		
	优化前	文献[26]方法	本文方法
300	3.9	3.7	3.1
600	2.9	2.6	1.9
900	5.6	4.3	2.5
1 200	2.5	2.3	1.9
1 500	6.0	4.9	2.7
1 800	7.5	6.9	6.4
2 100	3.1	2.7	2.1
2 400	6.2	5.7	4.8
2 700	5.4	5.3	5.1
3 000	3.6	3.4	3.1
3 300	5.2	5.0	4.8
3 600	4.6	4.6	4.5

其中,优化前是仿真过程中没有进行车速诱导的延误时间结果数据。

校园无人车通过三岔路口的延误时间如表8所示,

表8中详细记录了在实车道路实验时长3 600 s,实验间隔300 s的过程中,校园无人车在三岔道路通行优化前和优化后的延误时间各项计算数据结果。

表8 延误时间实车实验结果数据

Table 8 Delay time real vehicle test result data

实验时间/s	延误时间/s		
	优化前	文献[26]方法	本文方法
300	3.8	3.7	3.0
600	3.0	2.7	1.9
900	5.5	4.5	2.6
1 200	2.6	2.4	1.9
1 500	6.2	5.0	2.7
1 800	7.3	6.7	6.3
2 100	2.9	2.7	2.2
2 400	6.1	5.5	4.7
2 700	5.3	5.3	5.1
3 000	3.7	3.5	3.1
3 300	5.3	5.1	4.7
3 600	4.7	4.6	4.5

2) 实验结果分析

针对仿真场景和实车实验场景下计算求得的各项数据,实验主要对校园无人车在道路通行优化前、文献[26]方法和本文方法3种情况进行分析,优化前指没有进行车速诱导,以下是具体的分析结果。

(1) 车辆行程时间分析

行程时间是校园无人车在校园内通行的最基本功能。根据表3中校园无人车通过三岔道路的行程时间仿真数据和表4中校园无人车通过三岔道路的行程时间实车实验数据,绘制出校园无人车经过本文车速诱导策略和文献[26]方法优化前后的行程时间对比图,如图15和16所示。

