

文章编号: 1002-0268 (2009) 01-0129-05

经典干道协调控制信号配时数解算法的改进

卢 凯, 徐建闽, 叶瑞敏
(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 遵循最大绿波带设计理念, 利用干道协调控制中的时距分析图, 结合实际算例, 对经典数解算法在理想交叉口间距取值范围的确定、通过带宽度的计算、最佳理想交叉口间距的选取、以及各交叉口相位差的设置上存在的问题进行深入剖析, 提出了基于公共信号周期允许变化范围的理想交叉口间距取值范围确定法则, 给出了一种新的通过带宽度计算方法, 建立了一条新的最佳理想交叉口间距选取原则。算例分析表明, 改进后的经典干道协调控制信号配时数解算法能确保干道协调控制系统获得尽可能宽的通过带宽度, 计算得到的最佳公共信号周期与通过带宽度也更为准确有效。

关键词: 交通工程; 数解算法; 时距图; 通过带宽度; 公共信号周期; 相位差
中图分类号: U491.5⁺4 文献标识码: B

干道协调控制信号配时数解算法是干道协调控制中应用最广泛的一种方法, 其基本原理是根据干道协调控制中的时距分析图, 通过求解一系列方程, 得到最佳的公共信号周期和相位差。然而, 经典数解算法在实际应用中存在一些问题, 如理想交叉口间距取值范围的确定、通过带宽度的计算、最佳理想交叉口间距的选取、以及各交叉口相位差的设置等。本文针对这些问题, 提出了改进后的经典干道协调控制信号配时数解算法, 并进行了算例分析。

1 引言
干道协调控制是城市交通信号控制中的一种重要形式, 其主要目的是通过协调干道上各个交叉口的信号配时, 提高干道的通行能力, 减少交通延误。经典干道协调控制信号配时数解算法是干道协调控制中应用最广泛的一种方法, 其基本原理是根据干道协调控制中的时距分析图, 通过求解一系列方程, 得到最佳的公共信号周期和相位差。然而, 经典数解算法在实际应用中存在一些问题, 如理想交叉口间距取值范围的确定、通过带宽度的计算、最佳理想交叉口间距的选取、以及各交叉口相位差的设置等。本文针对这些问题, 提出了改进后的经典干道协调控制信号配时数解算法, 并进行了算例分析。

0 前言

在一个城市路网中, 主干道往往承受着大部分的交通负荷, 因此保证主干道上车流运行的畅通与高效是改善城市交通拥挤问题的关键所在。干道协调控制作为一种主干道的交通管理与控制手段, 是将干道上

的多个交叉口以一定方式联结起来作为研究对象, 同时对各个交叉口进行相互协调的配时方案设计, 使得主干道上行驶的车辆可以获得尽可能不停顿的通行权或最小的行车延误。

进行干道协调控制设计的原则主要有: (1) 绿波带最大化; (2) 延误最小化。最大绿波带设计方

法^[1-2]是通过追求绿波通行时间与公共信号周期比值的最大化,从而确定干道协调控制系统的信号配时参数,即以车辆连续通过带带宽作为评价指标来研究干道配时方案的协调控制效果,常用算法有图解法、数解法;最小延误设计方法^[3-5]则是依据干道协调控制系统的延误时间(停车次数)与信号配时参数之间的对应关系,通过优化算法寻找最佳的配时参数,从而实现干道协调控制系统的总延误最小,常用算法有结合法、遗传算法等。其中,经典的干道协调控制信号配时数解算法,作为干道协调控制设计中最为常用的一种数值计算方法,具有计算简洁、实现方便、可操作性强等优点,特别是对于车队行驶离散性较小、转弯车辆较少的双向对称式干道,能最大限度地保证车队通过干道多个交叉口的连续性,并在一些干道协调控制实际系统设计中^[6-9]得到广泛应用,取得了令人满意的实际控制效果。

但仔细研究可以发现,经典数解算法自身还是存在一些不足之处亟待改进,而目前国内有关对经典数解算法改进的研究甚少,少数文献也只是对经典数解算法进行了适当的补充与修正,例如文献[10]研究了存在双周期交叉口的绿波带宽求解方法与协调相位流量不均衡下的绿波带设计问题,文献[11]提出了一种新的干道协调控制思路,即所谓的“安宁绿波带”,但却都未能针对经典数解算法本身存在的理论局限性与不合理之处做出有效改进。鉴此本文将深入分析经典数解算法中存在的一些问题,并提出相应的改进方法与解决思路,使得改进后的数解算法能在干道协调控制信号配时设计中更好地发挥作用。

