DOI 编码：10.13646/j.cnki.42-1395/u.2022.04.042

城市快速路瓶颈区可变限速反馈控制方法研究

尤兰[1]，王嘉文[1*]，耿良凤[2]，严凌[1]

（1. 上海理工大学 管理学院，上海 200093；2. 南京未来生态城市规划设计有限公司，江苏 南京 211302）

摘　要：针对快速路瓶颈区易发生通行能力下降导致的交通阻塞问题，提出一种可变限速控制方法。首先，构建了反馈控制器实时优化路段限速值，以瓶颈区现有占有率与期望占有率差值调整上游限速值，以提升瓶颈区通行效率；其次，基于实测数据构建快速路瓶颈区元胞传输模型并开展实验。结果表明，与无限速控制相比，实施可变限速的路段总流出车流量提高了 4.3%，平均行程时间减少了 2.1%。较无控制情况下总流出车辆数前者提高了 5.2%，较无模糊控制情况下提高了 2.7%。

关键词：交通控制；快速路瓶颈区；可变限速；反馈控制

中图分类号：U655　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006—7973（2022）04-0128-04

城市快速路是大城市路网的骨架系统，承担了巨大的交通量。据统计：北京主要城市快速路占路网长度 8%，承担了将近 50% 的交通量；上海城市快速路占路网长度的 5%，承担了 35% 的交通量 [1]。快速路的巨大交通吞吐量极易在进出快速路的匝道区域产生瓶颈效应，严重影响快速路通行效率和服务水平。可变限速控制（Variable Speed Limits, VSL）作为一种相对经济和实用的控制手法，已经成为提升城市快速路通行效率、缓解瓶颈区拥堵的潜在控制方法 [2-4]。

可变限速是有效的快速路交通控制方法之一，根据控制策略自动计算路段当前最优限速值，以此应对交通堵塞及延误等问题 [5-7]。目前可变限速控制系统可大致分为在线优化算法，开环控制，闭环控制三种类型 [8]。基于在线优化算法依靠强大的在线算法对于最优限速值进行实时求解计算，计算量较大。Yu, Miao 等 [9] 提出了一种基于遗传算法的可变限速方法，建立了一种多目标的非线性的整数模型以此减少交通拥堵。基于开环控制的控制系统具有结构简单，维护容易，稳定性高等特点，但抗干扰性较差。Frejo[10] 等人对于周期性交通堵塞提出了一种限速器，当密度达到阈值时启用 VSL。基于闭环控制的控制器实时计算量较小，控制结构简单直观，对于系统误差能够自动校正，稳定性高，Wu, Yina 等 [11] 为降低雾天条件下高速公路瓶颈区的追尾事故风险，考虑视距关系，开发了一个反馈控制的框架，减少了车辆运行时间。

回顾国内外对可变限速等控制的研究可以得出，现有研究提升高速公路与城市快速路通行效率、降低延误方面取得大量的成果。然而，针对瓶颈区的研究多基于在线优化模型或开环控制模型为主，前者依赖于模型的准确性且计算量大，后者控制效果抗干扰能力较难评估，需要经过实践的反复测试后方可生效。因此，本文针对快速路瓶颈区，提出一种基于比例控制器的可变限速反馈控制方法，主要有以下两点贡献：①基于比例控制器实现了快速路瓶颈区可变限速反馈控制，得到一种结构简单，稳定性高的可变限速策略。②构建并标定快速路瓶颈区元胞传输仿真模型，并依托该平台将该方法与无控制、模糊控制方法进行对比研究，明确了本方法的适用范围及其有效性。

1 可变限速反馈控制模型

首先根据历史数据分析瓶颈区交通流通行能力与占有率关系，确定通行能力下降时的占有率。通过检测器实时监测瓶颈区占有率，当瓶颈区域的占有率超过阈值时，启动可变限速控制，调节上游车辆的到达率，保证瓶颈区不会拥堵。本文提出的可变限速反馈控制采用比例控制器计算可变限速值。

$$vsl(t) = Vsl(t-1) + k_p[o_c - o(t)] \qquad o(t) > o_c \tag{1}$$

当流量不断变小，瓶颈区占有率恢复到正常水平，道路排队现象逐渐消失，可变限速控制发布的限速值恢复到默认值：

$$vsl(t) = v_{default} \qquad o(t) \le o_c \tag{2}$$

考虑快速路运行安全车速，一般采用第 85% 百分位车速作为限速值（反馈控制器输出的最大值）。此外，需将计算得到的限速值需四舍五入至 10 的整数倍值发

布。可变限速反馈控制中包含一个控制参数，通过调节参数可以使控制系统稳定，且起到良好的控制效果。该控制模型采用比例控制器，Vsl(t) 为发布的可变限速值，其控制模型可以表示为

$$Vsl(t)=\begin{cases}\min\ (Vsl(t-1)+k_I[o_c-o(t)],v_{\max}) & o(t)>o_c\\ v_{\text{default}} & o(t)\le o_c\end{cases} \quad (3)$$