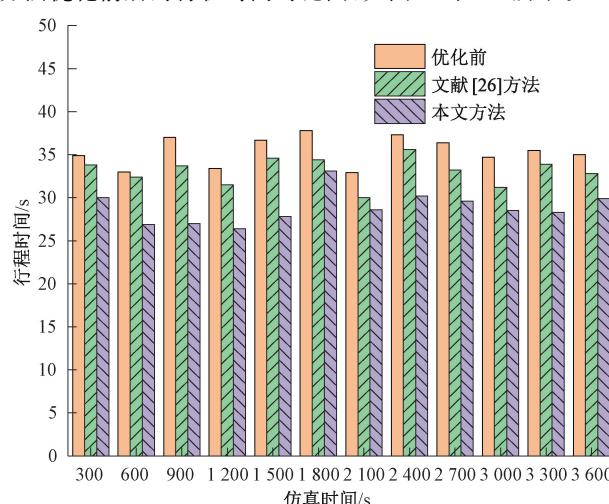


图15 行程时间仿真实验对比

Fig. 15 Comparison of travel time simulation experiment

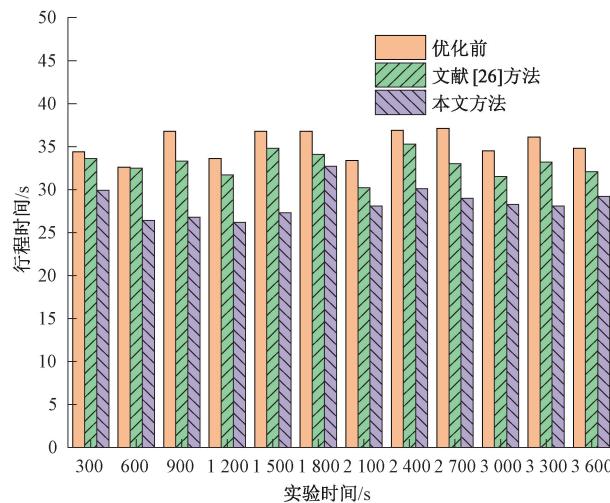


图 16 行程时间实车实验对比

Fig. 16 Comparison of real vehicle experiment with travel time

优化前的数据是校园无人机在三岔道路行驶过程中,未采用车速诱导策略通过三岔道路的行程时间。通过本文车速诱导策略优化后,在仿真总时长里,校园无人机在三岔道路的行程时间相较于优化前减少了 18.4%,相较于文献[26]方法减少了 12.8%。

通过本文车速诱导策略优化后,在实验行车总时长里,校园无人机在三岔道路的行程时间相较于优化前减少了 19.3%,相较于文献[26]方法减少了 13.5%。

从图 15 和 16 中可以看出,使用车速诱导策略后的行程时间明显低于未使用车速诱导策略的行程时间,并且行程时间低于文献[26]方法,即利用车速诱导策略优化后能够有效减少校园无人机在三岔道路的通行时间,从而进一步验证了车速诱导策略的有效性。

(2) 排队车辆数分析

排队车辆数是指校园无人机在三岔路口附近由于信号灯控制和其他突发状况影响,速度为 0 时,停留的车辆总数。绘制出校园无人机经过车速诱导策略优化前后的排队车辆数对比图,如图 17 和 18 所示。

优化前的数据是校园无人机在三岔道路行驶过程中,未采用车速诱导策略通过三岔道路的排队车辆数。经过车速诱导策略优化后,在仿真总时长里,校园无人机在三岔道路的排队车辆数相较于优化前减少了 41.5%,相较于文献[26]方法减少了 35.1%。

经过车速诱导策略优化后,在实车实验总时长里,校园无人机在三岔道路的排队车辆数相较于优化前减少了 47.5%,相较于文献[26]方法减少了 35.1%。

由于校园无人机在三岔道路频繁启停、停车等待,严重影响了运输效率,增加了校园道路拥堵和安全事故的发生。从图 17 和 18 中可以看出,在车路协同环境下,校园无人机经过车速诱导策略优化后,处于三岔道路车辆排队数显著减少,即校园无人机在三岔道路行驶过程中使用本文车速

