

公交优先 系统中的 交通安全

在规划、设计及运营环节
提升公交系统的安全性



出品：世界资源研究所

 WORLD RESOURCES INSTITUTE

 EMBARQ[®]
www.embarq.org

 WORLD BANK GROUP



报告撰写人:

尼克莱·杜图塔 (Nicolae Duduta)
世界资源研究所可持续交通中心(EMBARQ)
交通规划助理研究员, nduduta@gmail.com

克劳迪娅·斯泰尔 (Claudia Adriazola-Steil)
世界资源研究所可持续交通中心(EMBARQ)
健康与道路安全部门总监, cadriazola@wri.org

卡斯腾·沃斯 (Carsten Wass)
康莎咨询公司技术总监, wass@consia.com

达里奥·伊达尔戈 (Dario Hidalgo)
世界资源研究所可持续交通中心(EMBARQ)
研究与操作部门总监, dhidalgo@embarq.org

路易·林道 (Luis Antonio Lindau)
EMBARQ巴西区首席代表, tlindau@embarqbrasil.org

文尼·约翰 (Vineet Sam John)
世界资源研究所可持续交通中心(EMBARQ)
研究员, vjohn@wri.org

世界资源研究所罗斯可持续城市中心出品

版面设计:
卡尼·克里尔斯(Carni Klirs),
美术设计, cklirs@wri.org

研究经费支持:
布隆伯格慈善基金会

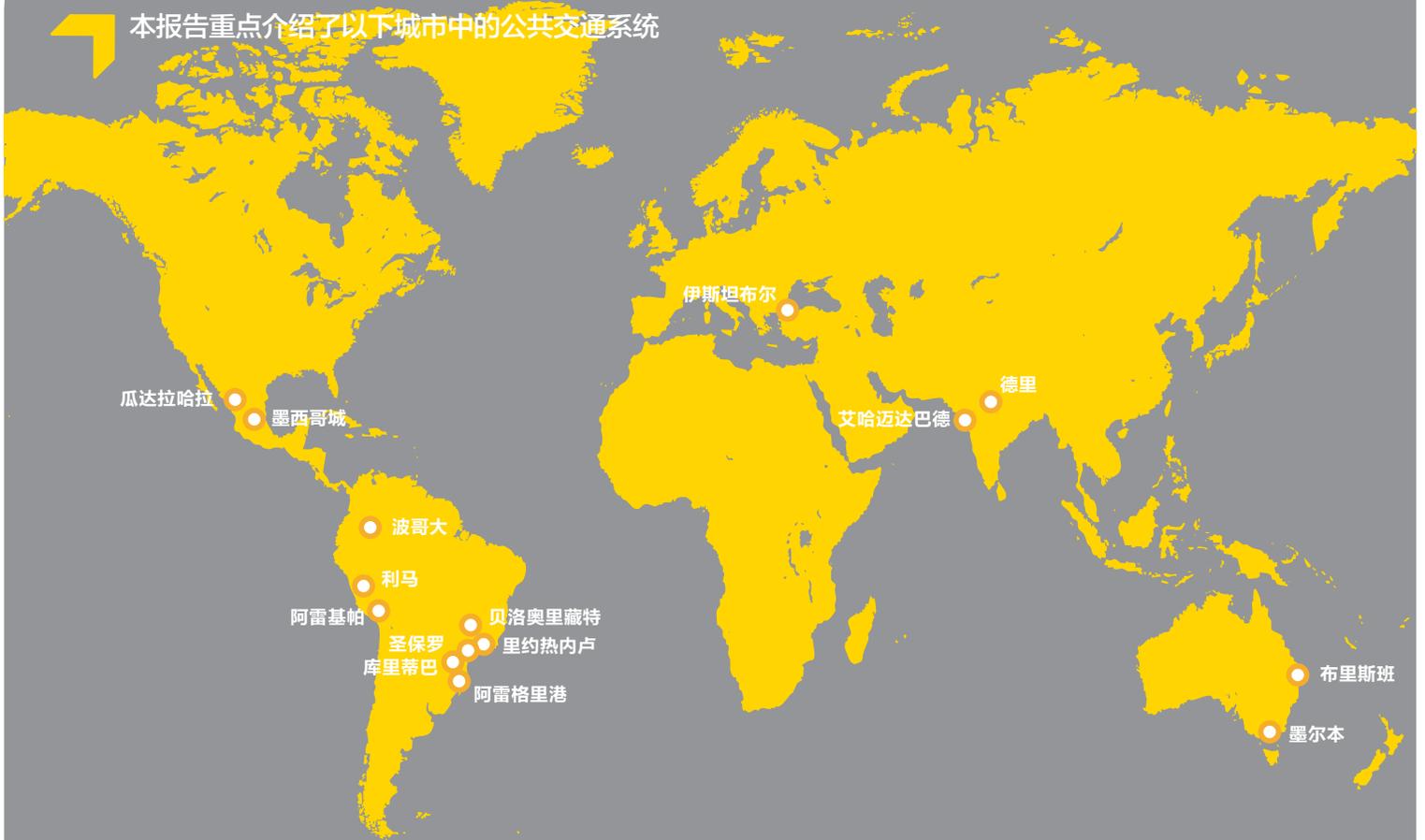
**Bloomberg
Philanthropies**



目录

前言	3
执行摘要	4
第一章 研究综述	6
<hr/>	
设计建议	
第二章 车速管控	19
第三章 路段、路中段设计及人行横道的设计建议	23
第四章 案例研究——里约热内卢市TransOeste快速公交系统	31
第五章 交叉路口的设计建议	35
第六章 案例研究——墨西哥城METROBÚS系统4号线	57
第七章 车站的设计建议	59
第八章 案例研究——高速路上的BRT系统：伊斯坦布尔市METROBÜS快速公交系统	71
第九章 大型换乘站的设计建议	87
<hr/>	
第十章 研究与分析	92
第十一章 致谢	106
第十二章 参考文献	107

本报告重点介绍了以下城市中的公共交通系统



道路安全检查

- 库里蒂巴整合交通网(Rede Integrada de Transporte)
- 波哥大TransMilenio快速公交系统
- 德里BRTS快速公交系统
- 艾哈迈达巴德Janmarg快速公交系统

市级交通事故发生频率模型

- 墨西哥城
- 瓜达拉哈拉
- 阿雷格里港
- 波哥大

附加数据收集及分析

- 墨西哥城Metrobus公交系统2号线
- 瓜达拉哈拉Macrobús公交系统
- 波哥大TransMilenio快速公交系统
- 佩雷拉Megabus公交系统
- 加利的比圣地亚哥BRT系统
- 阿雷基帕SIT公交系统
- 贝洛奥里藏特Busways公交系统
- 库里蒂巴Boqueirao及南线公交系统
- 布里斯班“东南”公交系统
- 德里BRTS快速公交系统
- 圣保罗Busways公交系统
- 伊斯坦布尔Metrobüs快速公交系统

公交走廊道路安全审计

- 墨西哥城Metrobús系统3、4、5号线
- 秘鲁阿雷基帕SIT公交系统
- 贝洛奥里藏特Busways公交系统C. Machado及Dom Pedro II号线
- 里约热内卢TransCarioca快速公交系统
- 里约热内卢TransOeste快速公交系统
- 土耳其伊兹米特BRT系统

数据来源

- 哥伦比亚交通部, 2011年
- TransMilenio机构, 2011年
- 德里警察局, 2010年
- 澳大利亚昆士兰州布里斯班市道路安全及系统管理处, 2009年
- Gobierno de la Ciudad de México 2011年
- Secretaria de Vialidad y Transporte de Jalisco, 2011年
- Estudios, Proyectos y Señalización Vial S.A. de C.V. 2011年
- Empresa Pública de Transporte e Circulação (EPTC), Porto Alegre, 2011年
- Matricial Engenharia Consultiva Ltda., 2011年
- Empresa de Transporte e Trânsito de Belo Horizonte S.A. (BHTrans), 2011年
- Urbanização de Curitiba S.A. (URBS), 2011年
- Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo, 2011年
- Instituto Metropolitano Protransporte de Lima, 2012年
- Istanbul Elektrik Tramvay ve Tünel (IETT)

前言

对发展中城市而言，若要确保城市交通的安全性，同时满足市民日益增长的出行需求，就需要大力提升公共交通系统的服务质量，并保证公交领域的财政投入。

据世界卫生组织 (WHO) 统计，全球每年因道路交通事故而死亡的人数超过 120 万；其中，大部分致死事故发生在机动化发展迅速的中低收入国家。如果缺乏有效的政策管理，这一情况将很有可能持续恶化，导致交通事故在 2030 年成为全球第五大引发过早死亡的因素。

为了扼制这种势头，联合国启动了“道路安全十年行动” (UN Decade of Action for Road Safety 2011–2020)。世界资源研究所可持续交通中心 (EMBARQ) 及世界银行是这一行动的重要参与成员，在推动行动的工作成果方面做出了突出贡献，力争在 2020 年使全球道路伤亡人数减半。

本研究报告作为 EMBARQ 及世界银行工作中的重要组成部分，旨在呼吁城市重视对快速公交系统 (BRT) 及其他公交优先系统的投资，以提升交通安全性，并满足出行需求。随着快速公交系统在拉丁美洲地区取得巨大的成功，世界其他地区的城市也在效仿，以期完善自身的公共交通系统。因此，

快速公交系统正在成为广受欢迎的公交系统之一。目前，已有 8 个跨国开发银行宣布支持可持续发展，并承诺在未来十年内提供 1750 亿美元的资助。作为可持续发展的重要组成部分，快速公交系统无疑将从这项投资中获益。

本报告的研究结果显示，完善的公共交通系统有助于巩固道路安全，可使道路伤亡事故减少 50%。然而，要使公交系统充分发挥作用，亦须建设完备的配套基础设施和安全设施。本报告广泛参考了国际上对公交系统道路安全的审计及检查意见，并从中提取数据加以分析，最终针对推进各类公交系统规划、设计及运营环节的安全考虑提出了依据充分、切实可行的意见和建议。

我们希望这份报告对公共交通系统的建设有所助益。在新增公交优先系统的规划和建设中，有关规划人员、设计人员、工程师及决策者可参考本报告中的建议，更好地完善系统功能，使其完成提升道路安全、改善居民生活质量的使命。



马克·胡埃尔
Marc H. Juhel
世界银行集团 交通与信息
及通信技术行政主管



豪格·道克曼
Holger Dalkmann
世界资源研究所可持续交通中
心(EMBARQ)主任



克劳迪娅·斯泰尔
Claudia Adriaola-Steil
世界资源研究所可持续交通中心(EMBARQ)
健康与道路安全部门总监

执行摘要

相比轨道交通而言，快速公交 (BRT) 及其他公交优先系统具有成本低、建设周期短的优势，因此广受城市交通决策者的青睐。

基于此¹，研究人员撰写了一系列对应的研究报告及规划指南，分析了不同的系统设计方案，针对其各自预期的系统运营效果进行了对比，并指出了不同方案所面临的挑战（参见 Rickert, 2007 年；Hidalgo, Carrigan, 2010 年；Moreno González Romana, Alvaro, 2013 年）。

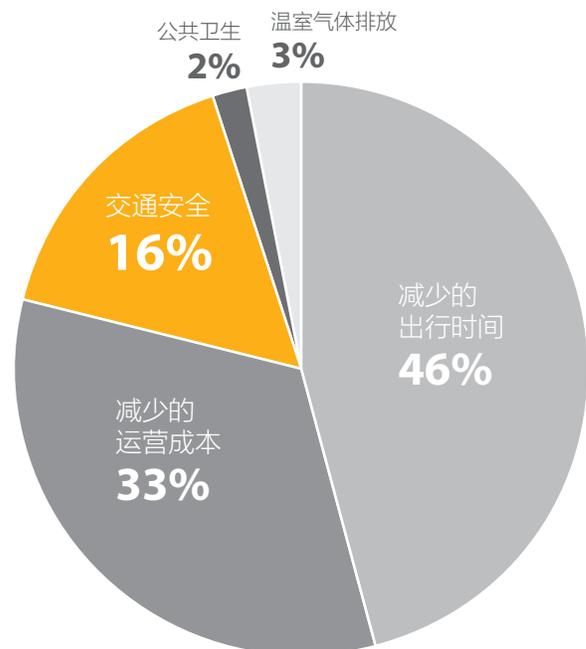
在公交优先系统中，针对出行时间、温室气体排放、本地污染物排放及土地价值的研究都已趋于成熟；而系统的交通安全问题仍是一个较新的话题，相关资料也较单薄。通过研究，我们判定公交优先系统能够显著提升交通安全性，使道路重大伤亡事故的发生几率减少 50%（Duduta, Lindau, Adriazola-Steil; 2013 年）。据估算，安全因素在各类公交优先系统的经济效益中所占的比重在 8% 至 16% 之间（见图 1）²。

我们在开展公交优先系统中交通安全问题的研究基础上，形成了这份报告。该研究的对象囊括全球逾三十条公交系统，研究内容包括数据分析、道路安全审计及检查，以及系统运营安全措施效果测试的微观模拟。

在拉美地区常见的 BRT 系统中，安全影响在经济效益中所占的比重可达 16%

本报告为参与公交系统建设的规划人员、工程师及城市设计人员提供了详实的参考。报告涵盖了多种公交系统和走廊，包括路侧式公交优先道，大容量、多车道及带隔离带的 BRT 系统。在报告中，我们分析了主要的风险隐患及常见的交通事故，并提出了相应的设计方案建议，以协助解决这些问题。同时，报告还讨论了主要的设计理念对公交系统运营效果——特别是乘客承载力、出行时间及车队规模要求——的影响。

图 1 拉美地区常见 BRT 系统中安全影响在经济效益中所占的比重



公交优先系统中的交通安全

本报告可被作为指南使用。用户可从中了解到如何在公交系统的规划、设计及运营环节充分考虑到系统的安全性。这份报告的研究对象主要为**发展中国家的城市**，因此对这些地区的大容量公交系统更为适用。然而，发达国家的城市亦可参考报告中的研究成果及建议，以完善自身的交通系统，特别是轨道交通中的有轨电车及轻轨系统。

研究表明，公交走廊的安全隐患主要来自不合理的街道几何设计，而非建设走廊所使用的技术（对公共汽车或轨道交通而言），或走廊所在城市的条件。

例如，公交车辆行驶在受隔离的主干道车道上时，最容易遇到的事故之一是与转向车辆相撞。这一点无论是在里约热内卢的 BRT 系统，亦或美国的轻轨系统中，都得到了证实（Duduta 等，2012 年；Klaver, Pecheux, Saporta, 2009 年）。然而，同类事故在不同的公交模式中的表现各异，因而制定对策时应对情况做具体的分析。这是由于不同城市的交通构成、街道设计标准，**交通信号灯的设计，以及居民对交通规则的同度**可能存在很大差异。

在“研究综述”章节中，我们将呈现主要研究成果。“研究与分析”一章更具体地阐述了研究成果，并对不同类型的公交系统的安全性做了说明。此外，报告还分析了各类评估安全影响的方法论以及道路安全所带来的经济效益。为了更清晰地阐述方法论，我们以波哥大、墨西哥城、瓜达拉哈拉、艾哈迈达巴德及墨尔本为例，做了详细的说明。此举为将安全问题纳入成本效益分析或备用方案分析提供了参考，有助于完善项目初期规划及融资方案的制定。

在“设计建议”一章中，我们以配图的形式分析了公交优先系统所经过的街道及交叉路口规制。可能出现道路情况分为以下四个大类：

- 路段、路中段设计及人行横道
- 交叉路口
- 车站
- 大型换乘站

本章节所涉及的设计理念较为宏观，在多种情况下均适用。此外，我们还选取了多个城市做案例分析，以帮助读者了解这些理念的具体应用情况。具体案例包括：1）里约热内卢市 BRT 系统安全设计理念微观模拟分析；2）伊斯坦布尔市高速公路 BRT 系统运营；3）高速公路公交系统运营——伊斯坦布尔市 Metrobüs 系统车站设计。

第一章

研究综述

公交走廊中的公交优先系统所产生的安全影响因系统特性及街道情况而不同。

1.1 施行公交优先对安全性产生的影响

在发展中国家的城市中，中央快速公交系统通常能够提升交通安全性（见表 1）。针对澳大利亚的研究表明，公交优先系统（包括信号优先及专用道）对交通安全亦有促进作用。而针对美国的研究则显示，设立公交车道会导致交通事故的增加。

通过研究，我们得出了如下结论，即：相较于公交优先系统的类别，城市为建造公交优先系统而对街道基础设施所做的改造更能影响系统的安全性。拉美地区的 BRT 系统之所以能够提升交通安全性，主要是由于城市为了保证系统的顺利运行，移除普通车道，设置中央分隔带，缩短人行横道的长度，并禁止社会车辆在大多数交叉路口左转（见图 2）。通过模拟交通事故的发生频率，我们发现这些调整工作提升了交通安全性（见表 2）。通过分析安全影响，我们发现在进行了上述调整的城市中，其 BRT 系统均提升了交通安全性（如瓜达拉哈拉市的 Macrobus 系统，见图 3）。

对走廊以外区域的安全影响

在施行公交优先的同时移除其他交通用道，能够减少交通流量，并避免出现交通混杂的情况。其他交通流量被分流到平行路段中，看似可能会增加这些路段事故发生的机会，实则不然。我们选取瓜达拉哈拉作为案例分析的样本城市。为了将与 BRT 走廊平行的几条主干道都包括起来，在走廊的两边各选取了一段 3 公里长的缓冲路段。通过统计，我们发现同一时段中缓冲路段（BRT 走廊除外）的交通事故发生率下降了 8%，与城市其他地区的趋势相吻合。这项发现说明，瓜达拉哈拉市公交走廊的交通安全性并没有因平行路段交通流量的增加而下降（见表 3）。

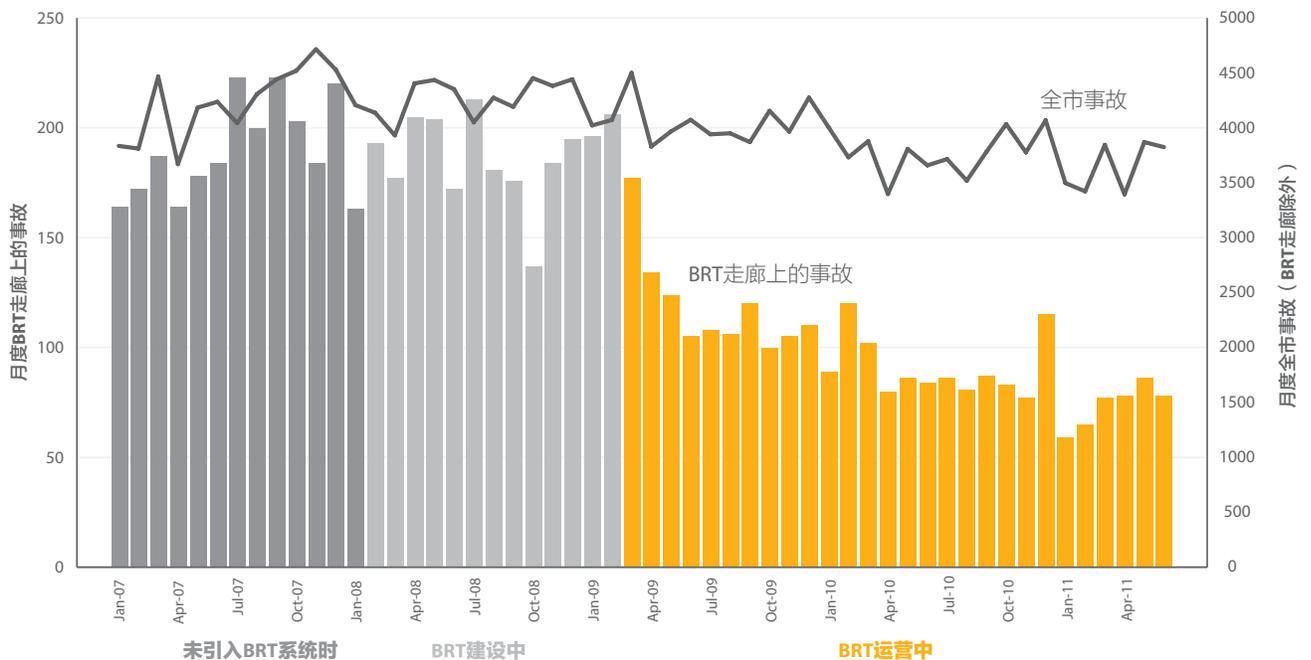
表 1 公交优先系统中的交通安全

	事故发生率变化 (%)	95% 置信区间	数据来源
BRT主干道 (拉丁美洲国家)			
死亡	-47%	(-21%; -64%)	EMBARQ 分析
受伤	-41%	(-35%; -46%)	
所有事故	-33%	(-29%; -36%)	
BRT主干道 (拉丁美洲及印度)			
死亡	-52%	(-39%; -63%)	EMBARQ 分析
受伤	-39%	(-33%; -43%)	
所有事故	-33%	(-30%; -36%)	
公交优先 (澳大利亚)			
所有事故	-18%	n/a	Goh等 2013年
高峰时段及高承载车辆 (HOV) 专用道 (美国)			
未知等级事故	+61%	(+51%; +71%)	Elvik, Vaa, 2008年
高峰时段公交专用道 (美国)			
致伤事故	+12%	(+4%; +21%)	Elvik, Vaa, 2008年
导致财产损失事故	+15%	(+3%; +28%)	
全时公交及出租专用道 (美国)			
致伤事故	+27%	(+8%; +49%)	Elvik, Vaa, 2008年
未知等级事故	-4%	(-8%; 0)	

图2 拉美地区针对BRT系统所做的常见街道设施改造（图中为瓜达拉哈拉市的Macrobus系统），及其带来的安全性效益



图3 瓜达拉哈拉市Calzada Independencia路2007至2011年间的交通事故统计



资料来源：墨西哥哈利斯科州道路交通秘书处(Secretaria de Vialidad y Transporte de Jalisco)，2011年

表 2 公交优先系统推动的普通基础设施改造所带来的安全影响

	事故种类	事故发生率变化 (%)	95% 置信区间
将十字路口改为两个丁字路口	严重	-66%	(-1%, -88%)
	所有种类	-57%	(-37%, -70%)
减少一条车道	严重	-15%	(-11%, -17%)
	车辆相撞	-12%	(-9%, -15%)
缩短行人过街距离 (以米计)	严重	-2%	(-0.04%, -4%)
	行人事故	-6%	(-2%, -8%)
禁止社会车辆在干线走廊左转	严重	-22%	(-12%, -32%)
	车辆相撞	-26%	(-10%, -43%)
引入中央隔离带	严重	-35%	(-8%, -55%)
	车辆相撞	-43%	(-26%, -56%)
增设逆向公交车道	严重	+83%	(+23%, +171%)
	车辆相撞	+35%	(+0.02%, +86%)
	行人事故	+146%	(+59%, +296%)
缩短路口交通信号灯之间的距离 (以10米计)	严重	-3%	(-1%, -5%)
	所有种类	+2%	(+0.03%, +4%)
	行人事故	-5%	(-1%, -7%)
在高速路上架设行人过街天桥	行人事故	-84%	(-55%, -94%)
在主干道上架设行人过街天桥	行人事故	无统计意义上显著的变化	(-23%, +262%)

