

基于 ALINEA 算法的城市快速路入口 匝道优化控制策略

谢羲¹, 任璐^{2*}, 单东辉¹

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 长安大学)

摘要:为缓解城市快速路入口匝道交通拥堵,采用匝道管控技术,以实际工程为依托,收集了道路实际小时观测数据;将主线交通状态根据上下游实时监测的交通数据分为畅通、拥堵、阻塞3种状态,对应不同状态及之间的过渡,将入口匝道管控策略分为无控制策略、控制放行策略、关闭匝道策略;借助 VISSIM 仿真平台建立道路仿真模型,基于 ALINEA 算法,设定 ALINEA 控制参数;以工程高峰小时交通量为输入,对比分析了无控制和 ALINEA 控制条件下主线交通量、主线运行速度、匝道排队长度的参数变化。研究结果表明:在主线平均运行速度方面,无控制策略和 ALINEA 控制策略主线平均运行速度分别为 52.93、77.64 km/h,采用 ALINEA 控制策略的主线平均运行速度增大了 46.20%;在主线交通量方面,无控制策略和 ALINEA 控制策略主线平均交通量分别为 235.50、270.08 veh/h,采用 ALINEA 控制策略的主线平均交通量增大了 14.7%;在匝道影响方面,无控制策略和 ALINEA 控制策略匝道平均排队长度分别为 13.79、15.50 pcu,采用 ALINEA 控制策略情况下匝道平均排队长度增加了 14.7%。可见,ALINEA 匝道管控能够有效提升主线平均运行速度和交通量。

关键词:交通管理;匝道管控;VISSIM 仿真;ALINEA 算法;排队长度;运行速度

快速路是指建于城市内,具有单向双车道或以上的中央分隔、全部控制出入并设有配套的交通安全与管理设施的城市道路,是城市大运量快速交通干道。城市快速路互通立交承担着交通转换的功能,是连接快速路、次干路、地方路的关键节点,也是交通拥堵频繁发生的位置之一。匝道管控技术通过在入口匝道、主线处布设交通检测器,通过优化算法实时调节进入主线的车辆数,减少合流交织次数、保证主线交通畅通,从而使路网通行能力和容量被充分挖掘、发挥。欧美国的大量研究和工程实践已经表明:匝道管控技术是解决干线公路拥堵直接、有效、低成本的控制方法。

与国外相比,中国匝道管控技术研究起步较晚,仅在上海、杭州等地快速路入口有少量应用示范。科学合理的城市快速路入口匝道管控可以显著缓解交通拥堵,提高道路服务水平;但是,不合理的控制策略可能会导致入口匝道排队溢出、控制滞后等问题,进一步恶化路网交通拥堵情况。因此,该文从城市快速路入口

匝道管控基本技术原理、控制算法、案例仿真分析等方面,剖析入口匝道管控方法策略,以期为城市快速路管控策略提出、缓解拥堵提供参考。

1 入口匝道管控策略与方法

1.1 匝道管控基本原理

匝道管控技术是在入口匝道安装信号灯,通常以交通流三参数为基础,分析匝道交通量对主线的影响,根据主线和匝道交通流检测结果,调控进入主线的车辆数,减少匝道车辆汇入主线交织频率,从而保证主线交通流畅通。图1为匝道控制基本原理,在匝道和主线安装车辆检测器,实时监测交通运行状态,匝道排队长度检测器检测车辆的排队长度,通过控制算法,调节信号灯准入或禁止车辆通行;从而保证主线交通顺畅。

