

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.11.020

考虑故障因素的高速公路交通检测器布设

王 仲, 钟树伟, 徐洪峰

(大连理工大学 交通运输学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 利用交通检测器获取车辆通行信息, 是促进路网的智能化建设和提高道路运营管理效率的基础, 但过去的检测器布设研究大多数都是对于城市路网进行研究, 较少考虑到检测器故障因素对整体路网检测效果的影响。提出了一种两阶段法, 探究在高速公路网中最少检测器的布设方案, 以及通过布设冗余检测器的方式提高检测体系在故障时的检测可靠性: 第1阶段结合以往高速路网检测器最少布设数量研究的基础, 利用 MATLAB 设计和实现算法, 得出不发生故障的理想条件下最少检测器的布设方案; 第2阶段考虑路段重要度指标, 设计算法探求了在故障情形下冗余检测器的安装数量与能够测得数据的路段数量的关系, 在考虑成本因素的情况下, 得出最佳的冗余检测器布设数量与位置。最后, 将两阶段得到的布设位置相结合, 在保障路段检测覆盖率的前提下, 得到合理的高速公路最少检测器的布设方案, 并通过实际高速路网进行了方法验证。试验结果表明: 所提出的检测器布设方法有效, 且能够保证当故障发生时整体的检测器布设方案仍有较高的检测能力。本研究对于提升高速公路车流检测器布设的经济性和科学性以及促进高速公路信息化建设有较高应用价值。

关键词: 交通工程; 检测器布设; 检测器故障; 高速公路; 车流检测

中图分类号: U49

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 11-0158-07

Layout of Expressway Traffic Detectors Considering Failure Factors

WANG Zhong, ZHONG Shu-wei, XU Hong-feng

(School of Transportation and Logistics, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract: Using traffic detectors to obtain vehicle traffic information is the basis for promoting the intelligent construction of road network and improving the efficiency of road operation and management. However, most of the previous detector layout studies were focused on the urban road network, the influence of detector failure factors on the detection effect of the overall road network was rarely considered. A two-stage method is proposed to explore the layout scheme of the minimum detectors in the expressway network, and improve the detection reliability of the detection system when detector malfunction occurs by deploying redundant detectors: In the first stage, based on the previous research on the minimum number of detectors in expressway network, the algorithm is designed and implemented by using MATLAB, The layout scheme of the minimum detectors under the ideal condition of no failure is obtained. In the second stage, considering the link importance indicator, the relationship between the number of redundant detectors and the number of links that can measure data in the event of detector failure is explored by using the designed algorithm. Considering the cost factor, the optimal number and location of redundant detectors are obtained. Finally, combining the placement positions obtained in the 2 stages, a reasonable layout scheme of the minimum detectors for expressway is obtained on the premise of ensuring the detection coverage of the road section, and the method is verified by an expressway network. The result shows that the proposed detector layout method is effective and can ensure that the detector layout scheme still has high detection ability when detector failure occurring.

收稿日期: 2020-12-23

作者简介: 王仲 (1975-), 男, 湖北宜昌人, 博士, 教授. (zwang@dlut.edu.cn)

This study has high application value for improving the economy and scientificity of expressway traffic flow detector layout and promoting expressway information construction.

Key words: traffic engineering; detector layout; detector failure; expressway; traffic detection

0 引言

近年来随着智能交通的不断发展,对于道路交通信息采集的准确性和全面性也提出了更高的要求。因此,对于检测器的安装布设国内外学者都进行了多方面的探索。

在 1992 年西澳大学的研究团队^[1]就率先提出了一种使用双层优化模型的方法来研究检测器的布设,这是首次系统性地将优化模型运用到检测器布设领域,所提出的道路独立等 4 大原则,成为了后续检测器研究领域的理论基石。随着城市交通的进一步发展,多位研究者运用网络理论等不同的理论方式对于路网的交通数据进行分析,探讨更优的流量数据观测方法^[2-4]。随着几年来高新技术的发展,也探讨了利用浮动车等方式的动态检测技术^[5-6]和利用神经网络、深度学习^[7-8]等先进方式。此外,对于检测器的使用寿命方面^[9]也进行了一定程度的探索。整体来看,对于城市路网的检测器布设研究较为全面。