值得注意的是，启用 BRT 系统有时亦会增加周边道路发生事故的风险。如果 BRT 系统被铺设在中部车道，那么大多数交叉路口处的其他车辆都不能左转，而需经由环路完成左转，进入周边社区。如果环路设计合理，就不会增加 BRT 系统周边道路的事故。然而，因把交通导向环路而导致环路沿线的交叉路口事故率增加的情况确有发生。因此，

BRT 系统的建设者在进行系统设计和规划时应充分考虑到周边道路的路况，尽量减少不良的溢出效应。在“设计建议”一章中，我们将更详细地阐述此问题。

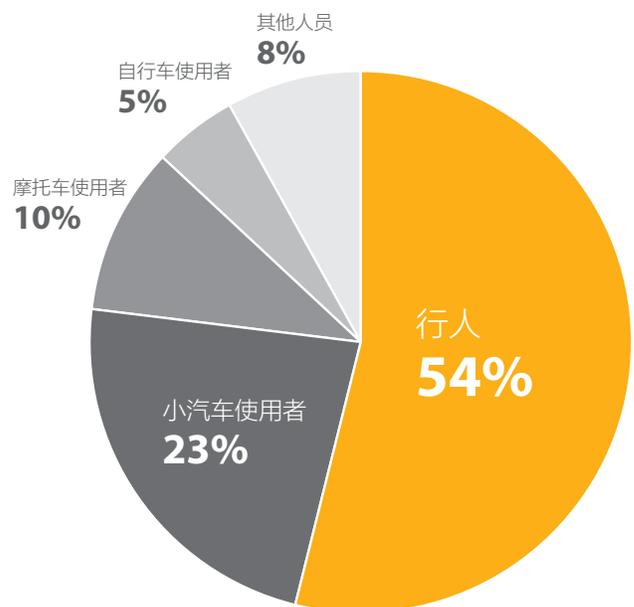
表 3 拉丁美洲、印度及澳大利亚主要公交优先系统安全影响力评估结果³

城市	公交系统的改造	安全影响力		
		事故	致伤	致死
艾哈迈达巴德	非正式公交改为单车道中央BRT系统	-32%	-28%	-55%
墨西哥城	非正式公交改为单车道中央BRT系统	+11%	-38%	-38%
瓜达拉哈拉	路侧式公交优先系统改为带站台超车道的中央BRT系统	-56%	-69%	-68%
波哥大	中央公交车道改为多车道的BRT	n/a	-39%	-48%
墨尔本	传统公交改为公交优先服务（排队优先、信号灯优先）	-11%	-25%	-100%

严重事故

在公交走廊上，发生在行人身上的事故仅占全部事故的7%（如此低的数字也暗示了少报漏报）。然而，我们的数据库显示，公交事故的死亡人数中，超过半数为行人。因此，提升公交走廊的安全性对确保行人的安全尤为重要。行人有安全风险的原因是由于他们选择在路中段穿过马路，而不是在指定的人行横道穿过。这种情况在公交站附近更为普遍——乘客因逃票或为节省时间直接跳上或跳下公交站台，并横穿公交车道。为避免此类伤亡，提升公交走廊的安全性，我们强烈建议有关部门优化车站的可达性，并提供更好的路中段人行横道设施。

图 4 公交走廊上的死亡案例分类（数据来自墨西哥城、瓜达拉哈拉德里、艾哈迈达巴德、库里蒂巴、阿雷格里港、贝洛奥里藏特）



超过半数的公交走廊上死亡案例为行人

1.2 常见事故种类

横穿公交车道左转

事故等级：严重
 如果与快速行驶中的公交车辆相撞，
 将可能导致严重的交通事故。

在中央设置的公交走廊中，此类事故最为常见。
 尽管规定禁止车辆左转，但是一些驾驶员仍会
 违规进行左转操作，继而导致事故的发生。

为避免这类事故，建议将左转改为右转环路
 （参见报告第39至40页）。如需了解带左转道的
 交叉路口，请参考报告的第43页。

违规占用公交车道

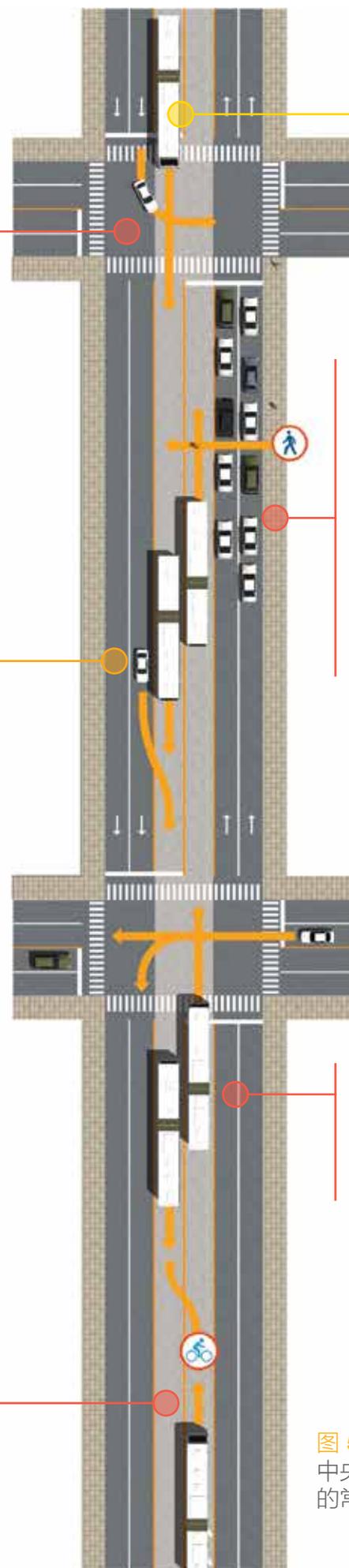
事故等级：中等

一些公交走廊划出了公交专用道，但并没有
 在公交车道与其他车道之间设置物理隔离；
 此类走廊中最容易出现因违规占用公交车道
 而发生的车辆相撞事故。

自行车与公交车辆相撞

事故等级：严重

在没有设置自行车专用道的公交走廊中，骑
 车人常常在BRT车道上骑行，因而容易与公交
 车辆相撞。当骑车人为躲避BRT车辆而猛然
 转出车道时，最容易发生严重的交通事故——
 他们既可能与相邻车道上的公交车辆相撞，
 也可能因失衡而撞上车道隔离物。两种情况
 都极度危险。



铰接式公交车

行人横穿车道

事故等级：严重
 此类事故是最常见的致死类BRT交通事故。

行人经常在车辆停止行驶的时候在路
 中段横穿马路。公交车辆由于享有专
 用车道，因此得以在拥堵路段正常行
 驶。公交司机受视域限制，不能及时
 发现行人横穿车道，因此可能难以避
 免撞到行人。

如需了解路中段人行横道的设计建
 议，请参考报告的第24至26页。

事故等级：严重

事故等级：严重

当公交车辆或其他车辆闯红灯时，
 容易发生此类事故。

图 5
 中央公交专用道或BRT系统的
 常见交通事故

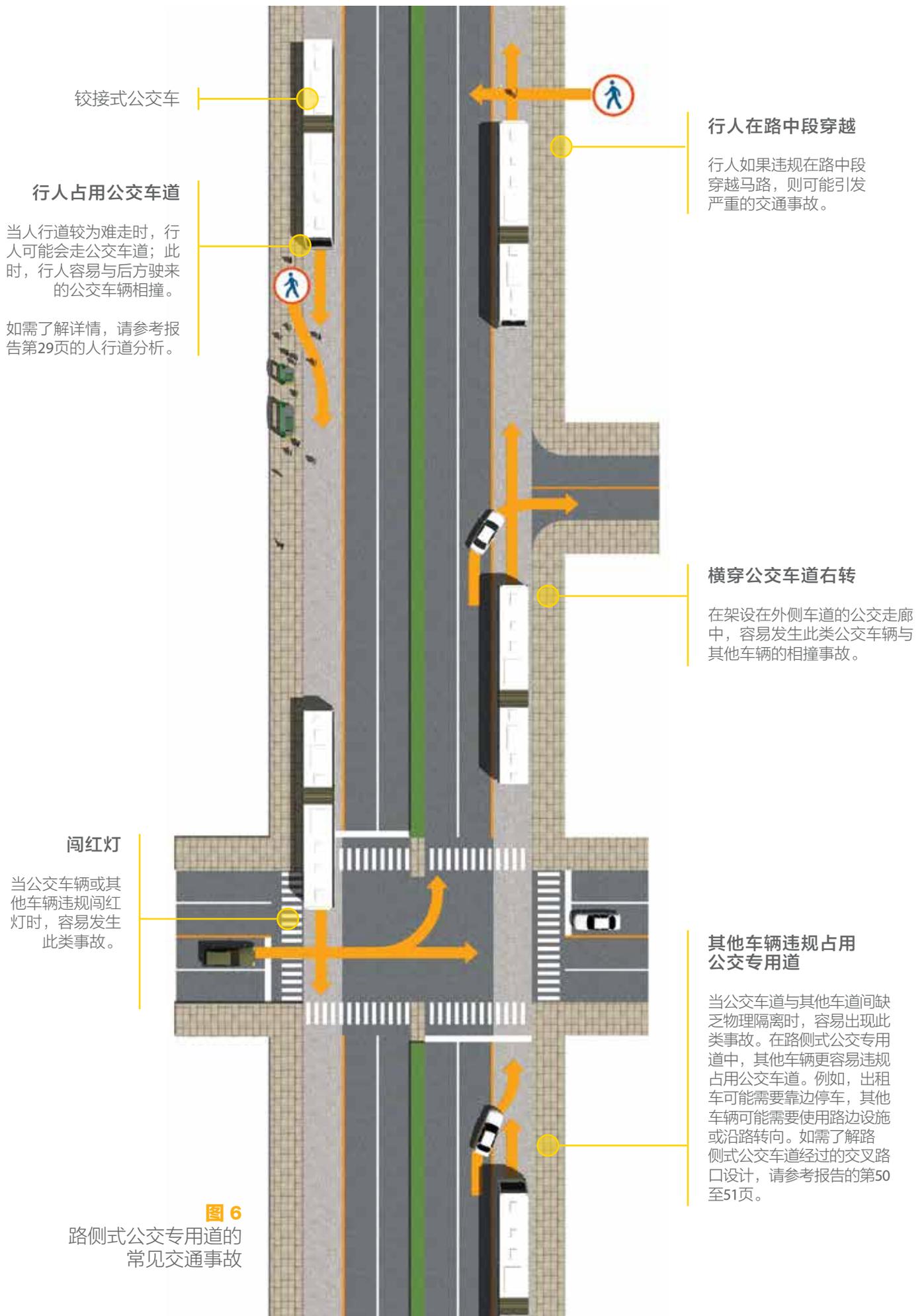
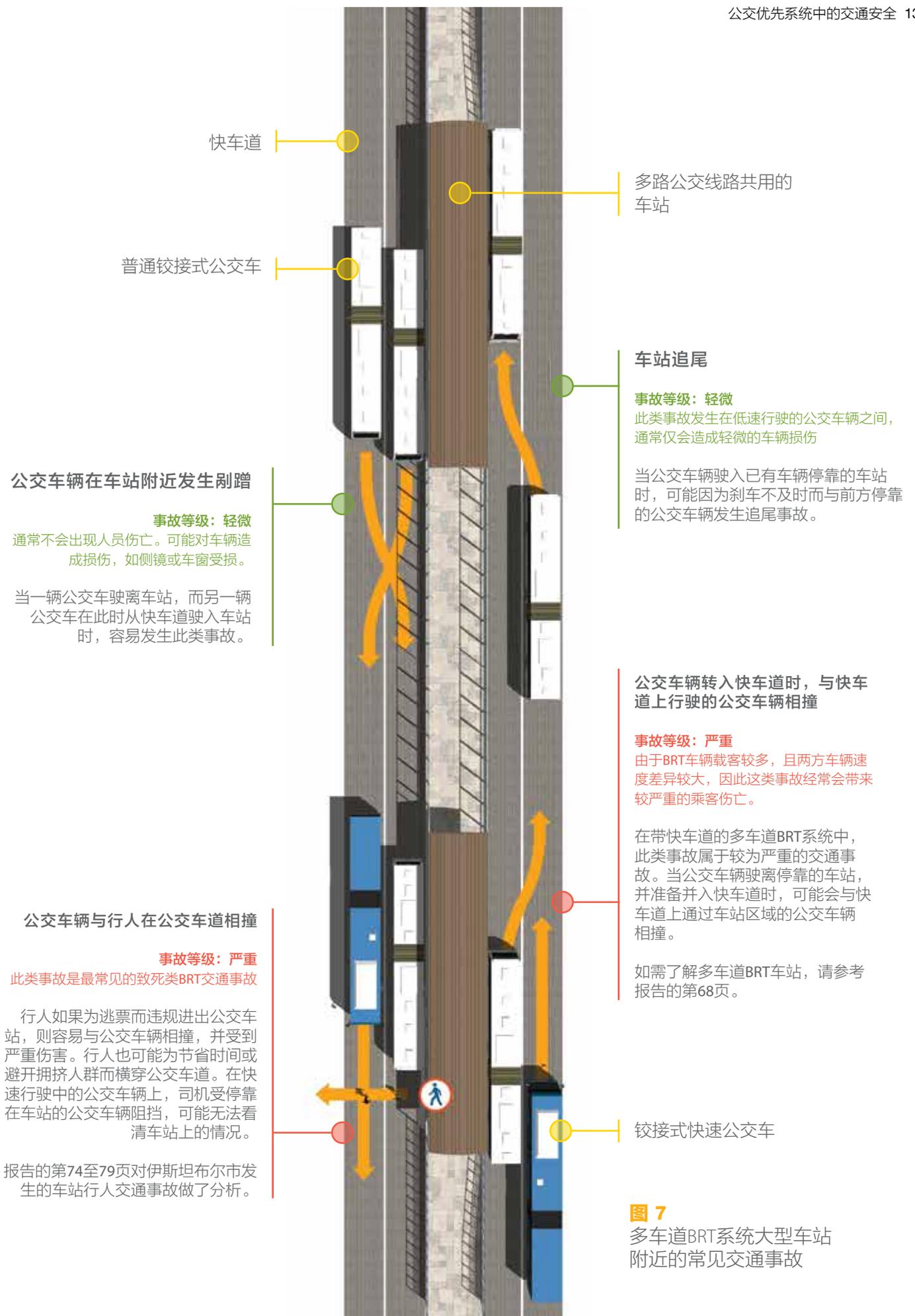


图 6

路侧式公交专用道的
常见交通事故



公交车辆在车站附近发生刮蹭

事故等级：轻微
通常不会出现人员伤亡。可能对车辆造成损伤，如侧镜或车窗受损。

当一辆公交车驶离车站，而另一辆公交车在此时从快车道驶入车站时，容易发生此类事故。

车站追尾

事故等级：轻微
此类事故发生在低速行驶的公交车辆之间，通常仅会造成轻微的车辆损伤

当公交车辆驶入已有车辆停靠的车站时，可能因为刹车不及时而与前方停靠的公交车辆发生追尾事故。

公交车辆转入快车道时，与快车道上行驶的公交车辆相撞

事故等级：严重
由于BRT车辆载客较多，且两方车辆速度差异较大，因此这类事故经常会带来较严重的乘客伤亡。

在带快车道的多车道BRT系统中，此类事故属于较为严重的交通事故。当公交车辆驶离停靠的车站，并准备并入快车道时，可能会与快车道上通过车站区域的公交车辆相撞。

如需了解多车道BRT车站，请参考报告的第68页。

公交车辆与行人在公交车道相撞

事故等级：严重
此类事故是最常见的致死类BRT交通事故

行人如果为逃票而违规进出公交车站，则容易与公交车辆相撞，并受到严重伤害。行人也可能为节省时间或避开拥挤人群而横穿公交车道。在快速行驶中的公交车辆上，司机受停靠在车站的公交车辆阻挡，可能无法看清车站上的情况。

报告的第74至79页对伊斯坦布尔市发生的车站行人交通事故做了分析。

铰接式快速公交车

图 7
多车道BRT系统大型车站附近的常见交通事故

1.3 影响安全性的因素

街道及交叉路口的设计

通过使用模型分析交通事故发生的频率，我们发现道路的宽度及交叉路口的规模和复杂程度最能影响公交走廊中交通事故的发生频率。我们对样本走廊的调查结果亦呼应这个结论——在所有的事故中，发生在公交车道上的仅占全部事故的9%，而绝大多数事故都出现在其他车道上，且不涉及公交车辆。交叉路口对交通事故发生频率的影响，主要取决于路口有几个岔口，每个岔口有几条车道，以及行人过马路的最大距离（见表8、表4）。若其他车辆可以在交叉路口处穿过公交走廊，则事故更容易发生；在只允许车辆右转的路口，则要更安全些。如需详细了解交通事故发生频率模型及模拟测试结果，请参考章节10.1。

公交车道的位置

研究表明，墨西哥城及阿雷格里港的逆向公交车道使得发生在机动车和行人身上的交通事故显著增加（见表4）。我们的多种模拟分析均显示，在公交系统中增设逆向车道最容易提升安全风险（详见章节10.1中的逆向车道部分）。此外，设置路侧式公交车道使瓜达拉哈拉的机动车和行人交通事故增加，而对墨西哥交通事故发生频率没有显著影响。这说明设置路侧式公交车道可能会带来安全隐患，但其危害程度不及设置逆向车道。

若将公交走廊铺设在中部车道，就需要对道路进行较大规模的改造，因此对走廊的安全性评估过程也较为复杂。

交叉路口每多一个岔口，发生机动车相撞的几率就会上升

65%

每增加一条车道，发生致伤和致死交通事故的几率就会上升

17%

人行横道的长度每增加一米，行人发生交通事故的几率就会上升

6%

如果决定将公交走廊铺设在外侧车道上，则仅需将一条车道（或停车道）改为公交车道。在中部车道设置公交走廊，对原有道路进行的改造包括：将一条车道改建为中央分隔带；在道路中央建立行人等候区，缩短过马路的路程；以及增加公交走廊中的丁字路口，并减少十字路口的数量。多种模拟演示显示，影响交通事故发生频率的因素主要包括：车道数量、中央隔离带、过马路的距离，以及行人数量；而是否将 BRT 系统铺设在中部车道则不在其中（以墨西哥城为例，见表 4、表 8）。如需详细了解交通事故数据分析，请参考章节 10.1。

设置逆向车道

可使致伤及致死交通事故的发生率上升

83%

设置中央隔离带

可使致伤及致死交通事故的发生率下降

35%

表 4 公交走廊道路改造对交通安全的影响

	统计项目	事故发生率变化 (%)	95% 置信区间
设置中央隔离带	致伤或致死事故	-35%	(-55%, -8%)
	车辆碰撞	-43%	(-56%, -26%)
设置逆向车道	致伤或致死事故	83%	(+23%, +171%)
	车辆碰撞	35%	(+0.02%, +86%)
	行人事故	146%	(+59%, +296%)



哥本哈根市Vesterbrogade路公交优先信号灯

设计建议



在本章节中，我们将探讨如何规划及设计安全的公交优先系统，并提出系统设计、规划及运营方面的建议。



墨西哥城Avenida Insurgentes路上的BRT系统——Metrobus系统1号线

通过提炼数据进行分析，或总结道路安全检查结果，我们得出了相应的建议。详见第十章。

相关建议既涉及公交走廊整体管理（如车速管控），也涉及细节操作（如特定道路及交叉路口的设计）。

需要注意的是，本报告中的设计指南不可取代道路安全审计及检查。设计指南的实际作用是为公交走廊的设计人员提供参考，以辅助规划新的公交走廊。通过参考设计指

南，走廊的规划人员、工程师及设计人员可以更充分地考虑安全问题，继而设计出更为安全的公交走廊。然而，与具体的道路安全审计及检查不同的是，指南针对的是公交走廊这一整体概念，并不特指某一条走廊。因此，工作人员不可将其中的设计建议照搬到工作中，而是应依据具体情况酌情参考。在本章的最后，我们将探讨如何平衡公交优先系统的安全性与运营效率的问题，并重点介绍如何评估施行安全措施对营运速度、行驶时间及乘客承载力的影响。



巴西阿雷格里港的公交走廊

第二章

车速管控

想要确保道路的安全性，就必须对车辆的行驶速度实行有效的管控。车速对交通事故的严重程度具有重要影响，因此成为最为重大的安全隐患之一。

一起交通事故是否会造成行人的死亡，很大程度上取决于撞击速度。举例来说，撞击时速在 50 公里，致死率是时速在 40 公里时的 2 倍多（Rosén, Sander; 2009 年）。为安全起见，应针对道路种类及周边环境制定措施，严格控制车辆时速。表 5 列举了不同等级道路的建议 85 百分比行驶速度。“85 百分比行驶速度”是指车辆在超过道路上 85% 的车辆时的行驶速度。

对于表 5 涉及的道路种类（一条道路的不同路段可能分属不同种类），有关部门应采取相应措施，进行有效的车速管控，以确保车辆的实际

行驶速度在安全范围内。“目标速度”适用于公交车辆和混合车辆；而针对两者的车速管控措施则可能会出现差异。

如果公交系统的运营由独立的机构负责（特别是在该机构设有实时监控车速的控制中心的情况下），那么就可以通过培训和严格监管来有效地管控公交车辆的行驶速度。管控其他车辆车速的方法则更为灵活。我们将在本章中对多种方法逐一进行介绍。

详情请参考以下内容。

2.1 减速带等减速装置

设置减速带能够有效地控制车速。减速带是道路上的坡形突起物；车辆驶过减速带时，时速不得超过 50 公里，否则将有可能发生危险。减速带的长度和宽度决定着其对车速的影响。减速带应被放置在明显的位置，由突出色或反光涂料加以标识，并在旁安插限速标牌，以方便司机适时调整车速。理论上讲，应在道路全段安放减速带，以方便司机全程控制车速。如果实际情况不允许，则应尽可能在车流汇聚区域设置减速带。车流汇聚区域主要是指路中段人行横道及通往交叉路口的几条道路（特别是一长段道路）。