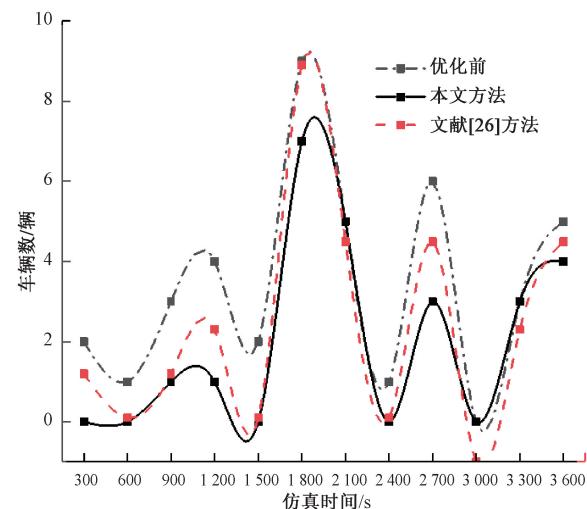


图 17 排队车辆数仿真实验对比

Fig. 17 Comparison of simulation experiment on the number of queued vehicles

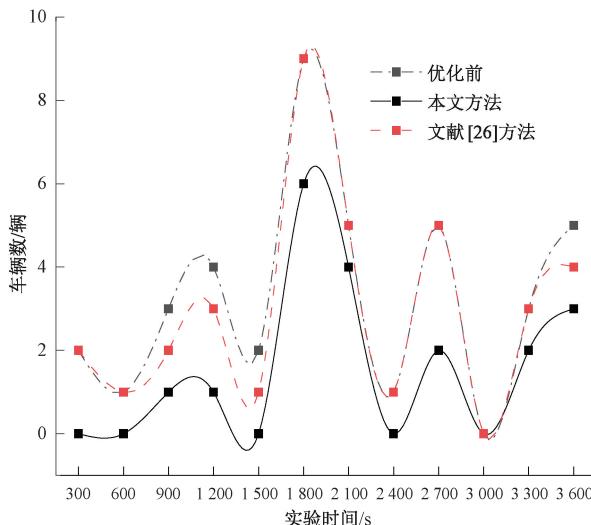


图 18 排队车辆数实车实验对比

Fig. 18 Comparison of the number of queued vehicles with real vehicle experiments

诱导策略达到了一定的优化效果。

(3) 车辆延误时间分析

延误时间是校园无人机在行驶过程中,由于彼此之间的干扰和信号灯的控制,所产生的冗余时间。当校园无人机处于三岔道路时,由于多个方向可能会有校园无人机通行,校园无人机会进行停车等待从而产生速度波动,在时间上产生一定的延误。校园无人机经过车速诱导策略优化前后的延误时间对比图,如图 19 和 20 所示。

优化前的数据是校园无人机在三岔道路行驶过程中,未采用车速诱导策略通过三岔道路的延误时间。经过车速诱导策略优化后,在仿真总时长里,校园无人机在三岔道路的延误时间相较于优化前减少了 24.1%,相较于文献[26]

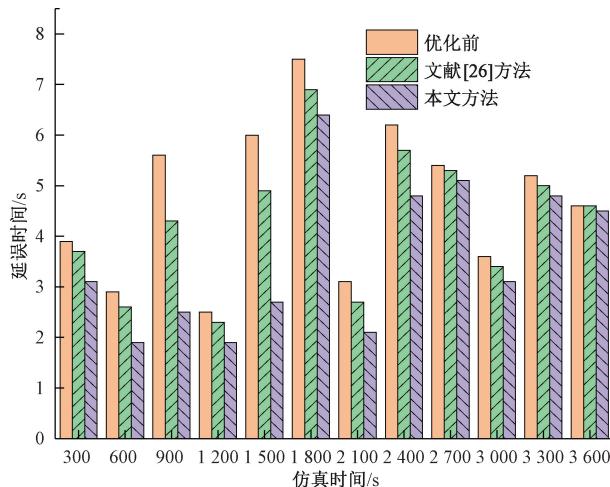


图19 延误时间仿真实验对比

Fig. 19 Comparison of delay time simulation experiment

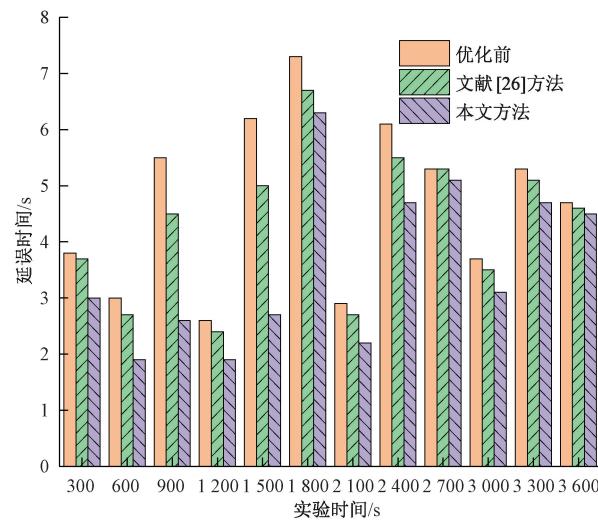


图20 延误时间实车实验对比

Fig. 20 Comparison of delay time in real vehicle experiment

方法减少了16.5%。进一步减少了校园无人车在三岔道路因排队而产生的延误时间。

经过车速诱导策略优化后，在实车实验总时长里，校园无人车在三岔道路的延误时间相较于优化前减少了24.3%，相较于文献[26]方法减少了17.4%。

从图19和20可以直观看出，校园无人车经过车速诱导策略优化后，延误时间在一定程度上有效减少。在间隔为900 s和1500 s内，效果最为明显。即使用车速诱导策略能够显著降低校园无人车在三岔道路行驶过程中的延误时间，为校园无人车提高运输效率提供了一定的保障。

