

文章编号: 1002-0268 (2000) 03-0047-05

环形交叉口交通控制模式研究

杨锦冬, 杨晓光, 彭国雄
(同济大学, 上海 200092)

摘要: 在对环形交叉口交通特征及其问题的分析, 以及对环形交叉口交通控制与管理基本思想讨论的基础上, 研究提出环形交叉口交通控制的3种基本模式, 并分析各种模式的控制方法、技术细节以及适用条件等。这3种模式对环形交叉口信号控制管理的理论研究与实际应用都具有重要价值。

关键词: 环型交叉; 交通设计; 交通控制; 信号相位的衔接

中图分类号: U412.35⁺1; U491.1⁺14

文献标识码: A

Mode of Traffic Control in Ring-intersection

YANG Jin-dong, YANG Xiao-guang, PENG Guo-xiong
(Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Aiming at remitting congestion of ring-intersection, this paper offer three modes for traffic control, which are important to improving traffic problems in ring-intersection.

Key words: Ring-intersection; Traffic design; Traffic control; Link up to phases

环形交叉口(简称环交)同一般平面交叉口(简称一般平交)相比,具有冲突点少、车流连续、行驶安全、便于管理等优点,因而在许多城市道路交叉口采用。然而,随着城市道路交通需求量的不断增加,原有许多环交的通行能力无法满足这种需求,交通问题日益尖锐。为对策环交的这一问题的,常采取拆除其环岛,改建成一般平交加信号控制的办法。但这一办法由于工程量较大,资金投入较多,并不完全可取。也有采用环岛加一般信号控制的方法,这样虽然可以在一定程度上提高交叉口的通行能力,但由于交叉口的冲突点与交织段依然存在,而且信号损失时间较大,其通行能力的提高程度仍然有限。充分有效地利用交叉口的时空资源,最大限度提高交叉口通行能力,是从交通信号控制的角度研究解决环形交叉口交通问题的有效途径。为寻求合理解决环形交叉口交通问题的有效方法,本文提出3种适用于环形交叉口交通控制的基本模式。

1 环形交叉口交通特征及交通问题分析

环形交叉是在交叉口中央设置中心岛组织渠化交通的一种交叉形式。其交通特点是进入交叉口的不同方向交通流,均按照逆时针方向(有些国家或地区按顺时针方向)绕中心岛作单向行驶,并以较低的速度连续进行合流与交织,直至所要去的路口分流驶出^[1],一般无信号控制。环交同一般平交相比,一方面没有冲突点,提高了车辆行驶的安全性,因而在一定程度上提高了交叉口的通行能力;另一方面,进入环道的车辆可以不用信号管制,以一定速度连续通过环道,这样避免了一般交叉口内信号控制产生的周期性交通阻滞,因而提高了交叉口的运行效率。但由于受中心岛环形车道上交织段的影响,不论环交各进口道有多少条车行道,其直行车与左转车都要在环道上交织行驶,当交织段长度小于2倍的最小允许交织段长度时,其通过量实际上只相当于一车道的通过量,故其通行能力只能达到一条车道的最大理论值^[2],其通行能力只能达

到一条车道的最大理论值^[2],当交织段长度大于2倍的最小交织段长度时,其通行能力通常会有所增加,但增加的幅度不会太大,因而其允许通过量仍不会很高。

2 对环形交叉口实施信号控制的意义

受环形交叉口通行能力的限制,当各进口道的流入量较低时,环形交叉口的通行效率尚可维持较好水平;而当各进口道的流量接近或超过环交的通行能力时,进入环道交织段的车辆过大,就会造成环道上交通拥挤和阻塞,使得车流无法连续通过环道,这种情形的最终结果就是:环道上车辆排放困难,进口道车辆停车延误过长与车流阻塞,交叉口通行效率严重降低。当有非机动车交通流混入时交通问题将更加严重。