我国对于检测器布设方面的研究起步较晚。宋志洪等人从不同的应用领域出发,对于检测器的布设方式进行了阐述与研究^[10]。陆百川等利用检测器等方式获取实时数据进行了交通流的短时预测^[11]。董春肖等利用建模的方式对于城市快速路的固定交通检测器优化配置问题进行了分析^[12]。朱宁等根据现实生活中复杂的外界环境,从不同的交通需求出发,提出了两阶段模型法,对于多目标的检测器优化问题进行了很大改进^[13]。张墨逸、赵禹乔、李梦莹等^[14-16]主要运用图论的方法来构筑合理的检测器布局。边梦依^[17]从需求出发,利用仿真检测器数据的方式研究了跟驰模型的标定。这些研究案例均表明我国对于城市路网检测器的安装布设也具有一定的进展。

综上所述,过去的检测器布设研究大多数都是对于车流量复杂多变的城市路网进行研究,对于如何在高速公路上布设研究相对较少,同时也大多没有考虑到检测器故障因素对于整体检测效果的影响。因而,为了一定程度上弥补这一缺陷,本研究在前人对于高速公路检测器最小安装数目研究的基础上^[18],考虑检测器故障因素的影响,利用 MATLAB 设计算法,提出一种新的方法来得到包含冗余检测

器的最少检测器安装方案,以保障当故障发生时检测器布设方案仍有较好的检测能力。

1 最少检测器布设算法设计

首先,对高速公路路网进行拓扑化处理,高速路网具有流量守恒和单个分流合流节点最多只连接 3 条路段的特点。根据前人的研究^[18],利用线性代数中秩与基变量的性质可以得到路网最小检测器安装数量的公式,如式(1)所示, N 为路网节点数; M 为路网出入口的数量; A 为最少检测器的布设数量。

$$A = 2N - \frac{3N - M}{2} \quad (1)$$

本研究为了得到路网最小的检测器安装数量,利用 MATLAB 程序在原有道路已经布设的检测器与没有布设检测器的两种情况下进行算法设计。最后,利用最小的安装数量公式进行检验,具体的思路流程如图 1 所示。

在整个算法当中,重点在于判断选取行与 B 集合的重复元素个数后,利用算法对于新的 B 集合中的路段进行计算,看是否能够通过已知路段流量推知新的路段流量,如果能的话,需要将这 3 条路段均所在的第 i 行在 D 中除去,之后生成新的矩阵 E ,之后再行进一步的运算,从而防止算法运行时出现布设位置选择的重复情况,最终得到可行的布设方案。需要注意的是,因为算法在判断重复元素时存在随机选择的情况,因此算法的解不唯一。

而当路网已经存在检测器时,需要将已布设路段的编号先加入 A , B 集合中,预先计算出能够凭借 B 集合中的路段信息推知的新路段,将其组合为新 B 集,之后的操作与流程图 1 一致。在明确了最少布设方案的算法设计思路后,选取图 2 这种复杂的高速路网单元进行验证,该处实际选自兰海高速牛郎关路段^[18]。

图 2 中,数字表示路段编号,可以看出,共有 16 个节点,8 个出入口,28 条路段。这里分为两种情况进行考虑:一种是路网没有布设检测器,直接利用所提出的算法对整个路网进行运算,用矩形图案表示检测器;另一种是路网已经预先布设了检测器,例如假设路段 {1, 2, 3, 4} 已经布设了检测器,图中用三角图案进行表示,再利用算法进行运算。二者的一种具体布设方案结果如图 3 所示。