FHWA 出版的《匝道管理和控制手册》将匝道管控技术,从时间和控制范围两个层面分为:单点定时匝道控制、单点自适应匝道控制、协同时定匝道控制、协

收稿日期:2021-07-06

作者简介:谢羲,男,硕士,工程师。E-mail:xiex@ccroad.com.cn

* 通信作者:任璐,女,硕士。E-mail:327499759@qq.com

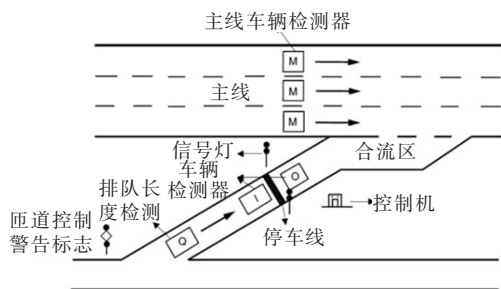


图 1 匝道管控技术原理

同自适应匝道控制。单点定时控制用于局部交通拥堵问题治理,独立于上下游匝道,需要定期人工调节红绿灯时间;单点自适应控制与单点定时控制类似,区别在于自适应控制,不需要人工调节;协同定时控制,是指上下游匝道联动,定时控制车辆汇入;协同自适应控制是指上下游匝道联动,根据实时交通流量自适应控制信号灯时长。

1.2 入口匝道控制策略

主线交通状态根据上下游实时监测的交通数据可分为:畅通、拥堵、阻塞 3 种状态。因此,对应 3 种不同状态及不同状态之间的过渡,入口匝道管控策略分为以下 3 种。

(1) 无控制策略

主线和匝道交通流畅通,不需要进行管控调节。

(2) 控制放行策略

实时监测交通流发现主线上游交通流、匝道交通流超过某一特定阈值,有可能造成主线拥堵,此时匝道红绿灯开启工作,按照调节算法控制放行车辆数进入主线;当匝道控制放行一段时间后,主线下游交通流恢复畅通,此时匝道红绿灯关闭,切换为无控制方式。控制过程需确定匝道控制放行启动的下游占有率阈值、最小控制周期、控制周期时长等参数。

(3) 关闭匝道策略

当主线上游是导致路段拥堵,溢出影响下游交通状态至拥堵状态时,匝道放行车辆进入主线会导致交通恶化;此时,需要关闭匝道策略进行缓解和调节。当关闭一段时间,主线交通流恢复畅通时,逐渐切换为控制放行策略和无控制策略。这个过程需要确定主线上下游占有率等参数。

匝道管控流程和策略切换见图 2。

2 入口匝道管控算法与指标

2.1 ALINEA 控制算法

ALINEA 模型是匝道管控中使用最广泛、最稳定

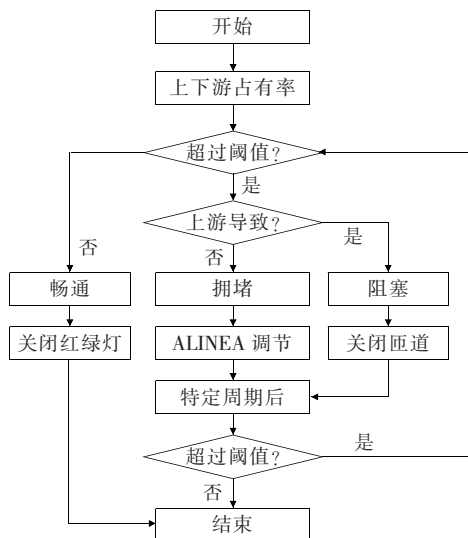


图 2 匝道管控流程和策略切换

的反馈控制算法,广泛应用于欧美等发达国家的城市道路管控环节中;ALINEA 是一种经典的单点控制算法,也是一种闭环反馈控制算法,其参数可以选择或者标定,思想来源于自动控制理论的 PID 算法,算法以维持主线下游占有率设定期望值为目标,实现主线通行能力最大化。在一个控制周期内,调节率为:

$$\gamma(k) = \gamma(k-1) + K[\hat{O} - \hat{O}_1(k-1)] \quad (1)$$

式中: $\gamma(k)$ 为第 k 个控制周期计算的匝道调节率; $\gamma(k-1)$ 为第 $k-1$ 个控制周期匝道调节率,调节率为一个控制周期内绿灯时长; K 为固定的校准参数; \hat{O} 为主线下游的期望占有率,其取值通常设定为最佳占有率; $\hat{O}_1(k-1)$ 为第 $k-1$ 个控制周期内主线下游实测的占有率。

