最大压力路口调度中等待保护与换向代价的仿真研究

以支路长等待和整批平均延误为评价指标

李京天 首都师范大学附属中学 高中

摘要

主路车多、支路车少时，优先放行主路会让支路久等，但频繁转去放支路又可能拖慢整体通行。本研究用四向直行路口仿真比较这两种影响。各组使用相同车流和车辆运动程序，只改变放行安排。第五轮 160 次试验中，加入等待保护后，偏流支路 P95 减少 39.85%，整批平均延误却增加 34.21%；只加入等待权重没有出现同样的改善。后续围绕保持时间、排队情况、保护批量和许可范围继续修改。最新一批 360 次试验中，8 米下限方案使支路 P95 减少 13.07%，但偏流和潮汐车流的平均延误分别增加 27.62%和 23.04%。目前还没有方案同时达到预设的等待和效率要求，独立确认试验尚未开展。研究得到的主要认识是：等待保护可以让部分支路车辆更早通过，但如何减少对其他车辆的影响，仍未解决。

关键词 最大压力调度 等待保护 支路长等待 换向代价 同批车流仿真

本研究的主旨

研究最关心的是，支路少等一些以后，其他车辆会多等多少。试验先比较有无等待保护，再分别关闭各项设置，检查究竟是哪项改动起作用；后续才调整放行时间和提前发许可的距离。

主要看两项数据：南北支路的额外入区等待 P95，以及整批车辆的平均延误。P95 是把等待时间从短到长排列后，约 95%的车辆不超过的时间，比只看平均值更容易发现久等问题，但它不是最长等待。

1 研究问题与已有工作

1.1 为什么同时研究支路久等和整体代价

主路不断来车时，按车辆多少决定先放哪边，少数支路车辆就可能一直排在后面。加入等待保护，是想给这些车辆一个更早通过的机会。不过，主路也会因此暂停发许可。试验既要看支路少等了多久，也要看全部车辆的延误变化。

项目最早关注路径冲突和同时通行，之后加入连续制动与完整等待计时。本文只讨论统一模型下的最大压力和改进规则。早期八车道、右转动画作为选题背景保留，相关数值不与现在的四向直行试验合并。

1.2 已有方法与本文的位置

这项研究并不是从零提出路口协同控制。Dresner 和 Stone 研究过预约通行[1]；Varaiya 讨论了最大压力控制、最短放行时间和队列加权[2]；也有研究考虑道路容量限制[3]。本项目借鉴这些思路，把问题缩小到一个直行路口，具体比较等待保护的收益和代价。

Liu 和 Gayah 研究了把累计延误用于最大压力控制的方法[4]。本项目设置了借鉴延误总量思想的对照，但没有完整复现其路网和定义。Tan 的预印本摘要讨论了决策间隔与切换损失的关系[5]；本研究只核对摘要，没有复现其中的完整算法。

本研究的重点是把规则写清楚，并在相同车流下逐项比较。每次改动保留程序和原始结果，效果变差的方案也留下，方便查出下一步该改什么。

1.3 本研究具体比较什么

问题一：等待保护能否让偏流支路中等得较久的车辆更早进入路口？整批平均延误和最差方向的等待会怎样变化？第五轮四组对比主要回答这个问题。

问题二：如果结果发生变化，主要是等待加权、等待保护，还是普通保持时间起作用？为此，把各项设置分别打开和关闭，并设置时间参数相同的无保护对照。

问题三：能否通过缩短提前发许可的距离、调整保持时间，在保留支路改善的同时减少整体代价？后续试验和另一车辆仿真平台的小样本运行用于检查这一思路。

2 路口模型和放行规则

2.1 模型保留了哪些条件

模型包含东西南北四个方向，每个方向只有一条直行车道。东西可以同时通过，南北也可以同时通过，但两组不能同时占用交叉区域。出口假定畅通。暂时进不了入口的车辆仍排在模型外，从最初请求时刻开始计时。当前模型没有加入转弯、行人、非机动车或出口堵塞。

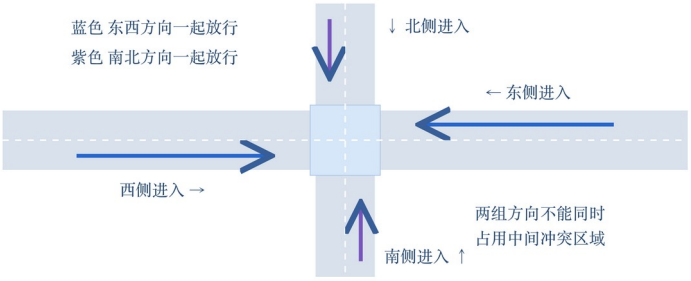


图 1 共同直行路口及允许同时放行的两组方向 示意图不是北京真实路口测绘图

车辆按基于 IDM 的跟车关系运动[6]。两组共用加速、减速、跟车、停车和风险制动程序，参数也相同。改进只发生在放行安排：谁先获准、何时获准、何时换向。许可时刻不同，实际车速和停车次数自然可能不同。

表 1 各组共同使用的车辆与计算参数

参数	取值	含义
车辆尺寸	4.5 米 × 1.8 米	长和宽
最高速度	11.11 米/秒	约 40 千米/小时
最大加速度	2.0 米/秒²	逐步加速
通常刹车减速度	2.5 米/秒²	正常制动设置
紧急刹车减速度	6.0 米/秒²	异常接近时使用
最小净车距	2.5 米	前车车尾到后车车头
跟车时间参数	1.2 秒	IDM 跟车设置
计算间隔	0.1 秒	各组相同
原对照许可距离	距停止线 45 米内	放行策略参数 第七轮另列

模型沿路线记录车头的位置。停止线在 141.8 米，路口入口在 142.8 米；车头到达 162.7 米时，车尾已经离开冲突区；路线终点在 290 米。程序检查未获准进入、交叉方向同时占用和车身重叠。试验中没有出现这些事件，只能说明已运行的样本，不代表真实道路上的安全认证。

2.2 最大压力和等待保护

2.2.1 原最大压力怎样放行

一般的最大压力方法会考虑上游排队和下游拥堵。本模型出口不堵塞，下游压力取零，两组方向的通行能力相同，因此用尚未获准的上游车辆数 Q 表示方向压力，模型外的队列也算在内。这是针对当前路口的简化，不能等同于完整城市路网算法。

原对照的最短许可窗口是 6 秒，最长是 30 秒。另一组方向有车时，当前窗口满 6 秒后，如果对方车更多，或者当前窗口已满 30 秒，就提出换向。此后先停止发新许

可，等已经获准的车辆全部离开冲突区，再放另一组。已经发出的许可不强行撤回。等待车辆清空路口的时间不算在 30 秒内。

2.2.2 等待加权和等待保护

车辆从提出请求到接近路口，本来就需要一段时间。因此，调度中估算等待时，要用当前时刻减去请求时刻，再减去最少自由接近时间；结果为负时按零计。原 45 米许可距离下，这个参考时间约 11.09 秒。每组方向取尚未获准车辆中的最大值 W。它是调度估计值，不能直接当作最后统计的实际额外等待。

等待加权把得分写成 S = Q + 0.2W，让等待时间也参与方向选择。等待保护则规定：另一组有车、W 达到 25 秒，而且当前窗口满 6 秒时，就提出换向。完整方案同时使用这两项。这里的 25 秒只是触发换向的条件，不保证每辆车都能在 25 秒内通过。

表 2 第五轮四组拆分开关 其余条件一致

方案	等待加权 0.2	25 秒保护线
最大压力对照	关闭	关闭
仅等待加权	启用	关闭
仅等待保护	关闭	启用
完整方案	启用	启用

2.2.3 保护条件与普通保持

第六轮后期又增加了一个服务时钟：只要某组仍有获准车辆占用冲突区，就更新这组最近一次得到服务的时刻。另一组的估算等待和距上次服务的时间都达到设定间隔时，才触发保护。第七轮把间隔固定为 26 秒，并与相同设置但关闭保护的版本比较。它与第五轮 25 秒单时钟方案的条件不同，结果分开报告。