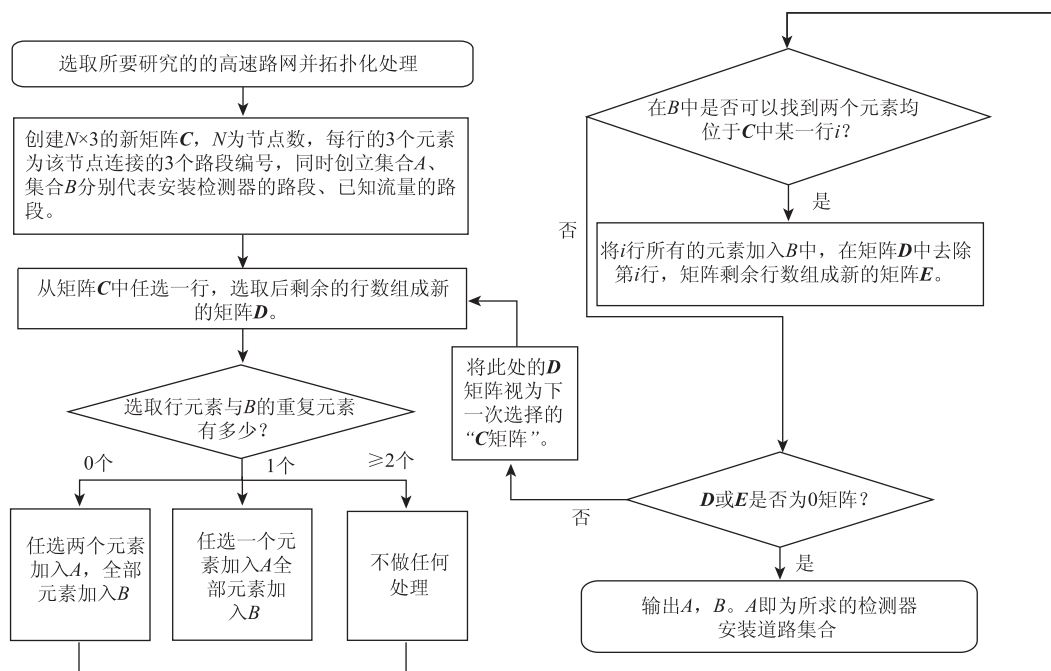


图1 可行方案的求解算法

Fig. 1 Feasible solution solving algorithm

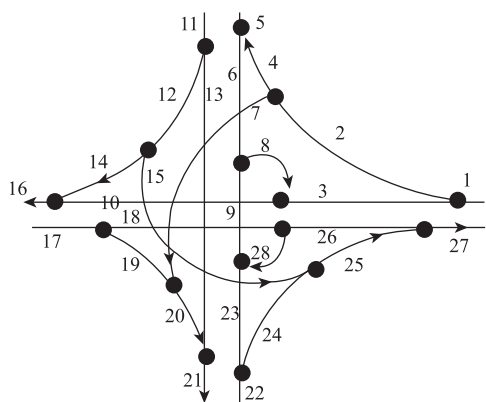
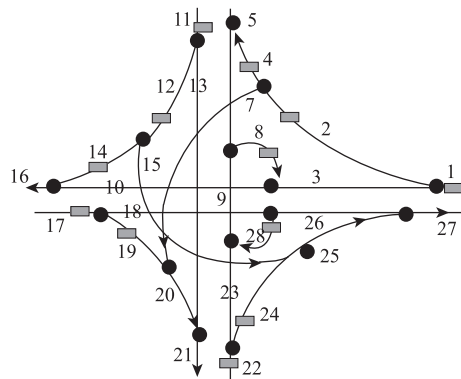


图2 一种路网拓扑图

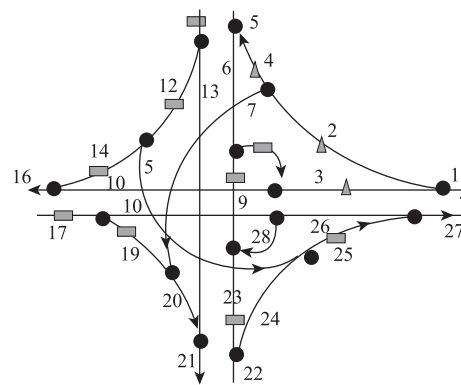
Fig. 2 A topological graph of road network