在 ALINEA 模型算法中,主线下游期望占有率 \hat{O} 、调节周期、校核参数 K 3 个参数需要提前设定。该文根据已有研究成果,对 ALINEA 模型参数的选择作如下处理:

(1) 已有研究和工程实践采用的调节周期范围较广,一般为 20~300 s;考虑到匝道和主线流量、占有率检测器数据采集频率为 20 s/次,该文将其控制周期设定为 40 s,最小控制周期数为 6,即单次控制至少 4 min。

(2) 一般情况下控制结果对校核参数 K_R 并不敏感,取值范围一般为 70~200 veh/h,研究表明当 $K_R = 70$ veh/h 时控制效果较佳。

(3) 期望占有率一般为最佳占有率(流量与通行能力相等或相近),取值一般为 0.18~0.31;该文设置略小于通行能力的占有率,设定为 0.3。

ALINEA 算法属于闭环反馈控制算法,根据下游

主线占有率表征的交通状态和上一周期匝道调节率来计算当前周期绿灯时长;因此上下游检测器的布设安装和相关参数的设定对匝道管控效果至关重要。

2.2 评价指标

城市快速路匝道管控主要调节汇入主线车流实现交通拥堵的缓解,因此,采用匝道管控和不采用匝道管控技术的对比分析是评价管控技术应用效果的主要方式;主要指标包括:主线平均速度、流量、行程时间、最大排队长度、平均延误等。

3 案例分析

3.1 工程概况

以西安市绕城高速公路为研究对象,绕城高速公路设计速度为120 km/h,双向六车道,以互通立交A为入口匝道管控技术应用做对比分析,上下游互通立交平均间距为4 km。以2018年12月26日(星期二)观测站小时统计数据为基础,见表1。

