

我们能从道路交通拥堵中学到什么

What We've Learned about Highway Traffic Congestion

Pravin Varaiya¹ 著, 吕大玮² 译

(1.加利福尼亚大学电气工程与计算机科学系,加利福尼亚州 伯克利 94720;2.中国城市规划设计研究院,北京 100037)

Written by Pravin Varaiya¹, Translated by LÜ Dawei²

(1.Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley CA 94720, USA; 2. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100037, China)

摘要: 随着高速公路监测手段的完善,高速公路运行数据日益丰富。通过深入挖掘、分析加州高速公路运行监测系统5年来收集的数据,从不同角度定量理解拥堵产生的原因,包括拥堵动态分析、交通瓶颈识别、匝道控制效益评价、出行时间预测等。此外,基于上述数据,以加州湾区HOV车道为例,通过分析通行能力损失、对比路段相同位置HOV限制与非限制时段车道流量及速度变化,定量评价了HOV车道的实施效果及其给其他车道带来的拥堵后果。上述各项研究均衡量了拥堵的严重程度及产生原因,并给出了相应的缓堵方法。

Abstract: Freeway operational data become more available and enriched with the improvement of surveillance systems. By analyzing five years of freeway operational data archived in California, this paper quantitatively elaborates the causes of highway congestion from different perspectives, including congestion dynamics analysis, traffic bottleneck identification, ramp metering performance evaluation, travel time prediction, and etc. In addition, this paper quantifies the performance of HOV lanes and their impacts on other lanes in California Bay Area by analyzing capacity loss and comparing the speed and flow within and outside of HOV restriction periods for the same highway segment. Each of the aforementioned studies measures the severity and cause of congestion, and suggests mitigation approaches.

关键词: 高速公路; 交通拥堵; HOV车道; 匝道控制; 实时数据

Keywords: freeway; highway congestion; HOV lane; ramp metering; real-time data

中图分类号: U491 文献标识码: A

收稿日期: 2012-10-01

作者简介: Pravin Varaiya, 男, 教授, 美国工程院院士, 美国艺术与科学院院士, IEEE会员, 主要研究方向: 交通运输系统、通信网络、传感器网络、分层控制等。

E-mail: varaiya@eecs.berkeley.edu

译者简介: 吕大玮(1982—), 男, 河北沧州人, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 交通运输系统、城市交通规划。E-mail: thone.js@gmail.com

文章来源: Access, 2005年秋季刊, 第27期 2-9页, http://robotics.eecs.berkeley.edu/~varaiya/papers_ps.dir/accessF05v2.pdf

0 引言

在加州高速公路路面下埋设有2.6万个传感器。这些传感器收集的数据每30 s就被传送到位于伯克利的计算机上。利用这些数据可以得到高速公路的实时交通量和车辆行驶速度。同时,也可采集、处理并存储交通事故相关数据。该高速公路运行监测系统(Performance Monitoring System, PeMS)收集了加州高速公路最全面的信息,信息存储量已达4万亿字节,而且全部可以在线下载(网址: <http://pems.eecs.berkeley.edu>)。深入分析这些数据,可以发现很多有意思的现象。例如,过去通常认为车辆平均速度为40~50英里·h⁻¹(64~80 km·h⁻¹)时,高速公路的通行能力最大,分析证实这一数据并不准确,通行能力最大值实际出现在速度为60英里·h⁻¹(约97 km·h⁻¹)时^[1];另一个令人吃惊的发现是:高速公路上的某些高载客(High Occupancy Vehicle, HOV)

车道不仅未缓解拥堵，反而提高了拥堵程度。

通过持续不断的观测、分析，可利用 PeMS 更好地管理高速公路交通流、缓解其拥堵。将相关研究成果融合到加州交通部高速公路管理中，有助于其改善交通行为。除此之外，还能从 PeMS 收集的数据中学到什么？通过分析 5 年来 PeMS 收集的数据，本文总结了一些关于道路交通拥堵的经验性知识。当然，需要从中研究和挖掘的知识还有很多，这些数据还能被交通工程师、交通规划师、政策制定者、科研机构及公众以很多其他的方式分析和使用。