图3 (a) 所示的布设方案为12个检测器的最小方案, 与式 (1) 的计算结果相同, 而在已有布设的情况下如图3 (b) 所示, 因为1, 2, 3号检测器属于同一节点, 无论如何调整方案, 均会产生1个冗余, 因此布设13个检测器, 虽与公式计算结果不同, 但也达成了最小布设方案, 因此算法有效。

通过对于以上路网的模拟研究结果, 可以看出本研究通过设计最少布设算法, 解决了过去仅靠公式只能得出具体数量而无法得出具体方案的问题。但一旦有某些检测器故障, 整个路网的流量检测能力将会大幅度下降, 所以在设计方案时有必要考虑故障因素的影响。



(a) 没有布设检测器的情况



(b) 已经布设检测器的情况

图3 不同预设条件下的检测器布设方案

Fig. 3 Detector layout schemes under different preset conditions

2 考虑故障因素的冗余检测器布设算法设计与验证

在实际的测量过程中, 道路流量检测器极易因为各种因素导致自身的损坏, 根据美国 PEMS 系统 2019 年的统计数据, 每年有大量的检测器因为多种因素导致故障, 丧失数据收集能力。因此, 在得到了可行的最少检测器布局方案后, 应当尽可能地布设足够数量额外检测器, 保障当故障发生时, 整个检测系统仍具有较高的检测能力。本研究将可行方案中路段被选择频数与路段重要度评分结合起来, 将整个路网的所有路段进行排序, 并据此设计算法探讨在不同的检测器故障概率下, 为达到整体布设方案 95% 的可靠性, 合理的冗余检测器布设数量。

首先是路段重要度评分方面, 根据 AHP 层次分析法中的相对重要性理论, 选定如下判断标准, 本研究将路网中的所有路段进行加权赋值, 对于符合判断标准的, 认定此路段为对于该标准的重要路段, 加权值设定为 0.7; 对于不符合判断标准的, 认定此路段为对于该标准的不重要路段, 加权值设定为 0.3。

(1) A_1 路段类型

通常情况下, 高速公路的路段类型主要分为主干道和匝道, 干道与众多道路相联结, 加权值设定为 0.7, 匝道与其他路段的联系较少, 加权值设定为 0.3。

(2) A_2 路段车流量

利用 OpenStreetMap 等软件对于车流量数据进行观测, 计算出路段 5 a 的平均车流量, 将平均车流量较大路段的重要度评分设定为 0.7, 其余路段的重要度评分设置为 0.3。

(3) A_3 外界因素

此项指标需提前进行判定, 在考虑其余因素之前, 需对路网中的某些因为气候、政策等因素导致必须要安装检测器的路段进行标定。此时, 这些路段的重要度评分为 ∞ 。

(4) A_4 路段是否位于路网边缘

此项指标主要考虑该路段是否为路网边缘或是与出入口收费站相连的路段, 这些路段与路网其余路段的联系较差, 很难通过这些路段的流量数据推测其余路段, 因此, 这些路段的重要度评分设为 0。

利用以上的评价标准对于路网中的所有路段进行重要度评分, 如式 (2) 所示:

$$W = A_3 + A_4(A_1 + A_2),$$

$$A_1 = \{0.3, 0.7\},$$

$$A_2 = \{0.3, 0.7\},$$

$$A_3 = \{0, \infty\},$$

$$A_4 = \{0, 1\}. \quad (2)$$

首先考虑 A_3 与 A_4 元素, 即路段是否位于路网边缘出入口地区, 如果符合标准, 则 A_4 取值为 0, 不符合则为 1; 之后判断该路段是否必须安装检测器, 如果是则指标 A_3 设置为无穷大, 不符合则设置为 0; 之后在 A_3 与 A_4 判断完成后, 根据路段的实际情况对于 A_1 与 A_2 因素进行赋值判断。