1 经典数解算法

经典数解算法是通过寻求与实际交叉口间距最为匹配的理想交叉口间距,从而确定最佳公共信号周期与相位差,以期干道协调控制系统能获得尽可能大的通过带宽度和较为理想的协调控制效果,其计算步骤为:

①确定初始公共信号周期 T_0 ;

②确定理想交叉口间距 L 的取值范围 $\left[\frac{T_0 \cdot V}{2} - \Delta, \frac{T_0 \cdot V}{2} + \Delta\right]$, V 为通过带速度, Δ 为变化浮动范围;

③求取最佳理想交叉口间距值 L_{opt} , 保证最佳理想交叉口间距与实际交叉口间距最为匹配;

④确定最终选用的最佳公共信号周期 T_{opt} ;

⑤根据各交叉口相对于理想交叉口位置所处的方

位,确定其相位差大小。

其中,“保证最佳理想交叉口间距与实际交叉口间距最为匹配”是指实际交叉口位置将最为集中地处在最佳理想交叉口位置附近,因实际交叉口位置与理想交叉口位置不一致所造成的最大绿时损失最小,从而确保协调控制系统获得尽可能宽的绿波带。

上述经典数解算法的计算步骤④已对原有文献^[1-2]进行了一定的修正。通常,只有当通过带速度约等于干道上车辆的实际平均行驶车速时,才能保证基于数解算法的干道协调控制设计真正能够取得预期的协调控制效果,因此,最佳理想交叉口间距 L_{opt} 需要通过适当调节公共信号周期的大小,找到一个最佳公共信号周期 T_{opt} ,使得 $L_{opt} = \frac{1}{2} \cdot T_{opt} \cdot V$ 而非通过调整通过带速度为 V 来满足 $L_{opt} = \frac{1}{2} \cdot T \cdot V$ 。最佳公共信号周期 T_{opt} 的计算公式为:

$$T_{opt} = \frac{2L_{opt}}{V} \quad (1)$$

为了便于对经典数解算法改进前后进行比较分析,在此引入一个许多文献^[1-2,10]都曾引用过的数解法算例:假设某一干道上有 n 个交叉口,相邻交叉口间距依次为 350、400、160、540、280、280、270 m,各交叉口主干道方向的绿信比分别为 55%、60%、65%、65%、60%、65%、70%、50%,初始公共信号周期时长为 80 s,通过带速度为 40 km/h。按照经典数解算法计算步骤,首先设定理想交叉口间距 L 的取值范围为 $[440-100, 440+100]$ m,变化步长为 10 m;其次求得最佳理想交叉口间距 $L_{opt} = 500$ m;然后确定最佳公共信号周期 $T_{opt} = 91$ s(通过带速度保持为 40 km/h);最后确定一组交叉口 L_{opt} 之间的相位差采用同步协调,另一组交叉口 L_{opt} 之间的相位差采用同步协调,而两组交叉口之间的相位差则采用交互协调。

2 经典数解算法的改进

2.1 理想交叉口间距取值范围的确定

可以看到,利用数解算法求解最佳公共信号周期是通过不断调整公共信号周期的大小,寻找一个与实际交叉口间距最为匹配的理想交叉口间距。因此理想交叉口间距的取值范围必须取决于公共信号周期的允许变化范围,否则即便找到一个能使所有实际交叉口位置与理想交叉口位置重合的理想交叉口间距,也无法得到一个与之对应并可以付诸实施的公共信号周

期;同时干道公共信号周期的允许变化范围又将由干道上各交叉口的信号周期变化范围共同决定。例如某干道上有 n 个交叉口,其中第 i 个交叉口的信号周期变化范围为 $[T_{\min i}, T_{\max i}]$,则公共信号周期的允许变化范围应为 $[T_{\min}, T_{\max}]$,记作 $[T_{\min}, T_{\max}]$;进而可以计算得到理想交叉口间距的取值范围为 $[\frac{1}{2} \cdot T_{\min}, \frac{1}{2} \cdot T_{\max}]$ 。对于理想交叉口间距的变化步长可取为 $\frac{T}{2}$,即对应于公共信号周期变化 1 时理想交叉口间距的变化增量。

