

文章编号: 2095-2163(2023)10-0077-06

中图分类号: U491.1+7

文献标志码: A

信号灯多重调控下公交系统优化研究

袁野

(长春市市政工程设计研究院有限责任公司, 长春 130033)

摘要: 为保证公交车有序到达公交站点,减少乘客的等待成本及公交车运营成本,本文提出多重调控的有限公交优先信号控制方法。借助车辆感应器检测公交车行驶速度和路况信息,预测该公交车与第一辆公交车通过交叉口的时间间隔,并计算该时间间隔与两车期望时间间隔之间的偏差;结合信号灯显示状态采用多重信号调控手段,建立交叉口信号配时优化模型以减小偏差。该信号控制策略能优化公交车的车头时距,提高公交车的运行效率。

关键词: 多重调控; 信号配时优化; 有限公交优先; 信号控制

Research on control optimization of bus system by multiple regulation of signal light

YUAN Ye

(Changchun Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd, Changchun 130033, China)

【Abstract】 In order to ensure bus to arrive at bus stations in order and to reduce passengers' waiting costs and bus operating costs, this paper proposes a multi-regulated limited single priority control method. With the help of vehicle detectors which detects the speed of buses and road condition information, the time interval between buses when passing the intersection is predicted. The deviation of true time interval and the expected time interval between the two vehicles is calculated. Combined with the signal display status, the multiple signal control methods is adopted and an optimization model of intersection signal timing is established to reduce this deviation. The simulation results show that the signal control strategy proposed in this paper can optimize the headway of buses and improve the operating efficiency of buses.

【Key words】 multiple regulation; signal timing optimization; limited bus priority; signal control

0 引言

城市道路交叉口是交通网络的咽喉,是交通车辆不断分流、合流和交叉的场所,提高公共交通在交叉口处的通行效率,可提高整个路段的舒适度,是缓解交通压力的有效方法。

随着“公交优先”战略提出,有限公交优先的研究日渐深入。汪斌等^[1]全面的阐述了传统公交优先的基本概念;刘秋红^[2]等对传统公交应用范围进行分析;赵天羽^[3]等在定周期下对公共汽车通过信号交叉口进行信号调控;曹成海^[4]等验证了有条件公交信号优先控制策略对交叉口通行能力无影响。虽传统控制策略在初始阶段收到一定的成效,但公交运营中仍会出现公交不均匀到达的现象。公交运行系统中存在公交到站停车、礼让行人、乘客上下车等消耗时间较难确认的情况,使得均衡车头时距发车的公交车行驶过程中会出现车头时距改变问题。

而传统的公交优先的信号控制不能针对每辆公交车的车头时距做出灵活的调节,很容易造成公交串车、簇拥等一系列影响运行效率的现象。大多数调控方法只是考虑单一公交车道路上的运行,忽略了公交系统整体的运行效果,使公交车服务水平较低。

本文结合马万经^[5]等分析的有限信号优先延误时间更小的结论,预估公交车到达交叉口的时间,并计算通过交叉口后该公交车与第一辆公交车的时间间隔。比较计算所得时间间隔与期望时间间隔,通过多重信号调控的方法实时进行信号控制,以期实现公交车车头时距的稳定性,使公交系统运行平稳有序,同时兼顾公交系统本身运行秩序,实现公交有限优先。

本文的创新点:

- (1) 采取不定周期下的信号灯调控,即每个信号周期的周期时长随信号控制策略的不同而改变;
- (2) 在一个周期内采取单一或多重的信号控制

作者简介: 袁野(1988-),男,硕士,工程师,主要研究方向:公交优先。

收稿日期: 2022-10-03

方式,根据公交车实际通过交叉口后的时间与期望时间的偏差情况对控制手段进行动态选择。

1 问题描述

本文所使用的控制策略主要包括:红灯早断,红灯延长,绿灯早断,绿灯延长。根据公交车到达交叉口时的状态选择单一或者多种策略进行调控。该信号配时优化模型应满足如下假设:

(1) 公交车在专用道行驶,不考虑社会车辆及行人对公交车的影响;

(2) 一个公交相位只有一辆公交车到达;