1 拥堵动态

当交通流从高速度(60 英里·h⁻¹)、高流量的自由流状态转变为混乱、低速度、低流量的过饱和状态时，交通拥堵就开始出现；这一转变发生于车辆密度超过某一临界水平时。进入拥堵状态后，交通流将耗费很长时间才能回到自由流状态，与此同时，交通延误也不断累积。图 1 给出了洛杉矶 I-10 高速公路西行方向 4 条车道每 5 min 的速度—流量关系，阐明了这种现象。清晨早些时候车速保持在 60 英里·h⁻¹ 时，从 4:00—5:35，流量可从 150 辆·(5 min)⁻¹ 增至 625 辆·(5 min)⁻¹，增加 3 倍多，达到了最大值。此时，持续增加的车流将道路车辆密度推至临界值以上，迫使交通进入拥堵状态。9:00 时，流量降至 500 辆·(5 min)⁻¹，车速更慢，约为 30 英里·h⁻¹(约 48 km·h⁻¹)。大约在 17:00 才恢复到自由流状态。

从图 1 的速度—流量关系可得到两个重要启示：1) 高速公路的最大流量或路段通行能力是在自由流状态下达到的。即车辆以 60 英里·h⁻¹ 行驶时，高速公路的效率最高，限速设置过低时会引发额外的延误。2) 若采用匝道控制措施，车辆密度可被控制在临界值以下，交通将保持自由流状态，并且可完全避免拥堵。这样的匝道控制策略通常被称为理想化控制策略(Ideal Metering Policy, IMP)。由于车辆在高速公路上以自由流速度行驶，且道路通行能力达到最大，因此该控制策略尽管在入口匝道处会带来排队延误，但总延误会

有所减少。

2 交通瓶颈

交通瓶颈可能由固定干扰引起，如车道数减少、道路等级变化或入口匝道较短。此类瓶颈在一周的同一天和一天的同一时段重复出现，是可预测的。无规律可循或突发性的交通瓶颈通常由以下情况引起：交通事故或道路维护堵塞一条或多条车道、特别事件如球赛带来的超常规需求、恶劣天气导致道路通行能力下降等。

在加州，工作日高峰时段约 50% 的拥堵延误出现在 600 个周期性瓶颈处。采取相关措施缓解这些瓶颈的拥堵程度，将显著减少道路交通拥堵^[2]。此外，还有 28% 的高峰时段拥堵延误由交通事故引起，其中 10% 的交通事故引起的拥堵延误占有所有交通事故引起拥堵延误的 90%。因此，迅速发现并处理这些最为严重的交通事故将显著减少拥堵。

3 匝道控制

如上文所述，若控制进入高速公路的车流量，使车辆密度不超过其临界值，则可以完全避免拥堵。当大量车辆从匝道涌入时，车辆密度通常会超过临界值。一个合理的匝道控制方案可防

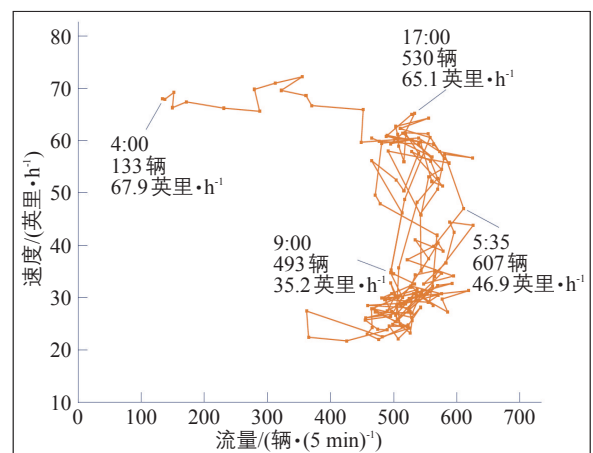


图 1 洛杉矶 I-10 高速公路西行方向 4:00—18:00 每 5 min 的速度—流量关系

Fig.1 Speed vs. flow on I-10 westbound in 5 minute intervals from 4:00 am to 6:00 pm

止出现上述情况，并将高速公路交通流维持在自由流状态。在合理的匝道控制方案下，当高速公路的车流量超过其通行能力时，车辆将在入口匝道处排队等候。根据前述分析，约50%的拥堵延误出现在600个周期性瓶颈处，若在这些瓶颈处实施匝道控制措施，则可减少25%的拥堵总延误，且有21%的拥堵总延误被移至入口匝道处，这些延误是实施匝道控制前由超额流量需求(即高速公路通行能力超出部分的车流量)导致的。

图2对上述判断进行了总结。在高峰时段，驾驶人有20%的时间处于拥堵状态。通过合理的匝道控制，可减少约25%的拥堵总延误；车祸导致的拥堵延误占总延误的28%；超额流量需求占21%^[3]。