表1 西安绕城高速公路基础数据

| 统计时段 | 方向 | 时间占有率/% | 客车流量/veh | 货车流量/veh | 总流量/veh | 客车速度/(km·h ⁻¹) | 货车速度/(km·h ⁻¹) | 平均速度/(km·h ⁻¹) | 拥堵状态 | 拥堵等级 | 拥挤度 |
|-------|----|---------|----------|----------|---------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------|------|-------|
| 24:00 | 下行 | 0.97 | 417 | 142 | 559 | 75.2 | 66.8 | 73.1 | 1 | 1 | 0.236 |
| 23:00 | 下行 | 1.89 | 869 | 193 | 1 062 | 74.0 | 67.6 | 72.8 | 1 | 2 | 0.404 |
| 22:00 | 下行 | 2.25 | 1 203 | 183 | 1 386 | 73.0 | 68.8 | 72.4 | 1 | 2 | 0.480 |
| 21:00 | 下行 | 3.39 | 1 595 | 261 | 1 856 | 71.5 | 65.2 | 70.6 | 1 | 3 | 0.652 |
| 20:00 | 下行 | 3.44 | 1 853 | 242 | 2 095 | 74.3 | 70.5 | 73.9 | 1 | 3 | 0.714 |
| 19:00 | 下行 | 4.44 | 2 625 | 240 | 2 865 | 71.5 | 68.3 | 71.3 | 1 | 5 | 0.957 |
| 18:00 | 下行 | 4.72 | 2 611 | 268 | 2 879 | 71.4 | 69.5 | 71.2 | 1 | 5 | 0.953 |
| 17:00 | 下行 | 3.81 | 2 114 | 262 | 2 376 | 73.7 | 68.7 | 73.2 | 1 | 3 | 0.793 |
| 16:00 | 下行 | 4.28 | 2 114 | 341 | 2 455 | 73.6 | 68.4 | 72.9 | 1 | 4 | 0.850 |
| 15:00 | 下行 | 4.25 | 2 139 | 355 | 2 494 | 73.1 | 70.0 | 72.7 | 1 | 4 | 0.848 |
| 14:00 | 下行 | 4.25 | 2 102 | 320 | 2 422 | 73.2 | 69.9 | 72.8 | 1 | 4 | 0.827 |
| 13:00 | 下行 | 3.86 | 1 942 | 316 | 2 258 | 74.2 | 71.2 | 73.8 | 1 | 3 | 0.769 |
| 12:00 | 下行 | 4.67 | 1 792 | 501 | 2 293 | 70.4 | 70.1 | 70.3 | 1 | 3 | 0.794 |
| 11:00 | 下行 | 6.45 | 2 214 | 665 | 2 879 | 65.8 | 67.8 | 66.3 | 2 | 5 | 1.022 |
| 10:00 | 下行 | 10.67 | 2 701 | 707 | 3 408 | 53.2 | 52.0 | 53.0 | 2 | 5 | 1.173 |
| 09:00 | 下行 | 12.42 | 2 125 | 1 400 | 3 525 | 42.1 | 51.1 | 45.7 | 3 | 5 | 1.276 |
| 08:00 | 下行 | 10.31 | 2 135 | 1 009 | 3 144 | 46.0 | 49.9 | 47.3 | 3 | 5 | 1.122 |
| 07:00 | 下行 | 2.61 | 1 217 | 252 | 1 469 | 74.5 | 67.3 | 73.3 | 1 | 2 | 0.540 |
| 06:00 | 下行 | 0.53 | 220 | 116 | 336 | 78.0 | 68.0 | 74.5 | 1 | 1 | 0.164 |
| 05:00 | 下行 | 0.58 | 121 | 117 | 238 | 77.8 | 68.4 | 73.2 | 1 | 1 | 0.149 |
| 04:00 | 下行 | 0.25 | 62 | 65 | 127 | 78.1 | 65.3 | 71.5 | 1 | 1 | 0.085 |
| 03:00 | 下行 | 0.39 | 75 | 95 | 170 | 78.7 | 69.0 | 73.3 | 1 | 1 | 0.113 |
| 02:00 | 下行 | 0.36 | 142 | 96 | 238 | 75.7 | 65.3 | 71.5 | 1 | 1 | 0.127 |
| 01:00 | 下行 | 0.44 | 229 | 111 | 340 | 76.1 | 66.3 | 72.9 | 1 | 1 | 0.152 |

从表1可知:主线小时交通量最大达3 525 veh/h,统计当天日交通量达42 874 veh/d,当量日交通量为50 587 veh/d;由拥挤程度和拥堵等级分布可以看出,早高峰08:00~11:00拥堵等级达到最大,为5级;晚高峰17:00~18:00拥堵等级达到5级;特别

是早高峰时段拥挤度均大于1,时间占有率均在10 s以上,平均速度为45 km/h;这对于城市快速干道,特别是绕城高速公路的功能定位显然不相符合,因此,该文提出城市快速路入口匝道管控技术应用,以达到缓解主线拥堵,充分发挥其“快速、畅通”的功能。

3.2 VISSIM 仿真模型建立

为了分析匝道管控技术应用效果,依托 VISSIM 仿真平台建立道路模型,收集管控策略调控作用下的各参数变化。首先,将分析对象的底图图纸导入 VIS-SIM 仿真平台,根据地图绘制道路仿真模型;绘制道路仿真模型过程中尽量还原道路主线、匝道线形指标,建立完成后将底图删除。根据监测站监测数据,将车辆组成、期望速度、平均速度等参数进行设定。为使交通流运行稳定后进行统计,模型建立和参数输入之后,先进行 900 s 预热,再进行数据采集,数据共采集 2 h。为了避免单次仿真带来的随机性,故每次仿真分别采用随机种子 20、40、60、80,最后求其平均值。输出数据设置包括交通量、平均速度、行程时间、匝道排队长度等。