(3) 公交车到达交叉口时,只在到达交叉口时的信号周期内调控。

1.1 公交车到达交叉口时间的确认

为更加准确预测公交车的到达交叉口的时间点并做出相应的调控,需布设一组车辆感应器,用以检测公交车到达检测点的位置,推算公交车到达交叉口的准确时间。

公交车专用道设置在道路最右端,减少公交车向公交站点停靠时间的同时,还可将社会车辆对公交车的影响降到最低。在道路两侧设置公交车检测器,在公交车地盘设置识别仪器,检测器垂直地面距离 30 cm,保持检测器与识别仪器在同一直线上。检测器到达交叉口的距离,一般设置为 50~150 cm 之间。

1.2 公交车车头时距的确认及信号识别

假设红灯时长为 r , 绿灯时长为 g , 第 i 辆公交车到达交叉口的时刻为 t_i , 通过交叉口后的时刻为 T_i , 则公交车在交叉口延误时长 Δ 如式(1)所示:

$$\Delta = T_i - t_i \quad (1)$$

信号调控时,信号周期应至少满足交叉口以及垂直交叉口的行人安全过街时间,故需设置最短绿灯时间 g_{\min} 、绿灯极限延长时间 g_{\max} , 相应的设置最短红灯时间 r_{\min} 、红灯极限延长时间 r_{\max} 。 T_j 为公交车到达检测点所在截面的时刻,当公交车以恒定行驶速度 V 行驶至检测器时,由经典运动学可得公交车到达交叉口时间如式(2)所示:

$$t_i = T_j + \frac{L}{V} \quad (2)$$

其中, L 为检测器到达交叉口的距离。

假设标准车头时距为 H , 为保证公交车在行驶过程中准时到达站点,第 i 辆公交车通过交叉口后的理想时间为 i 倍标准车头时距,即 iH , 记为第 i 辆车的理想通过时间。

1.3 公交车到达交叉口时信号灯周期的确认

为了使公交车更加准确可靠的按照规定时间通过交叉口,交叉口信号灯应根据公交车到达交叉口的时间点灵活调整周期时长。

假设公交车到达交叉口时处于某个信号周期的第 k 秒,第二辆公交车通过交叉口后,确认第二辆公交车与第一辆公交车车头时距并进行调控,记录本次的调控方式。下辆公交车到达交叉口时,确认该公交车与第一辆公交车的时间差,调控并记录调控方式,直到第 i 辆公交车。

当第 i 辆公交到达交叉口,根据前 $i-1$ 辆公交车的调控方案,减去前 $i-1$ 辆公交车早断总时间再加上延长总时间,对原有周期 C 取余,余数即公交车到达交叉口时处于某个信号周期的时间 K ,进而计算出公交车到达交叉口时该信号相位的剩余时间。

2 信号配时优化模型的建立及控制策略

2.1 信号配时优化模型

Case1:若在不调整信号周期的情况下,第 i 辆公交车通过交叉口时满足 $T_i = iH$, 则不调整信号灯原有配时;

Case 2:当 $t_i > iH$ 且交叉口信号灯为绿灯时,第 i 辆公交车到达交叉口时间 t_i 大于理想通过时间 iH 时,由于公交车行驶速度恒定,为避免与理想通过时间之差继续变大,只能缩短第 i 辆公交车在运行线路上的延误时长。此时信号灯为绿灯,不改变公交车信号配时,公交车直接通过,延误为 0。

Case3:当 $t_i \leq iH$ 且交叉口信号灯为绿灯时,第 i 辆公交车到达交叉口时间 t_i 小于理想通过时间 iH 时,应减慢第 i 辆公交车的行驶速度,采取绿灯早断,在公交车到达交叉口时,将信号灯由绿灯变为红灯。需要对比红灯早断、红灯延长以及不调整信号配时 3 种不同方案,选择优化效果显著的方案进行调配。

(1)当公交车到达交叉口时,交叉口信号灯处于最短绿灯时间 g_{\min} 内,为保证交叉口行人的通过,不改变交叉口信号灯的配时,公交车延误为 0。

(2)当公交车到达交叉口时,交叉口信号灯未处于最短绿灯时间 g_{\min} , 即 $t_i - nc > g_{\min}$:

① 当公交车需要在交叉口等待的时间恰好等于整个红灯时长,则只采用绿灯早断,早断时间如式(3)所示:

$$\Delta = g - (t_i - k) \quad (3)$$

② 若等待的时间小于整个红灯时长, 但不小于最短红灯时间 r_{\min} , 即 $r_{\min} < iH - t_i < r$, 则同时采用绿灯早断和红灯早断两种调控方案。绿灯、红灯早断时间分别为 Δ_1 、 Δ_2 , 如式(4)所示:

$$\begin{cases} \Delta_1 = g - (t_i - k) \\ \Delta_2 = r - (iH - t_i) \end{cases} \quad (4)$$

③ 若等待时间小于最短红灯时间 r_{\min} , 即 $iH - t_i < r_{\min}$, 则需对比直接通行和同时采用红灯早断和绿灯早断两种不同信号调控方案, 选择优化效果更显著的方案进行调配。

公交车到达交叉口的时间与理想通过时间的绝对差值小于等于公交车采取绿灯早断与红灯早断时, 则采取直接通行的方案, 延误时长为 0;

若公交车需要在交叉口的等待时长大于采取绿灯早断与红灯早断通过交叉口后的绝对差值, 即 $(iH - t_i) + (t_i - k) < g_{\min} + r_{\min} \& |iH - t_i| > |iH - t_i - r_{\min}|$, 则同时采取绿灯早断与红灯早断。绿灯早断、红灯早断如式(5)所示:

$$\begin{cases} \Delta_1 = t_i - k \\ \Delta_2 = r - r_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

(4) 当等待时间大于整个红灯时长, 还需考虑红灯极限延长时间 r_{\max} :

① 若小于等于红灯极限延长时间 r_{\max} , 即 $r < iH - t_i < r_{\max}$, 则同时采用绿灯早断和红灯延长。绿灯早断、红灯延长时间分别为 Δ_1 、 Δ_2 , 如式(6)所示:

$$\begin{cases} \Delta_1 = g - (t_i - k) \\ \Delta_2 = (iH - t_i) - r \end{cases} \quad (6)$$

② 若公交车需要在交叉口等待的时间大于红灯极限延长时间 r_{\max} , 即 $iH - t_i \geq r_{\max}$, 绿灯早断、红灯延长时间如式(7)所示:

$$\begin{cases} \Delta_1 = g - (t_i - k) \\ \Delta_2 = r_{\max} - r \end{cases} \quad (7)$$

Case4: 当 $t_i > iH$ 且交叉口信号灯为红灯时, 表明第 i 辆公交车到达交叉口时与理想状态下通过交叉口距离过大, 应减少公交车在交叉口的延误时长。判断绿灯延长和红灯早断两种调控方案, 选择优化效果更好的方案进行调控。

(1) 当交叉口信号灯为红灯, 但已进行的红灯时长尚未到达红灯总时长的一半, 即 $(t_i - k) < g + \frac{r}{2}$, 则只采用绿灯延长, 延长时间如式(8)所示:

$$\Delta = (t_i - k) - g \quad (8)$$

(2) 若已进行的红灯时长超过红灯总时长的一半, 即 $(t_i - k) \geq g + \frac{r}{2}$, 则只采用红灯早断, 早断时间如式(9)所示:

$$\Delta = g + r - (t_i - k) \quad (9)$$

Case5: 当 $t_i \leq iH$ 且交叉口信号灯为红灯时, 而第 i 辆公交车到达交叉口时间 t_i 小于理想通过时间 iH , 由于不同公交车到达时间与理想通过时间的差值不同, 应判断在交叉口处延误时长采用不同调控方案。

(1) 当公交车需在交叉口的延误时长恰好等于本周期剩余的红灯时长, 即 $iH - t_i = g + r - (t_i - k)$, 则不改变交叉口原有信号配时, 延误时长如式(10)所示:

$$\Delta = g + r - (t_i - k) \quad (10)$$

(2) 若所需延误时长大于本周期剩余红灯时长, 即 $iH - t_i > g + r - (t_i - k)$, 则采用红灯延长, 需对交叉口信号灯红灯延长时长进行预测, 并做出相应调控。