第七轮设置了 12、18、24 秒普通保持时间，作用是避免仅因压力变化就过早换向。当前方向没有车时仍可提前换向；等待保护和 30 秒上限仍可在满 6 秒后触发。第五轮许可距离统一为 45 米；第七轮的 30 米、尾段 12 米方案只改变发许可的条件，不改变车辆减速模型。比较保护作用时，两组必须使用相同的保持时间和许可距离。

3 对比试验怎样进行

3.1 各组读取同一批车流

每批先生成 1000 辆车，保存请求时刻和方向，各方案都读这份表。这样比较时，车辆输入相同。偏流按 80 比 20 的概率生成，不要求刚好有 800 辆主路车和 200 辆支路车。统计等到 1000 辆全部驶离后再做，场外排队和最后通过的车辆都计入。

表 3 五种理想化车流输入

场景	生成时段	四向车辆的生成方式
低负荷均衡	1800 秒	各方向概率相同，请求时刻均匀抽样
高负荷均衡	600 秒	各方向概率相同，请求时刻更密集
主支路偏流	1200 秒	东西合计 80%，南北合计 20%
成团到达	1200 秒	约半数在前 15%时段，约半数在后 40%时段；方向等概率
潮汐切换	1200 秒	前半段东西 80%，后半段南北 80%

“低负荷”和“高负荷”只是本模型中输入车辆疏密的相对名称，没有用北京路口实测流量标定。每次最多观察 24000 秒，从最早的原始请求开始计时，也保留开始阶段的数据。

3.2 原始比较与后续开发分开

表 4 本文证据的分层与用途

阶段	同场景编号数	实际运行	用途
第五轮原始四组对比	8	160	测量等待保护的收益及代价
第六轮六批开发	每组 4	960	探索保护间隔与使用条件
第七轮三批开发	每组 4	520	探索许可距离与普通保持
尾段方案跨平台复核	每场景 2	24	两引擎小样本机制复核
24 秒保持方案跨平台先导	每场景 1	8	检查有利和不利场景
后续独立统计确认	未执行	0	无待检验方案达到同时达标要求

第五轮使用编号 2100 至 2107，计划在 2026 年 11 月 7 日 20 时 34 分保存，约 20 时 36 至 38 分完成运行。整体延误增加后，后续试验才提出定量改进要求。第六、第七轮换用新的开发编号，每次修改另存版本；另一平台的先导运行另计。

3.3 怎样统计和判断结果

3.3.1 延误和等待分别怎样算

整批平均延误的算法是：对每辆车，计算从原始请求到路线终点的总耗时，减去没有其他车辆干扰时的耗时，再对 1000 辆求平均。额外入区等待则计算到车头进入路口为止的差值。自建模型的单车参考时间分别为 28.90 秒和 15.60 秒。两项都包含模型外排队和慢行影响，不只是红灯前停车的时间。

偏流支路 P95 把南北车辆的额外入区等待合在一起计算。最差方向 P95 则先分别计算四个方向，再取其中最大值。只有固定偏流场景中的南北方向代表少数车流，其他场景统一称南北 P95。清空累计耗时记录停止发新许可后，等待已获准车辆离开所花的时间；它不能与整批延误直接相加。

3.3.2 后续改进的判断要求

表 5 第六轮起采用的代价约束及第七轮增加的匹配要求

比较	支路等待目标	整批平均延误约束
相对原最大压力	偏流支路 P95 至少减少 15%	偏流增加不超 5% 其他四场景不超 3%
第七轮相对同设置无保护对照	偏流支路 P95 再减少 10%	五场景增加均不超 5%
运行与诊断	1000 辆全部完成	指定安全诊断全部为零

表中的比例是后续开发前固定的判断要求，不是行业标准或比赛评分线，也没有用真实出行成本来标定。只有同时达到这些要求，才把规则固定下来，用未参与修改的新编号做确认。参数相同的无保护对照，还可以帮助判断改善是否只是延长保持时间带来的。

3.3.3 怎样处理随机差异

先比较同一个随机编号下两种方案的差值，再汇总不同编号。第五轮对 8 批差值重复抽样 20000 次，得到 95%参考区间，用来观察随机变化范围。由于没有统一调整多项指标，这些区间不能直接证明所有比较都显著。第七轮每组只有 4 个开发编号，除探索区间外，也为 12 项事先列出的比较给出了更保守的调整区间。完整数值随数据保留。

这里把一批车流作为一次随机输入，1000 辆车不是 1000 次独立试验。已经反复用来修改参数的编号不再用于独立确认。第六轮 4100 至 4119、第七轮 6100 至 6119 均未用于独立确认，相关计划及变更另存。

4 等待保护的收益和代价

4.1 五种车流下的比较

表 6 第五轮最大压力与完整方案 秒 每项为八批指标均值

场景	最差方向 P95 对照 → 完整	平均延误 对照 → 完整	平均延误变化
低负荷均衡	37.76 → 39.20	16.45 → 16.51	+0.38%
高负荷均衡	770.46 → 799.07	377.36 → 386.25	+2.36%
主支路偏流	212.12 → 272.76	92.71 → 124.43	+34.21%
成团到达	486.79 → 507.55	183.69 → 186.98	+1.79%
潮汐切换	215.74 → 273.81	87.12 → 122.32	+40.42%

完整方案没有降低任何一种车流下的最差方向 P95 均值。低负荷均衡的差值区间包含零，变化还不明确。其余四种车流的平均延误都增加，潮汐增加 40.42%。固定保护条件在主次方向变化时表现较差。

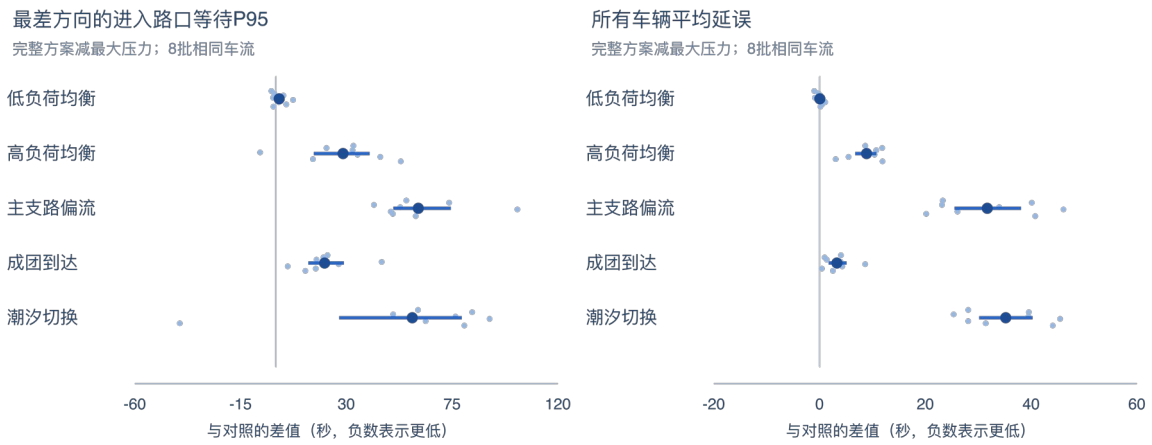


图 2 第五轮完整方案减原最大压力 浅点为全部八批 深点为均值 横线为 95%参考区间

4.2 支路少等是否代表整体受益

偏流支路 P95 从 51.00 秒降到 30.67 秒，减少 39.85%。8 批的平均差为−20.32 秒，95%参考区间为−23.75 至−16.88 秒。与此同时，整批平均延误从 92.71 秒升到 124.43 秒，增加 34.21%，最差方向 P95 从 212.12 秒升到 272.76 秒。支路少等了，整体却更慢，这正是后续修改要解决的问题。