对环形交叉口实施信号控制,就是要将可能形成交通拥阻的交通流,从时间上加以分离,实现不同流向的车流,依时间次序连续通过交叉口,保障环道上的车辆顺利排放出环道,尽快腾出交通空间让后面进口道上的交通流进入环道。由于环交的形状、规模(通常指直径的大小)不同,对环交实施交通信号控制的方法也不能完全相同,本研究提出3种信号控制方法,以适应不同规模环交实施信控的需要。

3 实施信号控制的环形交叉口分类

依环形交叉口的可容纳交通空间,将信号控制的环形交叉口划分为3种类型:

1. 左转两步控制的环交 要求环岛直径较大,环道上有足够的交通空间容纳左转车流在环道上进行排队,参见图1;
2. 左转一步控制的环交 要求环岛直径较小,各进口引道作成喇叭形,有足够的交通空间可使左转车流切环岛路缘石(不绕环岛)直接通过交叉口,参见图3;
3. 一般控制的环交 就是不能满足前述两种类型交通空间条件要求的环交,参见图4。

4 环形交叉口交通控制基本方法

为便于研究,本文以标准四路环交为例进行研究,且不考虑非机动车及行人过街的影响。对于三路交叉或多路交叉以及非机动车、行人过街等情形,待进一步研究。

4.1 左转两步控制的环交

4.1.1 基本思想

1. 对左转交通流实行两步控制^[3]

左转两步控制法是笔者在文献[3]中提出的大型环交控制新法。本法原则上采用两相位的交通信号控制方式,相应的进口道及停车线,以及信号灯设施

布置如图1所示。首先进口道上设置第一停车线,专用左转车道及专用左转信号灯;另外,在环道上各进口道左转交通流与对向进口道左转交通流冲突点前,分别设置第二停车线,并配以相应的专用信号灯。左转交通流将经过二次通行信号(进口道通行信号、环道通行信号)后通过交叉口。

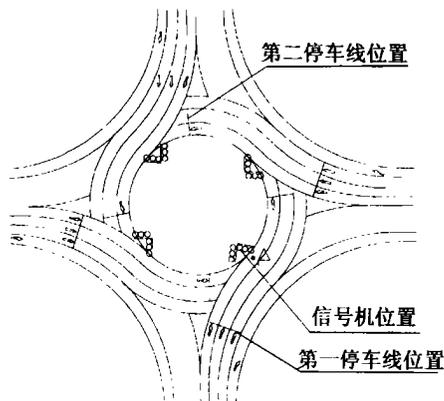


图1

2 协调利用环形交叉口的时空资源

首先为合理利用环道内左转车辆的停车空间,应以其最大停车数为约束条件确定左转交通流的通行信号时间;另外其它相位的通行信号启亮与中断时间,皆考虑交通流的安全与最大通行能力的需要,实施灵活的控制措施,最佳协调利用环形交叉口的时空资源;再有为减少时间损失,可以考虑信号配时调节与环道上的车速限制相结合的方法。

4.1.2 交叉口改善设计的技术处理

为了达到交通控制与管理的最佳效果,有必要对环形交叉口辅以合理的改善设计。

1. 交通空间设计

(1) 车道布置

依流入交通需求特征(流量和流向)及通行空间条件,进口道须划分左转、直行、右转专用车道;环道上须划分左转、直行专用车道。

(2) 停车线设计

为实现左转交通流的两步控制,必须在进口道、环道上分别设置停车线,以保证车流的秩序通行。停车线的设置方法见参考文献[3]。

(3) 环道容量的确定

a. 若环道上只有一条专用左转车道,设环岛半径为 r_0 ,环道宽度 w ,交织点、第二停车线中点(第一条环道上)及岛心3点连成的三角形之圆心角为 α (如图2所示),第 $i-1$ 路口(逆时针排序)对应的第二停车线第一左转车道前第一辆左转车到交织点 A_i 行驶距离为 d_{2i-1} ,则在第一左转车道的排队长度 l_i 为