① 已进行的红灯时长与公交车所需的延误时长之和未超过红灯极限延长时间 r_{\max} 时, 即 $(t_i - k) - g + (iH - t_i) \leq r_{\max}$, 则只采用红灯延长, 延长时间如式(11)所示:

$$\Delta = (iH - t_i) - [r + g - (t_i - k)] \quad (11)$$

② 已进行的红灯时长与公交车所需的延误时长之和超过红灯极限延长时间 r_{\max} , 即 $(t_i - k) - g + (iH - t_i) > r_{\max}$, 所需延误时长未超过红灯极限延长时间 r_{\max} :

交叉口已进行的红灯时长未达到红灯总时长的

一半时, 即 $(t_i - k) - g \leq \frac{r}{2}$, 则同时采用红灯延长与绿灯延长。绿灯延长时长、红灯延长时长如式(12)所示:

$$\begin{cases} \Delta_1 = (t_i - k) - g \\ \Delta_2 = (iH - t_i) - r \end{cases} \quad (12)$$

已进行的时长已超过红灯总时长的一半时, 即 $(t_i - k) - g > \frac{r}{2}$ 时, 则采用绿灯延长, 公交车到达交叉口时, 已进行的红灯时长与所需的延误时长未超过红灯极限延长时间 r_{\max} , 即 $(t_i - k) - g_{\max} + (iH - t_i) \leq r_{\max}$, 这时同时采用绿灯延长和红灯延长, 绿灯延长、红灯延长时间如式(13)所示:

$$\begin{cases} \Delta_1 = (H - h_i) - [r + g_{\max} - (t_i - k)] \\ \Delta_2 = r_{\max} - r \end{cases} \quad (13)$$

③已进行的红灯时长与公交车所需的延误时长之和超过红灯极限延长时间 r_{\max} , 即 $(t_i - k) - g + (iH - t_i) > r_{\max}$, 若所需延误时长已超过红灯极限延长时间 r_{\max} , 需要采取红灯延长:

若尚未进行到红灯时长的一半, 即 $(t_i - k) - g \leq \frac{r}{2}$, 则采取绿灯延长, 延长时间如式(14)所示:

$$\Delta = (t_i - k) - g \quad (14)$$

若已进行到红灯时长的一半, 即 $(t_i - k) - g > \frac{r}{2}$, 则采取绿灯延长时间如式(15)所示:

$$\Delta = g_{\max} - g \quad (15)$$

(3)当公交车在交叉口所需的延误时长小于本周期剩余红灯时长, 即 $iH - t_i \leq g + r - (t_i - k)$ 。在采用红灯早断的同时需判断信号灯已进行的红灯时长与公交车所需要的延误时长是否小于最短绿灯时间 g_{\min} 。

①若已进行的红灯时长与公交车所需要的延误时长大于最短绿灯时间 g_{\min} , 即 $(t_i - k) - g + (iH -$

$t_i) > r_{\min}$, 只需要采用红灯早断, 早断时间如式(16)所示:

$$\Delta = [g + r - (t_i - k)] - (iH - t_i) \quad (16)$$

②若公交车到达交叉口时, 信号相位的剩余时间小于等于最短绿灯时间 g_{\min} , 即 $(t_i - k) - g + (iH - t_i) \leq r_{\min}$, 为保证垂直交叉口行人的正常通行, 同时需要采用绿灯早断与红灯早断, 绿灯早断、红灯早断时间如式(17)所示:

$$\begin{cases} \Delta_1 = r_{\min} - \{[(t_i - k) - g] + (iH - t_i)\} \\ \Delta_2 = r - r_{\min} \end{cases} \quad (17)$$