4.3 分别开关加权和保护

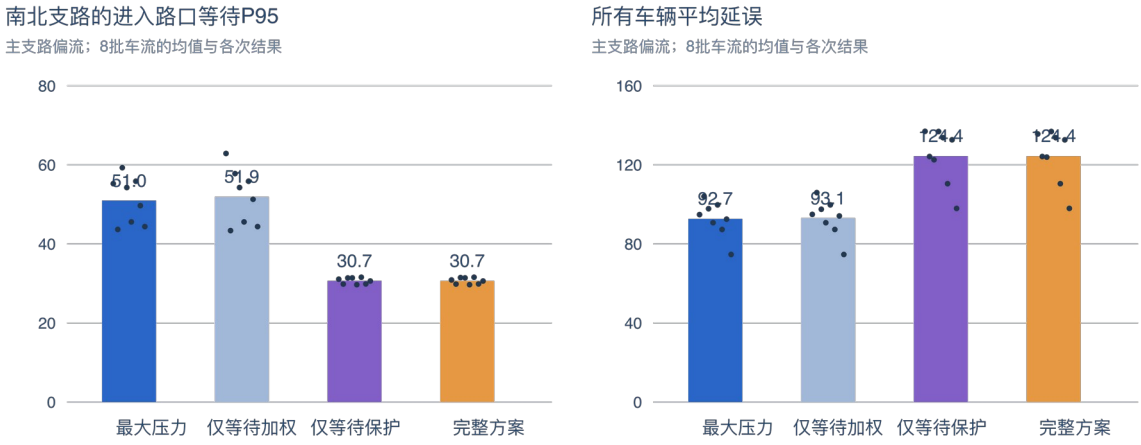


图 3 偏流车流的四组拆分对比 柱为八批均值 小点为各批结果

表 7 第五轮偏流拆分结果 时间为秒 换向为八批合计

方案	支路 P95	平均延误	保护触发	换向总数
最大压力对照	51.00	92.71	0	383
仅等待加权	51.93	93.13	0	385
仅等待保护	30.68	124.44	423	467
完整方案	30.67	124.43	423	467

只加入等待权重，支路 P95 为 51.93 秒；只加入保护，则为 30.68 秒，平均延误为 124.44 秒，已经接近完整方案。完整方案与仅保护方案的支路 P95 平均只差−0.01 秒，95%参考区间为−0.07 至 0.04 秒，平均延误差的区间为−0.50 至 0.50 秒。因此，这批数据中的主要变化来自保护，加权项还没有显示出额外好处。

完整方案共换向 467 次，原对照为 383 次，其中 423 次记录了保护触发理由。这个 423 不能直接当作新增换向次数，因为同一次换向也可能同时满足压力或最长窗口条件。现有日志能看出服务顺序变了，但还不足以精确分开每种触发条件造成的延误。

看到上述结果后，后续工作转向保护条件和保持时间。原对照继续保留 6 秒最短窗口与 30 秒上限，作为后续比较的基础。

5 调整保持时间与许可距离

5.1 调整保护间隔和计时方式

表 8 第六轮六批开发及未达标路线

开发批次	运行数	比较内容与实际判断
第一批	180	保护 35/45 秒、队列差补偿、最短保护窗口；全部未达联合目标。
第二批	140	可刹停时撤回预约；保护与效率的综合表现更差，淘汰。
第三批	160	只保护不超过 2 或 4 辆的小队列；效率损失小，支路 P95 改善不足。
第四批	160	去掉绝对辆数上限，改用队列比例；仍未达到全部门槛。
第五批	160	同时看请求年龄和上次被服务后的空档；短间隔代价仍大。
第六批	160	服务时钟 26 至 29 秒的新开发车流；按预案判断是否确认。

第六轮六批共 960 次开发，依次尝试保护间隔、排队条件、可刹停时撤回预约，以及服务时钟。撤回预约只在停止线前、相关上游车辆满足制动条件时进行。虽然没有触发指定安全计数，但偏流平均延误增加 60.68%，所以放弃这条路线。已有研究讨论过预约取消[7]，本项目不据此声称首创。

第一批计划原本安排：即使没有合格方案，也确认代价最小的一种。后来因为没有达到要求，停止了这项 400 次任务，并在下一批前另存了计划变更。没有运行的任务不计入 960 次，也不把开发尝试写成一次成功的独立确认。

5.2 单项改善仍未同时达标

表 9 第六批四个保护间隔的相对变化 百分比

设置代号	偏流支路 P95	偏流平均延误	其他场景最大增幅	联合目标
service26	-19.37	+7.58	+8.34	未通过
service27	-10.68	+4.85	+3.83	未通过
service28	-10.32	+3.09	+2.75	未通过
service29	-11.89	+2.96	+2.83	未通过

26 秒服务时钟让偏流支路 P95 减少 19.37%，同时使平均延误增加 7.58%。改成 28 秒后，延误增幅缩小到 3.09%，支路 P95 却只减少 10.32%。两项要求没有同时达到。偏流的 4 个编号中，28 秒服务时钟和只改变最短保护窗口的对照，三项主要指标逐批相同，暂时看不出新增时钟的额外作用。

5.3 调整提前发许可的距离

5.3.1 从清空日志提出问题

清空日志提示，换向时等待已获准车辆离开，要花掉一部分时间。第七轮便从两处尝试：让车辆离路口近些再发许可，或者减少普通换向。三批分别运行 200、160、160 次，共 520 次；各批的程序、计划和输入编号单独保存。

第一批把提前 45 米发许可的范围改为 20 米、30 米，或按当前速度和加速度估计的 2 秒、3 秒接近距离；后两种保留 8 米下限。每种设置都配有关闭保护的对照。越接近路口才获准，车辆越可能提前减速，所以清空时间缩短，不一定意味着整体更快。这里的 2 秒、3 秒也不是实际到达时间的保证。

第二批只在接近 30 秒窗口结束时收窄许可范围，下限设为 8、12、20 米。但是，在高负荷的 4 批原对照中，281 次换向由压力触发，只有 2 次由最长窗口触发；换向请求出现时，窗口平均只有约 7.58 秒。因此，只在窗口末尾起作用的规则很少遇到主要换向时刻。第三批再尝试 12、18、24 秒普通保持时间，各配关闭保护的对照。

表 10 第七轮代表保护方案相对同批原对照的变化

方案	偏流支路 P95	偏流平均延误	高负荷平均延误
30 米范围加保护	+12.08%	+13.34%	+8.33%
尾段 12 米加保护	-25.15%	+15.81%	+0.01%
12 秒保持加保护	-27.49%	+24.65%	-2.91%
18 秒保持加保护	-35.79%	+55.50%	-7.22%
24 秒保持加保护	-38.64%	+75.94%	-9.62%