4 出行时间建议

拥堵增加了出行时间及其不确定性。利用PeMS收集的实时数据可精确预测出行时间，降低

其不确定性。将预测的出行时间通过互联网及类似511的电话服务提供给出行者，将使出行者获益匪浅。久而久之，将改变其出行方式，从而减少拥堵延误。

若将出行时间预测用于路径选择中，那么出行者就能够选择出行时间最短的路径。表1列举了南加州的5对OD数据，每对OD间都有多条路径可供选择。最短路径预测采用历史数据预测和实时数据预测两种方法；前者推荐的是过去同一时段内平均出行时间最短的路径(经验丰富的通勤者通常会选择这条路径)，后者的推荐则是通过实时数据分析得到^[4]。5对OD中，实时数据预测的结果均好于历史数据。PeMS数据提供了高精度的实时估算。表1中出行时间节省列是使用实时数据预测时节约的平均出行时间。

对出行者来说，更有意义的是出行时间不确定性的减少。本文通过计算所谓的九分位缓冲时间，即出行者为保证其有90%的可能性按时到达

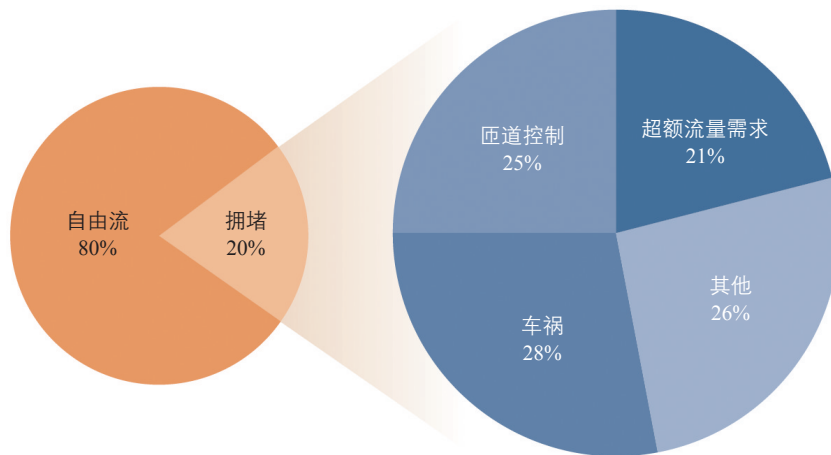


图2 高峰时段车辆总出行时间分布(左)及拥堵延误产生原因分析(右)
Fig.2 Total vehicle-hours of travel (left) and sources of congestion (right) during peak periods

表1 高峰时段5个OD对间出行时间实时预测的效益
Tab.1 Benefits of real-time prediction for peak-period trips between five origin-destination pairs

出发地及目的地	可选路径数	由历史数据得到的平均出行时间/min	实时预测节省的出行时间/%	九分位缓冲时间/min	实时预测节省的缓冲时间/%
I-10 西行方向,怀特大街至洛杉矶中心区	3	41.7	2.9	75.2	18
I-5 南行方向,泰拉贝拉大街至洛杉矶中心区	2	29.8	17.1	47.7	31
I-15 南行方向,I-5到圣地亚哥中心区	2	22.9	8.7	29.9	20.7
I-5 北行方向,艾尔托洛至普安那公园	5	32.9	1.7	41.8	11
I-5 北行方向,艾尔托洛至海豹滩	2	34.2	4.7	43.5	7

目的地需预留的时间，来定量衡量出行时间的不确定性。正如所预期的，缓冲时间远大于平均出行时间。与历史预测法相比，实时预测法节省的缓冲时间更多(见表1)。

5 HOV 车道

HOV 车道通过鼓励拼车减少拥堵，但却在上述两方面增加了拥堵：1)由于限制低载客车辆在 HOV 车道上通行，增加了其他车道的拥堵程度；2)HOV 车道有限的通行能力反而限制了 HOV 的通行。对加州湾区的数据分析表明，这两方面的负面影响已大于鼓励拼车带来的积极影响，在湾区设置的 HOV 车道实际上加剧了该区高速公路的拥堵状况。

利用湾区的数据之所以得出上述评价结果，是因为湾区的 HOV 车道运行受时间限制(运行时段为 5:00—9:00, 15:00—19:00)。因此，有必要对比高速公路同一路段在 HOV 限制和非限制时段的交通状况。图 3 有助于阐释 HOV 车道对高速公路通行能力的损害，图中给出了 I-880 南行方向最左侧车道 1(HOV 车道)每 5 min 的速度—流量关系。图 3a 所示时段(16:00—19:00)该车道只能行驶载客数 ≥ 2 人的车辆，图 3b 所示时段(19:00—21:00)则无此限制。两个时段该车道的最大车流量均为 145 辆 $\cdot (5 \text{ min})^{-1}$ ，即 1 740 辆 $\cdot \text{h}^{-1}$ ；在 HOV 限制时段，