类似减速带的其他装置包括：

- **高起的人行横道：**简单说就是一个放在减速带上的人行横道，用于路中段人行横道或狭窄路段的十字交叉路口。
- **高起的交叉口：**高于周边路面的交叉路口，能够有效控制各方向车辆的车速。需要注意的是，在较宽的交叉路口（每方向车道多于 2 条）设置时效果可能不好，因为宽路适合汽车加速。

- **分段式减速带：**宽度小于路宽的窄型减速带，能够控制小汽车等小型车辆的车速，但不影响长轴距车辆（如公交车或应急车辆）的正常行驶。

减速带、高起的人行横道及高起的交叉口的设计应以对车速的要求为前提。不合理的限速装置会为道路使用者（如机动车驾驶人员、骑车人及摩托车使用者）带来安全隐患。

表 5 不同等级道路的85百分比行驶速度*

道路等级	建议85百分比行驶速度	道路环境说明
高速路	80公里 / 小时以上	有限的支道，无平面交叉路段或人行横道
主干道	50公里 / 小时	城市要道，沿路有带交通信号灯的交叉路口及平面人行横道
闹市区的街道	20 - 30公里 / 小时	位于人口稠密地区（如中心城区、商业区等）的街道，沿路人行横道的人流量较大

* 在设定建议车速时，还应综合考虑其他因素，如周边区域的土地利用情况、人流量及非机动车交通。

2.2 交通信号灯的间距

交通信号灯之间的间距是对车速影响最大的因素之一。信号灯较密集的道路上，车辆行驶速度较慢；反之，如果信号灯较稀疏，则该道路上的车速较快。在一段路上，各个信号灯交叉路口的间距对各类的交通事故发生率均有影响。根据对墨西哥瓜达拉哈拉市街道进行的调研，交叉路口的间隔每增加 10 米，交通事故的发生率就会下降 2%，而其中致伤及致死事故的发生率则会上升 3%（见表 2）。换句话说，就是交通事故的数量出现了下降，而事故性质更加严重。究其成因，交叉路口的增加带来了更多的冲突点，进而增加了事故发生的几率，但同时也减缓了车速，并降低了事故的严重程度。

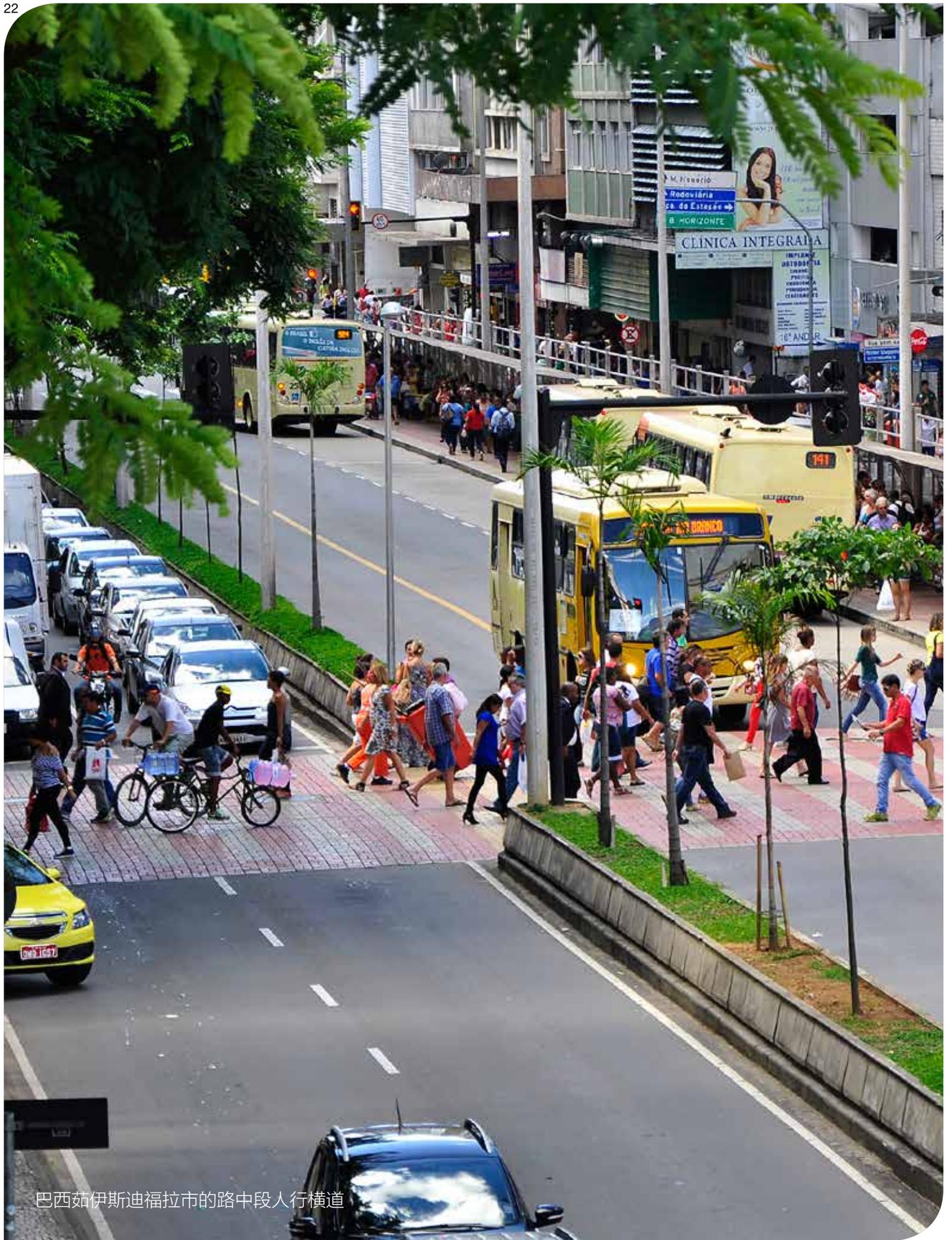
依据上述结论，城市道路的规划应合理设置交通信号灯的密度。在城市边缘区（特别是快速发展的城市的边缘地带）及改造为城市道路的原高速路地带，这项工作显得尤为重要。交通信号灯间隔的设置牵涉方面较多，因此我们不作统一的推荐。需要注意的是，信号灯间隔越远，行人则更容易在路中段横穿马路，并与高速行驶的车辆相撞。但是，如果信号灯过密，车辆驾驶人员又更容易闯红灯（特别是绿灯方向上只有行人时）。基于以上两方面的考虑，有关部门应对不同区域进行单独评估，制定合理的信号灯间隔，以最大限度的在行人安全与车辆通行间取得平衡。要合理安放信号灯，就要充分了解公交走廊沿线的土地利用情况，因地制宜。在学校、商场及其他主要地标附近，人流量通常较大，因此可能需要更多的人行横道。如需详细了解这部分内容，请参考报告中“路中段设计”的部分。



**交叉路口的间隔
每增加10米，发
生致伤及致死交
通事故的几率就
会上升3%**

2.3 车速限制

除上述设计手法外，现代科技也可有效控制车辆的行驶速度。举例来说，雷达和测速仪能够监控各类车辆的车速；公交运营管理机构可以通过设置运营控制中心及安装车载 GPS 系统来实时监控公交车辆的车速。



巴西茹伊斯迪福拉市的路中段人行橫道

第三章

路段、路中段及人行横道的设计建议

在人口密集的城市中心区，行人时常走到公交车道上。这点在发展中国家尤为常见。

公交车道的车流量较低，常使行人误以为公交车道更为安全，并从此处横穿马路。这是非常危险的做法。为防范这种行为，我们推荐有关部门细致评估新建公交走廊的可达性，找到行人安全岛的高需求地区。道路安全检查的结果显示，大型商业区域的人流量较大，横穿马路的事件也较多。此外，在学校（特别是大型校区）、宗教场所及大型活动场所等其他闹市区，也有较多的往来行人。有关部门应在这些区域建立完善的行人过路设施，并在禁止横穿的地方加装明显的警示和防范设施。

下面，我们将介绍几种能够有效确保路段安全性的设计手法。其中所涉及的道路种类、路宽，以及公交系统的种类均出自我们数据库中公交走廊街道设置的部分。



图 8 行人在路中段横穿BRTS快速公交走廊，德里市

在城市主干道的公交系统中，全部的行人过路口都应配以交通信号灯。

我们推荐使用分段人行横道。如图所示，准备过马路的行人处在隔离带中，并面朝车辆驶来的方向。分段过路口为行人提供了更多的等待空间，使过马路变得更为安全。

一些车辆可能会在路中段人行横道处掉头；因此，应在这些地方放置阻车桩，以阻止大型车辆掉头。

分段过路口还能够有效阻止摩托车在此处掉头。

一些司机可能会在过路口处闯红灯。我们建议在过路口前方设置减速带或其他减速装置，提示驾驶员在驶近红灯时减速。针对公交车辆，我们建议对司机进行培训，并对车辆加强监控。



图 9 城市主干道上的路中段人行横道

3.1 城市主干道的路中段人行横道

在阿雷格里港，93%的行人交通事故都发生在道路中段（见图 11）。城市主干道上所有的路中段人行横道都应配有信号灯。在主干道的公交走廊上，这些人行横道通常位于路段较长因而车速较快的直行路段；因此，交通信号灯是保障行人安全的关键设施。理想情况下，信号灯应留给行人充足的时间，使行人能够一次性穿过道路。在设定行人绿灯的时长时，我们建议默认行人的步行速度为 1.2 米 / 秒；如果预计至少有 20%的行人是老年人，则应将步行速度定为 1 米 / 秒（TRB；2010 年）。

我们还建议在道路上设置中央隔离带，并在人行横道的中央设置等候区。等候区的功能是供未能一次性穿过马路的行人等候下一个绿灯，可为行人减少最多 10 米的路程，并使过路口致伤及致死事故的发生几率下降达 35%（见表 4）。

在设计路中段人行横道时，应充分考虑机动车驾驶人员对交通信号灯的遵守情况。不同国家，甚至是一国内的不同城市，交通信号灯的权威性都有差异。在发展中国家，如果司机面临的唯一冲突是行人，那么他们就很有可能闯红灯。针对这种现象，应在路中段人行横道加设减速带，以保护正在过马路的行人。通过分析道路安全检查的结果，我们发现车速越慢，则驾驶员更愿意避让行人。

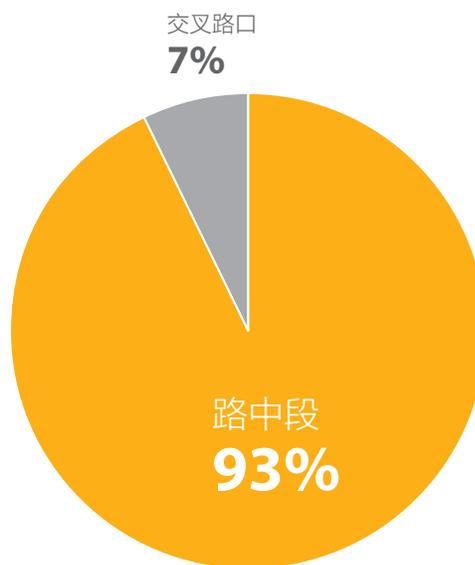


图 11 阿雷格里港交通事故发生地点统计。数据来源：阿雷格里港 Empresa Pública de Transporte e Circulação (EPTC)，2011年



图 10 行人违规横穿TransMilenio BRT系统的公交车道，波哥大市

阻车桩可以防范车辆在路边违规停车。我们建议在中央隔离带的等候区也安装阻车桩，防止车辆在过路口违规掉头。

在人行横道或等候区安装阻车桩时，需要注意为婴儿车及轮椅留出足够的穿行空间。

建议最小阻车桩间隔：1.2米。

图中是一条双向各有一条混合车道的道路，并且车道和人行道间有缓冲带。缓冲带可以充当停车带、绿化带、自行车道。或者，可以对其进行改造，使之成为曲折道路从而减速

在市区，狭窄道路上的人流量可能更大，因此要求驾驶员控制好车速，预留出充分的刹车距离，避免因闪避不及时而与行人发生相撞

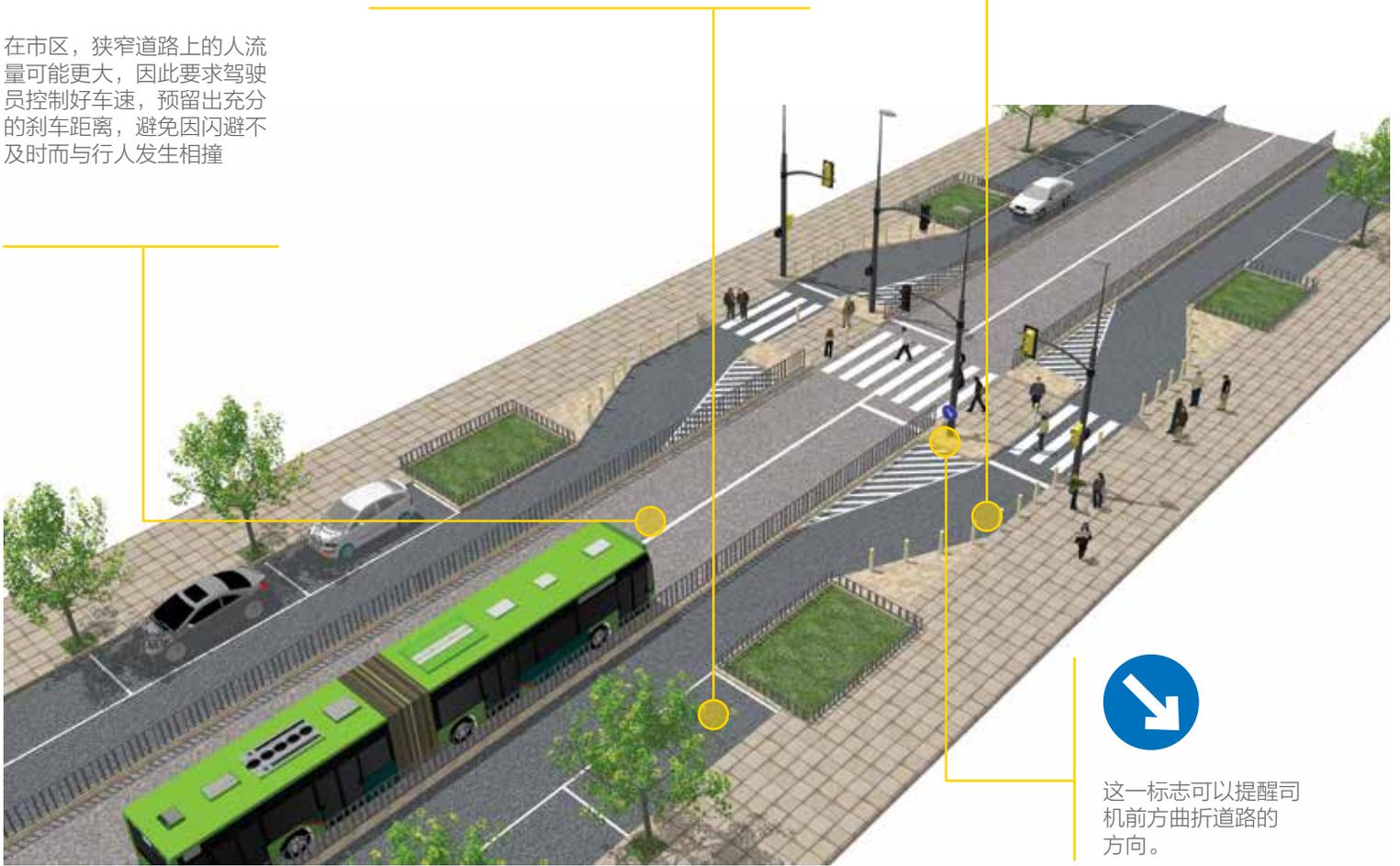


图 12 狭窄道路上的路中段人行横道

2.3.2 狭窄道路上的路中段人行横道

在双向各有一条混合车道的道路上，还可以使用曲折道路来实现减速（见图 12）。相较于中央隔离带，曲折道路能够更好地分拆过街距离，进一步帮助行人安全过马路。

3.3 行人过街天桥

行人过街天桥下方的人行道上应安装护栏。出于一些原因，行人可能不愿走过街天桥，而试图翻越或绕过护栏，并不惜绕路。在没有地面人行横道的公交走廊上，应沿走廊全程安装护栏。过街天桥应铺设成坡道，方便轮椅行动。坡道亦可供人休息，其角度最好在 5 度左右，并不超过 10 度 (Rickert; 2007 年)。由于要保证天桥距地面的高度足够大型车辆通过，因此天桥的行走区域可能会较长。为方便各类人群使用，建议安装电梯。

为了测试过街天桥对主干道和高速路交通构成的影响，我们使用了交通事故发生频率模型。通过分析数据，我们发现行人过街天桥没有大幅提升城市主干道的安全性，但对高速路的安全作用明显（见图 6）。

过街天桥在城市主干道（及绝大部分的窄道）收效甚微；通过实地考察，我们判定其原因是行人对天桥的接受度较低，而更愿意在地面过马路。我们建议在无法建造有信号灯的人行横道时，在车速高的道路（如高速路）上架设过街天桥。典型案例参见波哥大 TransMilenio 快速公交系统 Autopista Norte 走廊路段的过街天桥，该天桥架设在位于高速路路段的 BRT 系统中。

如果道路较窄，行人就更有可能攀越护栏并在天桥下横穿马路。因此，不仅需要天桥下安装护栏，更应注意保证护栏的高度，使行人不能轻易攀越。此外，有关部门应该定期安排人员对护栏进行检修和养护。



图 13 墨西哥莱昂市的斜坡过街天桥



图 14 相较于过街天桥，行人选择翻越护栏并横穿马路，德里市

表 6 过街天桥对安全的影响

过街天桥架设路段	对行人交通事故的影响	95%置信区间
高速路	-84%	(-94%, -55%)
主干道	统计意义上无显著影响	

在较狭窄的道路上，通常使用路侧式公交专用道，因为路中没有足够空间修建公交基础设施。然而，即使面对窄道，我们依然建议在两方向的车流之间添加隔离带，以确保安全。



图 15
路侧式公交专用道设计

3.4 路侧式公交专用道的设计

在人口稠密的地区，行人常常在公交车道上行走、等候或从事商业活动。对公交车道的占用可能是由于人行道太过拥挤，也可能是由于周边设施不到位。例如，如果行人恰好携带着手推车，那么就可能会走较为方便、快捷的公交车道，而不是绕路走过街天桥。另一方面，公交车道的车流量偏小，会给行人“安全”的假象，因此行人也更愿意走公交车道。为了解决行人占用公交车道的问题，我们建议有关部门从维护公交走廊沿线的人行道入手，确保人行道的路面平整、无障碍物，并保证人行道的面积。



图 16 行人在Eje 1 Oriente公交线路的路侧式公交专用道行走，墨西哥城

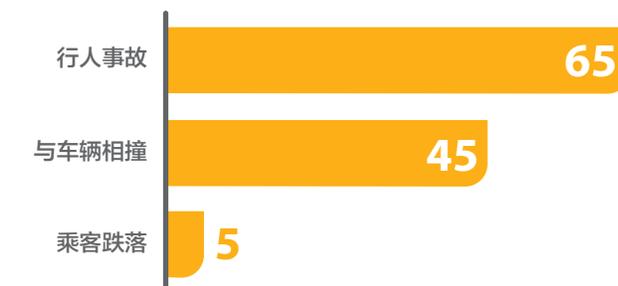


图 17 公交车辆交通事故分类说明，墨西哥城 Eje Central路侧式公交走廊，2006至2010年



图 18 行人推手推车在Eje Central路侧式公交车专用道上行走，墨西哥城



图 19 里约热内卢市TransOeste快速公交系统

案例研究

里约热内卢市 TRANSOESTE 快速公交系统

安全改造对运营效率的影响

到目前为止，我们建议的安全保障措施包括降低车速；以及修建路中段人行横道，并配以交通信号灯。这些做法可能会降低公交系统的运营效率。如果要权衡安全与效率间的取舍，就需要首先精确评估安全保障措施对公交运营的影响。下面，我们将介绍一种可用的方法论，并以里约热内卢市的TransOeste快速公交系统为应用对象加以说明。

TRANSOESTE快速公交系统简介

里约热内卢市TransOeste快速公交系统自2012年6月投入运营，一期BRT网络长150公里，运营线路包括TransCarioca，TransOlimpica及TransBrasil。TransOeste快速公交系统属于为2014年世界杯及2016年夏季奥运会兴建的公共基础设施，连接着里约市南部的Barra da Tijuca

区，以及距该区西部约40公里的2016年奥运村Santa Cruz。目前，TransOeste系统一期线路主要承担通勤任务，与一般的居民出行，这一点区别于本报告所提到的其他BRT系统。这条线路的乘客大部分是在Barra da Tijuca上班的工作人员，因此主要在上下班高峰期较为活跃。TransOeste系统的两端均位于人口稠密的中心城区，而中部所经地区则大多人口稀少。

TransOeste系统架设在里约热内卢市的著名干道——美洲大道(Avenida das Américas)的中部车道上。美洲大道宽60至90米，车辆最高时速可达70至80公里。大道上交通信号灯分部较为稀疏，平均间隔在600米以上。较高的车速及较少的交通信号灯使得TransOeste系统的车辆行驶速度高于一般的架设在主干道上的BRT系统。经停所有车站的常规公交线路时速为28公里；快速公交有专用道，越过大多数车站，时速为35公里。

方法论

安全保障措施具有地域性；制定之前应对措施辐射的路段进行详细的考察。在本案例讨论中，我们将针对前文提到的里约热内卢市道路系统问题给出几条解决建议。

- 将美洲大道所有车辆（包括 BRT 公交车辆）的行驶速度上限定为 60 公里 / 小时
- 将在超车道上不停车驶过车站的快速公交车时速上限定为 30 公里，以减少车辆与车站附近违反交规的行人相撞的几率，并给予驾驶员更多时间，在出现意外时更迅速地避让各类公交车辆。
- 增加带交通信号灯的路中段人行横道，缩短路口间的间隔距离。
- 完善交通信号灯，为行人留出更多时间。