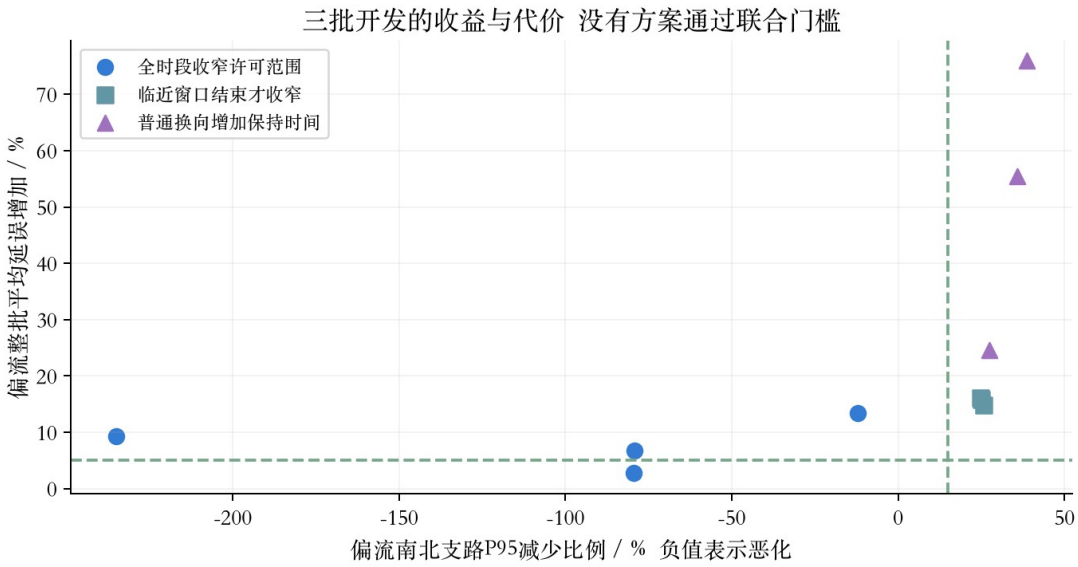


图 4 第七轮偏流收益与代价 每点四个开发编号 虚线只标出偏流两项要求

5.4 长保持在不同车流下的效果

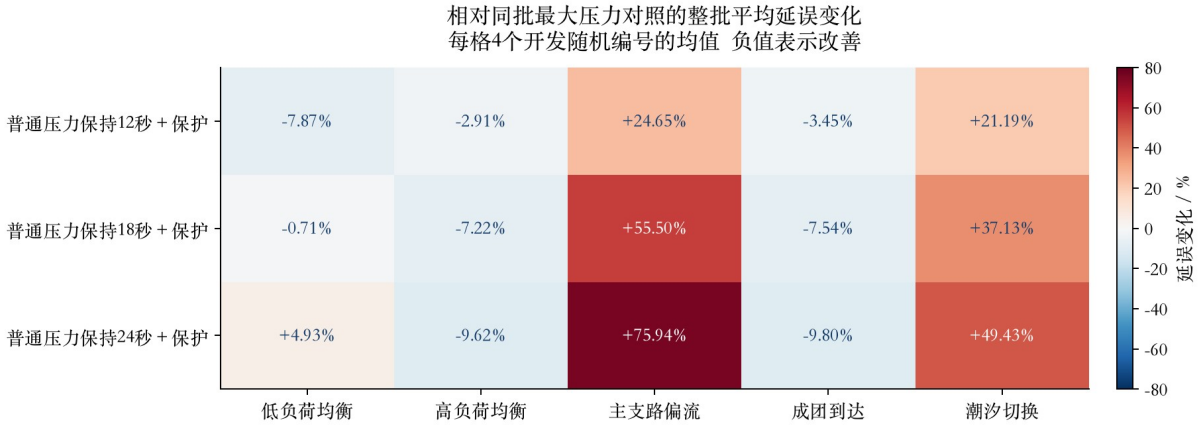


图 5 第七轮整批平均延误相对原对照的变化 负值表示减少 每格四个开发编号

24 秒普通保持加保护在高负荷均衡中有效：平均延误从 379.70 秒降到 343.19 秒，减少 9.62%；成团到达减少 9.80%。但偏流从 105.30 秒升到 185.27 秒，增加 75.94%，潮汐增加 49.43%，低负荷均衡增加 4.93%。这一组结果提醒，适合密集均衡车流的保持时间，未必适合主支路差别大的车流。

5.4.1 相同保持时间下再检查保护

高负荷均衡中，只用 24 秒保持时，平均延误已经降到 342.38 秒，加保护后是 343.19 秒。也就是说，主要改善在延长保持时间时就已经出现。偏流中，保护相对相同保持时间的无保护对照，让支路 P95 再减少 14.34%，但相对原最大压力，整体延误仍然增加很多。

表 11 24 秒保持的匹配比较 第七轮四批均值 秒

车流与方案	整批平均延误	南北入区等待 P95	清空累计耗时
高负荷 原最大压力	379.70	737.29	876.05
高负荷 仅 24 秒保持	342.38	661.41	281.92
高负荷 24 秒保持加保护	343.19	658.20	285.75
偏流 原最大压力	105.30	51.26	397.48
偏流 仅 24 秒保持	186.95	36.72	242.77
偏流 24 秒保持加保护	185.27	31.46	248.12

偏流的清空时间虽然下降，平均延误仍然上升。少花清空时间只是其中一部分，车辆在各方向怎样排队、何时轮到放行，也会影响最终结果。三批都没有达到全部要求，原计划 300 次的新编号确认未启动。

6 用另一车辆平台做小样本复核

为了检查结果是否过度依赖自建运动程序，又在 SUMO 1.28.0 中使用其原生 IDM 运动和停车指令，不直接写入车辆速度、加速度或位置。两个平台读取同一份到达表，共用上层放行规则，但分别计算车辆运动，并分别测量单车无干扰时的进入和驶离耗时[8,9]。因此，这是对另一种运动实现的检查，并不是把整套调度程序完全独立重写。

表 12 各引擎相对本引擎原对照的平均延误变化

方案与场景	编号数	自建平均延误	SUMO 平均延误
尾段 12 米加保护 高负荷	2	+0.03%	+0.00%
尾段 12 米加保护 偏流	2	+19.59%	+18.69%
24 秒保持加保护 高负荷	1	-9.84%	-10.08%
24 秒保持加保护 偏流	1	+111.55%	+111.61%

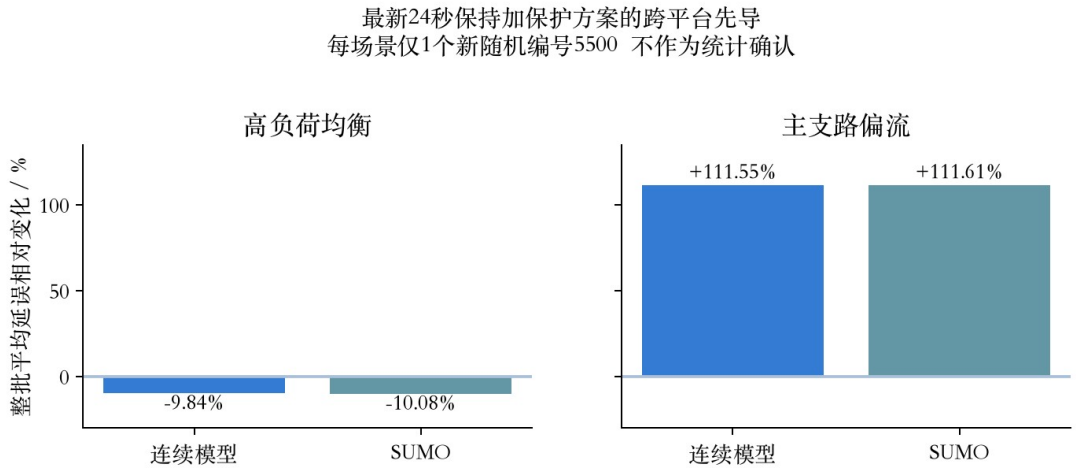


图 6 24 秒保持加保护的新编号 5500 先导 每场景仅一个编号 不用于统计确认

尾段 12 米方案在第二批完成前就指定，每种车流用 2 个新编号，共 24 次运行；24 秒保持方案在开发后用于检查条件差异，每种车流用 1 个新编号，共 8 次。合计 32 次全部完成，指定安全计数为零。最新偏流支路 P95 在两个平台分别减少 33.27%和 34.57%，但平均延误都增加约一倍。变化方向相近只是一条线索，样本还太少，不能证明改善幅度可以推广。

第六轮还对已放弃的预约撤回方案做过一次 SUMO 先导，目的是检查停车指令能否恢复。这次不计入上述 32 次，也不能作为其他保护方案已经通过复核的证据。第五轮完整方案与后续方案不同，不能借用后者的结果，说它本身已通过跨平台验证。

7 根据排队情况继续改进

7.1 按排队状态选择保持时间

固定长保持在偏流下代价较大，因此第八轮改为按排队情况决定是否使用长保持。每 0.1 秒统计两组尚未获准的车辆数 Q，包括模型外队列。总量≥12，且较少一组占比≥35%时，启用 24 秒普通保持；总量<8 或占比<25%时，恢复 6 秒。介于这些阈值之间时，沿用上一状态，避免来回切换。这些是模型试验参数，不来自北京实测流量。

26 秒双时钟保护仍可在最短 6 秒窗口后触发换向；当前方向没有车时可提前换向，另保留 30 秒触发上限。许可距离固定 45 米，已获准车辆先通过，再改变方向。减速、跟车、停车和风险制动程序都没有改。

表 13 第八轮八组对照与拆分开关

方案	总量条件	占比条件	等待保护
原最大压力	无	无	无
仅等待保护	无	无	26 秒
固定 24 秒保持	固定 24 秒	固定 24 秒	无
固定保持加保护	固定 24 秒	固定 24 秒	26 秒
状态保持不加保护	启用	启用	无
完整状态保持加保护	启用	启用	26 秒
只看总量加保护	启用	无	26 秒
只看占比加保护	无	启用	26 秒