式中：k_p 为比例项控制参数；t 为时刻 o（t）为一个步长内瓶颈区占有率；o_c 为期望占有率；v_{max} 为第 85% 百分位车速，$v_{default}$ 为默认限速值。

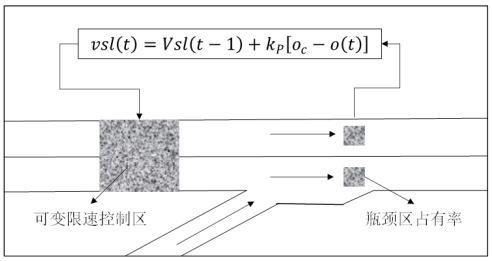

图 1 可变限速反馈控制

2 案例验证

2.1 限速控制场景

为了验证可变限速效果，本文采用实测数据构建了快速路瓶颈区元胞传输模型并展开了实验。同时，为了评价可变限速反馈控制的有效性，稳定交通需求情况下，将可变限速反馈控制、可变限速模糊控制与无控制进行比较。

无控制即只对上游的交通流进行路段默认限速控制。

快速路可变限速模糊控制是根据快速路交通流相关信息对道路实施可变限速控制，动态干预道路行车速度。当瓶颈区占有率和流量超过一定的阈值，启动模糊控制器，对路段的交通流进行控制。可变限速模糊控制器的设计如图所示：

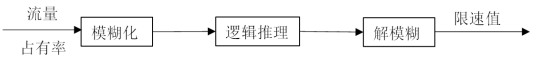

图 2 模糊控制设计图

反馈控制即为以瓶颈区的实际占有率和期望占有率差值为控制信号输出可变限速值，再以限速效果为下一步的信号进行方案修改控制。

2.2 结果分析

由图 3 可见，可变限速反馈控制中，主线的限速值变化从 10 分钟后开始，也就是瓶颈区通行能力开始下降，启动可变限速，限速值从 80km/h 下降到 30km/h。当仿真到 45 分钟时，瓶颈区排队车辆慢慢消散，限速值不断上升，通行能力逐步恢复。开启可变限速之后，瓶颈区交通得到缓解，限速值不断下降，流量降低，道路交通流基本稳定，瓶颈路段车速基本维持在 70km/h 左右。

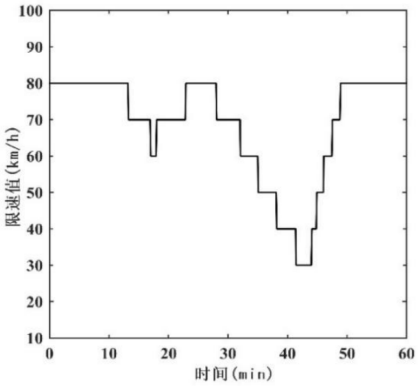

图 3 反馈控制中可变限速值的变化图

为了评价可变限速反馈控制的有效性，稳定交通需求情况下，将可变限速反馈控制、可变限速模糊控制与无控制进行比较，对快速道路段内总流出车辆数与平均行程时间进行比较，分别从道路车辆流出数与平均行程时间两个方面评价可变限速反馈控制的效果，得出每条道路上优化结果，并比较每条道路流量控制的有效性。

仿真时间内路段通行时间与流出流量变化曲线图如图 6 所示。稳定需求下无控制流出车辆数在 10 分钟时达到最大，10 分钟之后流出流量逐渐减少。实施可变限速模糊控制第 10 分钟到第 23 分钟，流出流量低于无控制，但稍后流量有所恢复。实施可变限速反馈控制后，流出流量在 23 分钟之后开始变化，并不断增多。