反措施对碰撞频率的影响

在测试上述设计手法对 BRT 系统运营效率的影响时，我们主要关注系统以下三个方面的变化：

- **不同类车辆运营时速：**模拟测试环节中，不同公交线路（分为常规和快速公交）的车辆在进行商业运行时的平均时速。车辆运营时速是反映 BRT 系统运营情况的重要指标；运营良好的系统中，公交车辆的时速应不低于 25 公里（Wright, Hook, 2007 年）。
- **车辆行驶时长：**车辆自发车至停靠在终点站所用的全部时间。在我们的模拟测试中，计算车辆行驶时长的公式为：行驶时长（分钟）= 公交走廊长度（公里） / [运营时速（公里） / 60]。
- **运营时速方差：**这个指标的数值来自车辆运营时速的标准差，能够反映 BRT 系统运营的稳定性。在模型给出的线路种类中，方差最小的方案将被优先考虑。除了方差，我们还会计算时速变率的系数，即：标准差与平均值的比。利用时速变率的系数，我们可以更准确地对比不同的模拟情景（Moreno González, Romana, Alvaro; 2013 年）。

在建立模型时，我们使用的工具是世界资源研究所可持续交通中心 (EMBARQ) 为分析大容量公交系统而特别研发的宏观模拟工具——EMBARQ BRT 系统模拟器。该模拟器能够全面再现 BRT 线路的各个部分，包括终点站布局、终点站操作区、带交通信号灯的交叉路口、多站台综合车站，以及常规公交与快速公交的组合系统⁴。在建立模型时，我们首先设定了基准情景，以复制此时的 BRT 公交走廊的运营情况。此外，我们还设定了一系列的“项目”情景，以呈现不同的安全保障措施。与 2012 年的情况相比，整套 BRT 系统于 2016 年正式竣工时将发生很大变化。其中，较为显著的是与 TransOlimpica 及 TransCarioca 两条走廊相连接，以及进而可能出现的 TransOeste 走廊的客流量增加。这些变化的出现，要求我们不仅要以 2012 年的运营情况为背景对比基准情景和项目情景，还要以 2016 年的情况为背景进行对比——届时，无论是走廊的客流量，亦或是发车频率都将有所上升。在这里，我们只讨论针对 2016 年情况的情景模拟。如需详细了解模型的建立，具体参数及针对本案例研究所做的调试，请参考 Duduta 等，2013 年。

2016年的模拟结果

我们选取了3个项目情景作为测试对象。在车辆时速为60公里的情景中，出现的唯一变化是针对美洲大道上的所有车辆制定了60公里的时速上限。在“60 / 30公里”的情景中，规定了所有驶近车站的公交车辆（包括不经停的车辆）的时速不得超过30公里。在“全速”情景中，则出现了车辆行驶速度控制和增设带交通信号灯的路中段人行横道两项新规定。

表7的栏目中，从左向右依次体现了不同的安全保障措施对每个运营指数的影响。例如，时速上限降低使公交车

辆的行驶速度出现略微的上升，乘客的出行时间也出现延长。当时速变率下降时，则说明公交运营趋向平稳，发车频率也更加稳定。交通信号灯的出现影响了车辆的运营时速；但在“全速”情景中，我们可以看到人口稀少的城郊地区（无明显建筑物的区域）对车辆时速限制较宽松，上限为70公里。

纵观整体的模拟测试结果可以发现，安全措施虽然在一定程度上影响了运营效率，但并不严重。这说明，TransOeste系统能够提供高品质且安全的快速公交服务。此外，即使采纳了建议的安全保障措施，车辆的运营时速依然高于25公里的基准值。

表 7 2016年情景模拟结果

指标	线路种类	基准线	时速60公里	时速60 / 30公里	全速	差异
运营时速（公里）	快速公交	32	31.5	29.6	29.6	2.4
	常规公交	25.6	25.6	25.45	25.43	0.17
行驶时长	快速公交	71	72	77	77	6
	常规公交	89	89	89	89	0
时速方差（公里）	快速公交	37	31.3	22.33	15.57	21.43
	常规公交	16	14.94	14.85	15.57	0.43
时速变率系数	快速公交	0.19	0.18	0.16	0.16	0.03
	常规公交	0.16	0.15	0.15	0.16	0



巴西库里蒂巴市的BRT公交走廊

第五章

交叉路口的设计建议

5.1 主要的安全问题

一个交叉路口是否安全，主要取决于其结构是否是紧凑而便利。我们掌握的公交走廊数据均显示，交通事故发生的频率与交叉路口的尺寸和复杂度密切相关。

交叉路口的大小

交叉路口所占的面积由右转车道的转弯半径及每条岔口的宽度决定。通过使用模型分析交通事故的发生频率，我们发现每增加一条通往交叉路口的车道，发生严重交通事故的几率就会上升达 17%（见表 8）。

为降低交叉路口的宽度，我们建议首先缩短右转车道的转弯半径，控制好弯道的幅度，不要盲目加长弯道。此外，我们还建议把停车道用路缘扩展改造为人行道，并尽量减少公交走廊上的车道数量。

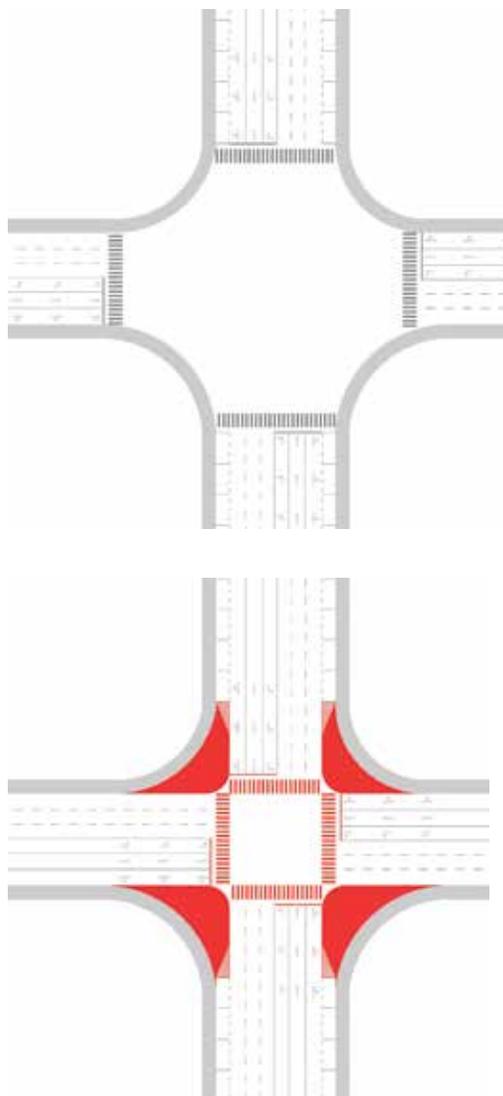


图 20 通过减小转弯半径，以及路缘扩展改造（红色部分）减少交叉路口的面积。

表 8 道路及交叉路口的基本要素对安全性的影响

		交通事故的变化 (%)	95% 置信区间
每增加一个岔口	致伤或致死事故	+78%	(+56%, +103%)
	车辆相撞	+65%	(+46%, +87%)
每增加一条车道	致伤或致死事故	+17%	(+12%, +21%)
	车辆相撞	+14%	(+10%, +18%)
人行横道宽度 (每增加一米)	致伤或致死事故	+2%	(+0.04%, +4%)
	行人交通事故	+6%	(+2%, +9%)
允许左转	致伤或致死事故	+28%	(+14%, +48%)
		+35%	(+11%, +75%)

左转

我们通过调查发现，禁止在交叉路口左转能够提升路口的安全性（见表 8）。在交叉路口左转通常都会带来安全隐患；而在道路中部的公交走廊上，这个问题尤为突出。在中央公交专用道走廊上，公交车辆最容易遇到的交通事故是与违规左转的右侧车辆相撞。

在大多数中央公交专用道上，需要禁止左转，改由环路完成左转动作。这需要仔细地设计环路，避免把公交走廊上的风险转移到环路上。此外，有关部门应加设明显的标志物，标示出禁止左转和改道环路的情况。如果需要在某些路口允许左转，信号灯需要有专门的左转时间段。

人行横道

模型对实际情况的模拟结果显示，人行横道的宽度每增加一米，行人交通事故的数量就会上升 6%（见表 8）。在此，我们将介绍两种无需减少车道即可缩短过人行横道宽度的设计手法。我们使用的道路样本为双向四车道，在每个方向上配有一条停车道。过路口的宽度为 19.3 米。

通过进行路缘拓宽，可以扩充人行道区域，使其越过停车道，延展至交叉路口边缘。此举使行人过马路的路程变为 13.3 米，比原来减少了 6 米；此外，路口处的车辆驾驶员及行人也能看清路况。反之，如果停车道上的车辆一直铺排至过路口，遮挡了后方的人行道，那么驾驶员则可能无法及时看到准备过马路的行人，进而导致行人被撞。因此，建议取消交叉路口处的停车位（这种做法成为“曝光”），以拓展驾驶员与行人的视域，减少交通事故的发生。

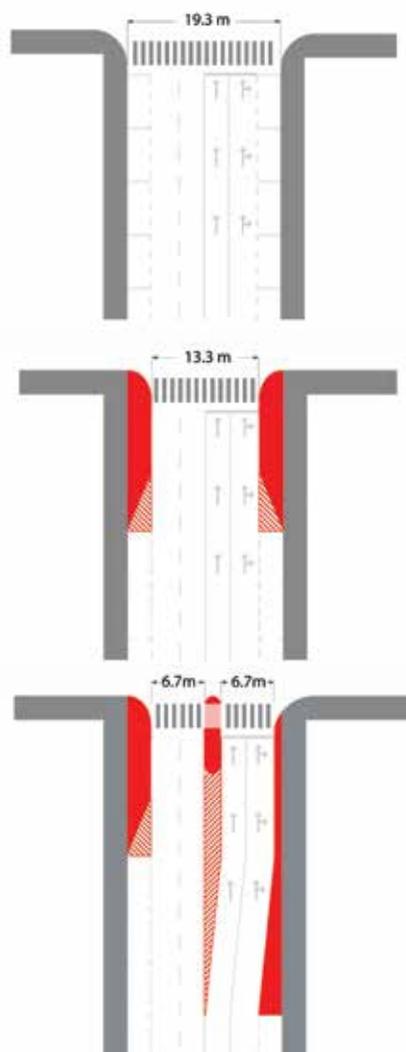


图 21 “曝光”设计与安全岛

另一种提升行人过马路的安全性的方法是：取消交叉路口路段的停车道，将四条车道中的两条移至紧邻人行道的位罝，并在空出的地方建立过马路的等候区。这样一来，行人穿过两条车道（6.7米）就可到达等候区，因而不易发生交通事故。变换交叉路口路段车道的位置还可以起到降低车辆行驶速度的作用，以更好地保障行人的安全；要做到这点，可在设计上做相应的调整。

受保护的行人区

在道路中央为行人设置等候区时，还应该安装一些保护行人的防护设施，如防护柱或较高的路基。在车辆因失去控制或因驾驶员疏忽而撞向等候区时，这些防护设施能够保护行人不受车辆威胁。

交叉口标记

如果交叉路口较大，我们建议使用特制的路面标记来引导路口处的车辆（特别是转向车辆）。交叉口标记分为两种：1）车道延伸标记，包括用来突出车道穿过交叉路口的点状虚线，以及用来表明有两条车道相交叉的十字状标记；2）清空带，即：禁止驶入的区域，以斜划线加以区分。各国使用的路面标记的形态有所不同，建议在选用标记物的时候认真参考相关的行业标准。在本指南中，我们以丹麦的交汇点标记为例加以说明。

车道对齐

交叉口前后的同一条道路需要对齐所有车道。如果出现偏差，那么就可能使驾驶员认错对面的车道，或在发现自己进入了错误的车道后猛然转弯，进而导致交通事故。

如果确实发现了轻微的偏差，建议在交叉口用标记线来引导司机保持车道。严重偏差，例如可能让司机驶入对侧车道的情况，要严格避免。对于出现明显偏差的较为次要的小路，则可以考虑禁止直行，只保留右转功能。



图 22 设有交叉口标记和没有标记的路口对比

车道平衡

当进入路口的车道数量超过直行后或左转后驶离路口的车道数量时，这种情况叫做“车道失衡”。出现“车道失衡”时，车辆驶离交叉路口后需要并入其他车道。此时，则可能出现因驾驶员迅速换道而发生的交通事故。

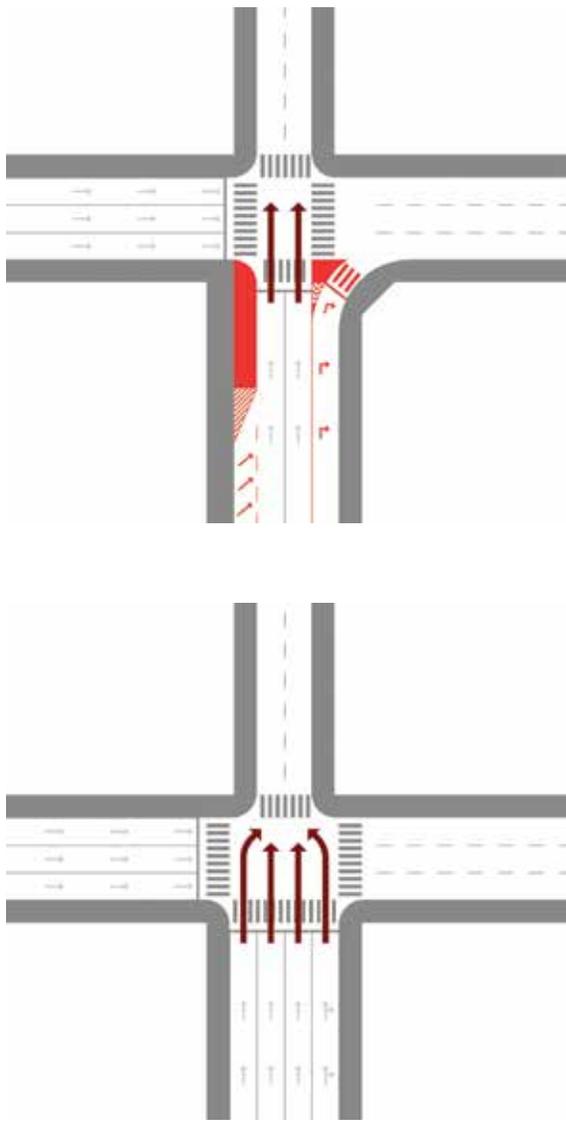


图 23 通过减少一条岔口上的车道数量或设定转弯专用道来取得车道平衡

在一些情况下，可以通过设定转弯专用道来进行补救。例如，如果某条道路的驶入路口方向有四条车道，而在驶出路口方向只有三条车道，那么则可以将驶入方向的一条车道划为左转或右转专用道。这样一来，就可以保证交叉路口前后的直行道路数量一致，避免出现道路失衡的情况。另一种补救方法是，在之前一个交叉路口或路中段处取消一条车道，并在适当的位置设置标志，以警示驾驶员。

环路

在中央公交专用道走廊上，社会车辆通常不可左转。这是由于左转可能会导致公交车与其他车辆相撞，严重危及交通安全。此外，禁止左转可以去除一个左转信号灯时间段，为公交车增加绿灯信号周期比（g/C 比），从而增进公交车的效率。

方案1：环路在交叉路口后

方案 1 将一个左转弯改为三个右转弯。右转弯的安全性远高于左转弯；因此，从安全角度考虑，这是较为理想的解决方案。在使用这套方案前，需确保满足以下两个条件：

- 环路的车道必须能够承载转移到环路的车流量，并不会出现车流隐患或拥堵情况。
- 环路不可过长。如果紧邻交叉路口的路段长度超过 150 至 200 米，那么在此设置的环路就会过长，驾驶员可能会不想使用。

方案2：环路在交叉路口前

如果方案 1 不可行，则可以考虑方案 2。依照方案 2 的设计，环路将一个左转弯改为一个右转弯和两个左转弯。这样做虽然可以提升公交走廊的安全性，却也给其他车道带来了安全隐患。使用方案 2 的前提与方案 1 相同，即：其他车道必须具备足够的车流承载力，以及环路不可过长。

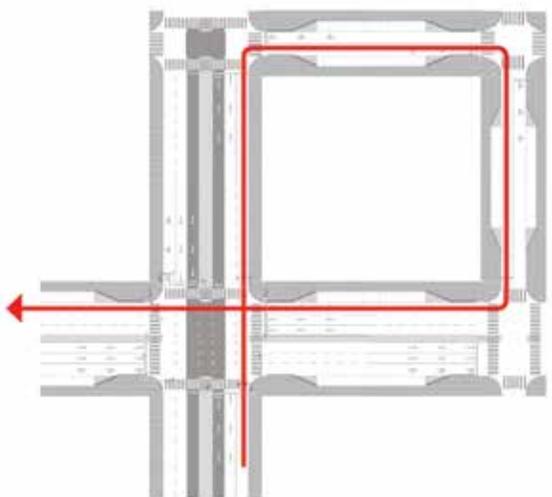


图 24 环路设计方案1：在禁止左转的交叉路口后

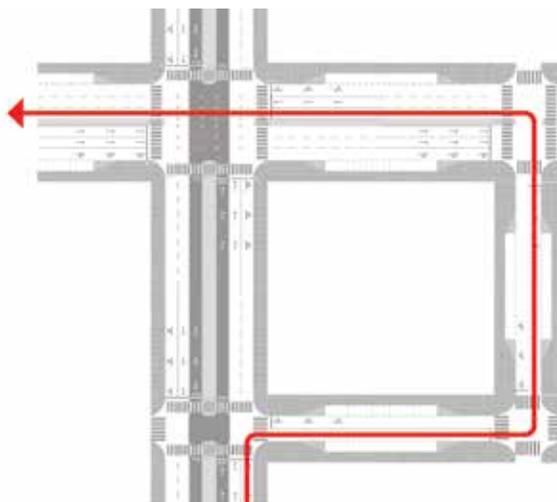


图 25 环路设计方案2：在禁止左转的交叉路口前

环路标志牌

无论环路是在交叉路口的前方或后方开始，标志牌必须放置在相应交叉路口的岔口上。在设计及安放提示牌时，应遵从国家或地方层级的相关标准。此外，我们还针对提示牌的设计与位置分布提出了一些整体原则：

放置

- 无论环路是在路口之前或之后开始，都应在禁止左转的路口前放置环路标示。如果选用方案 2，则必须将标志放置在上一个路口之前，使司机能在到达下一个（禁止左转的）路口前能转入环路。
- 在较宽的路段上（双向六车道以上），可以将环路指示牌放置在车道上方——而非人行道上——以保证良好的可视性。也可以在人行道和隔离带上各放置一个指示牌。

设计

- 指示牌上的内容应尽量简略，使驾驶员理解如何使用转盘即可。
- 指示牌的大小以驾驶员在以最大限速驶过时，依然能够准确读取其上内容为准。
- 请勿在指示牌上提供路名。只需要给出禁止左转的路口名，以提示驾驶员环路是为那个路口而设。

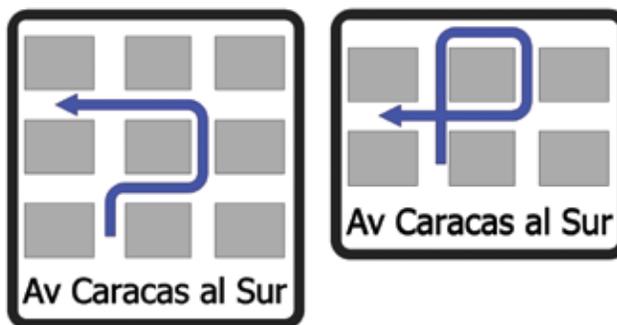


图 26 两种环路指示牌的建议设计方案。注意：尽量简化指示牌上的信息，唯一标出的路名是禁止左转的路口街道名。

在交叉路口附近移除停车道，并拓宽人行道能够缩小交叉路口的面积，减少行人过马路的距离。这项操作简单易行，并不会影响路口的车流量承载力，是改善行人过马路环境的理想方案之一。

此举亦可使路口附近不再有车辆驶进、驶出停车道，有效避免了公交走廊上的车辆在右转时与出入停车带的车辆相撞。

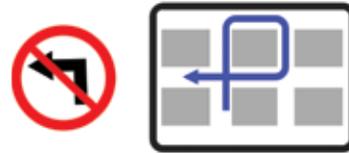
除了安装交通信号灯外，还应在交叉路口的各个路口加装行人信号灯。此外，还应在交叉路口后安装第二组信号灯。

尽量缩减右转半径，以保证交叉路口的紧凑。但是，不可因盲目追求紧凑设计，致使大型车辆因空间不足而无法顺利转弯。



图 27 禁止左转的大型
十字交叉路口

保证交叉路口中部区域的照明充足，以方便车辆及行人在夜间安全通过路口。



为禁止左传及环路设置明显的指示牌。指示牌的样式及内容应符合国家及地方标准。环路指示牌应尽量简单易懂，方便通过路口的司机使用。

5.2 禁止左转的大型十字路口

在由城市主干道交汇形成的交叉路口附近，BRT 走廊是交通事故的高发路段。因此，应特别重视这些走廊的安全问题。

图 27 的设计方案融合了前面提到的多个提升安全性的要素，包括：紧凑、简单的路口、限制车辆左转、缩短行人过马路举例、在路中央增设带防护装置的等候区、安装护栏、以及为环路安装清晰的指示牌。除了这些要素外，还有一些额外的安全保障措施；我们将在“注释”部分加以说明。

需要注意的是，此类设计方案并不包括在走廊上增设自行车设施。我们提倡将自行车道放在相邻的并行车道上，以防止骑车人群有使用公交车道的风险。如果可以预计需要使用公交走廊的骑车人群较多，可以考虑在走廊上增设自行车道。