在一个干道协调控制系统中倘若存在某些对信号周期时长要求较低的交叉口,此时可以考虑将其信号周期时长设置为公共信号周期的一半,对其实施双周期协调信号控制。双周期交叉口的相位差优化与绿波带宽求解^[10],将依据单周期交叉口信号配时优化(如经典数解算法)的计算结果进行,因而与经典数解算法相对独立。

2.2 通过带宽度的计算

在经典数解算法中,通过带宽度的计算方法为:对于所有从左方靠近理想交叉口位置的交叉口,选出一个最小有效绿信比;对于所有从右方靠近理想交叉口位置的交叉口,选出另一个最小有效绿信比;将这两个最小有效绿信比取平均值,即得到通过带宽度。这种通过带宽度计算方法其实只适用于各交叉口主干道方向绿信比接近的情况,对于各交叉口主干道方向绿信比相差较大、特别是干道上存在个别瓶颈交叉口的情况,计算方法可能将会失效。例如,若将算例中的各交叉口主干道方向绿信比设为 50%、70%、70%、34%、60%、76%、58%、64%,其他参数保持不变,生成新的算例 1,则经典数解算法对算例 1 的通过带宽度计算过程如表 1 所示(与算例相比,算例 1 的第 4 行与第 6 行数据有所变化),计算得到的通过带宽度为 35%,大于交叉口 4 的主干道方向绿信比 34%,显然不合情理也不切实际。

表 1 经典数解算法对算例 1 的通过带宽度计算

交叉口	1	2	3	4	5	6	7	8
理想交叉口位置编号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
实际交叉口所处方位	右	左	左	右	右	左	右	左
主干道方向绿信比/%	50	70	70	34	60	76	58	64
损失绿信比/%	26	4	24	8	16	28	28	18
有效绿信比/%	24	66	46	26	44	48	30	46
通过带宽度/%	$(24+46) \div 2 = 35$							

造成经典数解算法中通过带宽度计算方法失效的

原因主要在于,干道上绿信比较小的交叉口可能对通过带的上下限都存在制约,因此需要引入一种新的通过带宽度计算方法,以便能够更加全面深入地考虑到干道上各交叉口对通过带宽度的影响。

准确来说,经典数解算法中所提及的“损失绿信比”并不完全是在绿波带之外而不予考虑的。“损失绿信比”所对应的“损失绿灯时间”,其实是由于实际交叉口位置偏离理想交叉口位置而造成的实际交叉口绿灯中心时刻点相对于理想交叉口绿灯中心时刻线的上下偏移量。因此,用“偏移绿信比”与“偏移绿灯时间”的概念取代“损失绿信比”与“损失绿灯时间”,将更有利于对通过带宽度的计算进行分析。

利用经典数解算法得到算例 1 的时距图如图 1 所示。图中,三角形 $\triangle OAB$ 相似于三角形 $\triangle ODE$ 可以推出 $\frac{OA}{OB} = \frac{OD}{OE}$ (线段 OA 为交叉口 1 的偏移绿灯时间, OB 为交叉口 1 偏离理想交叉口位置①的距离, OD 为公共信号周期的一半, OE 为最佳理想交叉口间距),交叉口 1 的偏移绿信比 $\Delta\lambda_1 = \frac{\text{交叉口 1 的偏移绿灯时间}}{\text{公共信号周期}} = \frac{OA}{OD} = \frac{1}{2} \cdot \frac{OB}{OE}$ 。其他交叉口偏移绿信比的计算也将与之类似,即交叉口 4 的偏移绿信比 $\Delta\lambda_4$ 可由式 (2) 表示:

$$\Delta\lambda_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t_i}{T/2}, \tag{2}$$

式中, Δt_i 为交叉口 i 偏离最近理想交叉口位置的距离。

从图 1 可以看出,通过带宽度应取为理想交叉口绿灯中心时刻线上方最小绿信比与下方最小绿信比之和。对经典数解算法中通过带宽度计算方法的改进如表 2 所示,算例 1 的计算结果与作图结果也完全一致。