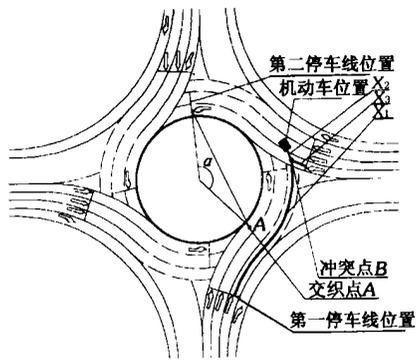


图 2

$$l_i = \frac{\pi \alpha_i}{180} (y_0 + 0.5w) + d_{2,i-1} \quad (1)$$

于是, 与第 i 路口相对应的环道一条左转车道之平均容量 (单位 pcu) 为

$$C_{1,i} = l_i / 5 = \frac{1}{5} \left[\frac{\pi \alpha_i}{180} (r_0 + 0.5w) + d_{2,i-1} \right] \quad (2)$$

b. 若环道上有 n 条左转车道, 则环道平均容量 (单位 pcu) 为

$$C_{n,1} = nC_{1,i} \quad (3)$$

c. 若环道还有 m ($m > 1$) 条直行车道, 可利用直行车道的部分空间进行排队, 但必须留出至少一条直行车道, 以备绿未黄初进入环道的直行车通行。据此, 一个路口对应的环道平均容量 (单位 pcu) 为

$$C_{m,i} = nC_{1,i} + (m-1)C_{1,i} - 0.75m(m-1) \quad (4)$$

d. 于是一个周期内环道总容量为 (单位 pcu)

$$C = \sum_{i=1}^r C_{m,i} \quad (5)$$

其中, r 为环路口数。

2. 信号灯配置

为了最佳地协调控制进口道的左转、直行车流以及环道上的左转车流, 需要配置具有联动控制功能的信号机和相应的信号灯: 在第一停车线前车辆可视的位置设置 4 组箭头信号灯, 控制进口道上左转与直行车流; 在第二停车线前车辆可视的位置设置 4 组普通信号灯, 以控制环道上的左转车流。详见图 1 所示。

4.1.3 相位

大型的四路环交, 由于环道足够的空间排队条件, 在进口道, 宜采用两相位控制, 并结合各进口道流量的不均衡比, 依迟启早断方式调整各流向的绿灯时间; 在环道, 相应采用两相位控制 (如拆除环岛, 则需四相位控制, 而左转两步控制只需两相位, 可大大减少时间的损失, 这也充分说明了本法的优势)。

多路环交可依流向特征具体确定相位数。

4.1.4 主要信号控制参数的确定

1. 周期时长的确定

由于环道上允许左转车停候, 因而周期时长不能小于环道上左转车排放时间的总和。设对应于第 i 进口环道上停候的左转车排放时间为 t_{ci} , 则其平均值

$$t_{ci} = (c_{1,i} - 6)^* (1/s_c) + 19.5 \quad (6)$$

其中, s_c 为环道上的饱和流率, $i = 1, 2, \dots, r$ 。

取 t_j 为同相位中各路停候左转车排放时间之最大值, 于是环道车流所需的最短信号周期时间 c_e 为

$$c_e = \sum_{j=1}^k (t_j + l_j) \quad (7)$$

其中, k 为一个周期的相位数, l 为各相位损失时间。

在进口道, 直行车流所需的信号周期时间可按 Webster 公式

$$c_e = (1.5L + 5) / (1 - Y) \quad (8)$$

计算, 其中 L 为每周期的总损失时间, $Y = \sum_{j=1}^k y_j$,

y_j 为第 j 相位的直行车道流量比的最大值, 即 $y_j = \max \left\{ \frac{q_i}{s_c}, \frac{q'_i}{s_c}, \dots \right\}$ 。于是, 环交周期时长取为

$$c = \max \{ c_e, c_e \} \quad (9)$$

2. 环道信号的灯色设置及实际绿灯时间

为避免环道控制对进口道左转车流的信息干扰, 避免驾驶员对环道信号的误解, 简化环道信号是必须的; 另外由于本相环道左转车流通过第二停车线后, 下相位的左转车要接续行驶至该相第二停车线, 当环道车行驶时, 与本相环道左转车流可能冲突的对向直行车流已放红灯, 不会发生冲突, 因此, 环道两相位配时可只设置红灯、绿灯时间, 不设黄灯时间。于是环道的每周期实际绿灯时间即为周期时间。