本轮仍用五种车流，采用 7100 至 7107 这 8 个新开发编号，每组 1000 辆，共 320 次。规则和程序在开跑前保存，不根据本轮结果再调整阈值。完整规则分别与原最大压力、固定长保持加保护、相同规则关闭保护，以及只保留单项判断条件的版本比较，用来区分各项改动的作用。

第八轮目录保存了计划、40 份共享输入、逐车结果、轨迹、调度事件和分析，记录之间的连接与文件校验均通过。统计仍以随机编号为单位，保留每个编号的结果、配对差、95%探索区间和更保守的区间。这些是开发结果，不是独立确认。

7.1.1 多种车流的结果

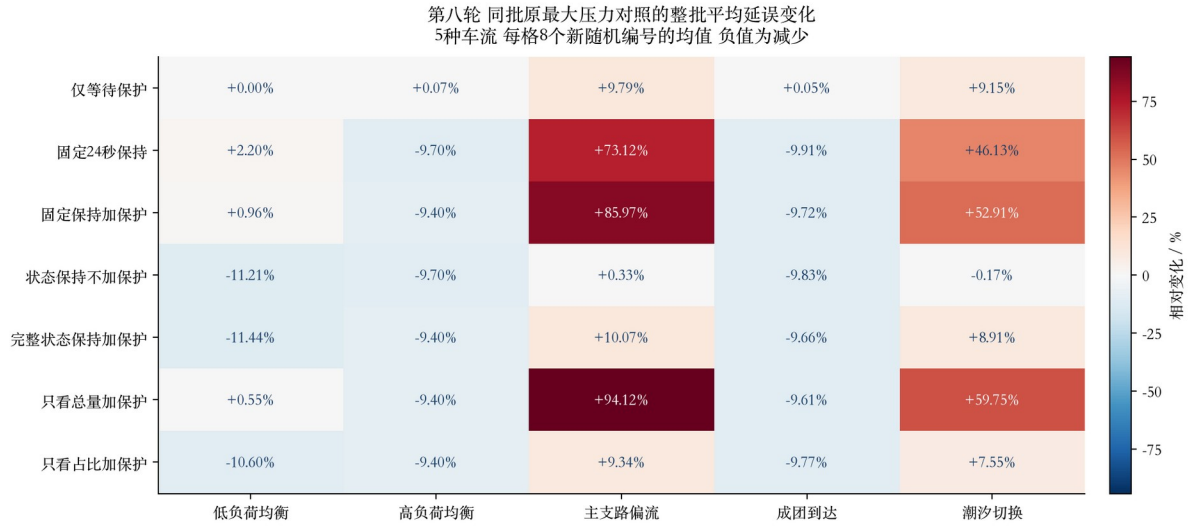


图 7 第八轮平均延误相对同批原最大压力的变化 每格 8 个编号均值

表 14 完整状态规则与原最大压力的比较

车流	对照均值 秒	完整均值 秒	均值变化	南北 P95 变化
低负荷均衡	17.01	15.07	-11.44%	-7.93%
高负荷均衡	378.75	343.16	-9.40%	-10.53%
主支路偏流	100.29	110.40	+10.07%	-17.80%
成团到达	183.33	165.63	-9.66%	-7.73%
潮汐切换	94.05	102.43	+8.91%	+12.18%

完整状态规则让高负荷均衡的平均延误减少 9.40%，但偏流仍增加 10.07%，支路 P95 减少 17.80%。按排队情况选保持时间，确实缩小了一部分偏流代价，距离同时达到各项要求还有差距。

这些结果要放在五种车流中一起看。平均延误算到路线终点，额外入区等待 P95 只算到进入路口；南北方向也只有在固定偏流场景中代表支路。逐编号数据与区间均保留，统计方法沿用第 3 章。

7.1.2 各项判断分别起什么作用

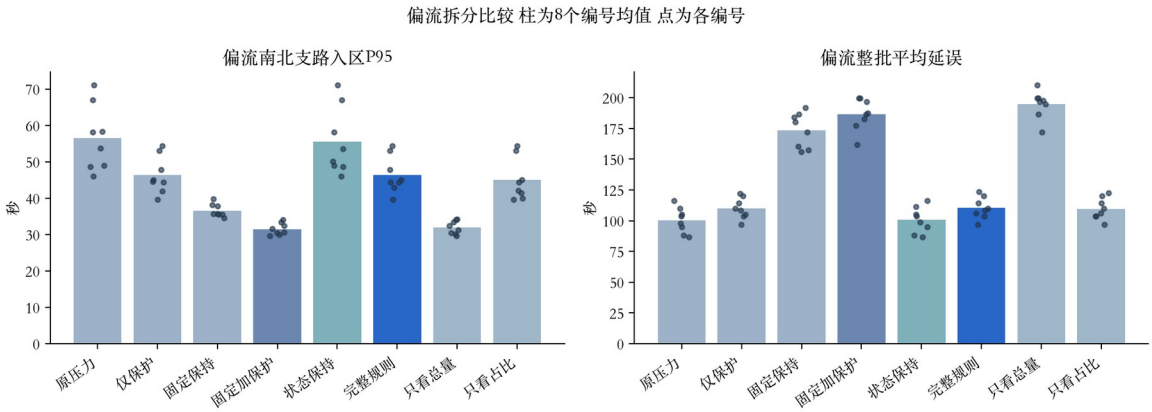


图 8 第八轮偏流拆分比较 柱为 8 个编号均值 点为各编号

与相同状态保持但关闭保护相比，完整规则的偏流平均延误增加 9.71%，支路 P95 减少 16.29%。与固定 24 秒保持加保护相比，平均延误减少 40.81%，支路 P95 却增加 47.32%。这表明降低整体代价时，支路收益也退回了一部分。去掉占比判断后，偏流平均延误相对原压力增加 94.12%；去掉总量判断后增加 9.34%，完整规则增加 10.07%。这一批中，占比判断的作用较明显，总量条件的额外好处还不清楚。

表 15 完整状态规则的预设同时达标要求

对照	车流	指标	实际变化	要求	通过
原最大压力	主支路偏流	支路 P95	-17.80%	≤-15%	是
原最大压力	低负荷均衡	平均延误	-11.44%	≤3%	是
原最大压力	高负荷均衡	平均延误	-9.40%	≤3%	是

对照	车流	指标	实际变化	要求	通过
原最大压力	主支路偏流	平均延误	+10.07%	≤5%	否
原最大压力	成团到达	平均延误	-9.66%	≤3%	是
原最大压力	潮汐切换	平均延误	+8.91%	≤3%	否
状态保持不加保护	主支路偏流	支路 P95	-16.29%	≤-10%	是
状态保持不加保护	低负荷均衡	平均延误	-0.26%	≤5%	是
状态保持不加保护	高负荷均衡	平均延误	+0.34%	≤5%	是
状态保持不加保护	主支路偏流	平均延误	+9.71%	≤5%	否
状态保持不加保护	成团到达	平均延误	+0.19%	≤5%	是
状态保持不加保护	潮汐切换	平均延误	+9.09%	≤5%	否

320 次均完整结束，没有失败或超过观察时限的运行，指定安全计数为零。但完整方案没有达到全部开发要求，所以没有启动独立确认，未使用的编号和失败原因继续保留。本轮没有新增 SUMO 试验，前轮的复核结果不能直接当作本轮证据。

7.2 只服务一小批受保护车辆

7.2.1 怎样限制保护批量

第八轮降低了固定长保持的偏流代价，但保护仍让偏流和潮汐的平均延误增加。第九轮第一批试着把一次保护服务缩短：给支路放一小批车后，尽快把服务机会还给另一组。

本轮继续使用 6/24 秒状态保持、26 秒双时钟保护和 45 米许可范围。只有等待保护触发的下一个窗口采用短时服务，最多发 2、4 或 6 个许可。窗口满 2 秒后，如果已经达到批量、当前方向没有车，或者窗口已满 6 秒，就可请求返回仍有车的另一组。对方没有车时不强制返回，批量上限也不限制这一组独占服务。已发的许可不撤回，仍等获准车辆清空。