5 结论

本文以校园智慧化建设为背景，针对校园三岔路口无人运输车易引起的交通拥堵问题，提出了一种基于车路协同环境的校园无人车速度诱导策略，优化了校园三岔路口

无人车的运行状态。主要结论如下：

将车路协同融入校园交通环境中，达到了车与校园道路可以进行信息共享的目的。从校园道路的宽度角度出发，将道路划分为宽道路与窄道路，根据校园安全规定要求和管理制度，制定了8条宽道路行车规则和7条窄道路行车规则，对于直行宽道路和直行窄道路，交通信号灯均布置在错车区域内。

分析了三岔路口校园无人车的通行状态，在对车辆动力学模型进行定义和假设的前提下，通过确定车速诱导区域的范围，设计了不同信号灯情况下校园无人车的车速诱导控制策略。采用S型加减速算法进行了速度平滑处理，实现了校园无人车尽量不停车通过交叉口的目标。

以校园无人车行车规则为基础，设定了信号灯配时方案、校园无人车基础行车数据等状态参数，采用PYTHON编写了车速诱导策略，与VISSIM的COM接口连接，建立了校园无人车车速诱导模型。通过PYTHON、VISSIM搭建车速诱导的仿真模型，根据是否使用车速诱导策略，从车辆行程时间、排队车辆数、延误时间三个评价指标，进行了仿真对比实验，分析了通过三岔道路校园无人车的通行情况。实车实验结果表明，对校园无人车进行车速诱导后，行程时间减少了19.3%，排队车辆数减少了47.5%，延误时间减少了24.3%，有效提高了运输效率，减少了道路堵塞，在一定程度上保证了校园安全，验证了所提出方法的有效性，实现了智能调度的目标。

参考文献

- [1] 杨彦侃, 马鑫宇, 郁林. 一种基于 WiFi 信道状态信息的课堂行为识别方法[J]. 电子测量技术, 2025, 48(3): 118-127.
YANG Y K, MA X Y, YU L. A classroom behavior recognition method based on wifi channel state information[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(3): 118-127.
- [2] LIU P M, GUO X G, WANG J L, et al. Fully distributed hierarchical ET intrusion-and fault-tolerant group control for MASs with application to robotic manipulators[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 21(3): 2868-2881.
- [3] GIORDANO A, ACHENBACH L, LENGENHAGER D, et al. A soft robotic morphing wing for unmanned underwater vehicles [J]. Advanced Intelligent Systems, 2024, 6(6): 1-14.
- [4] SHARMA N, KUMAR P V, DHYANI R, et al. Idling fuel consumption and emissions of air pollutants at selected signalized intersections in Delhi[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 212(34): 8-21.
- [5] HAO J, PHAM V T. Stuck in traffic: Do auditors price traffic congestion[J]. British Accounting Review, 2024, 56(2): 1-13.
- [6] SUN P X, YU Q F, YOU K S, et al. Intelligent traffic management strategy for traffic congestion in