环道各相位实际绿灯时间依各相位对应的环道容量的最大值之比来确定

$$g_j = c^* \max \{ C_{m,j}, C_{m(j+2)} \} / C \quad (10)$$

其中, $j = 1, 2, \dots, k$ 。

3. 环道相位与进口道相位的衔接

环道上停候的车辆须在下一相位车流之前通过交叉口, 因而环道相位与下一进口道相位的时间差是配时方案中的又一技术关键, 需利用环道限定车速, 第一停车线与相邻进口道左转车流之间冲突点的距离, 黄灯时间, 全红时间等参数计算, 并采用联动方式实施。参见图 2, 设上相位环道上最后一辆停候车辆到交织点 A 的行驶距离 d_3 , 又若通过交叉口的饱和流率为 s_c , 环道限定车速为 v_0 , 则上相位环道上的最后一辆停候左转车到交织点的行驶时间为 $2d_3 / v_0$ 。于是上相位环道绿灯与本相位进口道绿灯的启动时间差为

$$t = g_j - s_c^{-1} - 2d_3 / v_0 \quad (11)$$

此即环道相位与进口道相位的衔接时间。

4 进口道每周期和各相位的有效绿灯时间

按饱和度相等配时法配时，通常是依各进口道流量比来确定各相位有效绿灯时间。但本方案中，由于环道上允许停放的左转车辆数是定值，因而每个周期的左转车最大通行能力也是定数。为此，确定配时方案时，要考虑环道允许停候的左转车数量。当左转车流量较大时，依环道左转车容量所需的左转车排放时间来确定每周期有效绿灯时间；当直行车流量较大时，依 Webster 方法确定有效绿灯时间。

5 进口道绿灯间隔时间与黄灯时间

由于大型环交的进口道与出口道间距较一般平面交叉口大，交通信号相位切换的衔接时间若采用 3s 黄灯时间，可能会导致黄灯未通过停车线的直行车辆与另一相位初期驶出的车辆（左转车或直行车）冲突，因而需重新确定绿灯间隔时间与黄灯时长⁴。

如图 2 所示，设在黄灯初（或绿灯末）通过第一停车线的最外侧直行车道上的直行车的制动时间为 t_1 ，本条直行车道与右侧相邻进口道中最靠近道路中线的左转弯车道形成的冲突点 B 到本进口道停车线的距离为 x_1 ，本向直行车驶过该冲突点而相邻左转车驶至冲突点时两车的安全距离为 x_2 ，该冲突点到右侧相邻进口道停车线的距离为 x_3 ，绿灯间隔时间为 I ，则有

$$t_1 + (x_1 + x_2) / v_0 \geq t_0 + 2x_3 / v_0 + I \quad (12)$$

由 (12) 式可算得适合于本进口道 t_1 的理论值，同一方法可计算适合于其它 3 条进口道 t_1 的理论值，4 个进口道 t_1 值的最大者，取为本交叉配时方案的绿灯间隔时间 I 。又设黄灯时长为 A ，则由

$$I = A + R_0 \quad (13)$$

可确定黄灯时长 A (R_0 为全红时长)。

4.2 左转一步控制（不绕环岛）的环交

4.2.1 基本思想

当环交左转与直行交通流流量都比较大，而环岛直径较小（或环岛直径较大，但环道较狭窄即狭环道的情形），没有足够的环道空间用于左转车流的排队等候时，有必要为各流向车流设置合理的交通空间与时间，保证其运行。为此，从交通空间上的考虑，即是不同流向的车流以不同的行车道分隔开来（通过渠化设计可达到此目的，而对于狭环道的情形，可以通过缩小环岛来实现）；从交通时间上考虑，即是在不同的时间段给不同流向的车流以通行权，从而实现各流向的时间分离（通过配时方案可达到此目的）。