通过 VISSIM 建立的仿真模型,通过输入观测站早高峰时段交通数据,对互通立交 A 匝道管控策略进行相关研究,建立模型见图 3。

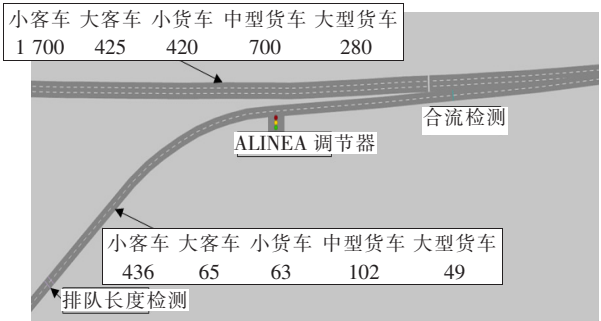


图 3 互通立交 VISSIM 仿真模型及输入参数设置(单位:veh)

3.3 结果分析

借助 VISSIM 9 仿真平台,以图 3 设置参数为交通量和交通组成输入,设置期望速度为 80~100 km/h,每间隔 5 min 采集一次交通数据;分别对比普通无匝道控制、ALINEA 调节控制情况下的交通量、平均速度、匝道排队长度等参数变化。具体参数见表 2。

表 2 控制效果参数

| 统计时段 | 平均速度/(km·h ⁻¹) | | 主线交通量/(veh·h ⁻¹) | | 匝道排队长度/pcu | |
|-------|----------------------------|-----------|------------------------------|-----------|------------|-----------|
| | 无控制 | ALINEA 控制 | 无控制 | ALINEA 控制 | 无控制 | ALINEA 控制 |
| 01:00 | 55.0 | 59.0 | 121 | 136 | 12 | 11 |
| 02:00 | 53.0 | 63.1 | 136 | 142 | 11 | 13 |
| 03:00 | 45.7 | 69.2 | 149 | 169 | 13 | 16 |
| 04:00 | 47.3 | 71.2 | 163 | 193 | 15 | 11 |
| 05:00 | 49.0 | 75.9 | 172 | 211 | 16 | 12 |
| 06:00 | 52.0 | 71.2 | 193 | 242 | 12 | 10 |
| 07:00 | 53.0 | 75.1 | 234 | 252 | 13 | 9 |
| 08:00 | 48.0 | 76.9 | 263 | 296 | 18 | 16 |
| 09:00 | 45.0 | 79.6 | 281 | 289 | 15 | 21 |
| 10:00 | 42.0 | 81.6 | 273 | 299 | 16 | 26 |
| 11:00 | 40.0 | 86.0 | 293 | 326 | 13 | 29 |
| 12:00 | 39.5 | 82.0 | 312 | 332 | 21 | 21 |
| 13:00 | 45.0 | 83.5 | 302 | 321 | 19 | 16 |
| 14:00 | 48.0 | 85.3 | 331 | 354 | 13 | 20 |
| 15:00 | 51.0 | 79.6 | 316 | 342 | 11 | 12 |
| 16:00 | 59.0 | 81.9 | 296 | 332 | 17 | 16 |
| 17:00 | 64.0 | 83.6 | 264 | 326 | 13 | 19 |
| 18:00 | 67.0 | 75.6 | 286 | 349 | 12 | 9 |
| 19:00 | 61.0 | 78.3 | 273 | 301 | 19 | 11 |
| 20:00 | 59.0 | 83.9 | 231 | 286 | 10 | 16 |
| 21:00 | 64.0 | 81.7 | 221 | 263 | 11 | 13 |

续表 2

| 统计 时段 | 平均速度/(km·h ⁻¹) | | 主线交通量/(veh·h ⁻¹) | | 匝道排队长度/pcu | |
|----------|----------------------------|-----------|------------------------------|-----------|------------|-----------|
| | 无控制 | ALINEA 控制 | 无控制 | ALINEA 控制 | 无控制 | ALINEA 控制 |
| 22:00 | 58.0 | 76.6 | 198 | 276 | 16 | 18 |
| 23:00 | 63.8 | 83.4 | 176 | 232 | 9 | 17 |
| 24:00 | 60.9 | 79.2 | 168 | 213 | 6 | 10 |
| 平均 | 52.93 | 77.6 | 235 | 270 | 14 | 16 |