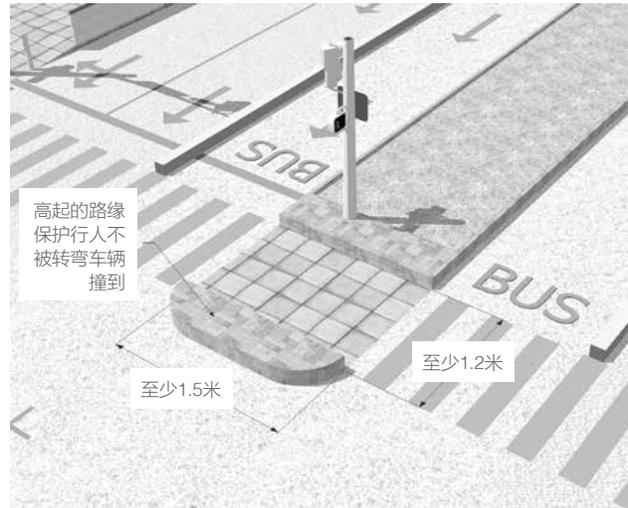


图 28 行人等候区详解。等候区的主体部分应与路面齐平，并用高起的路缘保护不被车流侵占。等候区的面积应依预计的行人量而定；但至少应能够容纳一个行人加一辆婴儿车。

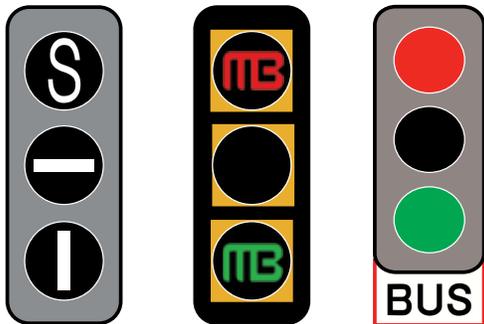
汽车左转应从公交车道旁边的一条车道开始。交通信号灯应为车辆左转留出单独的时段——此时，其他的交通活动应全部暂停。

在包含中央公交专用道的道路上，左转的起始点比一般道路的左转点更靠外侧。因此，同时左转的对向车流更容易出现相交点。针对这种情况，波哥大市在其TransMilenio快速公交系统上的解决方法是，保留左转需求量大的那一个左转道，使用环路代替对向的左转道。



图 29 允许左转的大型十字交叉路口

我们建议在BRT或其他公交走廊上为公交车辆单独设置交通信号灯。公交信号灯应明显区别于普通信号灯。信号灯的参考设计见下：



(左：根据丹麦标准设计的公交信号灯；中间：墨西哥城Metrobús系统的交通信号灯；右：带公交标志的普通信号灯)

表 9 在交叉路口处取消一个左转车道所带来的安全影响

取消一个左转道口的加权平均影响	交通事故发生几率的变化 (%)	95% 置信区间
致伤及致死事故	-22%	(-12%, -32%)
车辆相撞	-26%	(-10%, -43%)

5.3 允许左转的大型十字路口

我们建议，只能给满足下列条件之一的 BRT 或公交走廊开设左转功能：

- 预计将出现大量需要左转的车辆，且无法通过环路将车流分散到相邻或附近的道路上。
- 街区过长，车辆如果使用环路的话，则要额外行驶较多路程。这类区域通常出现在城市的工业园区、大型校区附近及道路网络稀松的地带。

如果开放左转功能，则应为其留出单独的信号灯时段，并划出左转专用道。建议将公交道与左转道区别开来，不要将两者混为一体。否则，当其他车道的车辆转入公交车道时，经常会导致事故的发生。这一点在波哥大、墨西哥城及瓜达拉哈拉得到了证实。

如果在公交走廊上开放左转功能，那么左转车辆通过时，其他车辆必须停车避让——这就会减少公交车辆的通行时间。左转功能对公交运营效率带来的具体影响取决于交通信号灯的时长及左转道口的数量。

如果仅在交叉路口的一条道路上开放左转功能，那么路口的通行能力依然要明显高于公交系统通行能力，因为此时限制公交通行能力的因素是站台设计。然而，如果在主路及横向岔路上均开放左转功能，并为其设置单独的信号灯时段，那么其所处的交叉路口的通行能力就会大受影响，成为影响整条系统效率的瓶颈。

是否允许左转不仅关系到安全问题，还影响着公交系统的运营效率。取消左转功能后，公交走廊的安全性将得到提升，且交通信号灯也会更为简洁，进而提升公交走廊的通行能力。

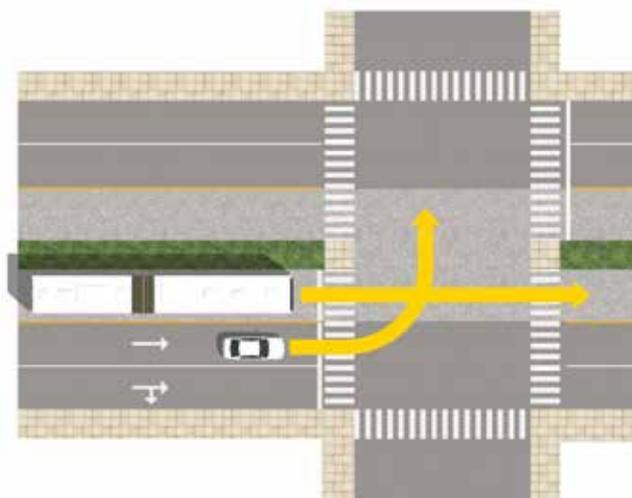
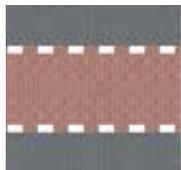


图 30 交通事故图：小汽车在公交车辆前强行左转——中央BRT或其他公交走廊上最常见的公交车事故。

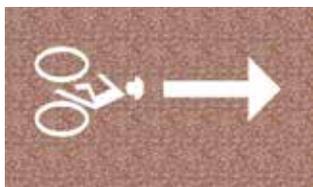


自行车道标志应贯穿交叉路口。本例中，在自行车道上用粗的虚线标示了车辆可能穿越自行车道的位置。请参考相关的标准选择正确的标示。



图 31 带自行车道的交叉路口

建议的自行车道标记



我们建议将汽车停车线和自行车停车线前后放置，并将自行车停车线画在略微靠前的位置，以突出骑车人的位置，方便右转车辆的驾驶员看清。

图中两条停车线的间隔距离为1米。这个距离最大可为5米。

5.4 带自行车道的大型十字路口

在此我们讨论的是公交走廊沿线的交叉路口中自行车道的设计。

其中，最容易发生的交通事故是正在穿过交叉路口的自行车与右转车辆相撞。为保障骑车人的安全，应对自行车道加以明显标记，使路口车辆的司机能够轻易注意到。建议在靠近交叉路口的区域提前移除大型自行车道隔离设施（如护栏），以提升骑车人的可视性。如需隔离，可使用路缘石高度的隔离物。

自行车道穿过交叉路口的部分也应配有清晰的标识；同时，还应该标记出车辆穿过自行车道的地方，提示骑车人注意安全。

加设自行车道后，骑车人可能会占用公交车道，而影响公交车的行驶。除此之外，自行车通常不会对公交系统的运营效率构成损害。



图 32 自行车专用道的标志和路面标识



图 33 小型十字路口，横向道路可以穿越的情况

5.5 小型十字路口，横向道路可以穿越的情况

有关这类交叉路口的安全问题，我们已在前面重点讨论过。主要的安全保障措施包括：尽量缩小路口的尺寸、缩短行人过马路的距离，以及防止其他车辆违规占用公交专用道。

此外，还应注意交通信号灯时段的设置，留给行人充足的时间，使行人能够一次性穿过公交走廊。

还应将行人护栏放置在人行道的边缘（而非路中央）防止行人在窄口随意穿越，同时防止车辆在人行道上违规停车。

表 10 将一个十字路口改造为两个丁字路口所带来的安全影响

		交通事故发生几率的变化 (%)	95% 置信区间
将十字路口改为两个丁字路口	Fatal or injury crashes	-66%	(-88%, -1%)
	All crashes	-57%	(-70%, -37%)

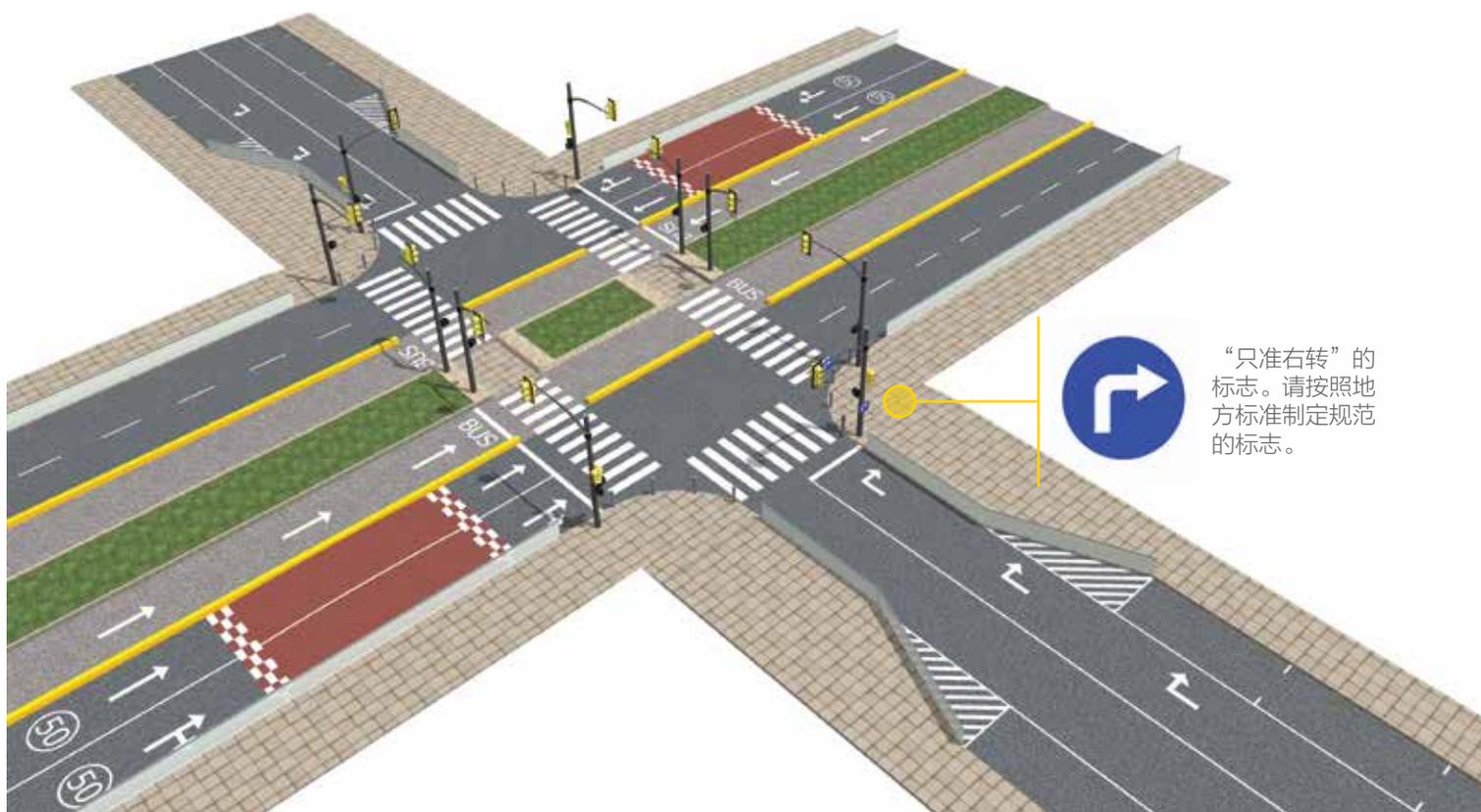


图 34 横向道路无法直行

5.6 小型十字路口，横向道路不能通行的情况（即丁字路口）

禁止横向道路直行可使交叉口交通事故的数量下降达 57%（见表 10）。然而，此举并不一定使行人受益。在实际情况下，如果将公交走廊的隔离带延展过交叉路口，那么通常也要取消 BRT 系统的交通信号灯，并禁止行人在此处过马路。道路安全检查中，可以发现行人依然会在这种情况下横穿走廊。因此，我们建议保留人行横道及信号灯。此外，当绿灯方向上只有行人时，红灯方向上的一些驾驶员可能会闯红灯。基于此，我们建议在靠近交叉路口处设置减速带，以提示驾驶员注意信号灯。

在这种设计中，横向道路上行人的绿灯时段是影响公交车道通行能力的主要因素。因此，在其他条件相同的情况下，横向道路不通行的设计应该不会对通行能力产生重大影响。然而，相较于没有人行横道及交通信号灯的设计，我们的设计会使公交车辆的行驶速度出现下降。这体现的是公交运营速度与行人安全的权衡。我们建议，至少每隔 300 米设置一个带交通信号灯的人行横道。

5.7 带自行车转弯带的小型十字路口

在这类路口中，第二组信号灯的作用尤为突出。排队左转的骑车人看不到主信号灯的变化，因此要完全依赖第二组信号灯。



图 35 带自行车转弯带的小型十字路口

在这类路口中，第二组信号灯的作用尤为突出。排队左转的骑车人看不到主信号灯的变化，因此要完全依赖第二组信号灯。

路边停靠车辆的车门可能会突然打开，这对骑车人来说是一个常见的安全隐患。在停车道及自行车道之间设立缓冲区，能够有效防止骑车人与车门相撞。

5.8 有自行车设施的交叉路口

对于两边道路都允许自行车通行的交叉路口，主要的安全考虑是左转骑车人的安全。相关的安全保障措施包括：划出自行车等候区及“两步左转”排队区(NACTO; 2011 年)。我们建议使用“两步左转”排队区，并在图 36 及图 37 中对其进行了说明。需要注意的是，“两步左转”排队区与自行车等候区的作用不尽相同。骑车人在左转时，要首先通过交叉路口，然后在排队区内等候绿灯穿过道路。当绿灯亮起时，骑车人方可正常穿过 BRT 走廊。

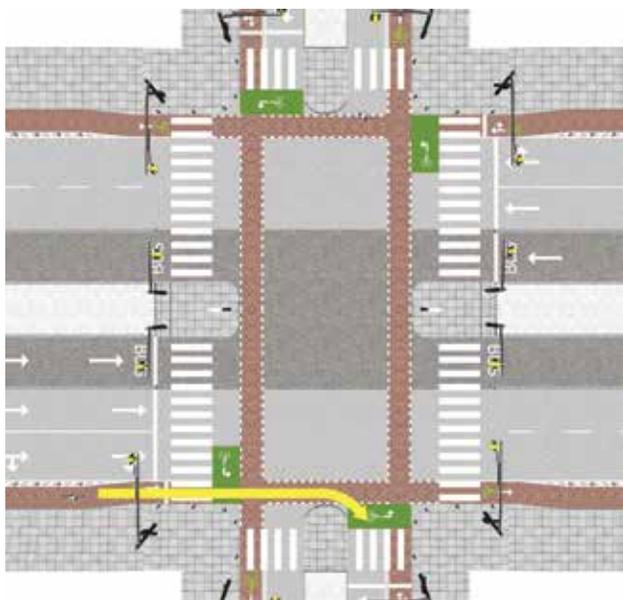


图 36 自行车左转第一步：绿灯亮起时，骑车人沿BRT走廊直行至右侧的转弯排队区，在此处等候交通信号灯放行。

这种设计 (NACTO; 2011 年) 能够最大限度地避免骑车人与其他道路使用者相撞。考虑到各城市的条件及过往经验，这种设计可能是不太常见的，也需要一定时间来适应。因此，有关部门应审慎权衡此措施的优点及在宣传教育及执法上的投入，再做出决定。

如果骑车人不知道如何使用这种设计，那么这项措施的安全效益也就无从谈起了。如果需要了解其他的自行车转弯措施，请参考 NACTO (2011 年)。

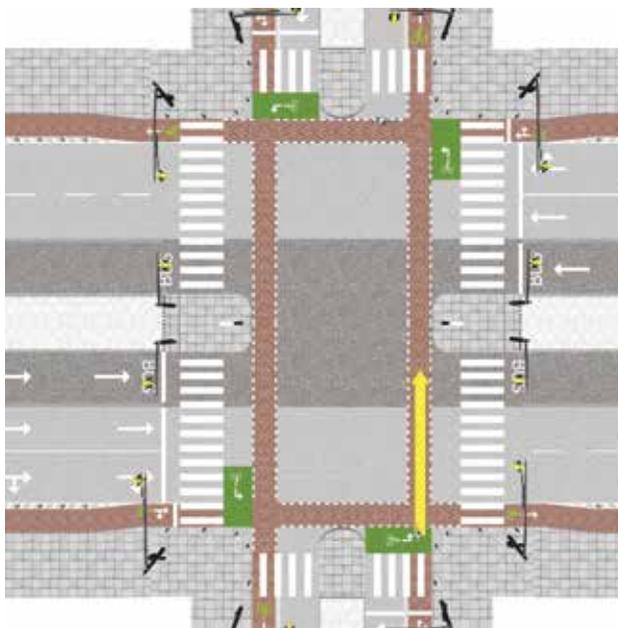


图 37 自行车左转第二步：当过马路方向的绿灯亮起时，骑车人可与其他道路使用者一同穿过BRT走廊。过路口的第二组信号灯非常重要，这是由于骑车人在过马路时无法看到主信号灯的变化，需要全部依赖远方的第二组信号灯来判断路况。

道路最外侧的车道应有清晰的标记，提示社会车辆仅可在该车道上右转，只有公交车可以直行或右转。请依据相关标准制定这一标志。

此处的转弯半径不宜过大，以防车辆不慎右转入公交车道。然而，也要有足够的转弯半径让右转车辆顺利转入混合车道。如果有特殊车辆（如检修车辆、共享公交车车道的常规公交车、救护车等）需要右转进入公交车道，那就不能使用太小的转弯半径。

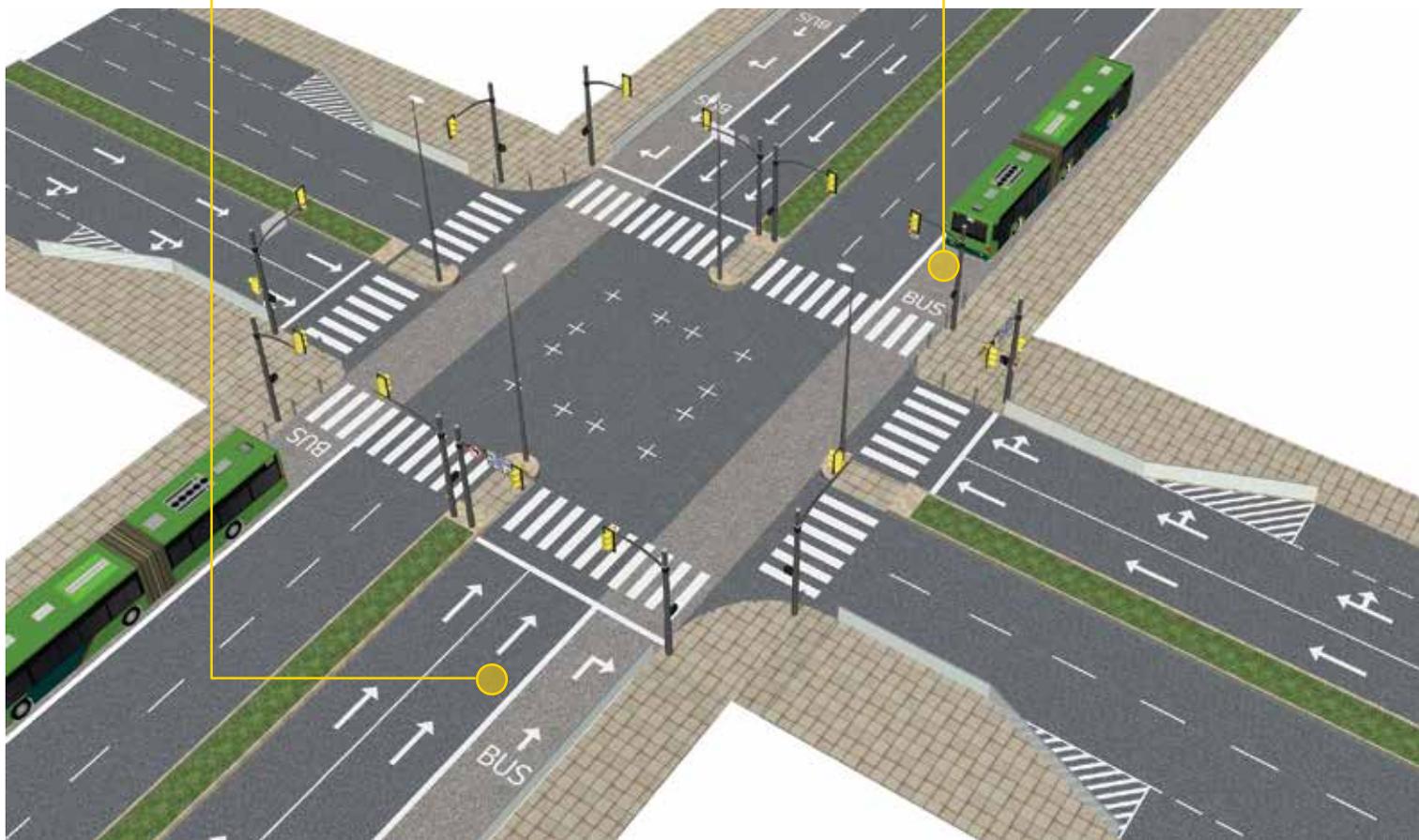


图 38
带路边BRT的交叉路口

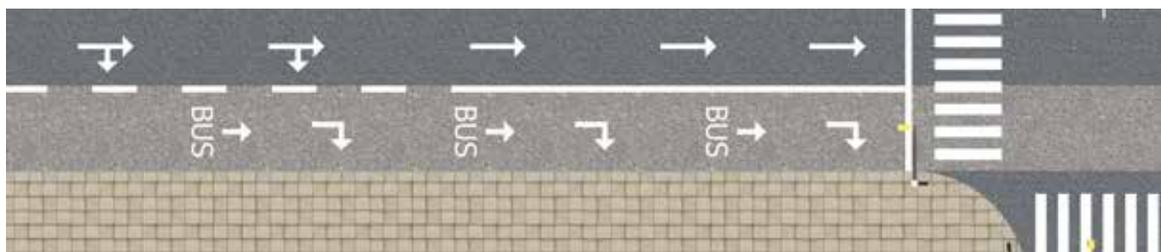


图 39 与公交走廊并排的车道。右转车辆可依照路面标记提前并入公交车道右转。并道路段的长度应不小于50米。

5.9 带路边BRT或公交专用道的大型十字路口

在规划带路边 BRT 或公交专用道的十字路口时，需要着重考虑的安全问题之一就是右转车辆的安全。如果简单地禁止其他车辆借路侧式公交车道右转，则会严重影响道路的

可达性。较为合理的方案是允许车辆并入公交车道右转，或允许车辆从相邻车道开出后右转，并在交通信号灯设置专门的转弯时段。



图 41
有公交专用道或混合车道穿过的交叉路口

5.10 街区长度不超过200米的大型十字路口：路边BRT走廊或公交专用道

在街区长度不超过 200 米的路段上（多见于人口稠密的城市中心区），路侧式公交走廊功能趋近于混合车道中的传统公交系统。

交通事故方面的数据分析显示，尽管路侧式公交优先系统较传统公交更为安全，但其危险性仍大于位于中央公交优

先系统。我们在“研究综述”章节中已提到，造成这种现象的原因不仅可能与公交系统本身的设计有关，还很可能来自其他设计的差异——位于中央的公交系统通常配有隔离带、较狭窄的人行横道，并不受左转车辆干扰；这些设计都有助于提升系统的安全性。而路侧式公交系统缺乏这些设计，因此其安全性可能较低。