在得到路段的重要度评分表之后, 接下来对于第 2 个指标路段被选频次进行考虑。

为保证各路段被选频次这一指标的可靠性, 利用上节得到的最少检测器布设方案程序进行了 1 000 次可行方案求解 (确保每条路段被选择概率相同), 对于所有路段的被选择频数进行计算, 并按照路段被选择频数从大到小进行排序。

之后对于路段重要度评分与路段被选择频数综合进行分析, 所有路段按照前者进行排序, 同一分值下按后者进行排序。得到目标路网所有路段的冗余检测器安装顺序集合。

在得到具体的安装排序后, 接下来需要明确安装多少冗余的检测器。冗余检测器布设上限不超过最少检测器布设数量, 最大损坏数量设为 $MaxN$ 。如式 (3) 所示:

$$MaxN_j = \min \left[\sum_{i=1}^n P_i \geq 95\% \right], \quad (3)$$

式中, P_i 为检测器同时损坏 i 个的概率; $MaxN_j$ 为当布设 j 个冗余检测器时系统的检测器最大损坏数量, 取 P_i 累计概率达到 95% 以上的最小整数值。

假设单个检测器故障概率一定, 计算布设 j 个冗余检测器时对应的整体布设方案可能发生故障的最大个数 $MaxN_j$, 之后在算法设计时, 将最大故障数作为检测器故障数量上界, 计算故障发生时不同的冗余检测器布设方案对于整个路网的覆盖率, 如式 (4) 所示:

$$F_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^L C_{ik}}{L},$$

$$i \in (0, MaxN_j), \quad (4)$$

式中, F_{ji} 为布设 j 个冗余检测器的情况下, 损坏 i 个检测器时整个检测体系对路网所有路段的检测能力; C_{ik} 为损坏 i 个检测器的情况下第 k 次算法模拟运行时的检测能力; L 为算法模拟运行的总次数, 本次取值 1 000。具体思路如图 4 所示。

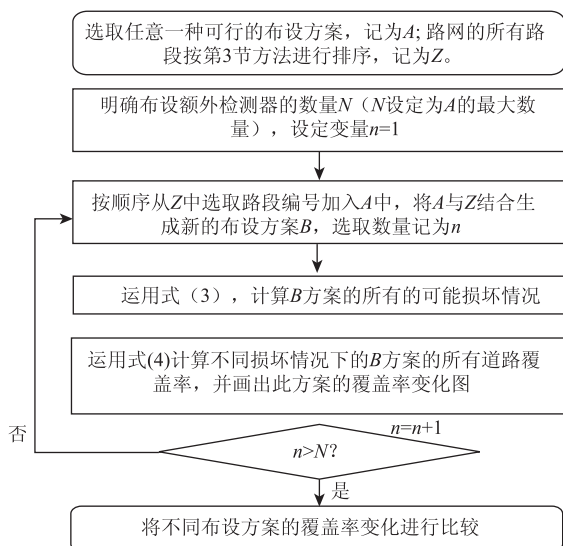


图 4 可行的求解算法

Fig. 4 Feasible solution solving algorithm

接下来针对设计的算法进行模拟验证, 以图 2 兰海高速牛郎关段为例, 结合实际环境对此路网的 28 条路段进行重要度分析后, 结果如表 1 所示。

表 1 路段重要度评分

Tab. 1 Scores of road section importance

评分数值	路段编号
0	22, 21, 15, 27, 17, 16, 11
0.6	15, 24, 7, 8, 28, 14
1.0	2, 25, 12, 19, 4, 23, 9, 6, 20
1.4	18, 10, 26, 13, 3
∞	无

从上表可以看出, 路段 {18 13 10 3 26} 均为主干道且平均车流量较大, 因此重要度评分取值较高, 而路段 {11 5 16 17 21 22 1 27} 位于路网边缘地带, 因而评分值最低。