从表 2 可知:在主线平均运行速度方面,无控制策略和 ALINEA 控制策略主线平均运行速度分别为 52.93、77.64 km/h,采用 ALINEA 控制策略情况下主线平均运行速度增加了 24.47 km/h,提升了 46.2%;在主线交通量方面,无控制策略和 ALINEA 控制策略主线平均交通量分别为 235.5、270.08 veh/h,采用 ALINEA 控制策略情况下主线平均交通量增加了 34.58 veh/h,提升了 14.7%;在匝道影响方面,无控制策略和 ALINEA 控制策略匝道平均排队长度分别为 13.79、15.50 pcu,采用 ALINEA 控制策略情况下匝道平均排队长度增加了 14.7%。

由以上分析可以看出,ALINEA 匝道管控能够有效提升主线平均运行速度和交通量,与无控制对比,平均交通量提升 14.7%、平均运行速度提升 46.2%;ALINEA 对主线运行速度提升效果更为显著。但是,采用 ALINEA 匝道管控阶段放行策略,导致匝道排队长度增加,是以牺牲匝道交通运行状态为代价保证主线运行效率的提升。

4 结语

该文从匝道管控技术原理、管控策略、控制算法方面出发,论述城市快速入口匝道管控策略和流程,并基于 VISSIM 仿真平台,以实际观测数据为基础,对比分析 ALINEA 管控策略和无管控情况下交通状态,分析结果表明:ALINEA 匝道管控能够有效提升主线平均运行速度和交通量。但是,ALINEA 匝道管控阶段放行策略是以牺牲匝道交通运行状态为代价保证主线运行效率的提升。因此,如何防止匝道排队长度溢出影响关联道路运行状态是下一阶段研究的重点。

参考文献:

[1] CJJ 129—2009 城市快速路设计规程[S].

[2] Jack Reilly, Samitha Samaranayake, Maria Laura Delle Monache, et al. Adjoint—Based Optimization on a Network of Discretized Scalar Conservation Laws with Applications to Coordinated Ramp Metering[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2015, 167(2):733—760.

[3] Arianne Mizuta, Kim Roberts, Les Jacobsen, et al. Ramp Metering: A Proven, Cost—Effective Operational Strategy—A Primer[R]. FHWA—HOP—14—020, 2014.

[4] 孙剑,刘好德,李克平. 城市干道交通信号协调控制仿真优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009(11).

[5] Sun J, Zhang S, Tang K S. Online Evaluation of an Integrated Control Strategy at On—Ramp Bottleneck for Urban Expressways in Shanghai[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2014, 8(8):648—654.

[6] 乔彦甫,赵斌,方传武,等. 基于 ALINEA 算法的城市快速路匝道控制方法[J]. 西南交通大学学报, 2017(5).

[7] 方传武. 城市快速路入口匝道流量控制研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2016.

[8] 郑飞,杜豫川,孙立军. 基于 ALINEA 算法的上海快速路入口匝道控制方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009(2).

[9] FHWA(2006) Ramp Management and Control Handbook[S].

[10] 朱炯. 高速公路入口匝道与路段可变限速控制方法研究及实现[D]. 浙江工业大学硕士学位论文, 2012.

[11] 林炜鑫. 数据驱动的城市快速路匝道自适应控制研究[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2019.

[12] Markos Papageorgiou, Habib Hadj—Salem, F Middleham. Alinea Local Ramp Metering—Summary of Field Results[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2003(1 856):74—86.

[13] 张海军. 城市高速道路入口匝道动态协调控制方法研究[D]. 同济大学博士学位论文, 2005.

[14] 周小鹏. 城市快速路入口匝道控制研究[D]. 同济大学博士学位论文, 2006.