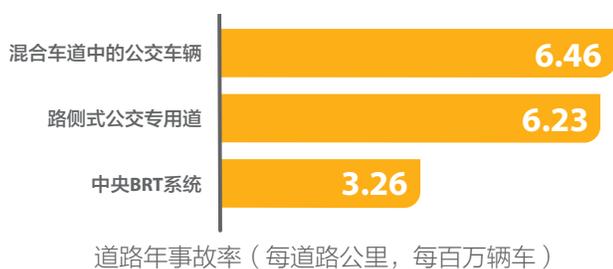


图 40 墨西哥瓜达拉哈拉市三类公交走廊的安全性比较

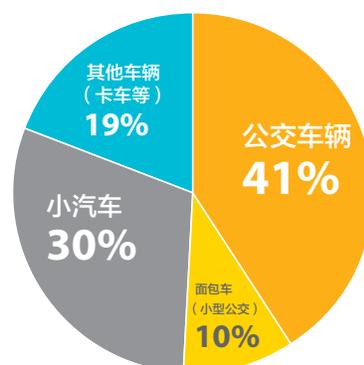


图 42
路侧式公交走廊上各类车辆的事故占比，瓜达拉哈拉市Alcalde大

5.11 理解行人对交通信号灯的遵守

在第三章的“路中段人行横道”及第五章的“交叉路口”部分，我们建议为所有位于城市主干道的行人过路口安装信号灯，以提升行人过马路的安全性。要达到这个目的，需满足两个前提条件——信号灯的设计应切实符合实际情况的需要；确保行人遵从信号灯的调度。如果行人对信号灯的认可度低，那么即使安装了完备的信号指示系统，也不能保证过路行人的安全。我们为报告所做的城市调查显示，在设计交通信号灯时，大多数城市仅考虑了车辆的通行能力，而行人的需求却很少被纳入考虑范围。其结果就是行人看不懂信号提示，且需要等候较长时间才能过马路。因此，不少行人都没有遵从信号灯的调度。在我们的采样分析中，大多数城市都存在较为突出的行人闯红灯问题（见图 43），城市的交通安全也因此存在较大隐患。

行人闯红灯的问题严重，固然有教育和监督不够到位的责任；但较深层次的原因还在于交叉路口及交通信号灯的设计不够以人为本（Zhou 等，2011 年；Cooper 等，2012 年）。

在本项目的研究阶段，我们分析了行人对交叉路口信号灯的反映，以及交叉路口及交通信号灯的设计与行人闯红灯之间的关系。如需了解数据收集过程及方法论，请参考 Duduta, Zhang, Kroneberger（2014 年）。在本报告中，我们重点探讨的是主要发现，以及交叉路口和信号灯设置所产生的影响。



图 43 行人闯红灯现象：伊斯坦布尔市Eminönü公交车站（左）；里约热内卢市快速公交系统Salvador Allende车站（右）

表 11 使用二分变量logit模型预测行人在交叉路口闯红灯的几率（正数代表闯红灯的几率较大）

	系数	P值
有行动不便的人（是 = 1，其他 = 0）	-3.813	0.000
车辆间隔（下一辆车驶来前的秒数）	0.037	0.000
车流量（车辆 / 秒 / 车道）	-12.525	0.000
平均行人延时（参见道路通行能力手册HCM公式，秒）	0.012	0.023
与车辆左转相冲突（是 = 1，其他 = 0）	0.873	0.000
全红灯时段（是 = 1，其他 = 0）	1.02	0.001
行人过路距离（米）	-0.298	0.000
常量	1.576	0.000
观察总量	1570	
对数似然函数值	-494.342	
LR chi2 (prob > chi2)	294.16 (0.000)	

来源: Duduta, Zhang, and Kroneberger 2014年

通过分析表 11 中的数据，我们得知“平均行人延时”对行人是否遵守信号灯影响很大。信号延时是行人绿灯时长与信号灯周期时长的函数：

$$d_p = \frac{(C - g_{Walk,mi})^2}{2C}$$

（《道路通行能力手册》18—71页）

其中， d_p 为行人延时， C 为信号灯周期时长， $g_{Walk,mi}$ 为次要道路上信号灯时段中的有效步行时长（即：绿灯时长 + 4 秒）；计算单位全部为秒。当信号灯周期较长，或行人绿灯周期较短时，行人延时较长。《道路通行能力手

册》（《手册》）中介绍的延时数值解读方法仅供参考，旨在分析行人对信号灯的遵从程度。根据《手册》中的说明，当延时超过 30 秒时，行人闯红灯的几率较大；当延时在 10 秒以内时，行人闯红灯的几率较低。表 12 显示的是当延时数值在 10 秒及 30 秒之内时，分别可能出现的行人时段及信号灯周期时长数值。

在示例A中，行人穿过一条主干道，并享有优先权。我们预测，行人在这种情况下通常会遵守交通信号灯。在示例B中，出现了大型交叉路口，行人可在通往路口的次要道路为绿灯时通行。此时，交通信号灯的周期较长，因而行人需要等候较长时间方可通行，其结果是遵守信号灯的人数下降。在示例C中，行人延时现象非常突出，信号灯周期非常长。这种情况常出现在印度特大城市的大型交叉路口。

表 12 信号灯设计对行人延时的影响

示例	行人延时(dp)	行人绿灯时长	信号灯周期时长
A	12	40	85
B	76	15	180
C	191	30	440

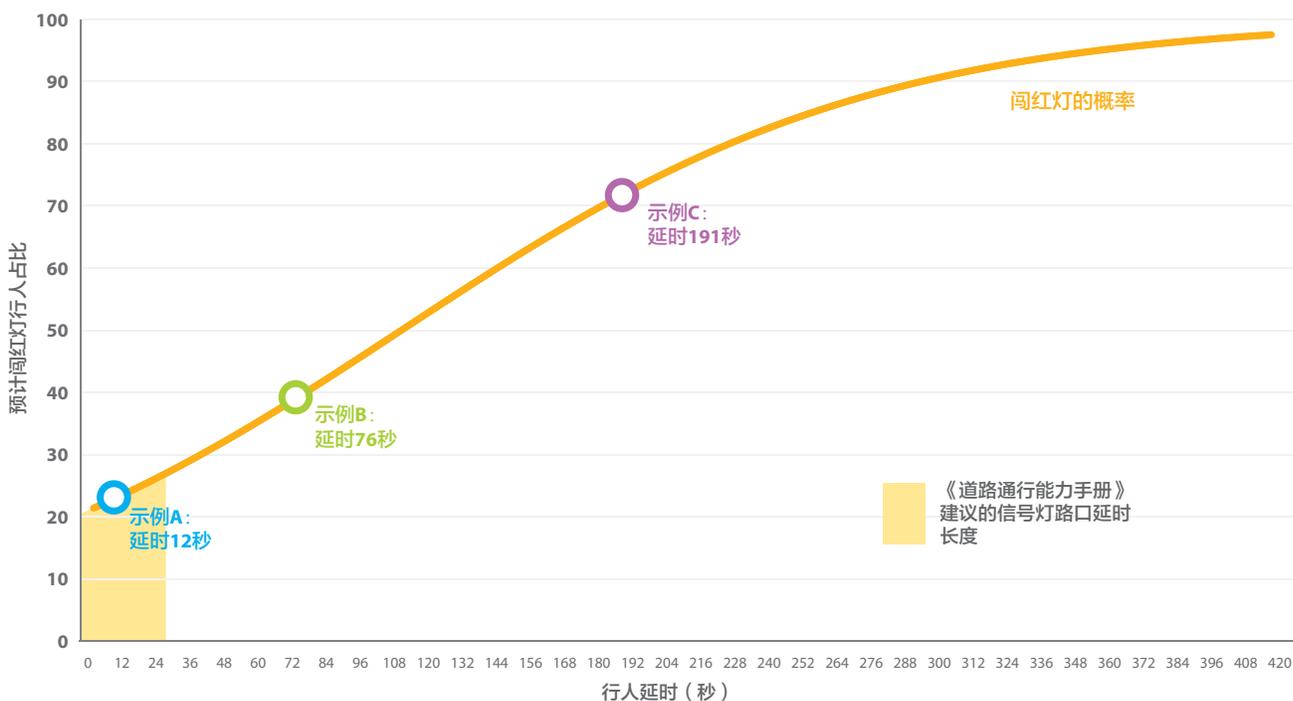


图 44 行人延时对行人闯红灯行为的影响(Duduta, Zhang, Kroneberger; 2014年)

除了信号灯不同相位的时长，交叉口信号的相位类型也会影响行人闯红灯的几率。例如，如果仅需等待次要方向的车辆通行，那么行人就更愿意遵守信号灯。而如果还要等待转弯车辆，那么一些行人就可能会闯红灯。我们对各种信号灯相位对行人的影响做了测试，结果发现只允许左转的信号灯相位最能激发行人闯红灯的行为（见表 11）。此处，特指会影响行人过街的左转车辆。

交叉路口的设计也会影响行人对信号灯的依从度。当过路口较短时，行人更容易闯红灯。这就需要区别利于行人遵从信号灯的设计和安全的設計——大型十字路口也许可以抑制行人闯红灯的行为，但却有更多行人伤亡。这一点从表 8 可以看出：人行过街距离越长，则行人发生事故的概率越高。这种现象说明，这就意味着，一个路口一旦变得更窄而更利于安全，行人反倒会激发出不利于安全的冒险行为。

设计符合提高行人认知的信号建议

模拟测试带给我们的中心启示是：信号灯周期应尽量简单，以尽可能降低行人闯红灯的几率。如果为照顾更多的转弯车辆或提升道路通行能力，而盲目增加信号灯的相位或延长单个相位的时长，则会使信号灯复杂化，或增加行人等待的时间。其结果就是，行人为了方便而更容易闯红灯。

过往经验说明，较短的过路口安全性更高。在设计行

人基础设施时，应首先考虑安全性；因此，尽管短距离的过路口可能会增加行人闯红灯的次数，但还应予以推广。需要提醒城市规划和交通工程人员注意的是，行人在较窄的道路上更容易违反交通规则，这可能会对其安全产生不利影响。如果确实存在这个问题，可以考虑使用缩窄道路并安装交通稳静措施（如减速带），或者在窄路的信号灯上进一步减少行人延迟，从而提升行人对信号灯的遵从度。



图 45 红灯时，行人在车辆空隙间违规横穿马路，里约热内卢市



图 47 墨西哥城在开通了Metrobús系统4号线后，对历史城区的交叉路口及公交系统所做的改造

案例研究

墨西哥城METROBÚS系统4号线

城市历史城区的公交优先:

Metrobús 系统 4 号线是墨西哥城 BRT 系统的一部分，其 2013 年的总里程为 95 公里，日载客数量超过 70 万人次。在 4 号线开通前，墨西哥市已在城市主干道开通了三条中央 BRT 专线；而 4 号线是第一条开通在城市历史城区狭窄道路上的线路。它的出现，将墨西哥城的两大公交枢纽——Buena Vista 及 San Lázaro——与城市的国际机场联系了起来。墨西哥城的历史城区道路狭窄，对 BRT 线路的设计提出了很大的难题。由于要对原有建筑物及停车场进行保护，因此不能像铺设其他 Metrobús 线路时一样，为 4 号线设置专用车道。因此，4 号线在一些路段上仅享有道路优先权；在空间允许的情况下，才拥有专用车道。这给其他的道路使用者带来了困扰，因为他们需要经常性地判断何时能够与公交车辆共用道路，何时需让出公交专用道。为了帮助他们熟悉道路使用新规，需要有关部门妥善设计线路、增设提示牌及路面标记，并积极进行教育和监督工作（见图 46）。

另一个注意事项是协调公交优先与历史城区的行人路权。为保障行人的安全，Metrobús 系统

4 号线的设计融入了许多安全元素，如行人信号灯、带防护的安全岛、防止违规停车而在人行道路边加装的防护柱、更完善的路面及信号灯设置（部分参见图 47）。这些措施在墨西哥城的其他道路上并不常见，足见 4 号线的设计和施工难度之高。其中，新型的人行横道和停车线的作用尤为突出，能够帮助驾驶员及时注意到交叉路口处的人行横道。



图 46 新添加的交通标志及路面标记，旨在提示其他车辆即将从共享路段进入公交专用道，必须右转避让公交车



里约热内卢市TransOeste快速公交车站

第七章

车站设计建议

7.1 主要安全问题

车站对行人的可达性

除了常规人流外，公交车站上还汇集了到达或离开车站的人流；因此，车站上的行人数量较公交走廊其他部分都要高，车站上发生行人交通事故的几率也更高。然而，这不仅是由于此处的行人较多，还在于行人做出的一些危险行为，特别是在车站附近违规横穿马路。合理的车站设计和布局有助于帮助行人遵守交通规则。其中，效果最好的是建造封闭式车站，并引导行人在指定地点（通常是带交通信号灯的路口）过马路。一般来说，在开放式、站台较低的车站上，行人更容易乱穿马路，而封闭式、站台较高的车站则有助于减少违规行为的发生。

公交车辆间的冲突

在公交走廊，特别是设有快速车道、并兼有普通及快速公交的走廊上，保障各线路公交车辆的路权是很关键的一部分。而如何防止车站附近驶进、驶出快速车道的公交车辆发生相撞则是其中的重中之重。

针对前面提到的几类公交车站重点安全问题，我们将提供几项车站设计建议，旨在引导车站行人的行为，尽量防止行人违规穿越马路。请根据车站的种类及售票方式选择符合当地情况的建议。

首先，我们将介绍中央 BRT 走廊的车站，包括车站对行人的可达性，以及车站及站台的具体设计方案。如需了解骑行与 BRT 系统的联动，请阅读下面的章节（换乘与终点站）。随后，我们将针对中央式车站进行单独分析。在大容量公交系统（如 TransMilenio 系统及带多个子车站和快速车道的系统）中，中央式车站的应用是非常广泛的。设计中央式车站时，不仅需要保证其对行人的可达性，还要注意各类公交车辆是否在进出车站时享有充分的路权。此外，我们还会关注车上售检票的公交走廊，如开放式公交系统、路侧式公交系统及使用混合车道的传统公交系统。



在拉丁美洲地区，可以考虑禁止其他车辆在BRT系统车站附近的交叉路口左转和右转。这可以帮助行人安全到达车站。在人流较大的车站，这一点尤为重要。为补偿右转功能的取消，可以在交叉路口的前一个街区设置环路。



图 49 城市主干道车站的可达性

在拉丁美洲地区，行人有时会穿越BRT走廊的隔离带进出车站；这种违规现象在BRT绿灯时段较长时更为常见。为了解决这个问题，有些城市在走廊隔离带沿线设置了带交通信号灯的人行横道，如瓜达拉哈拉市的BRT系统Macrobus沿线。目前，我们还没有掌握这项举措的安全性数据；但可以看到的是，Macrobus系统的整体安全性确实较好。这类举措适用于各类BRT系统，特别是当行人经常忽略信号灯及人行横道，而更愿意横穿隔离带时。

禁止车辆右转也存在弊端——由于分流了部分车辆，临近道路的通行压力就会增加，发生交通事故的几率也会更大。因此，我们也建议考虑开设右转专用道并设置右转专用的信号灯时段。纽约市及华盛顿特区已采用了这项措施；驾驶员较为遵守信号灯调度的其他城市也可考虑效仿。



图 50 TransMilenio系统Calle 72站出站口处的人潮

7.2 城市主干道车站的可达性

我们建议首先分析行人的行为习惯，再据分析结果优化车站设计，提升车站的安全性。其中，对防范横穿马路较为有效的设计方案是建设封闭式车站，并利用防护栏引导行人使用有信号灯的人行横道。

安全效果最好、且对车站及车上售检票系统均试用的设计手法是封闭式车站。而车站的进出口应与信号灯过路口或过街天桥相连，以引导行人的安全过马路。

此外，也可以在公交专用道与其他车道的车道线上加装护栏，以阻止行人在车站附近横穿公交车道。

要使车站易于行人使用，就需要充分考虑人流量，以及在隔离带及安全岛可能出现的拥挤。

单车道 BRT 系统（如墨西哥城的 Metrobús 系统）出入车站的人流量一般在 2000 至 12000 人次之间。里约热内卢市的 BRT 走廊道路安全检查发现，高峰期时段一个信号灯周期内通过的行人数量可达 100 人次。

鉴于此，设计车站通道时应充分考虑交通信号灯的设置，以确保建成的安全隔离带能够容纳大量的过路行人。通道的设计标准之一，是行人能够在绿灯时段内一次性从车站走到人行道上。从安全检查中，我们发现行人穿越距离较长，而隔离带较为狭窄；这些都使行人容易滞留，导致了多种问题。



图 48 行人为逃票而试图横穿公交车道进入车站，波哥大市TransMilenio快速公交系统

图 51
中央式车站



车站设计中的一个重要安全元素是在公交车道和其他车道间安装隔离物或护栏。这样做有助于防范行人试图横穿公交车道而进出车站。

在BRT系统车站上加装站台屏蔽门能够起到有效的防护作用。屏蔽门应与公交车门对齐，并仅在公交车在站台停稳后打开。在设计屏蔽门的开关装置时，应充分考虑到过路及停靠在其他站台的公交车，切不可发生无关公交车亦可触发开关的情况。



图 52 当公交车道和其他车道间没有隔离时，行人在车站前横穿公交道。



图 52 库里蒂巴市BRT系统车站的屏蔽门。在没有公交车辆停靠时，屏蔽门依然处在开放状态。如果车站人流较多，行人则可能不慎从开放的屏蔽门处跌落至公交车道。

7.3 中央BRT系统或公交专用道的车站设计

道路中央隔离带上的车站应为封闭式车站。这些车站的四周需要有隔离墙或较高的护栏遮挡，仅在与信号灯过路口相邻的位置开放出入口，以此达到引导行人按设计路线进出站的目的。在设计车站时，应注意做到以下几点。售检票方式（车站式或车上售检票）及公交车辆的种类不对其产生影响。



图 54 TransMilenio系统，2006年：车站上两个分站台之间的通道。图中，通道的护栏仅有1米高左右，很容易被行人翻越，是重大的安全隐患。



图 55 TransMilenio系统，2011年：护栏的高度增加了，以防范行人翻越。我们建议为车站上的所有连接通道加装较高的护栏

在公交车道及其他车道间设置较高的护栏

这项措施能够有效防止行人横穿公交车道、违规进出车站的高危行为，是最为必要的车站安全保障措施。

护栏的高度不得低于 1.7 米，其上不得出现可脚踏的地方，以防行人随意攀越护栏。护栏应坚固耐用，能够抵挡行人试图翻越时所造成的冲击。护栏延伸到整个车站的长度，不得出现间隙。

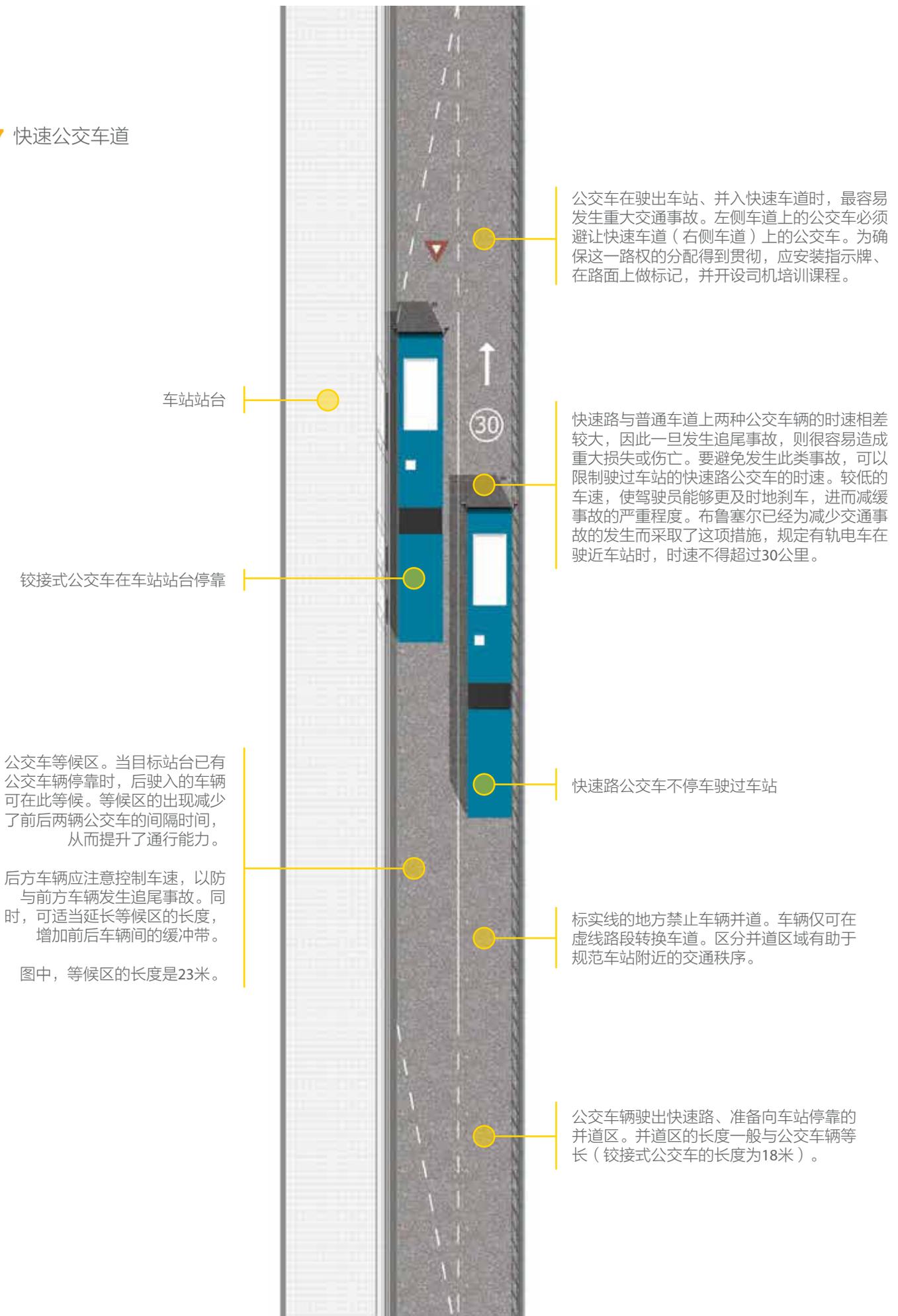
使用站台屏蔽门

站台屏蔽门能够起到防范行人乱穿马路的作用，并保护等候车辆的行人不被进站车辆撞到。使用屏蔽门时，应小心处理几个可能出现问题的环节：1) 屏蔽门可能会意外开启；乘客也有可能试图强行打开屏蔽门；2) 行人可能会横穿公交车道，违规进入车站；3) 乘客在等候公交车辆时，可能会阻拦屏蔽门闭合。