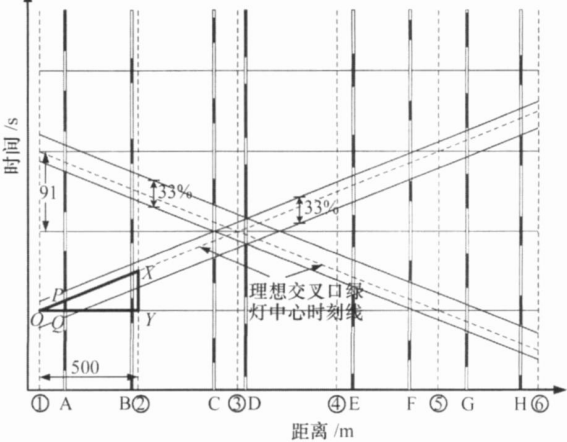


图 1 算例 1 的时距分析图

图 1 算例 1 的时距分析图

表 2 对经典数解算法中通过带宽度计算方法的改进

例 2 将初始公共信号周期设为 100 秒，其他参数保持不变，生成新的算例 2，则 $\lambda_{\text{最大}}$ 的取值范围变为 [560-100, 560+100] 秒，可列表计算出各理想交叉口间距数值 λ 对应的相邻挪移量之差最大值 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ ，计算结果如表 3 所示。

交叉口	倍	辆	值	秒	辆	停	假	犁
理想交叉口位置编号	①	②	③	③	④	⑤	⑤	⑥
实际交叉口所处方位	右	左	左	右	右	左	右	左
主干道方向绿信比 %	50	70	70	34	60	76	58	64
偏移绿信比 %	13	2	12	4	8	14	14	9
中心线上方绿信比 %	12★	37	47	13	22	52	15	41
中心线下方绿信比 %	38	33	23	21★	38	24	43	23
通过带宽度 %	12+21=33							

2.3 最佳理想交叉口间距的选取

经典数解算法是通过比较各理想交叉口间距的相邻挪移量之差最大值 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ ，依据 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 最大原则确定最佳理想交叉口间距。实际上，经典数解算法是将 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 视为反映理想交叉口间距与实际交叉口间距匹配程度的特征参量。

不难理解，对于同一个理想交叉口间距 λ ， $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 越大则表明实际交叉口位置可以越为集中地处在理想交叉口位置附近，最大“损失绿信比”越小，通过带宽度可能越宽；而当若干个理想交叉口间距对应相同的 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 时， λ 越小同样表明实际交叉口位置可以越为集中地处在理想交叉口位置附近，最大“损失绿信比”越小，通过带宽度可能越宽。因此，将 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 作为表征理想交叉口间距与实际交叉口间距匹配程度的特征参量，通过寻求最大的 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 以确定最佳理想交叉口间距 $\lambda_{\text{最佳}}$ 的取值，更显科学合理。同时，理想交叉口间距 λ 所对应的最大偏移绿信比 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 可由式 (3) 表示，以 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 最大，即以最大偏移绿信比 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 最小，作为最佳理想交叉口间距的选取原则，也将更为符合数解算法的设计理念。

$$\Delta\lambda_{\text{最大}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\lambda_{\text{最大}} - \lambda_{\text{最小}})}{\lambda_{\text{最大}}} = \frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{\text{最小}}}{\lambda_{\text{最大}}} \right), \quad (3)$$

将算例 1 中的初始公共信号周期设为 100 秒，其他参数保持不变，生成新的算例 2，则 λ 的取值范围变为 [560-100, 560+100] 秒，可列表计算出各理想交叉口间距数值 λ 对应的相邻挪移量之差最大值 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ ，计算结果如表 3 所示。

由表 3 可知，依据 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 最大原则确定的最佳理想交叉口间距 $\lambda_{\text{最佳}}=660$ 秒，利用改进后的通过带宽度计算方法可以算出通过带宽度为 29%；而依据 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 最大原则确定的最佳理想交叉口间距 $\lambda_{\text{最佳}}=500$ 秒，此时利用改进后的通过带宽度计算方法可以算出通过带宽度为

表 3 各理想交叉口间距与相邻挪移量之差最大值的对应关系

交叉口	倍	辆	值	秒	辆	停	假	犁
理想交叉口位置编号	①	②	③	③	④	⑤	⑤	⑥
实际交叉口所处方位	右	左	左	右	右	左	右	左
主干道方向绿信比 %	50	70	70	34	60	76	58	64
偏移绿信比 %	13	2	12	4	8	14	14	9
中心线上方绿信比 %	12★	37	47	13	22	52	15	41
中心线下方绿信比 %	38	33	23	21★	38	24	43	23
通过带宽度 %	12+21=33							