4.2.2 交通空间设计

1. 交叉口渠化设计 本渠化设计的关键在于如何最大可能地适应车流的走行路线。进口道的喇叭型设计，即是要有利于将左转、直行车流在交通空间上较好地分隔，以便直行车与左转车在交叉口中的行车轨迹尽可能短，最好达到最短（参见图 3）。

2. 车道布置 依据流入交通需求（流量和流向）及交通空间条件，将左转、直行车道以交通岛分隔。

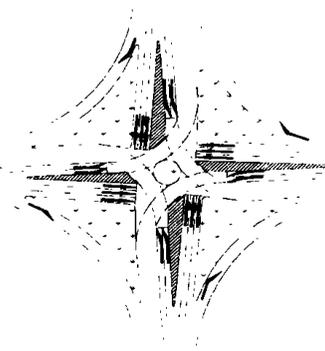


图 3

3. 左转车行车轨迹线 由于渠化后交叉口通行空间缩小，为提高左转车通行效率，避免驾驶员由于对本环交控制方法的不明确而导致的绕环行驶，在交叉口内部地面布设左转车行车轨迹标志线，且左转车行车轨迹线的转弯半径，应不小于依导流路设置要求所需的最小转弯半径。

4.2.3 信号相位的确定

本控制方法适用于环形交叉口左转、直行交通流量均较大的情况，因而本向左转车与对向直行车之间一般难以穿越空挡，特别是当左转车道或直行车道多于一条时，穿越空挡的可能性很小，因而适合实施多相位控制。

4.2.4 信号配时

由于左转车不绕环岛行驶，且划分车行道功能、设置专用左转相位，各流向间不存在冲突与交织，因而本控制方法实质上退化为一般平交的控制方法，可依 Webster 配时法确定配时方案，并视实际的流量比协调各流向的实际绿灯时间。但由于交叉口空间较大，车辆在交叉口内的行驶距离较一般平面十字交叉的行驶距离长，因而依惯例采用的 3s 黄灯时间可能会导致黄灯未通过停车线的左转车辆与另一相位初期驶出的车辆（左转车或直行车）冲突，所以有必要重新确定绿灯间隔时间与黄灯时长。

设左转车导流路的最大长度为 l_L ，直行车在交叉口内的最大行驶距离为 l_S ，交叉口的计算车速为 v_0 ，驾驶员启动反应时间为 t_0 ，则在交叉口内，左转车通过交叉口需要的最少时间为

$$t_L = t_0 + kl_L / v_0 \quad (14)$$

其中， k 为弯路行驶折减系数。

直行车通过交叉口需要的最少时间为

$$t_S = t_0 + l_S / v_0 \quad (15)$$

于是绿间隔为

$$I = \max \{t_l, t_s\} \quad (16)$$

取全红时间为 R_0 , 则由式(13)可算得黄灯时间 A 的值。

4.3 一般控制的环交

4.3.1 通行空间设计

1. 进口道布置 实施信号控制的目的是就是要使不同流向的车流在时间上分离。为便于实施信号控制, 有必要对进口道划分车道功能(见图4), 使得各流向车流各行其道, 避免相互干扰。

2. 环道布置

为避免不同流向交织引起的交通混乱, 提高环道通行能力以及同进口道车道功能相匹配, 有必要将环道也划分车行道功能, 主要是划分左转与直行专用车道(参见图4)。即环道至少

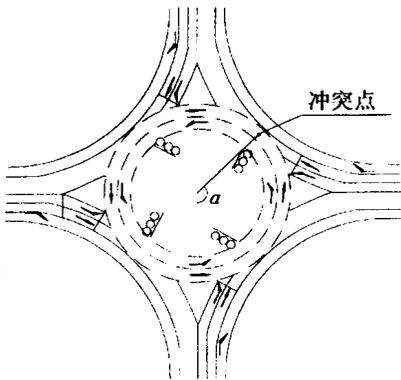


图4

4.3.2 信号相位的确定

由于环道的作用, 本向左转车流与对向直行车流之间的冲突实际上可演变为某种程度的交织, 因而对四路环交实施一般性控制, 可采用两相位控制形式; 多路环交的情形可视具体情况确定。