图 56 TransMilenio系统车站上的乘客强行打开屏蔽门

图 57 快速公交车道



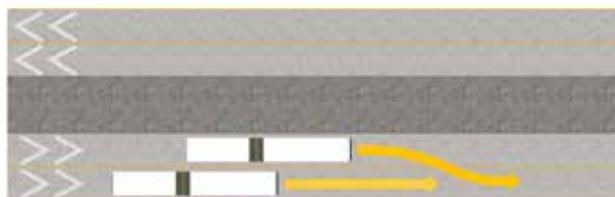
7.4 车站设计：快速车道

如果车站的容量较大，且搭配有快速车道和多个公交停靠站，那么则可能面临更多的安全问题。其中，最为严重的是常规公交与快速公交车间的碰撞，这可能会导致重大的伤亡。据统计，公交系统的单方向小时承载极限是3万至4万人次；当系统处在全负荷运营状态时，全部车道、车站、停靠位置都被启用，常规公交及快速公交车也同时发出，道路交通情况极其复杂。在TransMilenio系统最繁忙的时段，单方向每小时的公交车可达350辆。大量公交车同时行驶在道路上，大大增加了相互间发生碰撞的风险。

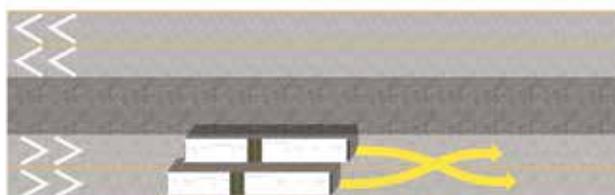
在TransMilenio系统，以及类似的Metropolitano系统（利马的BRT系统）上，最为常见的公交车事故就是追尾。追尾事故通常发生在车道上；而一旦发生在车站区域，则通常为快速行驶的车辆与驶离车站的车辆相撞，造成的危害也更为严重。2005年至2011年发生在TransMilenio系统车站上的事故中，最为严重的三起共造成了超过170人受伤。

另一类车站常见的交通事故是驶进、驶出车站的公交车间发生剐蹭。这类事故很少造成人员伤亡，通常会损坏车辆的后视镜。

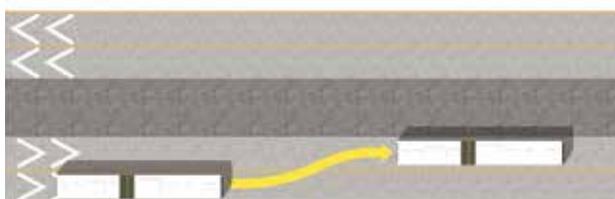
图 58



标准TransMilenio车站的严重交通事故场景重现：正在驶离车站的车辆与后方快速路上行驶的公交车相撞。这起事故造成了严重的伤情，及至少一人死亡。



标准TransMilenio车站的轻微事故：正在驶离车站的车辆与准备停靠在另一站台的公交车相撞。这类事故中的车辆时速通常较低，所以很少造成伤亡。



容易发生在TransMilenio及利马Metropolitano系统车站上的交通事故：停靠在车站的公交车与后方排队进入车站的车辆相撞。这类事故中的车辆时速通常较低，造成的危害不及快速路追尾事故严重。



图 59 行人从错误的出口离开TransMilenio接驳公交车站

在此处增设护栏有助于防范行人违规横穿马路到人行横道上。在阿雷格里港，一些公交车站的护栏可延展至站台后方十米的位置，而仍不能全面防止行人横穿马路。为了使护栏起到应有的作用，应设置更长的防护带。

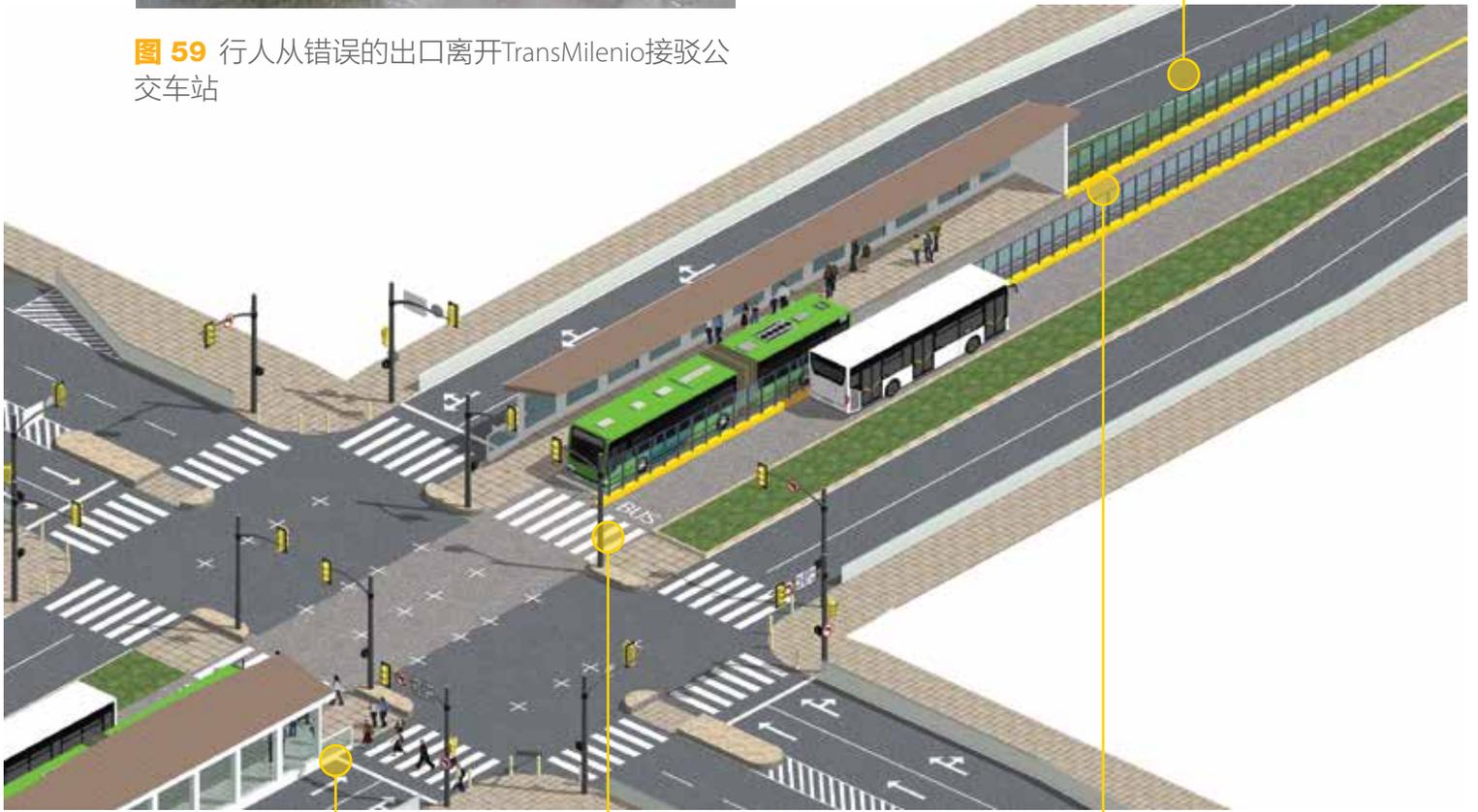


图 60 车站的可达性

我们建议在车站周边搭建不间断、透明的隔离墙。隔离墙能够引导行人前往指定的信号灯过路口；而选用透明的材料则是为了方便行人看清四周的交通状况。

图中所示为交叉路口两端的交错车站站台。将车站建在交叉路口附近，是为了方便附近区域的行人由人行横道安全进入车站。安装护栏及隔离墙，是为了引导行人遵守交通规则，平安过马路。将站台设置在交叉路口后方，是为了给在车站排队或等候红灯的公交车辆留出充足的空间，使其不至阻碍交叉路口的其他交通。

为了节省路程，行人可能从站台横穿公交车道过马路。在公交车道间安装护栏，目的是为了防范这种行为，引导行人前往指定的信号灯过路口。

7.5 车站可达性及设计

公交系统的车站通常配有开放式的低阶站台，售检票通常在车上进行。因此，行人在车站的行为很少受到约束，违规行为也较为常见。一项在巴西阿雷格里港开展的研究显示，考虑到不同的道路设计、交通情况及人流量等因素，行人在公交车站发生交通事故的几率较其他地方更高（Diogenes, Lindau; 2010年）。相应的解决方法是在设计车站时增设防范设施，规范行人的行为。

安装隔离墙及（或）护栏能够帮助行人遵守交通规则。在指定引导性措施时，应充分考虑到行人进出站台时的各类行为，并确保这些措施能够有效阻止行人违规过马路。

在设计车站时，应重点考虑车站与交叉路口间的区域。如果公交车在准备驶离车站时遇到红灯，那么它就可能因为等待绿灯而影响后方公交车驶入车站。为了避免出现这种情况，应保证车站与路口间有足够的空间，使公交车可以驶出车站后等候绿灯。此外，还可以考虑缩短信号灯周期，以降低红灯时长与平均停靠时间之间的比率。



图 61 行人违规出站，德里市BRTS快速公交走廊



图 62 行人违规横穿公交车道到达站台，德里市BRTS快速公交走廊

路侧式公交走廊的车辆在交叉路口后设站台，有助于避免公交车与右转车辆相撞，并防止等候绿灯的车辆阻碍公交车驾驶员的视野。

由于可能出现多辆公交车排队停靠站台的情况，因此不宜将车站设在距交叉路口过近的位置，以免公交车阻碍交叉路口的其他交通。



图 64 路侧式车站

7.6 路侧式BRT系统或公交专用道或的车站

行人不一定总会沿设计路线进入车站；如果要搭乘的公交车正在进站，而发车间隔又较长，那么行人很可能会为节省时间而横穿马路。这种做法非常危险。为了防止行人违规进站，可以在车站周边安放障碍物或护栏，将站台尾端 10 至 12 米（或更大范围）的区域与外围行人隔离开来。行人被隔离开后，就不会轻易选择冲上马路，而会更倾向依照设计路线从交叉路口的信号灯人行横道过马路。



图 63 路侧式车站处的公交车绕开停靠车辆，智利圣地亚哥Transantiago公交系统

如果缺乏完善的安全保障设施，那么无论是在公交优先车道或是传统公交车道上，都很容易发生行人交通事故。我们建议在车道间划出隔离带并安装护栏，以防范行人乱穿马路。此外，还应在道路中部为行人设置等候区。



图 65 公交优先车道及传统公交车道

7.7 车站：公交优先道路或混合车道

在完善公交优先车道或常规公交的安全设施时，应把重点放在道路整体改造和交叉路口设计优化上，并兼顾车站设计。设计车站时应牢记一个原则，即：防止行人乱穿马路，引导行人通过信号灯交叉路口进出车站。要做到这一点，可以沿隔离带加装护栏，将其延伸至整个街区的长度。我们建议要解决前文所提到的所有问题（街道中段设计和路口设计），并且要尤其重视行人乱穿街道的问题。由于传统的公交走廊对行人来说比较危险，因此也应重点关注传统公交走廊的安全改造工作。



图 66 伊斯坦布尔市Metrobüs快速公交系统中的Mecidiyeköy车站

案例研究

高速路上的BRT系统： 伊斯坦布尔市 METROBÜS 快速公交系统

伊斯坦布尔市METROBÜS系统简介

伊斯坦布尔市的 Metrobüs 快速公交系统于 2007 年投入运营。截至 2014 年，该系统总里程为 52 公里，连接伊斯坦布尔市的亚、欧两端，日载客量接近 80 万人次，成为伊斯坦布尔东西走向的公交干线之一。Metrobüs 系统全线都铺设在高架桥上的高速路上，不经过平面交叉路口及人行横道，因此车辆可实现高速行驶。

Metrobüs 系统的车站站台较长（通常在 120 至 170 米之间），发车形式采用组队发车（见图 66），发车最短间隔约 20 秒。因此，系统的载客能力较高，单向每小时 (pphpd) 最大载客量为 2 万人，远超其他任何单车道 BRT 系统。系统铺设在

高速路上，享有绝对路权，且不受信号灯或交叉路口干扰。优越的行驶条件，使 Metrobüs 系统的运营时速居本报告中的 BRT 系统之冠，可与重轨交通的时速媲美（见表 13）。从图 66 中还可以看到，Metrobüs 系统的车辆是逆向行驶的——土耳其的车辆在普通车道及 Metrobüs 公交走廊上均靠右侧行驶，而 Metrobüs 的公交车辆则靠左侧行驶。

在本案例中，由 IETT 公司负责运营的 BRT 线路及常规公交线路均采用右侧开门的低阶车辆；而逆向通行及车站低站台的设计恰好与 IETT 公司的车辆配置相呼应，给线路运营带来了方便。尽管在城市主干道上逆向行驶是非常危险的行为，但在高

表 13 不同公交系统在公交车道上的常规运营时速

公交系统及其行驶道路	运营时速（公里）	数据来源
常规公交系统	由具体的交通情况而定	
城市主干道上的BRT系统，无快速车道（如墨西哥城Metrobús系统）	20 – 28	Metrobús 2010
城郊主干道上的BRT系统，优先使用快速车道（如里约热内卢市TransOeste系统）	28 – 35	Rio Onibus 2012
高速路上的BRT系统（如伊斯坦布尔市Metrobús系统）	40 +	伊斯坦布尔市 IETT公司
轻轨	18 – 40	Vuchic 2007
快轨（地铁）	20 – 60	Vuchic 2007
区域轨道交通（如墨西哥城Tren Suburbano系统）	30 – 75	Vuchic 2007

速路上则不尽然。如果 BRT 系统享有绝对路权（即：线路运营不被行人及其他交通打断），那么车辆逆向行驶就是安全的。Metrobús 系统的情况即为如此。然而，即使将 BRT 系统、其他车流及行人规划到不同的区域，实际情况中依然可能出现其他车辆或行人违规占用公交专用道的情况；此时，逆向行驶就可能导致严重的交通事故。对于这一点，我们将在下面的章节做详细探讨。

常见交通事故

铺设在高速路上的 BRT 系统享有绝对路权，不受其他交通的干扰；因此，尽管其运营时速要远高于一般的城市主干道 BRT 系统，但其安全性仍要好于主干道上运营的 BRT 系统。

如图 67 所示，车辆与行人相撞是高速路 BRT 系统上最为常见的致伤交通事故。导致这类事故发生的原因一般有二。较为常见的一种是行人想要走捷径过马路或到达站台，

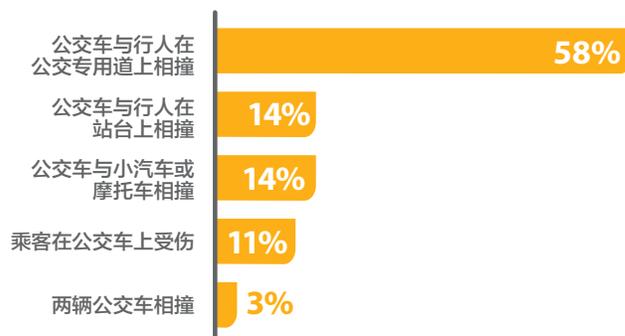


图 67 高速路BRT系统较为常见的几类交通事故。

资料来源：EMBARQ针对IETT公司提供的数据所做的分析

在横穿高速路时被公交车道上的公交车撞倒。另一种情况是行人在公交专用道上行走（通常是由于站台较为拥挤），而被公交车撞倒。

行人在公交车道上违规行走而被公交车撞倒，也可能被车辆的侧镜或打开的车门碰伤。

如果是 BRT 车辆与小汽车或摩托车相撞，那么较为可能的原因是后两者在撞倒隔离物后违规驶入公交专用道。需要特别指出的是，逆向行驶的 BRT 车辆（如 Metrobüs 车辆）若与违规闯入公交道的车辆相撞，则都会是高速迎头相撞事故，并会导致致伤或致死的严重情况。

高速路BRT系统的设计建议

护栏及防撞隔挡

护栏及防撞隔挡能够有效减少上述各类交通事故的发生。由于护栏两侧均有车辆行驶，因此应在护栏两侧安装防撞隔挡（见图 68），以抵御两侧的冲撞。如果 BRT 系统是逆向行驶的，那么防撞隔挡就更为必要。护栏的主要作用是防范行人横穿高速路的平地路段。防撞隔挡及护栏要能够承受走廊内以最高限速行驶的车辆的冲撞。设计时，从国家或地方层面的有关标准。



图 68 图解双侧防撞隔挡及高护栏的设计要求，建议应用在高速路BRT系统上



图 69 左侧：Metrobüs系统老旧路段之一，Cevizlibag车站晚高峰时段的人潮；右侧：改进后的车站：位于走廊上方的步行广场上，且加装了十字转门。

车站入口

高速路 BRT 系统中的另一个安全重点是站台入口。人流拥挤是站台入口最为常见的安全隐患——当人流量过大时，一些乘客可能会走公交车道，以躲避拥挤。这样做可能会被行驶中的公交车撞倒（如图 69 的左侧小图所示）。

铺设在高速路上的公交系统面临着一些特殊的空间限制问题。以伊斯坦布尔市的 Metrobüs 系统为例，公交车辆在双方向公交车道及中部隔离带（即：系统车站的候车台）上享有绝对路权。行人进站需走天桥，车站入口和十

字转门就设置在天桥底部。这种设计限制了入口的乘客通行承载力，使其受到隔离带路宽的限制。每个入口处最多只能安放四架十字转门，每小时可通过的乘客数量不会超过 5300 人次⁵。

2008 至 2011 年前半年，Metrobüs 系统的承载力有了显著提升，增幅达 450%。相关数据表明，这一趋势一直持续到了 2013 年。乘客数量的快速增长，使得一部分早期完工的系统车站不堪重负。2012 年，晚高峰时段通过 Cevizlibag 车站的平均客流量达到了 6300 人次，超过车站最大承载力近 20%（见图 69 的左侧小图）。



图 69 通过优化车站设计，增加乘客承载力，缓解高速路中央BRT车站的人流拥挤。图中所示部分为乘客入口的示意图，不包括需要的护栏。

为增加乘客承载力，缓解车站的人流拥挤，IETT 公司重新规划了车站入口，将其转移到通往车站的天桥处，以争取更多的空间来放置更多的十字转门（参见图 69 的右侧小图）。对于车站入口处的人流拥挤问题，我们提出如下的应对建议，并在图 70 中做更直观地描绘。

图 70 所体现的重点设计理念包括：

- 以天桥端口作为车站入口，使入口的面积不再受隔离带宽度的限制，而可以容纳更多的十字转门。
- 为进出车站的乘客各设置专门的扶梯，引导乘客走向，避免两方向的乘客发生冲突。
- 将天桥两侧的车站进行扩展，天桥的两侧各负责接送一个方向上的乘客。例如，一侧仅对需要向西走的乘客开放，另一侧则负责向东走的乘客。



墨西哥城Indios Verdes换乘站鸟瞰

第九章

大型换乘站的设计建议

9.1 重点安全问题

我们的研究发现，公交线路上的大型换乘站通常是事故最为频发的地方。以 TranMilenio 快速公交系统为例，在最容易发生交通事故的十个地点中，公交首末站及大型换乘站就占据了三个位置（包括第一位），分别为：Avenida Jimenez 站，Portal de Usme 站，以及 Santa Lucia 站。而位于库里蒂巴的“南线”公交线路中，交通事故次数排名前三的均为公交首末站，即：Pinheirinho 站，Raso 站，以及 Portão 站。

尽管这还不足以说明换乘站和首末站最易发生危险，但确实可以反映出这两处区域的人流量和车流量规模之巨大。人流与车流的密集，使大型换乘站周边的安全形势更为严峻——仅需很小的安全

隐患，就可导致大量的交通事故及人员伤亡。

在各类的车辆换乘活动中，最为重要的就是行人的安全。我们所掌握的数据显示，位于公交车辆中或车站站台上的行人比进出站的行人更为安全。在同一个站台换车是最能保证乘客安全的换乘途径。

当然，不同公交系统的车辆及车站设计存在差异，城市的交通环境也不尽相同。因此，上述情况可能不适用于所有的公交系统。建设大型的综合型换乘站，使乘客在不出车站、仅需更换站台的情况下换车，能够有效保护乘客的安全。然而，由于此类换乘站所需空间较大，因此更适宜建在城市边缘



图 71 墨西哥城Indios Verdes站鸟瞰。三条公交线路在该站交汇，分别是Metrobús BRT线路，the Metro线路，以及连接城市北部与墨西哥州的小客车专线。

地带的线路终端。TransMilenioBRT 系统就采用了这种措施，在每条主要走廊的终端都设有综合换乘站，供乘客在公交干线及支线间换乘。在其他情况下，特别是在空间紧张的中心城区，乘客通常是在交叉路口附近完成换乘。若将换乘站设置在交叉路口处，则需要采取全套的交叉路口安全保障措施，此外，还需酌情添加额外的行人安全措施，并充分考虑公交车转弯的安全问题。



**最安全的换乘方式
是乘客不需要离开站台
即可换乘的方式。**

设计方案汇总

针对不同的换乘方式，我们将在下面的章节中提出相应的设计建议，帮助城市建设安全的换乘站及首末站。首先要关注的是 BRT 线路与公交干线间的换乘；接下来，是公交干线与支线间的转换；最后，我们将谈到 BRT 线路与常规公交的转换。在评估换乘站的安全性时，需要从两个方面考虑。其一是乘客是否能安全换乘其他车辆。在这一点上表现最好的是实现了同车站换乘的换乘站，或是无需换乘的直达公交线路。