这一批除了限制保护批量，还把最早返回条件从 6 秒放宽到 2 秒；车辆运动和制动程序不变。2 秒只决定何时可以提出返回请求，实际换向仍要等获准车辆清空。

表 16 第九轮对照与拆分设置

方案	等待保护	保护访问批量	最短返回
原最大压力	无	普通	普通
状态保持无保护	无	普通	普通
第八轮完整规则	26 秒	普通	普通
短保护最多 2 许可	26 秒	2 许可	2.0 秒
短保护最多 4 许可	26 秒	4 许可	2.0 秒
短保护最多 6 许可	26 秒	6 许可	2.0 秒
4 许可但至少 6 秒	26 秒	4 许可	6.0 秒
只在需求空时返回	26 秒	无上限	2.0 秒

第一批采用 9100 至 9107 这 8 个新开发编号，五种车流、八种方案，每次 1000 辆，共 320 次。另设置最多 4 许可但至少保持 6 秒，以及只在队列为空时提前返回两组对照。4 许可方案在分析前就被指定为展示案例。先按事先保存的要求检查全部开发结果，再决定是否使用 10100 至 10111 进行独立复核。

7.2.2 整体变快但支路更慢

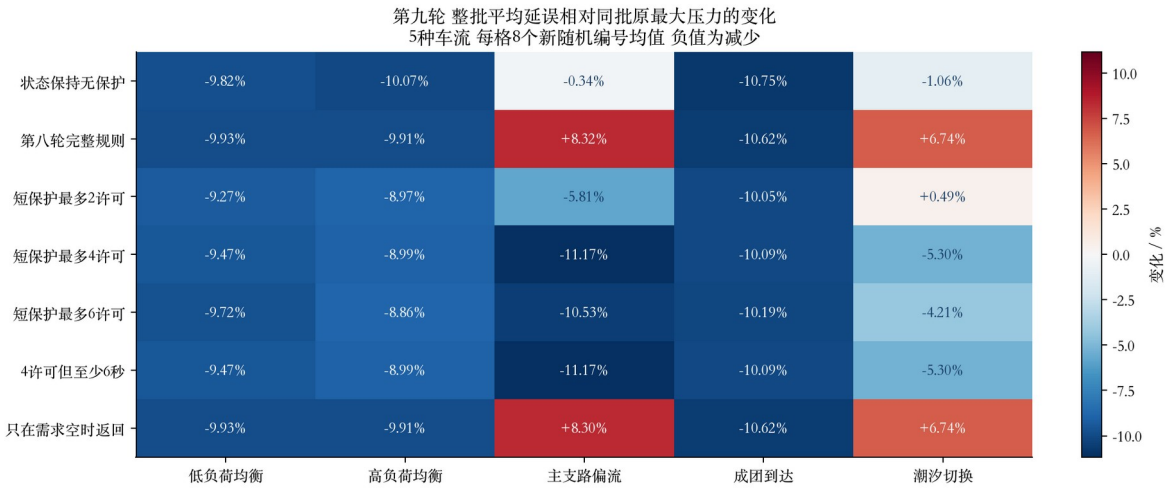


图 9 第九轮各方案相对同批原最大压力的平均延误变化

表 17 4 许可展示方案与同批对照 秒

车流	原压力	第八轮	4 许可	均值变化	南北 P95 变化
低负荷均衡	16.88	15.20	15.28	-9.47%	+0.82%
高负荷均衡	381.76	343.92	347.46	-8.99%	-10.09%
主支路偏流	98.84	107.07	87.81	-11.17%	+565.79%
成团到达	186.67	166.84	167.83	-10.09%	-7.09%
潮汐切换	91.81	98.00	86.94	-5.30%	-12.68%

4 许可方案把偏流平均延误减少了 11.17%，潮汐减少 5.30%，但支路 P95 增加 565.79%。相对同批第八轮规则，偏流和潮汐平均延误分别减少 17.99%和 11.28%。整体变快了，支路却等得更久，保护的主要目的没有达到。

百分比都相对本轮同编号的对照计算，不能把不同批次的百分比直接相减。每种车流有 8 个编号，完整保留逐编号差值和 95%探索区间；另按最多 42 项关键判断补充更保守的调整区间。反复开发后得到的均值，仍不能当作严格的独立确认结果。

7.2.3 分别检查批量和最早返回时间

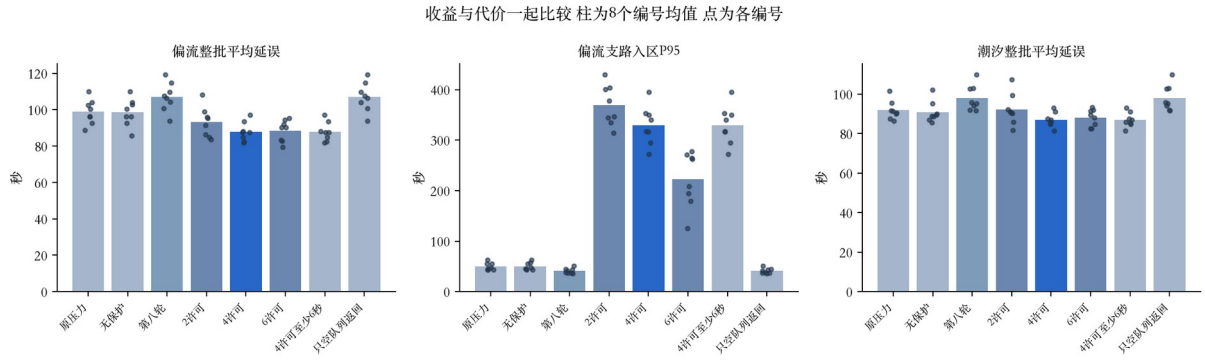


图 10 第九轮拆分对照 柱为 8 个编号均值 点为各编号

同样最多发 4 个许可，把最早返回时间从 6 秒放宽到 2 秒后，偏流平均延误、支路 P95 和潮汐平均延误的变化都为+0.00%。这次没有观察到单独放宽返回时间的作用。与只在保护方向没有车时返回相比，4 许可版让偏流平均延误减少 17.97%，支路 P95 增加 700.22%。

表 18 三个保护访问批量的预设联合判断

待检验方案	偏流支路 P95 变化	偏流均值变化	潮汐均值变化	未通过项	可进复核
短保护最多 2 许可	+645.19%	-5.81%	+0.49%	2	否
短保护最多 4 许可	+565.79%	-11.17%	-5.30%	2	否
短保护最多 6 许可	+349.95%	-10.53%	-4.21%	2	否

这一批没有方案同时达到全部要求，因此没有开展独立复核，实际运行 0 次。有利和不利的结果都保留。

1000 辆全部完成、指定安全计数为零，只是基本检查，还要同时比较等待和效率。对照包括原最大压力、关闭保护的版本，以及第八轮规则。320 次均完整结束，失败 0 次，超过观察时限 0 次；本轮没有新做 SUMO 复核。逐车时刻、轨迹、保护服务状态、许可数和实际运行时间均有记录。

7.3 换向前缩小新许可范围

7.3.1 从上一批失败继续提出问题

限制批量没有保住支路收益，于是第二批不再限制这项批量，而是减少可能换向前给远处车辆发的新许可。第七轮只在 30 秒窗口末尾收窄，较少碰到真正的换向时刻；这一批也把压力和保护可能引起的换向考虑进去。

程序只用当前排队、方向压力、窗口已经持续的时间和两个等待时钟，估计下一次可能换向还要多久。对方有车时先考虑 30 秒上限；对方压力更大时，再考虑 6/24 秒保持时间还剩多少；有保护时，也考虑 26 秒双时钟和 6 秒最短窗口。把最高速度乘预计剩余时间，再减去冲突区长度，与 45 米取较小值，作为许可范围，并保留 8 米或 12 米下限。对方没车时不收窄。

这只是根据当前情况作的估计。后续来车和排队变化可能使实际换向时刻改变，程序没有读取未来车辆请求，也不保证车辆准时到达。原有方向选择、保持时间和保护线仍保留，不限制保护批量，不撤回已发许可，车辆运动和安全检查也不改。