车辆平均速度低于 50 英里 $\cdot \text{h}^{-1}$ (与同时段的非 HOV 车道几乎相同)，而在非限制时段则接近 80 英里 $\cdot \text{h}^{-1}$ 。

从另一角度分析这组数据，在 HOV 限制时段，车辆以 60 英里 $\cdot \text{h}^{-1}$ 运行时，道路最大流量为 110 辆 $\cdot (5 \text{ min})^{-1}$ ，而在非限制时段，同样速度下道路的最大流量为 140 辆 $\cdot (5 \text{ min})^{-1}$ 。也就是说，HOV 车道的实施使该车道的通行能力损失了 21%。通行能力损失的原因是：从 16:00—19:00，HOV 车道实际变成了一条单车道道路，该道路的运行速度由低速车辆决定；由于非 HOV 车道拥堵加剧，想快速行驶的 HOV 车辆不能超越前方的低速车辆；低速车辆的数量随 HOV 流量的增加而明显增加，导致 HOV 车道的车辆行驶速度显著下降(见图 3a)。一旦 HOV 的限制结束，行驶较慢的车辆将移至外侧车道，较快的车辆则进入原来的 HOV 车道。

自由流状态下高速公路的通行能力大致为 2 000~2 200 辆 $\cdot \text{车道}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ，而湾区的 HOV 车道通过的车辆数大致为 1 600 辆 $\cdot \text{h}^{-1}$ ，据此可判断湾区的 HOV 车道未被充分利用。这激发了人们通过将 HOV 车道转化为高收费(High Occupancy Toll, HOT)车道以充分利用过剩通行能力的兴趣。然而，若把 HOV 车道的通行能力损失考虑在内，则发现道路上基本没有增加车流量的空间。因此，通过 HOT 车道增加湾区收入的想法过于乐观了；允许混合动力车辆驶入 HOV 车道的法律，无疑会增加拥堵^[5]。

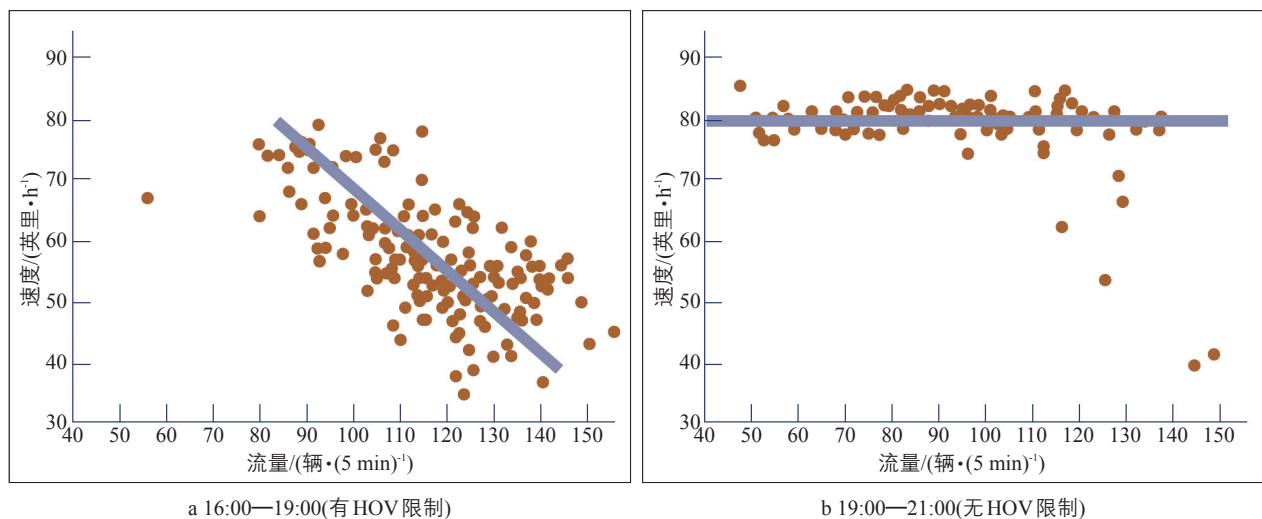


图 3 I-880 南行方向 2004 年 8 月 5 个工作日车道 1(HOV 车道)的速度—流量关系

Fig.3 Speed vs. flow in lane 1 (HOV lane) for five weekdays in August, 2004 on I-880 southbound