2.2 约束条件

交叉口信号灯控制应减小对交叉口行人及垂直交叉口社会车辆的影响, 即调控后绿灯时长 G 与红灯时长 R 应至少满足最短绿灯时间且小于极限绿灯延长时间。

调控后的绿灯时长范围: $g_{\min} \leq G \leq g_{\max}$

调控后的红灯时长范围: $r_{\min} \leq R \leq r_{\max}$

2.3 公交信号配时流程图

公交信号配时调控流程如图1所示。

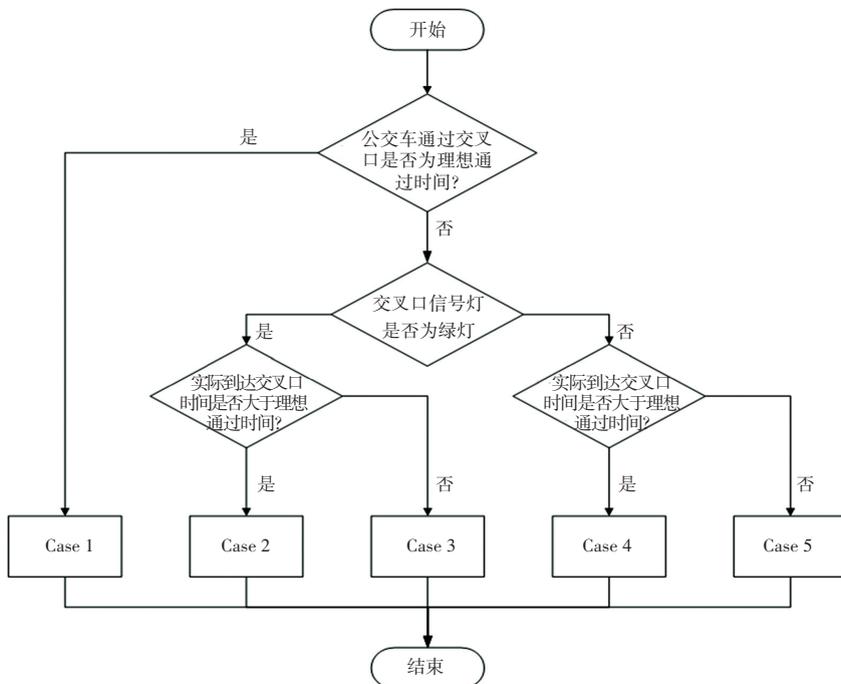


图1 公交配时调控流程图

Fig. 1 Flow chart of bus timing control

3 模拟验证

本文采用C语言搭建仿真平台, 模拟公交车在道路上运行情况, 验证本文控制方法的有效性及其可靠性, 并对信号周期进行敏感性分析。

选择车辆感应点与交叉口间的单向道路区间为

实验对象。假设公交车在公交车专用道上行驶, 与道路上的小汽车相对独立, 在正常状态下交叉口信号灯的周期为180s, 按照先绿灯90s后红灯90s的顺序进行。

公交车总量为100辆, 以均值离散随机分布的公交车到达交叉口时间与理想通过时间之差进行测

试,测试结果如图 2 所示。由图 2 可知,实验中公交车的时间偏差集中在 $-60\sim 90\text{ s}$,其中 16 辆公交车时间偏差为 90 s ,为通过交叉口数量最多的时间偏差;在正常信号灯调控下通过交叉口时间偏差均落入 $-60\sim 150\text{ s}$ 之间,其中有 12 辆公交车时间偏差为 50 s ,为数量最多的时间偏差。可见公交车在经过本文提出的方案调控下,公交车的时间偏差波动幅度较未调控时明显减小。此外,产生的随机数中出现 14 辆公交车恰好在红灯开始时到达交叉口,导致车辆延误大大增加,图像出现峰值。经本文提出的控制方案,在采用绿灯延长后,时间偏差明显减小,公交车的通过时间更均衡,公交车的服务水平在本文提出的控制方案下有了显著的提高。

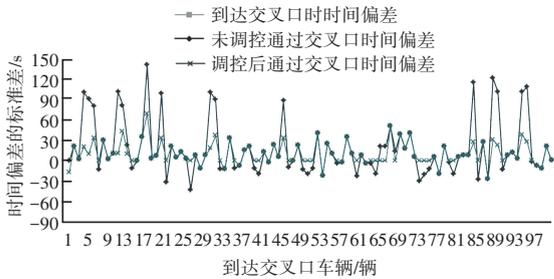


图 2 3 种情况下公交车时间偏差对比图

Fig. 2 Comparison of bus time deviation in three cases

本文提出的方案调控下的公交车通过交叉口后,时间偏差落入在 $-10\sim 50\text{ s}$ 之间,经调控后有 53 辆公交车不产生时间偏差。除此之外,经调控后通过交叉口的公交车时间偏差低于 -110 s 的公交车共有 3 辆,均为与前一辆公交车在同一周期时间到达交叉口,信号灯无法同时调控的特殊情况。于是本次分析选择将 $-150\sim 170\text{ s}$ 之间,每 20 s 为一个区间,将以上 3 组时间偏差分别放入对应的区间内,以比较同一个区间内调控前后的时间偏差分别出现的频次,并形成柱状图,如图 3 所示。