第二批用 9200 至 9207 这 8 个新开发编号，五种车流、九种方案，每次 1000 辆，共 360 次。8 米、12 米方案各配同距离规则的无保护对照，8 米另设只预测压力触发和只预测保护触发两组。8 米展示方案在分析前指定，不按结果挑案例。选取规则和判断要求也在开跑前保存，第一批失败结果没有改写成确认试验。

程序检查覆盖了当前压力、双时钟保护、距离下限和对方无需求等情况。关闭新增预测功能后，原控制器及第一批方案的 2400 个状态快照完全一致。共同运动源码的校验码也保持不变。这些检查用于排除程序改动带来的干扰，不计作正式研究样本。

7.3.2 多种车流的结果

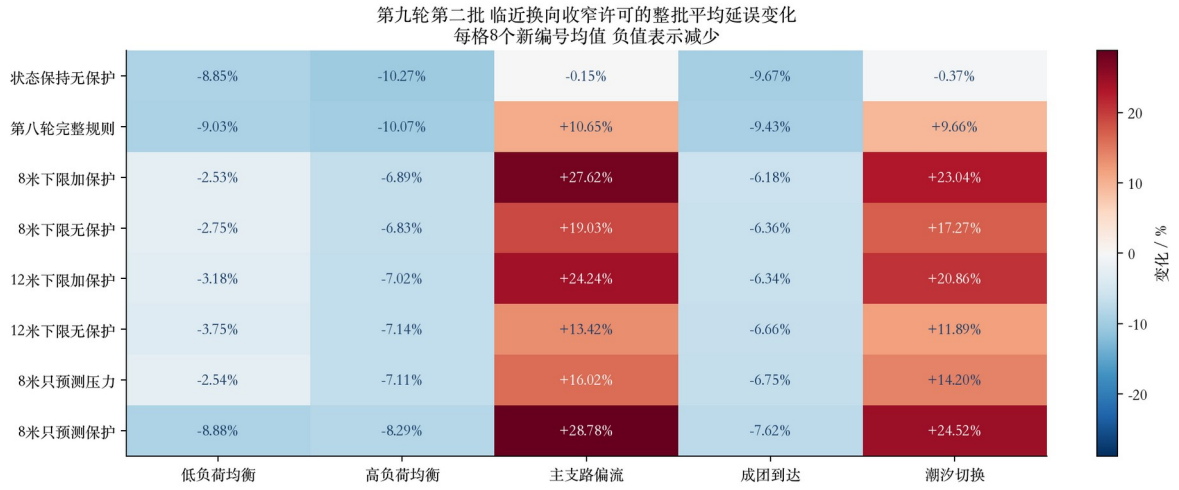


图 11 第二批各方案相对同批原最大压力的平均延误变化

表 19 8 米展示方案与同批对照 秒

车流	原压力	第八轮	8 米保护	均值变化	南北 P95 变化
低负荷均衡	16.57	15.08	16.16	-2.53%	+2.33%
高负荷均衡	381.30	342.92	355.03	-6.89%	-8.10%
主支路偏流	98.74	109.25	126.01	+27.62%	-13.07%
成团到达	180.92	163.87	169.74	-6.18%	-6.37%
潮汐切换	95.45	104.67	117.44	+23.04%	+22.06%

8 米方案使偏流支路 P95 减少 13.07%，但偏流平均延误增加 27.62%，潮汐增加 23.04%。相对同批第八轮规则，偏流和潮汐平均延误还分别增加 15.34%和 12.20%。这条路线留下了一些支路收益，却没有把整体代价降下来。

每格是 8 个编号的指标均值，先在同编号内比较，再汇总编号之间的差值。一批有 1000 辆，不能因此当作 1000 个独立样本。全部逐编号值、95%探索区间和更保守的调整区间保留，不把跨批百分比直接相减。

7.3.3 分别检查预测和保护的作用

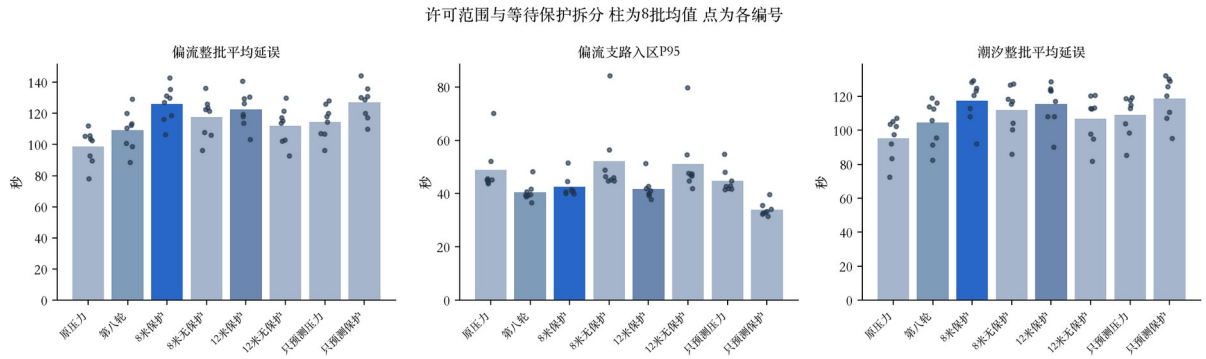


图 12 第二批偏流和潮汐的匹配与预测拆分

同样使用 8 米收窄规则时，加入保护使支路 P95 减少 18.43%，偏流平均延误增加 7.22%。完整 8 米版相对只预测压力触发的版本，偏流平均延误增加 10.00%；相对只预测保护触发的版本，则减少 0.90%。对照分别改变了不同设置，变化量不作简单叠加。

表 20 第二批完整待检验方案的联合判断

待检验方案	偏流支路 P95 变化	偏流均值变化	潮汐均值变化	未通过项	可进复核
8 米下限加保护	-13.07%	+27.62%	+23.04%	6	否
12 米下限加保护	-14.53%	+24.24%	+20.86%	7	否

8 米、12 米两个方案都没有达到全部要求，因此没有进入独立复核，实际运行 0 次。不利结果与有利结果一起保存。

360 次均完整结束，失败 0 次，超过观察时限 0 次，指定安全计数为零；但等待和效率还需同时满足相对原压力、同规则无保护及第八轮的要求。本轮没有北京实测流量标定，也没有新增 SUMO 运行，不能借用前轮结果证明新规则。程序版本、计划、输入和原始记录保存在第九轮第二批目录。

8 结果讨论

8.1 支路少等仍有整体代价

等待保护最明确的作用，是让固定偏流中的支路更早获得服务。第五轮支路 P95 减少 39.85%，同时整批平均延误增加 34.21%，最差方向也等得更久。只看支路会得出“有效”，把全部车辆算进去，结论就需要保留这一代价。

8.2 不能把多个改动一起算成功

拆分比较帮助排除了几种过早的解释。第五轮的主要变化来自保护，未看出加权项的额外收益；第六轮服务时钟与简单窗口对照逐批相同；第七轮高负荷中的主要改善，在只延长保持时间时就已出现。后续应继续保留这种只差一个设置的比较。

8.3 换向设置还没有消除取舍

长保持在高负荷均衡、成团到达中有利，在偏流和潮汐中却拖慢整体。结合清空日志，一种可能的解释是：换向少了，清空耗时随之减少；但两边需求不均衡时，保持太久也让另一边得不到及时响应。目前还没有专门固定清空或排队条件来分别验证这两部分。

8.4 模型和证据有哪些不足

模型离真实路口还很远：只有直行，出口始终畅通，车辆到达也是程序生成的，没有北京实测流量。转弯、行人、非机动车、下游堵塞和通信误差都未加入。现有比例只能描述这些试验；换一套保持、许可或制动参数，结果也可能变化。

样本数仍然偏少。第五轮每组 8 个随机编号，第六、第七轮每组 4 个，跨平台每种情况只有 1 或 2 个。虽然每次有 1000 辆车，但它们属于同一次车流输入。多轮开发后的结果还需要用未参与修改的新编号确认。