如上文所述, 利用图 1 所示算法进行 1 000 次可行方案求解, 各路段被选择的频数如表 2 所示。

表 2 各路段被选择频数

Tab. 2 Selected number of each section

试验次数/次	路段出现频数 (按从高到低排列)
1 000	13, 2, 20, 4, 10, 25, 3, 18, 19, 12, 26, 24, 6, 14, 8, 15, 7, 23, 28, 9, 11, 21, 27, 17, 22, 1, 16, 5

将表 1 与表 2 结合进行综合分析, 所有路段的冗余检测器安装优先度集合为 {13 10 3 18 26 2 20 4 ...} (此处仅列出优先度前 8 位)。以图 2 路网为例, 经过算法计算, 最少安装数目为 12 个。利用本研究算法, 在不同的检测器故障概率下, 计算布设 1~12 个冗余检测器时的整体布设方案可能发生故障的最

大个数, 结果如表 3 所示。

表 3 不同的布设方案下检测器可能发生故障的最大个数

Tab. 3 Maximum number of possible detector failures under different layout schemes

检测器故障概率/%	冗余检测器布设数量及对应的检测器故障数量/个											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20	5	5	6	6	6	7	7	7	7	8	8	8
10	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5
5	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

由表 3 可知, 在检测器的故障概率为 20% 时, 布设 2 个以下的冗余检测器, 将大概率最多会有 5 个检测器发生损坏。以此类推, 随着冗余检测器布设数目的增多, 可能会有 6~8 个检测器发生损坏。据此计算不同的布设方案在所有损坏情况下的路段检测覆盖率的均值, 得到的具体结果如图 5 所示。

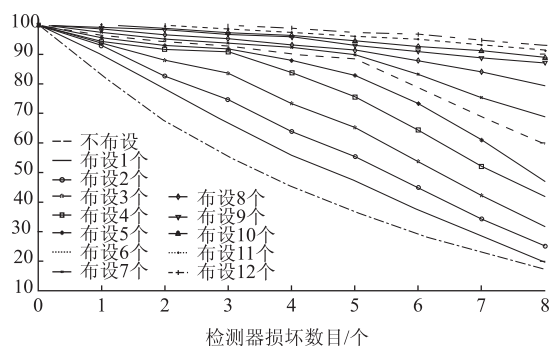


图 5 不同布设方案下检测能力随故障的变化

Fig. 5 Detection capability varying with failures under different layout schemes

由图 5 可知, 当检测覆盖率超过 95% 时, 此时的冗余检测器布设方案为 10 个, 再继续增加冗余检测器, 检测覆盖率增加的幅度并没有显著提升, 因此从成本角度考虑, 继续安装的必要性较低, 可以认为 10 个检测器即为理想的冗余检测器安装数量。同理, 检测器故障概率为 10%, 5%, 1% 时, 合理的冗余检测器安装数目分别为 7, 5, 3 个。因此, 最终的冗余检测器布设方案依计算得到的理想布设数目, 可从前文得到的路段优先度集合中按顺序选取。

3 实例研究

本研究选择辽宁省皮长高速整体区段作为研究对象, 进行实际路网验证。皮长高速整体呈东西方向, 西起长兴岛, 东至皮口, 共有 10 个收费站, 设计速度 120 km/h, 但在谢屯等一些匝道附近路段坡路起伏, 限速 80 km/h, 部分道路车流具有潮汐特

性。此处仍将检测器布设方案整体覆盖可靠性标准设置为 95%，近年来采用的交通检测器的整体质量较高，因此将故障率设定为 1%。之后，运用本研究提出的方法探求考虑故障因素的检测器最少布设方案。

结合实际情况，对路网进行拓扑化处理，可得 $M=28$, $N=78$ 。通过式 (1) 可知，全部路段均能检测的检测器最少布设总数为 53 个。运用图 1 算法进行计算，选取其中的一种安装方案如图 6 所示，设置方块标识的路段代表安装了检测器。