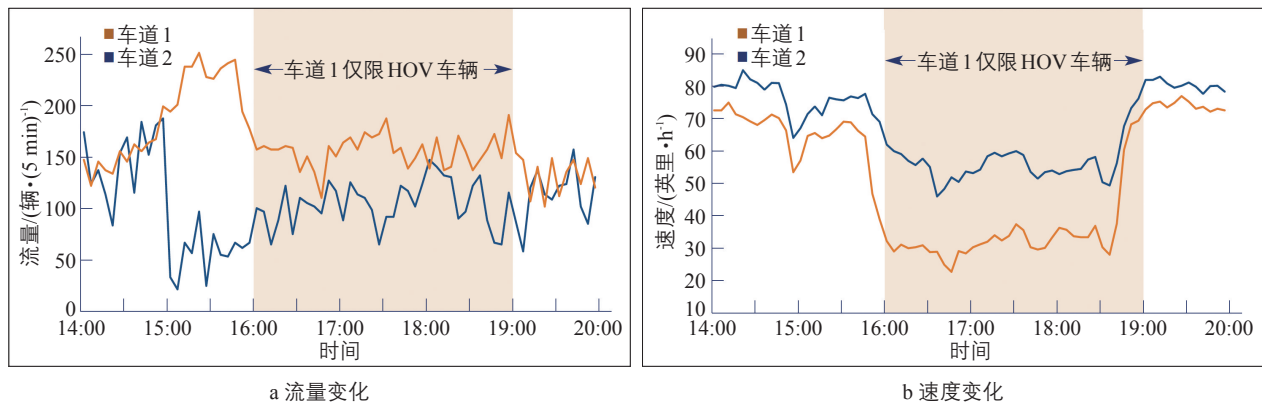


图4 I-880南行方向车道1及车道2的流量及速度
Fig.4 Flows and speeds in lanes 1 and 2 on I-880 southbound

图4比较了与图3相同位置处、最左侧车道1和2的车流量和速度，可说明HOV车道给其他车道带来的拥堵后果。直到15:00，在HOV限制开始前，两个车道的车流量和速度几乎相同。当HOV限制于15:00开始时，车道1——此时为HOV车道——的车流量急剧下降，车道2则增加了基本相同的量。伴随着典型的流量和速度的迅速下降，车道2在15:45进入拥堵状态。其原因部分是由限制非HOV车辆在HOV车道通行引起，部分是由超额流量需求引起。从图4b可以看出，从16:00—18:30，由于HOV车道的通行能力受限，其车速稳定下降。当HOV限制在19:00取消时，车道1和2的车速显著增加；低速车辆换到了最右侧车道，速度较快的车辆则换到了左侧车道。

从图3和图4的分析中可以得出这样的结论：湾区的HOV限制减少了总出行公里数，在增加非HOV车辆拥堵延误的同时，减少了HOV车辆的拥堵延误。为了判断拥堵总延误是增加还是减少，需要确定一天中不同时段HOV车道和非HOV车道的平均车辆载客数。但是，湾区的车辆载客数估算差别很大，有的估算显示HOV限制减少了总出行公里数，有的估算则显示其显著增加了该数值。

6 结语

在高峰时段的加州高速公路上，拥堵消耗了出行者20%的时间。在缺乏有效缓堵措施的情况下，假设出行需求以年均2%的速度增长，则拥堵

将以年均10%的速度增长。为了设计有效的缓堵措施，需要定量理解产生拥堵的不同原因。本文总结了目前从不同角度应用PeMS数据研究拥堵的方法，如交通瓶颈的识别、匝道控制效益的评价及HOV车道的实施效果等。每项研究均衡量了拥堵的严重程度，并给出了缓堵方法。

参考文献：

References:

- [1] Chen Chao, Pravin Varaiya. Max Flow in D12 Occurs at 60 mph and Maximum Throughput in LA Occurs at 60 mph[EB/OL]. 2001[2005-11-01]. <http://pems.eecs.berkeley.edu>.
- [2] Chen Chao. Systematic Identification of Freeway Bottlenecks[C]// Transportation Research Board. Proceedings of 83rd Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC: Transportation Research Board, 2004.
- [3] Jia Zhanfeng. Congestion, Excess Demand, and Effective Capacity in California Freeways[EB/OL]. 2000[2005-11-01]. <http://pems.eecs.berkeley.edu>.
- [4] Chen Chao. A System for Displaying Travel Times on Changeable Message Signs[C]// Transportation Research Board. Proceedings of 83rd Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC: Transportation Research Board, 2004.
- [5] DKS Associates. 2002 High Occupancy Vehicle (HOV) Lane Master Plan Update[R]. California: DKS Associates, 2003.