31%。算例 2 证明：依据 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 最大原则确定最佳理想交叉口间距，将更有利于干道协调控制系统能够获得尽可能大的通过带宽度。

实际上，由于各交叉口主干道方向获得的绿信比可能相差较大，因此完全以“ $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 最大，即最大偏移绿信比 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 最小”作为最佳理想交叉口间距的选取原则，而不考虑最大偏移绿信比是否出现在主干道方向绿信比较小的瓶颈交叉口，也将不尽科学合理。将算例 1 中的各交叉口主干道方向绿信比设为 65%、60%、65%、65%、60%、55%、50%、70%，其他参数保持不变，生成新的算例 3，则完全依据 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 最大原则或 $\Delta\lambda_{\text{最大}}$ 最大原则确定的最佳理想交叉口间距 $\lambda_{\text{最佳}}$ 均为 500 秒，其对应的通过带宽度计算过程如表 4 所示。

表 4 算例 3 中最佳理想交叉口间距取 500 秒时的通过带宽度计算

交叉口	倍	辆	值	秒	辆	停	假	犁
理想交叉口位置编号	①	②	③	③	④	⑤	⑤	⑥
实际交叉口所处方位	右	左	左	右	右	左	右	左
主干道方向绿信比 %	65	60	65	65	60	55	50	70
偏移绿信比 %	13	2	12	4	8	14	14	9
中心线上方绿信比 %	19.5	32	44.5	28.5	22	41.5	11★	44
中心线下方绿信比 %	45.5	28	20.5	36.5	38	13.5★	39	26
通过带宽度 %	11+13.5=24.5							

在此，由于最大偏移绿信比恰恰落在主干道方向绿信比最小的交叉口停假之上，因而致使通过带宽度偏小。针对此问题，不妨尝试让主干道方向绿信比最小的交叉口停假尽量处在最佳理想交叉口位置附近（选择最佳理想交叉口间距 $\lambda_{\text{最佳}}=340$ 秒，交叉口停假各距离最佳理想交叉口位置 $\frac{340-280}{2}=30$ 秒），如图 2 所示，此时交叉口停假的偏移绿信比都很小，通过带宽度计算过程如表 5 所示。

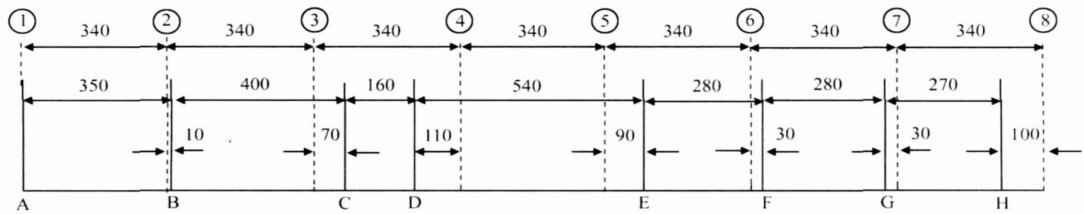


图 2 实际交叉口位置与最佳理想交叉口位置的相对距离

表 2 相位差设置与通过带宽度计算结果对比

表 5 算例 3 中最佳理想交叉口间距取 340 时的通过带宽度计算

交叉口	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
理想交叉口位置编号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
实际交叉口所处方位	中	右	右	左	右	右	左	左
主干道方向绿信比 %	65	60	65	65	60	55	50	70
偏移绿信比 %	0	2	10	16	13	4	4	15
中心线上方绿信比 %	32.5	28	22.5	48.5	17★	23.5	29	50
中心线下方绿信比 %	32.5	32	42.5	16.5★	43	31.5	21	20
通过带宽度 %	17+16.5=33.5							

从表 5 可以看出, 这样虽然会导致最大偏移绿信比增大, 但是最大偏移绿信比将落在主干道方向绿信比较大的交叉口之上, 可以确保干道协调控制系统获得较宽的通过带宽度。因此, 最佳理想交叉口间距与最佳公共信号周期的确定, 既要参考最大偏移绿信比最小原则, 也要考虑到主干道方向瓶颈交叉口对通过带宽度的影响。必要时可以使用枚举法, 对每一个理想交叉口间距取值分别计算相应的通过带宽度, 再从中选取对应通过带宽度最宽的理想交叉口间距作为所求的最佳理想交叉口间距。