原始文件和事件记录便于核对，但本地没有外部可信时间戳。安全方面，目前只检查了指定事件；零计数不能替代更完整的安全证明或真实道路测试。

9 结论与下一步

本研究还没有得到一个同时让支路少等、又能控制整体延误的方案。已经得到的结果是：等待保护能够改善固定偏流支路的长等待，但改善伴随着其他车辆的延误增加。

第五轮的取舍最清楚：支路 P95 减少 39.85%，整批平均延误增加 34.21%，五种车流的最差方向 P95 均值都没有下降。

几组拆分对照还说明，等待加权、服务时钟和保持时间需要分别检查。完整方案有效的部分，不一定来自每一项新增设置。

第七轮 520 次开发和 32 次跨平台运行表明，保持时间的作用与车流结构有关。高负荷下的改善不能直接推到偏流，跨平台的小样本结果也不能替代独立确认。

9.1 接下来怎样验证

第八轮做了 320 次开发，高负荷均衡平均延误减少 9.40%，偏流增加 10.07%，支路 P95 减少 17.80%。第九轮又分别运行 320 次短时保护服务试验、360 次许可收窄试验，仍未同时达标。结果见第 7 章，独立确认均未启动。

下一步先从偏流和潮汐失败的原因入手，每次只改少量设置，再换一批新编号比较。达到事先定好的要求后，再固定规则做独立确认。转弯、出口堵塞和混合交通可以继续扩展，但目前应先弄清已有模型中的问题。

9.2 实际分工与研究记录

本项目中，申报者主要提出研究方向、改进需求、比较方式和展示要求。程序实现、批量运行、统计、制图、资料整理和论文修改使用了 AI 直接辅助。上述工作没有全部作为申报者独立完成的成果。本人后续实际完成的观察、复现和解释将按真实记录补充；教师指导内容待本人和教师核实后补入。

研究输入、程序、试验计划、逐车结果、轨迹、决策和错误更正均保存。网站演示与重置记录单独归档，不计入正式研究次数；自动批量运行的耗时也单独记录，没有据此推算学生个人的研究时长。

参考文献

[1] DRESNER K, STONE P. A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2008, 31: 591-656. https://www.cs.utexas.edu/~aim/papers/JAIR08-dresner.pdf.

[2] VARAIYA P. Max pressure control of a network of signalized intersections[J]. Transportation Research Part C, 2013, 36: 177-195. DOI: 10.1016/j.trc.2013.08.014.

[3] GREGOIRE J, QIAN X, FRAZZOLI E, et al. Capacity-aware back-pressure traffic signal control[EB/OL]. arXiv:1309.6484, 2014 年修订[2026-11-07]. https://arxiv.org/abs/1309.6484.

[4] LIU H, GAYAH V V. Total-delay-based Max Pressure A Max Pressure Algorithm Considering Delay Equity[J]. Transportation Research Record, 2023, 2677(6). DOI: 10.1177/03611981221147051.

[5] TAN C. Decision Timescales in Max-Pressure Traffic Signal Control: Theory, Methodology, and Validation[EB/OL]. 2026-10-23. https://arxiv.org/abs/2610.32280. 本稿仅核对摘要。

[6] TREIBER M, HENNECKE A, HELBING D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. Physical Review E, 2000, 62: 1805-1824. DOI: 10.1103/PhysRevE.62.1805.

[7] DRESNER K, STONE P. Sharing the Road Autonomous Vehicles Meet Human Drivers[C]//IJCAI. 2007. https://ijcai.org/proceedings/2007/204.

[8] ALVAREZ LOPEZ P, BEHRISCH M, BIEKER-WALZ L, et al. Microscopic Traffic Simulation using SUMO[C]//2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems. 2018: 2575-2582. DOI: 10.1109/ITSC.2018.8569938.

[9] SUMO Documentation. Traffic Lights[EB/OL]. https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/Traffic_Lights.html. 核对日期 2026-11-08。

数据与复现入口

表 21 原始目录与本文证据对应

证据	科创比赛材料中的相对目录	关键文件
原始四组对比	第五轮研究_等待保护最大压力	分析结果/最终分析.json
保护条件开发	第六轮研究_等待收益与效率代价	各开发目录/分析结果
许可与保持开发	第七轮研究_预约距离与换向代价	分析汇总/本轮总分析.json
跨平台复核	第七轮目录中的独立平台复核和最新保持方案平台先导	SUMO 汇总与逐次 manifest
公开阅读与沙盘	https://trafficscience.top	研究页面及复现证据包
状态保持开发	第八轮研究_按排队状态选择保持	锁定预案与最终分析
短时保护开发	第九轮研究_短时保护服务	锁定预案及完整拆分分析
许可收窄开发	第九轮研究第二批目录	锁定预案及完整分析

复算时应复制到新目录，保留原始文件。程序默认不覆盖已有运行记录。先核对相同编号的车辆输入和程序版本，再计算各项指标。完整轨迹在本地研究记录包中，网页轻量包提供源码、输入、全部汇总和校验索引。

附录 A 原始四组的完整均值

表 A1 第五轮五场景四组指标 秒 每项为八批均值

场景	方案	最差方向 P95	平均延误
低负荷均衡	最大压力对照	37.76	16.45
低负荷均衡	仅等待加权	38.61	16.56
低负荷均衡	仅等待保护	38.46	16.51
低负荷均衡	完整方案	39.20	16.51
高负荷均衡	最大压力对照	770.46	377.36
高负荷均衡	仅等待加权	771.99	379.10
高负荷均衡	仅等待保护	799.75	385.97
高负荷均衡	完整方案	799.07	386.25
主支路偏流	最大压力对照	212.12	92.71
主支路偏流	仅等待加权	212.56	93.13
主支路偏流	仅等待保护	273.01	124.44
主支路偏流	完整方案	272.76	124.43
成团到达	最大压力对照	486.79	183.69
成团到达	仅等待加权	487.02	184.33
成团到达	仅等待保护	507.65	186.98
成团到达	完整方案	507.55	186.98
潮汐切换	最大压力对照	215.74	87.12
潮汐切换	仅等待加权	208.28	89.05
潮汐切换	仅等待保护	273.80	122.34
潮汐切换	完整方案	273.81	122.32

表 A1 与正文表 6、表 7 来自同一批 160 次运行，不另算试验次数。最差方向 P95 和偏流南北支路 P95 统计的车辆不同，不能互换。每个场景的逐次结果见原分析文件。

附录 B 逐次结果与开发边界

表 B1 第五轮偏流八批车流的原对照与完整方案 秒

随机编号	支路 P95 对照	支路 P95 完整	平均延误 对照	平均延误 完整
2100	55.25	30.88	94.83	135.62
2101	43.67	29.84	104.04	124.21
2102	59.29	31.48	97.82	123.91
2103	54.27	31.41	90.74	136.87
2104	45.57	29.69	99.76	133.74
2105	55.86	31.57	87.31	110.47
2106	49.68	29.88	92.52	132.66
2107	44.38	30.62	74.66	97.97

这 8 个编号属于第五轮事先固定的比较，不能在用它们调参后，再说它们是新的确认输入。第五轮 160 次均完成，后续 960 次和 520 次开发分别保留。

表 B2 第七轮三批开发身份及确认状态

开发	编号	方案数	运行数	独立确认
全时段收窄许可	5100 至 5103	10	200	未启动
尾段收窄许可	5200 至 5203	8	160	未启动
普通压力保持	5400 至 5403	8	160	未启动
跨平台尾段复核	5300 至 5301	3 每引擎	24	小样本复核
跨平台最新保持先导	5500	2 每引擎	8	小样本先导

尾段 12 米代表方案在第二批结果完成前指定；24 秒保持先导则在第三批之后用于比较条件差异，不能把两者都称为事先登记的统计确认。先导问题栏曾误用尾段方案的措辞，已追加更正；实际程序、参数和输入在开跑前就是 24 秒保持，原文件没有改写。

第七轮的原始文件和输入校验通过，沙盘中高负荷、偏流编号 5400 的主要最终指标与批量运行相同。软件检查还确认：20 种控制器共用同一套运动条件；同算法同批 1000 辆的轨迹、指标完全一致；16 组相同许可重放的逐步状态一致。两个 1000 辆案例在修改前后的逐车时刻、轨迹和指标也相同。沙盘每次推进前后核对共同条件，时间步被改动时会停止并留下失败记录。这些用于检查程序，不增加正式研究样本，也不改变研究数值。SUMO 使用另一套运动实现，其结果单列。