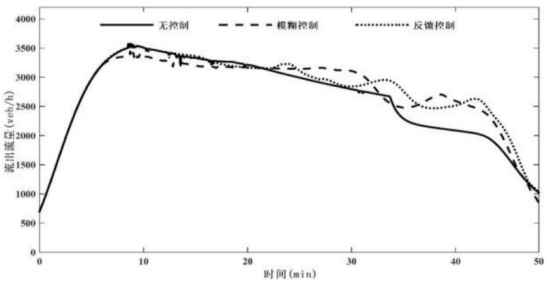

图 4 稳定需求下流出流量变化曲线

从表 1 可以看出，稳定交通需求状态下，与无控制相比，模糊控制下总流出车辆数提高了 2.7%，反馈控制提高了 5.2%，反馈控制的总流出车辆数高于模糊

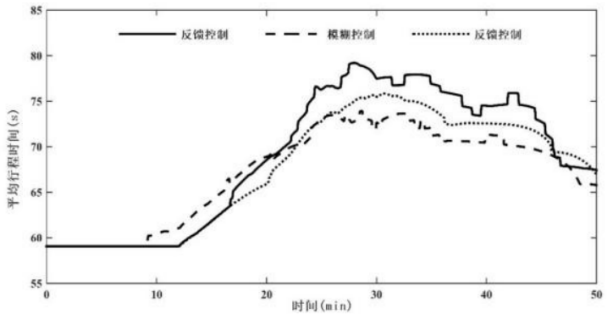

图 5 稳定需求下平均行程时间变化曲线

表 1 稳定交通需求下主线可变限速控制效果汇总

	无控制	模糊控制	反馈控制
总流出车辆数（veh/h）	2211	2271	2326
差值比例(%)	-	2.7%	5.2%
平均行程时间(s)	68.9	65.6	63.5
差值比例(%)	-	-4.8%	-7.8%

控制。模糊控制下平均时间减少了 4.8%，反馈控制的平均行程时间比模糊控制的减少了 7.8%，反馈控制下的平均行程时间减少百分比也高于模糊控制。因此，从这两个指标的结果可以看出，对于稳定交通需求情况下，可变现限速反馈控制比可变限速模糊控制可更为明显地提高车辆通行效率。

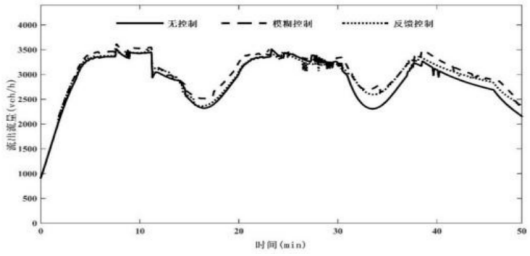

图 6 波动需求下流出流量变化曲线

3 结论

本文针对快速路瓶颈区的交通拥堵现象，提出一种可变限速反馈控制方法，并分析了提出的可变限速反馈控制效果，得出以下三点结论：

（1）基于比例控制器的可变限速反馈控制方法可以根据瓶颈区实际占有率和期望占有率的差值及控制参数确定当前瓶颈区路段限速值，并且将限速效果实时反馈到控制器中，对下一步的限速方案进行动态调整；

（2）从车辆总流出数量和平均行程时间两个指标评价可知，提出的可变限速反馈控制方法对于缓解瓶颈区阻塞具有一定的效果；

（3）将反馈控制与模糊控制可变限速控制效果进行比较，可知反馈控制方法与模糊控制方法相比道路总流出车辆数更多，车辆平均行程时间减少较多，路段交通状况得到更好的改善。

参考文献：

[1] Chen D S, Yu X X, Hu K Q, et al. SAFETY-ORIENTED SPEED GUIDANCE OF URBAN EXPRESSWAY UNDER MODEL PREDICTIVE CONTROL[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF SIMULATION MODELLING. 2014, 13(2): 219-229.

[2] Grumert E F, Tapani A. Using connected vehicles in a variable speed limit system[J]. Transportation Research Procedia. 2017, 27: 85-92.

[3] Ke Z , Li Z , Cao Z J , et al. Enhancing Transferability of Deep Reinforcement Learning-Based Variable Speed Limit Control Using Transfer Learning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, PP(99):1-12.

[4] Csik ó s A, Kulcs á r B. Variable speed limit design based on mode dependent Cell Transmission Model[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2017, 85: 429-450.

[5] Abdel-Aty M, Wang L. Implementation of Variable Speed Limits to Improve Safety of Congested Expressway Weaving Segments in Microsimulation[J]. Transportation Research Procedia. 2017, 27: 577-584.

[6] Cho H W , Laval J A . Combined Ramp-Metering and Variable Speed Limit System for Capacity Drop Control at Merge Bottlenecks[J]. Journal of Transportation Engineering Part A Systems, 2020, 146(6):04020033.