- underground loop [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 143(5): 6-19.
- [7] ZHU SH X, DING R Y, ZHANG M H, et al. Spatio-temporal point processes with attention for traffic congestion event modeling [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23 (7): 7298-7309.
- [8] LIANG Y, YU B J, ZHANG X J, et al. The short-term impact of congestion taxes on ridesourcing demand and traffic congestion: Evidence from Chicago [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2023, 172(45): 1-14.
- [9] SUN F R, XU X J, ZHANG H M, et al. Evolution mechanism and optimisation of traffic congestion [J]. Aeronautical Journal, 2024, 128(1321): 598-630.
- [10] PRIEUR C. Traffic congestion control by pde backstepping [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2024, 44(3): 1-11.
- [11] 谢高杨,房立清,苏续军,等.无人靶车在不同车速下的路径规划方法[J].电子测量与仪器学报,2023,37(2):39-47.
XIE G Y, FANG L Q, SU X J, et al. Path planning method of unmanned target vehicle under different speed conditions [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (2): 39-47.
- [12] ZAJI A, LIU ZH, BANDO T Z L, et al. Ontology-based driving simulation for traffic lights optimization [J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2023, 14(3): 1-16.
- [13] YING Z B, CAO SH L, LIU X M, et al. Privacy signal: Privacy-preserving traffic signal control for intelligent transportation system [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(9): 16290-16303.
- [14] 谷依田,张涛,张亮,等.面向多无人机的目标点分配和协同路径规划算法[J].仪器仪表学报,2024,45(3):263-274.
GU Y T, ZHANG T, ZHANG L, et al. Goal allocation and cooperative path finding for multiple UGVs [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(3): 263-274.
- [15] ZHANG Q, GUO G. Prescribed-time cooperative control of connected and autonomous vehicles on rough roads [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(1): 140-151.
- [16] DENG Y J, LIU X H. Reduce bus bunching with a real-time speed control algorithm considering heterogeneous roadway conditions and intersection delays [J]. Journal of Transportation Engineering Part A: Systems, 2020, 146(7): 1-15.
- [17] VARGA B, TETTAM T, KULCAS B, et al. Public transport trajectory planning with probabilistic guarantees [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020, 139(1): 81-101.
- [18] LIU SH, ZHANG W T, WU X J, et al. A simulation system and speed guidance algorithms for intersection traffic control using connected vehicle technology [J]. Tsinghua Science and Technology, 2023, 24 (2): 160-170.
- [19] GONG S Y, DU L L. Cooperative platoon control for a mixed traffic flow including human drive vehicles and connected and autonomous vehicles [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2022, 116 (1): 25-61.
- [20] TANG T Q, YI ZH Y. A speed guidance strategy for multiple signalized intersections based on car-following model [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Application, 2022, 496(1): 399-409.
- [21] GAO Y F, XI J W. Joint optimization of speed guidance and signal priority control for connected autonomous truck platoon at intersections with car and truck separation [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2023, 23(7): 88-101.
- [22] SHI Q, QI T ZH. Research on speed guidance strategy based on multi-objective optimization in connected vehicle environment [C]. 2023 IEEE 7th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 2023: 1-8.
- [23] WANG J F, LI C C. Speed guidance model during the green phase based on a connected vehicle [J]. Simulation-Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, 2021, 92(10): 889-905.
- [24] LIU Y R, XU X T. A speed control method at successive signalized intersections under connected vehicles environment [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2022, 11 (30): 117-128.
- [25] 安实,姚焰东,姜慧夫,等.信号交叉口绿色驾驶车速控制方法[J].交通运输系统工程与信息,2015,15(5):53-59.
AN SH, YAO H D, JIANG H F, et al. Green driving speed control method at signalized intersections [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(5): 53-59.
- [26] 刘伟,包宇宁,饶畅,等.城市特长隧道分车型动态诱导方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2025,44(2):99-107.
LIU W, BAO Y N, RAO CH. Dynamic induction method for different vehicle types in urban extra-long tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2025, 44(2): 99-107.

作者简介

杨芝,硕士,讲师,主要研究方向为机电系统智能控制、仪器与测试技术等。

E-mail:16608337628@163.com

张传伟(通信作者),博士,教授,博士生导师,主要研究方向为机电系统智能控制、仪器与测试技术等。

E-mail:13619195611@163.com