

基于文章中的技术内容，建议主题：

叶家炜

Sep 21, 2026

交通信号灯的定时与控制逻辑

交通信号灯早已成为城市路网的「神经元」，在每天数以亿计的通行决策中默默发挥作用。然而，真正决定通行效率的并非灯具本身，而是隐藏在灯具背后的配时逻辑与控制算法。固定周期的红绿灯在高峰期常常让驾驶者望「灯」兴叹，而在深夜又因不必要的等待而降低路口吞吐。本文将围绕「定时与控制逻辑」这一核心，系统梳理从经典的 Webster 公式到现代自适应与强化学习的演进路径，展示交通工程师如何用「秒与比特」重塑城市出行。

1 物理约束与基本模型

信号控制的每一个时间参数都受制于物理规律与安全标准。最小绿灯时间需保证车辆启动并完全通过停止线，一般取 5 - 10 秒；最大绿灯则防止主相位长期独占，通常设定在 60 - 120 秒。黄灯时长由路口宽度、设计速度与重力加速度共同决定，公式为 $t_y = t_r + \frac{v}{2a+2gG}$ ，其中 t_r 为反应时间， v 为设计车速， a 为减速度， G 为纵坡。清尾时间与行人过街时间同样不可或缺，二者叠加形成全红区间，确保最后一辆车或行人安全离场。周期、绿信比、相位差三要素则构成了信号配时的「三维空间」：周期是主循环长度，绿信比决定各相位的通行权占比，而相位差用于干线绿波协调。

2 Webster 公式与 HCM 方法

Webster 最优周期公式诞生于 1958 年，至今仍是工程实践的基准。其核心思想是在「延误最小」目标下找到周期与绿信比的平衡。公式可写为 $C_0 = \frac{1.5L+5}{1-Y}$ ，其中 L 为总损失时间， Y 为关键车流饱和度之和。推导过程首先将单周期总延误分解为均匀延误与随机延误，再对周期长度求导并令导数为零，即可得到最优解。HCM 方法在此基础上引入关键车流识别与相位冲突矩阵，使得多相位路口也能通过迭代计算各相位绿灯分配。实际案例显示，在四岔口早高峰流量比为 0.85 时，Webster 公式给出的周期为 96 秒，实测平均延误与公式预测误差小于 8%。然而，该方法假设流量平稳且到达服从泊松分布，当随机波动剧烈或存在下游溢出时，静态配时便会失效。

3 感应控制的工程实现

感应控制通过检测器实时感知需求，从而在「最小—最大」区间内动态分配绿灯。环形线圈或视频检测器在相位起始时给予一个缺省绿灯，之后每检测到一辆车便延长一个单位绿灯，称为「单位延长绿」。若在最大绿灯到达前无新需求，则相位结束。伪代码如下：

```
1 if not detector_call:
    green = min_green # 无需求时保持最小绿
```

```
3 else:
    while time_in_green < max_green:
5         if new_call_within_unit_extension:
            green += unit_ext # 每次检测到车就延长
7         else:
            break
```

这段逻辑看似简单，却需处理「排队溢出检测」与「行人二次过街」等边界条件，否则可能造成死锁或安全隐患。

4 自适应控制与多智能体协同

SCATS、SCOOT 与 InSync 代表了自适应控制的三种典型思路。SCATS 以「饱和度—周期曲线」为核心，每 1 – 5 分钟根据关键相位饱和度和周期与绿信比；SCOOT 则在上游检测器处建立排队预测模型，通过滚动时段优化把延误降到最低；InSync 采用多智能体架构，每个路口既可独立决策，又能通过相位差协商实现干线绿波。算法层面，三者均在「滚动时段」框架下运行：当前周期执行完毕前，系统已用最新 5 分钟数据算出下一周期参数，从而实现「准实时」响应。

5 强化学习在信号控制中的应用

近年来，深度强化学习开始进入信号控制领域。状态空间通常包含各进口道排队长度、等待时间与相邻路口溢出标志；动作空间则是「在当前相位继续或切换到下一相位」。奖励函数常设计为负的累积延误或负的停车次数。训练流程可概括为：

```
state = get_queue_lengths() # 状态：各车道排队
2 action = agent.select_action(state) # 动作：是否切换相位
reward = -compute_total_delay() # 奖励：负延误
4 next_state = step(action) # 环境演进
agent.update(state, action, reward, next_state)
```

然而，迁移学习仍是难点：在北京训练的模型直接部署到纽约可能因车道布局、驾驶习惯差异导致性能骤降。解决思路包括域随机化与元学习，使策略在不同路口间快速适应。

6 V2X 与边缘计算的协同

车路协同（V2X）把「绿波带宽最大化」从静态配时升级为动态优化。5G+MEC 节点可在 100 毫秒内完成相位微调，具体做法是将每辆车的预计到达时间映射为「绿灯窗口请求」，再用线性规划求解最优相位起止时刻。上海张江试点显示，在 12 个路口组成的走廊上，平均车速提升 17%，二氧化碳排放下降 9%。

7 故障-安全与网络安全

信号控制系统必须在任何故障场景下进入「故障-安全」状态，例如全红闪烁或切换到预设的最小冲突方案。多时段方案切换时，需插入「过渡相位」以避免现行绿灯突然截断。网络安全方面，零信任架构要求所有控制指令

携带时间戳与数字签名，并对异常流量（如短时间内大量切换请求）进行熔断。

8 量化评估与仿真验证

延误、停车次数与燃油消耗是核心指标。SUMO 与 Vissim 的硬件在环（HiL）测试流程为：真实控制器输出通过以太网注入仿真环境，仿真器实时返回检测器数据，形成闭环。线上灰度放量则遵循「5% → 20% → 100%」节奏，每阶段监控异常切换率与平均延误偏差。

9 未来展望

随着自动驾驶渗透率提升，信号灯将从「管车」转向「管队」。数字孪生城市把每辆车、每个行人映射为云端实体，毫秒级仿真与真实世界并行演化。GB/T 与 OCIT 等开放接口正推动「云-边-端」生态成熟，让更多创新算法在真实路口落地。

从机械秒表到强化学习智能体，交通信号控制完成了从「秒级定时器」到「毫秒级智能体」的范式跃迁。唯有产学研共建开放数据集与统一评测基准，才能让城市路口真正成为「会思考」的节点。