[7] Canudas-De-Wit C, Ferrara A. A variable-length Cell

DOI 编码：10.13646/j.cnki.42-1395/u.2022.04.043

沿海地区高速铁路桥梁 CRTS I 型双块式无砟轨道施工控制技术研究

于东东[1]，徐富刚[2]

（1. 中交第二航务工程局有限公司，湖北 武汉 430040；2. 东南沿海铁路福建有限责任公司，福建 福州 350013）

摘　要：随着社会经济持续发展，科技水平不断地进步，高速铁路的发展与建设呈现腾飞之势。泉州湾跨海大桥是国内首条时速 350km/h 的跨海高速铁路，采用 CRTS I 型双块式无砟轨道，无砟轨道结构采用分块式底座板 + 隔离层 + 道床板形式，具有高平顺性、高稳定性、高精度等特点，施工工艺要求高。无砟轨道施工时，遵循“三低一高”原则严格控制混凝土配合比，在底座板限位凹槽侧面及顶面和轨枕四角增设防裂网片，有效控制八字裂纹产生，提高道床板现浇混凝土的抗裂性能。加工使用特色工装对平整度进行控制，采用轨道精调小车配合数控显示仪对组合框架式轨排进行复测调整，提高轨道安装精度，以满足列车运行平顺、舒适、稳定要求。本文将针对无砟轨道精度控制及混凝土防裂控制进行阐述。

关键词：CRTS I 型双块式无砟轨道；轨道精度；基面平整度；八字裂纹；工装；混凝土防裂

中图分类号：U443.162　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006—7973（2022）04-0131-03

1 工程概况

桥上无砟轨道的混凝土底座板直接浇筑在桥面上，并与桥面预置连接钢筋连接，底座板采用分块式结构。底座板长度、宽度跟道床板的长度、宽度相同。底座板混凝土强度等级为 C40，钢筋焊网采用 CRB550 级，每块底座板上设置两个凹槽，与道床板的限位凸台相匹配。桥上无砟轨道在曲线段设置超高，超高采用外轨抬高方式设置在混凝土底座上，在缓和曲线全场范围内线性内插。道床板与底座板之间设置中间隔离层，采用 4mm 厚聚丙烯非织土工布，凹槽内侧铺设三元乙丙橡胶弹性垫层。底座板两侧与桥面保护层采用有机硅酮嵌缝材料密封，嵌缝尺寸为 20mm（深）×15mm（宽）。桥上道床板采用分块浇筑，分块道床板的长度一般在 5 ~ 7.5m 范围内。相邻道床板间设宽为 100mm 板缝。道床板的宽度均为 2800mm，高度为 2600mm，每块道床板上设桥上双块式无砟轨道由钢轨、SK-2 型双块式轨枕、WJ-8B 型扣件（根据无缝线路纵向附加力计算，在需减小线路纵向阻力地段采用 WJ-8B 型小阻件）、道床板和混凝土底座组成，轨道结构高度 725mm。桥上双块式无砟轨道典型横断面见图 1 所示。两个凸向底座方向的凸形挡台，挡台在高度方向呈四楞台型，倾角为 1:10，上下面的尺寸分别为 1022mm × 700mm、1000mm × 678mm，高低位 110mm。板内采用 HRB400 钢筋，采用 C40 混凝土。

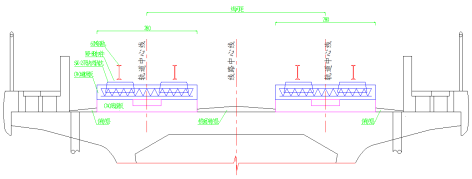

图 1 桥上无砟轨道典型断面布置图

Transmission Model for road traffic systems[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2018, 97: 428-455.

[8] 李志斌 . 快速道路可变限速控制技术 [C]. 东南大学 ,2014. Li Zhibin. Variable Speed Limit Control Technology of Fast Road [C]. Southeast University,2014.

[9] Yu M , Fan W . Tabu Search Strategies for Variable Speed Limit Control at a Lane Drop Bottleneck[J]. Journal of Transportation Engineering, 2018, 144(7):04018033.1-04018033.12.Traffic information and safety,2012,30(05):130-134.

[10] Frejo J , Schutter B D . SPERT: A Speed Limit Strategy for Recurrent Traffic Jams[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2018.

[11] Wu Y , Abdel-Aty M , Wang L , et al. Combined connected vehicles and variable speed limit strategies to reduce rear-end crash risk under fog conditions[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2020, 24(5):494-513 .