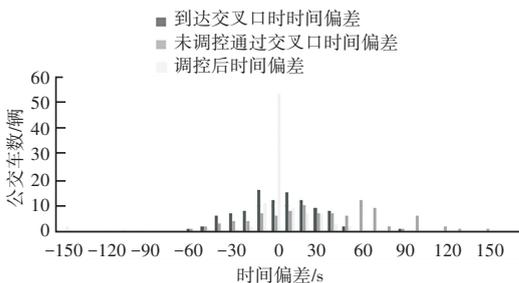


图 3 通过交叉口时间偏差频率分布图

Fig. 3 Frequency distribution of time deviation on crossing intersection of buses

为验证本方案在不同条件下对公交车时间偏差调控的影响,验证部分还对信号周期进行了敏感性

分析。

本文取周期为 30 s 作为最短周期,研究在 $30\sim 210\text{ s}$ 之间每 10 s 作为一个单位情况下公交车在不同调控下通过交叉口之后的时间偏差标准差的情况,如图 4 所示。可见随着交叉口信号灯周期时间的增长,公交车通过交叉口后的时间偏差标准差基本呈上升趋势,信号周期为 170 s 时间偏差的标准差最小,说明此信号周期在理想公交车车头时距下调控效果最好。在到达检测点时间相同的条件下,经过本方案调控下的公交车通过交叉口之后的时间偏差标准差明显低于未经过任何调控的时间偏差标准差。

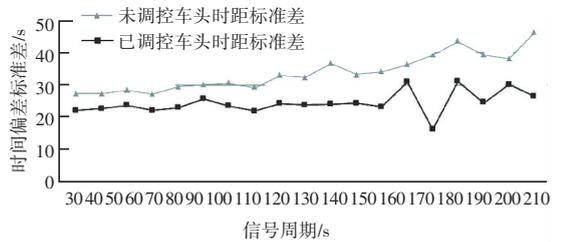


图 4 两种信号控制下通过交叉口时间偏差的标准差图

Fig. 4 Standard deviation of time under two signal control conditions

为进一步分析本方案的可靠性,还对比了在经本方案调控下公交车的时间偏差与未经调控公交车的时间偏差,如图 5 所示。可见在 100 次测试中,存在两次由于时间偏差过小,且恰好在最短绿灯时间内到达,交叉口无法实施调控的特殊情况,公交车车头时距与标准车头时距差距较大。除此特殊情况外,其余公交车在交叉口经本次调控后通过交叉口的时间偏差相比与本次交叉口未调控通过交叉口的时间偏差变化幅度更小,更收敛于标准公交车到达时间。

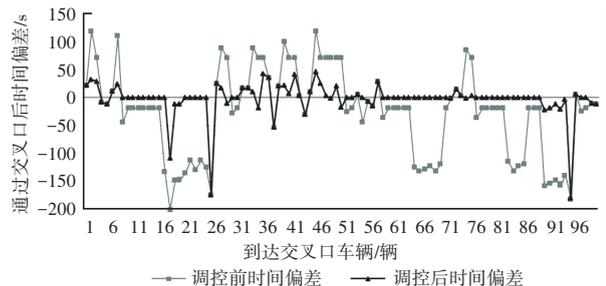


图 5 调控前后时间偏差对比图

Fig. 5 Comparison of time deviation before and after regulation

4 结束语

本文通过在交叉口前设置车辆检测器,预测出公交车到达交叉口的时间及公交车理想通过时间的

时间偏差。信号灯根据公交车实时状况,动态选择一种或多种的调控策略,使通过交叉口后时间偏差尽可能收敛于零。经仿真验证了本文提出信号优化策略的稳定性与可靠性,且能够使公交车通过交叉口后的时间更加收敛于理想通过时间,从而提高公交服务的可靠性。

参考文献

[1] 汪斌. 基于人均延误最小的公交优先信号配时优化设计研究

[D]. 兰州:兰州交通大学,2018.