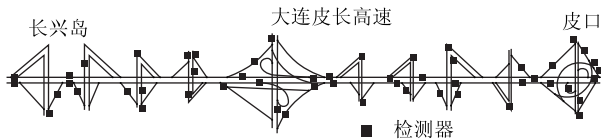


图 6 皮长高速拓扑图

Fig. 6 Topology of Pikou-Changxingdao expressway

为保证检测器故障条件下的检测能力，接下来进行冗余检测器的布设研究。与第 2 节的计算过程相同，根据路段重要性评分标准对路网每条路段赋予评分值；同时利用图 1 检测器最少布设求解算法取 1 000 次可行方案，求得各路段的被选择频数均值。

综合二者分析，冗余检测器安装优先度集合为 {114 112 7 2 50 122 77 29 3 123...}（此处仅列出优先度前 10 位的路段）。之后利用式 (3)，计算冗余检测器布设数量与可能发生的损坏情况之间的关系，得到布设 53 个检测器时，按照假定的检测器故障率，一般情况下至多同时会有 2~3 个检测器发生损坏。

最后运用图 4 所示算法，得出故障发生时不同的冗余检测器布设方案对于整个路网的覆盖率大小，以及不同布设方案下路段检测覆盖总数与检测覆盖率的均值，结果如图 7 所示。

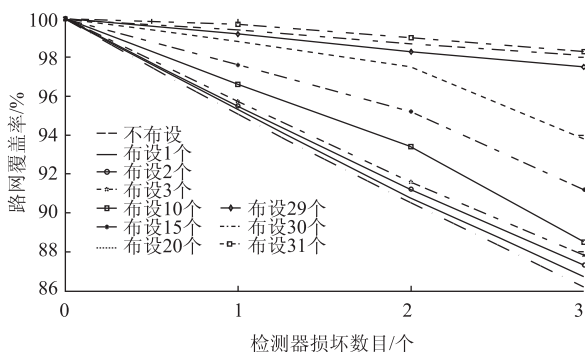


图 7 不同布设方案下检测能力随故障变化的情况

Fig. 7 Detection capability varying with failures under different layout schemes

在布置 53 个检测器的情况下，皮长高速路网整体的检测覆盖率能达到 85.9%~100%；在增加布设 12 个冗余检测器的情况下，路网整体的检测覆盖率能够达到 95%~100%，可以认为此布设方案对于提升该路网车流检测可靠性具有良好效果。12 个冗余检测器的可行方案如图 8 所示。

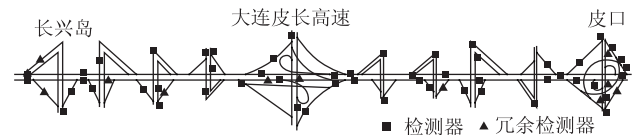


图 8 一种合理的最少检测器布设方案

Fig. 8 A reasonable layout scheme of minimum detectors

4 结论

高速公路车流检测对高速公路运营管理至关重要，本研究从现有研究出发，提出了一种两阶段方法，通过合理布设冗余检测器，保障了整个检测体系在个别检测器发生故障时仍对于路网整体具有可靠检测能力。本研究通过实际路网进行了验证，证明该方法具有良好的可应用性。本研究也存在一定的局限性，例如假定每台检测设备仅能对单一路段进行检测，未充分考虑一台设备多路段检测的可能性，此外，在路段重要度评价方面采用了较为简化的方法，未来可进一步改进。

参考文献:

References:

- [1] YANG H, SASAKI T, IIDA Y, et al. Estimation of Origin-destination Matrices from Link Traffic Counts on Congested Networks [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1992, 26 (6): 417-434.
- [2] HORVAT R, KOS G, ŠEVROVIĆ M. Traffic Flow Modelling on the Road Network in the Cities [J]. Tehnicki Vjesnik, 2015, 22 (2): 475-486.
- [3] CASTILLO E, JIMÉNEZ P, MENÉNDEZ J M, et al. A Ternary-arithmetic Topological Based Algebraic Method for Networks Traffic Observability [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35 (11): 5338-5354.
- [4] AN S, MA L, WANG J. Optimization of Traffic Detector Layout Based on Complex Network Theory [J]. Sustainability 2020, 12 (5): 1-22.
- [5] YAO E, WANG X, YANG Y, et al. Traffic Flow Estimation Based on Toll Ticket Data Considering Multitype Vehicle Impact [J]. Journal of Transportation Engineering Part A: Systems, 2021, 147 (2): 04020158.
- [6] SORIGUERA F, MARTINEZ-DIAZ M. Freeway Travel