2.4 各交叉口相位差的设置

在经典数解算法中, 各交叉口相位差的设置将根据与其所在位置距离最近的理想交叉口位置编号确定, 即靠近奇数编号理想交叉口位置的所有交叉口之间采用同步协调, 靠近偶数编号理想交叉口位置的所有交叉口之间亦采用同步协调, 而靠近奇数编号理想交叉口位置的交叉口与靠近偶数编号理想交叉口位置的交叉口之间则采用交互协调。显然这种交叉口相位差设置方法能使各交叉口的偏移绿信比适当减小, 但有时却并不一定有利于干道协调控制系统获得最宽的通过带宽度。

将算例 3 中的各交叉口主干道方向绿信比设为 32%、70%、80%、60%、60%、76%、58%、76%, 其他参数保持不变, 生成新的算例 4。依据最大原则确定的最佳理想交叉口间距为 500 呎。采用经典数解

算法中的相位差设置(交叉口停与交叉口卷交互协调)与适当调整后的相位差设置(交叉口停与交叉口卷同步协调), 所对应的通过带宽度计算如表 6 所示。

表 6 采用经典数解算法中的相位差设置与适当调整后的相位差设置对比分析

交叉口	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
理想交叉口位置编号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
实际交叉口所处方位	右	左	左	右	右	右	左	左
主干道方向绿信比 %	32	70	80	60	60	76	58	76
偏移绿信比 %	13	2	12	4	8	14	36	14
中心线上方绿信比 %	3	37	52	26	22	52	2	47
中心线下方绿信比 %	29	33	28	34	38	24	74	43
通过带宽度 %	3+24=27, 2+28=30							

由此可见, 经典数解算法中的相位差设置方法并不能保证对各交叉口相位差的设置最为合理, 还需要得到进一步的改进与完善。同样可以使用枚举法, 针对每一种相位差组合(最多共有 2^{n-1} 种相位差组合)分别计算相应的通过带宽度, 从而确定各交叉口相位差的最佳取值。

3 结论

理论分析与算例验证表明, 与经典数解算法相比, 采用改进后的数解算法求取最佳公共信号周期与各交叉口相位差, 可以使干道协调控制系统获得的通过带宽度最大化, 保证更多的车辆能够连续无阻滞地通过多个干道交叉口, 在干道协调控制实际系统设计中必将取得更加令人满意的协调控制效果。但对于如何制定更为科学简便的最佳理想交叉口间距选取原则与相位差设置方法, 特别是给出适合于非对称式干道的绿波协调控制数解算法, 还有待进行更加深入细致的研究。

参考文献:
[1] 中国公路学会 交通工程手册 [M] 北京: 人民交通出版社, 1998

- [7] 王旭,崔平远,陈阳舟 基于蚁群算法求路径规划问题的新方法及仿真 [J]. 计算机仿真, 2005, 22(7): 60—62
- [8] 邓江沙,姚刚 改进的蚁群算法在求解旅行商问题中的应用 [J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(7): 233—235
- [9]
- [10]

(上接第 124 页)

- [2] 杨佩昆, 吴兵 交通管理与控制 [M] 北京: 人民交通出版社, 2003
 - [3] 全永桑 城市交通控制 [M] 北京: 人民交通出版社, 1989
 - [4] 万绪军, 陆化普 线控系统中相位差优化模型的研究 [J] 中国公路学报, 2001, 14 (2): 99-102
 - [5] 常云涛, 彭国雄 基于遗传算法的城市干道协调控制 [J] 交通运输工程学报, 2003, 3 (2): 106-112
 - [6] 裴玉龙, 孙明哲, 董向辉 城市主干路交叉口信号协调控制系统设计研究 [J] 交通运输工程与信息学报, 2004, 2 (2): 41-45
 - [7] 刘洋, 史忠科 基于神经网络的多交叉口交通信号控制研究 [J] 交通与计算机, 2005, 23 (6): 35-38
 - [8] 顾九春 烟台市长江路交通信号线协调控制的设计思路与方法 [J] 鲁东大学学报 (自然科学版), 2006, 22 (2): 261-264
 - [9] 栗红强 城市交通控制信号配时参数优化方法研究 [J] 长春: 吉林大学, 2004
 - [10] 陈旭梅, 李永猛, 黄官中 安宁绿波带: 一种改善安全和减少环境影响的新思路 [J] 公路交通科技, 2000, 17 (2): 42-44