- [2] 刘红红,杨兆升. 实施公交优先的交通信号控制系统中信号协调方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2007,30(2):114-118.
- [3] 赵天羽,梁士栋,徐晗,等. 考虑到站时间可靠性的有限公交优先信号控制[J]. 智能计算机与应用,2020,10(5):163-168.
- [4] 曹成海,裴玉龙. 城市交叉口公交优先信号协调模式探讨[J]. 农业装备与车辆工程,2006(10):22-28.
- [5] 马万经,杨晓光. 基于时空优化的单点交叉口公交被动优先控制方法[J]. 中国公路学报,2007,85(3):86-90.

(上接第76页)

由表2可知,对不同网格规模的拓扑结构进行优化计算,所得灰度集在标准值附近上下浮动,整体差异不大,偏离度均保持在0.02%以内,可以视为完全复原。经过自适应阈值方法过滤所得结构在不改变整体体积约束条件下,中间密度单元明显得到过滤,完全实现图像黑白单元化。

4 结束语

本文针对拓扑优化变密度法中运用SIMP模型得到优化结构中存在大量灰度单元,且中间密度单元对整体结构清晰度影响较大的问题,通过数值化提取拓扑结构灰度单元,依据最大类间方差法确定初始阈值,接着通过histogram函数确定均匀宽度值,依据灰度值约束条件建立自适应阈值计算公式,得到自适应阈值算子,并通过典型算例验证方法有效性,与多种数字图像增强算法对比,本文提出算法在拓扑约束偏离值仅为0.01%情况下实现拓扑灰度图像有效过滤,整体优化结构清晰。

参考文献

- [1] 蔡新. 工程结构优化设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003:16-22.
- [2] WANG M Y, WANG S. Bilateral filtering for structural topology optimization.[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 63(13):1911-1938.
- [3] SIGMUND O. Morphology-based black and white filters for topology optimization [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2007, 33(4-5):401-424.
- [4] GUEST J K, PRÉVOST J H, BELYTSCHKO T. Achieving minimum length scale in topology optimization using nodal design variables and projection functions [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 61(2):238-254.

- [5] FUCHS M B, JINY S, PELEG N. The SRV constraint for 0/1 topological design [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2005, 30(4):320-326.
- [6] ZHAO W, CHEN L, ZHENG C, et al. Design of absorbing material distribution for sound barrier using topology optimization [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2017, 56(2):315-329.
- [7] LEE D, SHIN S. Topological Optimal Material Design of Structures with Moved and Regularized Heaviside Function [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 2020, 44(1):103-117.
- [8] LIANG Y, CHENG G. Further elaborations on topology optimization via sequential integer programming and Canonical relaxation algorithm and 128-line MATLAB code [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 61(1):411-431.
- [9] 赵艳妮,何燕. 基于模糊熵的数字图像局部自适应增强算法[J]. 计算机仿真,2021,38(10):232-236.
- [10] 娄联堂,何慧玲. 基于图像灰度变换的OTSU阈值优化算法[J]. 中南民族大学学报(自然科学版),2021,40(3):325-330.
- [11] 胡涛,茅健. 基于图像分解的PCB图像去噪算法研究[J]. 智能计算机与应用,2022,12(9):189-192.
- [12] 牛为华,李宝树,梁贵书. 数字图像的Riemann Liouville分数阶微分增强方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2014,26(12):2189-2195.
- [13] 刘巧红,孙丽萍,林敏. 改进的二阶总广义变分图像去噪算法[J]. 计算机工程与应用,2017,53(19):198-203.
- [14] BENDSØE M P. Optimal shape design as a material distribution problem [J]. Structural Optimization, 1989, 1(4):193-202.
- [15] M. Z, G. I. N. R. The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1991, 89(1-3):309-336.
- [16] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1979, 9(1):62-66.
- [17] 张晓娟,樊东燕. 红外图像动态范围压缩和对比度增强研究[J]. 激光杂志,2020,41(6):76-79.