- Time Information from Input-output Vehicle Counts: A Drift Correction Method Based on AVI Data [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22 (9): 5749-5761.
- [7] HARROU F, ZEROUAL A, SUN Y. Traffic Congestion Monitoring Using an Improved KNN Strategy [J]. Measurement, 2020, 156: 107534.
- [8] ZHANG Z, YANG X. Freeway Traffic Speed Estimation by Regression Machine-learning Techniques Using Probe Vehicle and Sensor Detector Data [J]. Journal of Transportation Engineering Part A: Systems, 2020, 146 (12): 04020138.
- [9] JUNG Y S, OH J S. Lifespan Evaluation of Traffic Detector for Automated Traffic Recorders Based on Weibull Distribution [J]. Journal of Transportation Engineering, 2017, 143 (9): 5017006.
- [10] 宋志洪, 王琳, 江金凤. 面向不同应用的检测器布局需求研究 [J]. 物联网技术, 2016, 6 (2): 54-56, 58.
SONG Zhi-hong, WANG Lin, JIANG Jin-feng. Research on Detector Layout for Different Application Requirements [J]. Internet of Things Technologies, 2016, 6 (2): 54-56, 58.
- [11] 陆百川, 舒芹, 马广露. 基于多源交通数据融合的短时交通流预测 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2019, 38 (5): 13-19, 56.
LU Bai-chuan, SHU Qin, MA Guang-lu. Short-term Traffic Flow Forecasting Based on Multi-source Traffic Data Fusion [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2019, 38 (5): 13-19, 56.
- [12] 董春肖, 张立涛, 孙洪运, 等. 固定交通检测器布设对快速路交通流量预测影响的实证研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19 (2): 359-366.
DONG Chun-xiao, ZHANG Li-tao, SUN Hong-yun, et al. Empirical Investigation of the Effects of Fixed Traffic Detector Deployment on Expressway Traffic Flow Forecasting [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19 (2): 359-366.
- [13] 朱宁. 交通网络检测器布设优化问题研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
ZHU Ning. Detector Location Optimization on Transportation Network [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [14] 李梦莹. 基于全路段流量估计的路网检测器优化布设研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
LI Meng-ying. Research on Optimal Layout of Road Network Detectors Based on Whole Road Traffic Volume Estimation [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [15] 张墨逸, 曹洁, 牛建强, 等. 基于图论与矩阵论的交通检测器布设新方法 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (11): 130-134.
ZHANG Mo-yi, CAO Jie, NIU Jian-qiang, et al. A New Layout of Traffic Detectors Based on Graph Theory and Matrix Theory [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (11): 130-134.
- [16] 赵禹乔. 城市道路交通数据检测器优化综合布设方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.
ZHAO Yu-qiao. Research on Optimization and Comprehensive Layout Method of Urban Road Traffic Data Detectors [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [17] 边梦依. 基于仿真检测器数据的跟驰模型参数标定研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
BIAN Meng-yi. Research on Parameter Calibration of Car Following Model Based on Simulation Detector Data [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [18] 柳波, 余红红, 张生. 高速公路网络最小检测器布设新方法 [J]. 交通科学与工程, 2015, 31 (1): 74-78, 84.
LIU Bo, YU Hong-hong, ZHANG Sheng. A New Minimum Detector Layout Method to Get Any Section Traffic Flow of Expressway Network [J]. Journal of Traffic Science and Engineering, 2015, 31 (1): 74-78, 84.