4.3.3 信号灯配置及优先规则

1. 信号配置 基于上述分析, 应配置箭头信号灯, 以利于对不同流向的车流给予不同的交通信号。

2. 优先规则 环道上由于存在同相位不同流向的车流, 本向左转交通流与对向直行交通流之间存在冲突的可能, 因而有必要设置优先通行规则, 通常在同一相位中, 直行交通流优先于左转弯交通流(也可视实际情况而定)。

4.3.4 信号配时

环道上划分车行道功能与信号控制的实施, 可消除以往环交在环道上的交织问题, 因而本控制方法在信号控制原理上同一般平交控制方法类似, 可依 Webster 配时法确定配时方案, 并视实际的流量比协调各流向的实际绿灯时间。但由于环道行驶车辆的速度限制以及行驶距离较长, 依惯例采用的 3s 黄灯时间可能会导致黄灯未通过停车线的左转弯车辆与另一相位初期驶出的车辆(左转弯或直行车)在环道入口的交织或冲突, 因而有必要重新确定绿灯间隔时间与黄灯时长。

设环岛半径 r_0 , 环道每车道宽度 w , 计算行车速度 v_0 , 驾驶员反应时间 t_0 , 则进口道最外侧直行车辆驶过邻近路口最外侧冲突点的最短距离约为

$$s = \frac{\pi \alpha}{180} (r_0 + \frac{1}{2} w) \quad (17)$$

于是(两相位情形)绿间隔 I 为

$$I = s / v_0 \quad (18)$$

由式(13)可确定黄灯时间。

5 各控制方法的适用条件分析

1. 流量条件 通常, 无信号控制的环形交叉口通行能力经验值为 2000pcu/h 左右, 因而当环形交叉口实际交通需求量接近或超过此经验值时, 即有必要实施信号控制, 本文提出的 3 种控制模式, 均针对流量超过 2000pcu/h 且需信号控制的环交而言。前两种控制法更适用于左转流量较大的情况。

2. 交叉口几何条件 左转两步控制的环交, 一般适用于环岛直径较大、环道上有足够的交通空间供左转弯交通流排队等候; 左转一步控制(不绕环岛)的环交, 一般适用于环岛直径较小、环岛周围有足够的交通空间布置左转弯交通流的行车空间, 且左转弯车行车轨迹线的转弯半径, 应不小于依导流路设置要求所需的最小转弯半径; 实施一般控制的环交, 一般无法满足上述两控制方法的几何条件要求(也无法拓宽达到上述要求)。

6 结论

以往对环形交叉口实施信号控制, 大多套用平面交叉口的控制方法, 因而难以真正有效地适应环形交叉口的交通特征、合理解决环形交叉口的交通问题。本文提出的环形控制模式, 是在对环形交叉口的交通特征及其交通问题进行深入研究基础上提出的, 针对不同的环岛规模、不同的交叉口空间, 给出不同的控制模式, 因而对环型交叉口信号控制管理的理论研究与实际应用都具有重要价值。由于研究条件的限制, 3 种模式均未研究非机动车及行人干扰的情况及其它一些可能的情形, 因而还有待于结合多种实际情况作进一步的完善。

参考文献:

[1] 张廷楷. 道路路线设计. 同济大学出版社, 1988.
 [2] 薛珊荣, 徐吉谦等. 城市交通工程与街道设计. 中国建筑工业出版社, 1988.
 [3] 杨晓光, 杨锦冬, 边经卫. 大型环形交叉交通改善设计与控制方法研究. 中国城市交通规划协会成立 20 周年纪念会论文集, 1999-09.
 [4] 杨晓光, 袁文平, 彭国雄. 混合交通信号控制相位切换及其评价. (中国)交通工程, 1997(3).