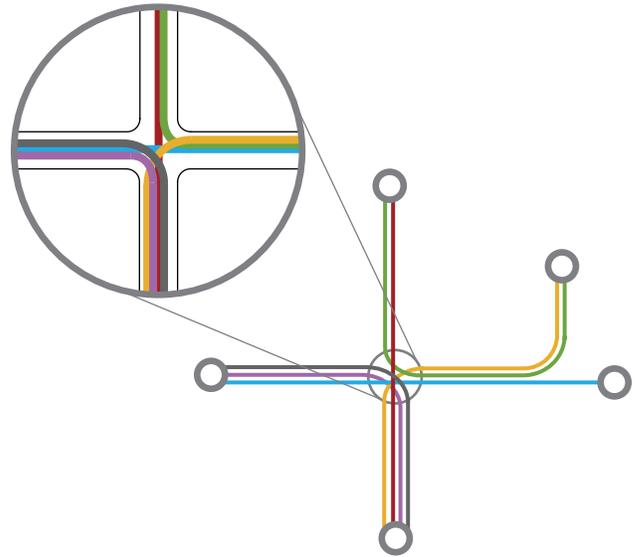
另一个方面，是换乘区域是否会危及其他道路使用者的安全。要保证其他道路使用者的安全，我们建议和对交叉路口和车站的建议是类似的，即：控制交叉路口的尺寸、限制车辆转弯、缩短行人过街距离，以及提升车站可达性以消除行人乱穿马路的可能性。

9.2 公交干线间的转换：直达各目的地

示例：TRANSMILENIO快速公交系统

在这个情景下，共享每条公交走廊有多条公交线路，对于每一个可能的目的地都有一条直达的线路。乘客无需换乘，只需按目的地选择公交线路，即可直接到达。

直达公交杜绝了换乘带来的风险，但实际统辖起来也最为复杂。为了保证每条线路的准点率，需要在交叉路口设置多条转弯专用道，并搭配单独的信号灯时段。如交叉路口的设计无法满足这些条件，则需要另辟高架桥及桥下通道。



交叉路口的交通信号灯时段最多可达六个，才能完全调度各转弯方向上的公交车辆。这种设置很可能会影响两个方向上的通行能力。事实上，这种设置并不是必要的；我们可以根据实际情况的需求，在交叉路口上选择性的开放部分转向功能。下图所示的路口上，三个方向上的公交车辆可以转弯或直行。设计人员在设置交通信号灯变换时，需要为每个转弯的方向留出单独的相位。

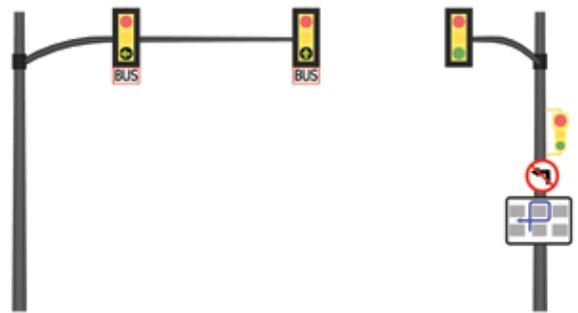


图 72
公交干线间的换乘

乘客在这类车站能够搭乘到直达线路，无需在途中换乘，因而最能保证自身安全。然而，这类设计要兼顾多条线路的转弯需求，因此交叉路口的尺寸较大，可能会给在路口过街的行人带来不便。建议严格控制公交车的转弯半径，并在道路中央划出行人等候区，方便行人过马路，并保证行人的安全。

这类换乘方式能允许公交线路的组织有灵活性。搭乘 BRT 线路的乘客可直达目的地，免去了去其他车站换乘的不便，因而可能会更支持 BRT 系统。然而，如果两条 BRT 走廊相交，那么各自的乘客承载能力可能均会受到影响。举例来说，一条多车道的 BRT 走廊的 pphpd 值可达 43000 人次（Hidalgo, Carrigan; 2010 年）。如果这样两条走廊在交叉路口处相交，那么受路口环境的限制，每条走廊的承载力都会降低。此外，由于每辆公交车都需要单独的信号灯时段，因而每辆车的 g/C 比（即：绿灯时段与信号灯周期时长的比）都会比较低。

针对上述问题，建议给予其中一条走廊或一辆公交车的信号优先权，增加它的绿灯时长，并相应地减少其他车辆的绿灯时长。涉及到 BRT 走廊时，如果两条走廊同等重要，那么可以增设高架桥及桥下通道，确保走廊间互不干扰。具体实例可参考 TransMilenio 快速公交系统的 NQS, Avenida Suba, 以及 Calle 80 三条走廊的设置。



图 73 图解右转公交车与直行车辆间可能发生的相撞事故。这类事故曾发生在 TransMilenio 快速公交系统上。

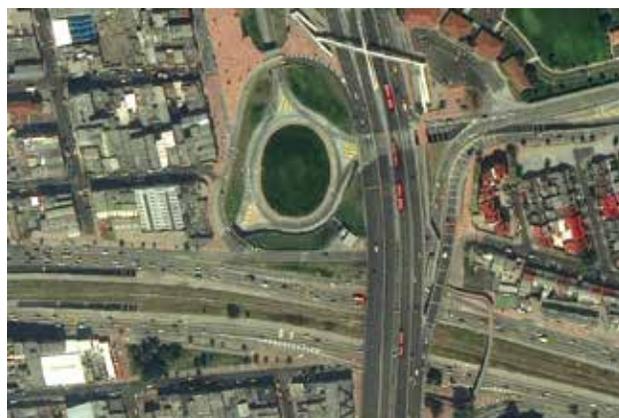
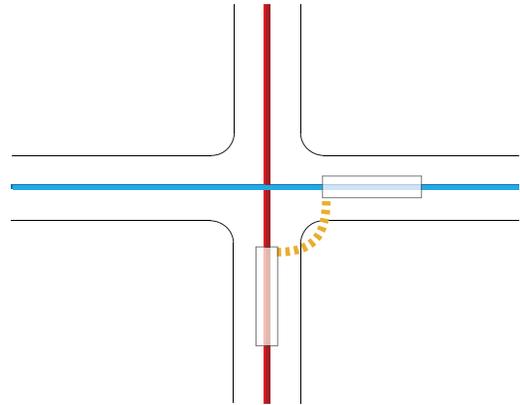


图 74 TransMilenio 快速公交系统三条走廊——NQS, Avenida Suba, 以及 Calle 80——的交汇点。三条走廊的转换经由过高架桥及桥下通道完成，各自的通行能力没有受到影响，公交车之间也不易发生相撞事故。

9.3 公交干线间的换乘：穿过交叉路口换乘

示例：墨西哥城METROBÚS系统

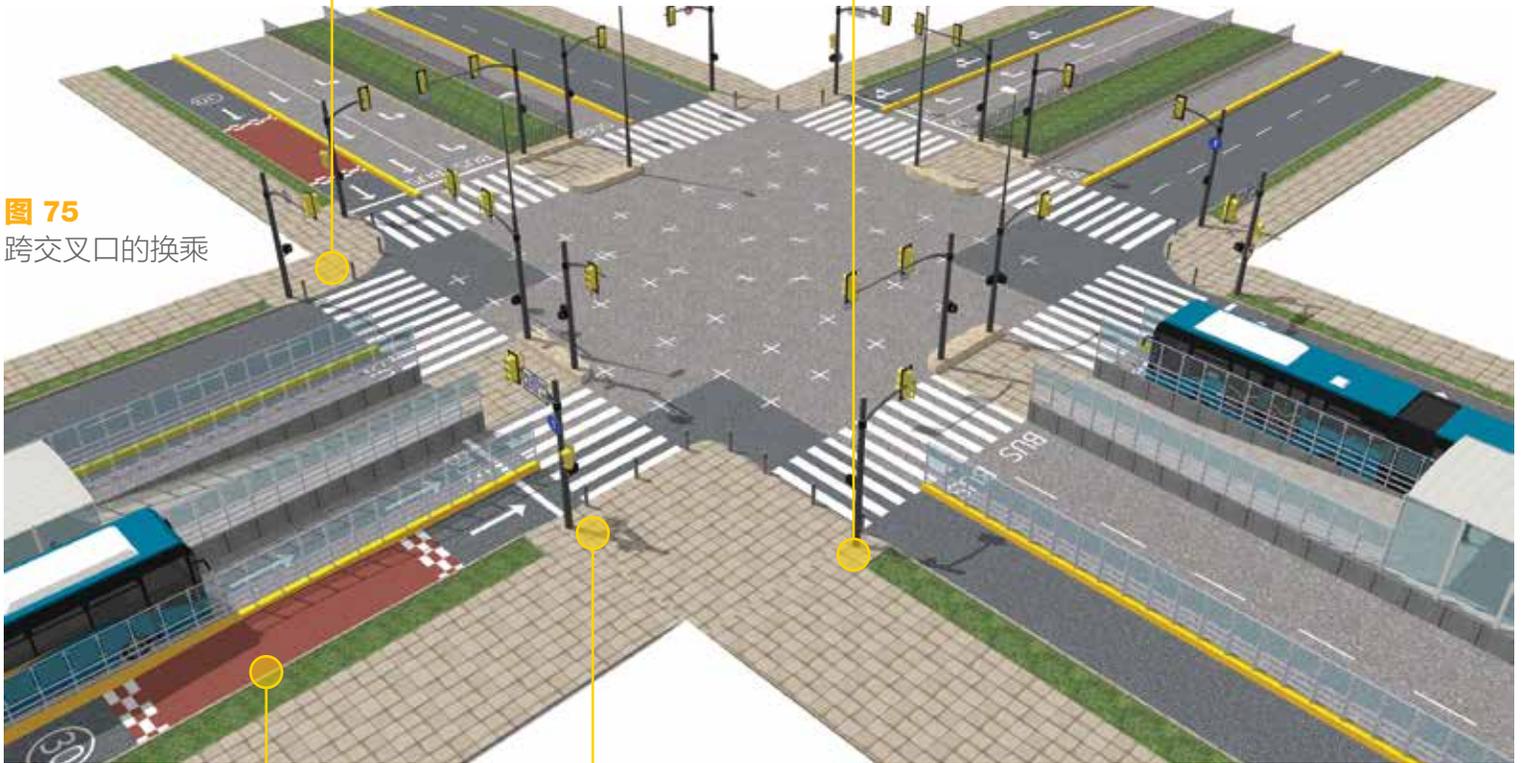
在这种情景下，每条走廊只有一条公交线路。换乘的乘客需要到马路另一侧去搭乘另一条线路。在这个过程中，乘客需要穿过数条车道，面临的安全风险也是最大的。除了换乘带来的不便外，乘客换乘时可能还要再次付费买票，这些不利因素都可能导致乘客对公交线路的抵触。因此，我们建议用过街天桥将两条线路连接起来，以方便乘客换乘。



可以结合行人穿过交叉路口换乘和公交转弯两种换乘方式。TransMilenioBRT系统的Avenida Jiménez车站就采用了这种设计方案——部分乘客乘公交车在两条走廊间换乘，另一部分乘客则经通道步行前往其他车站换乘。这种换乘的设计方案有助于简化交叉路口处的信号灯相位。

此处的人流量将会很大。这些行人中，包括普通路人群，前往车站的乘客，以及在两个车站间换乘的乘客。为了保证行人的步行空间，建议将两边的最外侧车道改造为人行道。此外，还可在街角附近建设小型的步行广场或袖珍公园。

图 75
跨交叉口的换乘



保护乘客换乘专用道，建议至少在穿过换乘道的两方向车道上设置减速带。

在有换乘乘客走过的路段，应禁止车辆转弯。对于想要左转的车辆，应以“禁止左转”及环路指示牌加以提示；对于想要右转的车辆，应在到达交叉路口前设置环路以及指示牌，指示牌不能放在此路口。

这种公交换乘方案最为简易，但给乘客带来的安全风险也最高。建议采用以下的措施降低安全风险。

在交叉路口处保护行人安全

如图所示，在穿过换乘乘客通道的两方向道路上，分别减少一条车道，并安装减速带。对于可能会影响乘客换乘的车辆转弯，也应予以禁止。如果换乘乘客较多，则应为行人设置单独的绿灯时段，帮助行人一次性完成换乘。

在两个车站间增设行人过街天桥或地下通道

可以通过增设行人过街天桥或地下通道连接两个车站，以保护换乘行人的安全。此外，两个车站经连接后可以成为一个整体，乘客就可进行站内换乘了。

TransMilenioBRT 系统的 Avenida Jiménez 车站就采用了这种方案。地下通道可以使用更短的坡道。如果选择修建过街天桥，则应注意天桥的高度，不要使下方驶过的公交车及重型卡车受到影响。建议的天桥最低高度为 4.8 米。

地下通道的高度只要能够使行人正常行走即可；一般都将这个高度设为 3 米左右。如果假定坡道的角度为 10 度，且过街天桥的高度比地下通道的高度多出 1.8 米，那么坡道则比地下通道短 18 米。车站空间及有关部门的财政能力决定了过街天桥与地下通道间的取舍。此外，如果决定修建地下通道，还应充分考虑照明问题及安保措施。

如果没有过街天桥或地下通道的帮助，那么换乘乘客则需要从下车的车站步行至换乘站。这种换乘方式能够输送较多的乘客，但相关的收费标准及方法却较繁琐；此外，其换乘难度较大，可能造成客源流失。相较于前一种换乘方式，这种换乘不受车站乘客承载力的制约，而与交叉路口的人流通行能力有关，因此其乘客通行能力较强。在这种方案中，两条走廊间的换乘不再需要换乘专线，增加了运送乘客的能力。

9.4 公交干线换乘：混合方法：一条线路绕行以实现同站换乘

尽管每条公交走廊只有一条线路，也可以实现同车站换乘。方法是其中一条线路改道，使其绕行一个街区，与换乘线路汇合在同一车站即可。

这种换乘方法能够节省时间，且更为安全。然而，由于红线的绕行，继续乘坐该线路的乘客可能要花费更多的时间。此外，这也给交叉路口的规划工作变得更为艰巨——既要保证各路公交可以自如转弯，还要平衡各方向上的车流，避免发生交通事故。

建议首先考察路网及两条公交线路的结构，评估是否会导致大规模的改道，再行决定是否采用这种换乘方式。

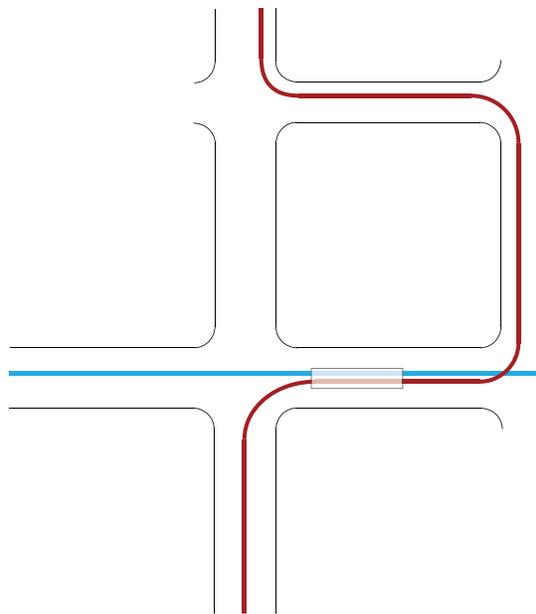


图 76 公交干线间的换乘

借助这种换乘方式，可以实现两条公交走廊的同站换乘，哪怕每条走廊只有一条线路。由于是同站换乘，其安全性可与直达线路媲美；而每条走廊上仅有一条线路，又大大简化了运营系统。根据需要，也可将其他的换乘方式结合在一起。这种换乘方式还可以做出调整，允许部分公交车正常直行，部分车辆走改道的路线，从而使换乘乘客及直行乘客的出行时间均得以缩减。

采用一条 BRT 走廊改道的换乘方式，也需要注意一些交叉路口可能出现的安全问题。当两条走廊共用一条道路时，应为两路公交车提供单独的转弯道，避免双方互相干扰造成延迟。同时，要确保车道均衡，交叉路口上相对的车道对齐，确保各种车流的安全。维护交叉路口的车辆、人员安全是一项庞大而复杂的工作。除了上述的措施外，还需要借助多种设施设备，如隔离带（宽度依具体情况而定）、安全岛、道路标记等。如果不能保证交叉路口的设计合理，那么同车站换乘的安全也将大打折扣。

相较于车站，交叉路口对此类设计的通行能力影响更大。为了保证两条线路的顺利运营，应为转弯及直行的公交车设置各自的专用道。究其原委，转弯与直行的车辆有单独的信号灯时段；如果共用一条车道，那么行驶到交叉路口时可能会相互阻隔。路口的信号灯应分三个时段，分别调度转弯的公交车辆，以及两个方向的直行车辆。对于社会车辆，建议禁止其左转，以简化信号灯的设置，并保证 BRT 走廊的通行能力。

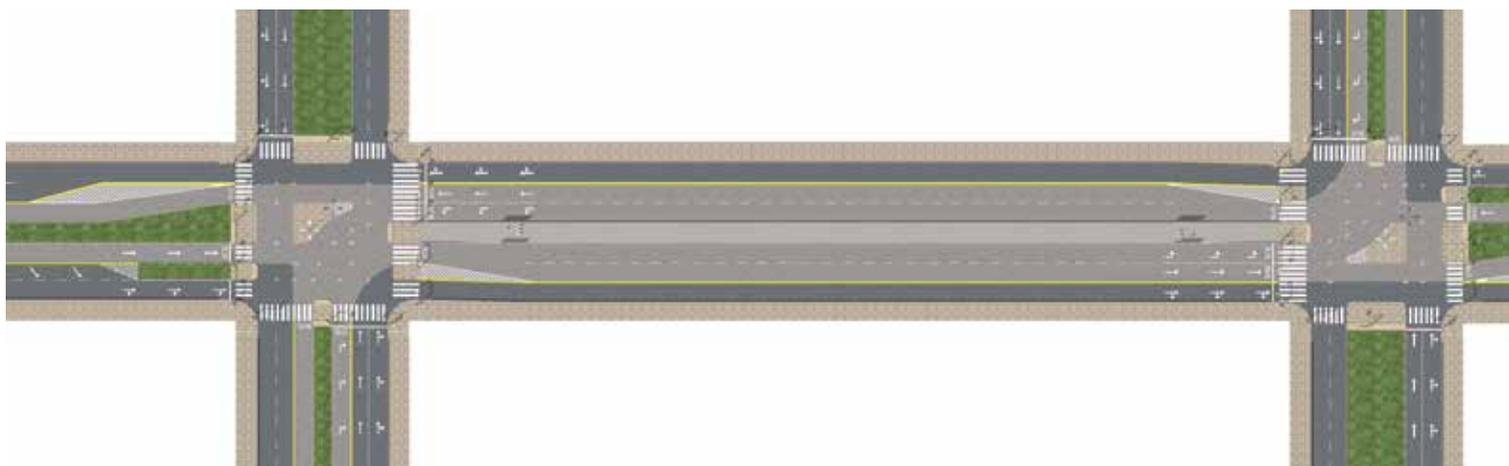


图 76 公交干线间的换乘

9.5 换乘其他公交系统：综合型首末站

示例：TRANSMILENIO BRT系统首末站，莱昂市 OPTIBÚS快速公交系统首末站SAN JERÓNIMO

TransMilenio 快速公交系统是典型的主干线与支线综合型公交系统。系统的总站包括一个中央站台，开左门或开右门的公交车均可停靠，乘客在同一个平台即可完成换乘。这类公交总站常见于容纳了多种公交服务，但独立运营的公交系统亦可采用。车站邻 BRT 系统的一边采用站台售检票（保持关闭）；另一边则开放。尽管车站自身具有良好的安全性，但驶入车站的车辆有可能会发生相撞事故。

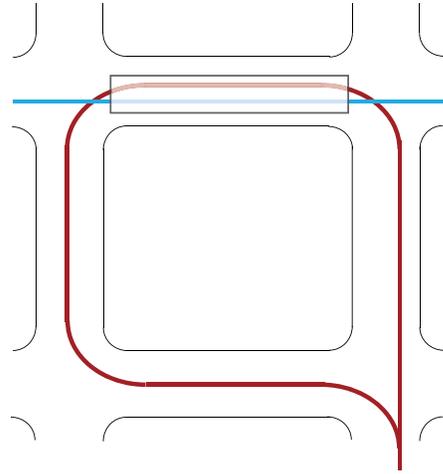


图 77
综合型首末站



站台高度：与公交车地板高度一致

BRT这一侧的站台较路面高出一米，适合高地板的左侧车门公交车停靠。

站台高度：30厘米。常规公交这一侧供低底盘的公交车停靠，因此公交车道要高出路面70厘米。

这一侧的公交车应为传统的右侧开门车辆，售检票应在车上进行。车站外侧应有护栏围挡，以防止行人横穿公交车道进站。

在设计站台时，应保证站台的面积。如果站台较小，而乘客较多，则可能出现乘客因躲避拥挤而走在公交车道的情况。

这种换乘方式可以很好地保证乘客的安全。而公交车辆则需注意在驶入车站时不要与其他车辆发生碰撞。要特别注意避免瓶颈，并注意分割不同方向的车流。

TransMilenioBRT 系统的 Portal de Usme 首末站曾发生过重大的交通事故。一辆公交干线的车辆和一辆公交支线的车辆在首末站入口处迎头相撞，造成一名乘客死亡，多名乘客受伤。

面积是公交首末站站台上最为关键的安全因素。站台切不可过小，以至于无法容纳大量的乘客。而乘客一旦感到站台过于拥挤，就可能走到公交车道上（特别是较低站台一侧的车道）。



图 78 图解TransMilenioBRT系统首末站的标准布局。
（左）绿色的支线车辆停靠在站台左侧。
（右）红色干线铰接式车辆停靠在同一站台的右侧。

综合型公交首末站出入口

设计公交首末站，要确保其出入口能够容纳多辆公交车，并保证通过乘客的安全。图 79 展示了一种较有难度的情形：首末站位于中心城区，供公交车及乘客使用的站台均为地平高度。针对这种情况，设计人员为驶入首末站的主干线及支线车辆留出了单独的信号灯时段，以防止它们相互干扰；并为行人划出了宽阔的等候区及过路通道。为方便行人进出首末站，应修建过街天桥或地下通道，以保护行人不被公交车撞倒。

这样设计出的交叉路口，其通行能力要略高于整个系统，因此不会成为瓶颈。然而，行人在这类路口可能要等候较长的时间，因此有可能闯红灯。要防范闯红灯的行为，可以修建过街天桥或地下通道，方便行人快速过马路。

城市中心区的首末站多为公交线路的起点或终点，而非不同线路间的换乘站。每个信号灯周期放行的人流量不同；要保证行人的出入口的规模，容许大批行人通过。如果预计行人的数量实在较多，应考虑修建过街天桥或地下通道来分流。

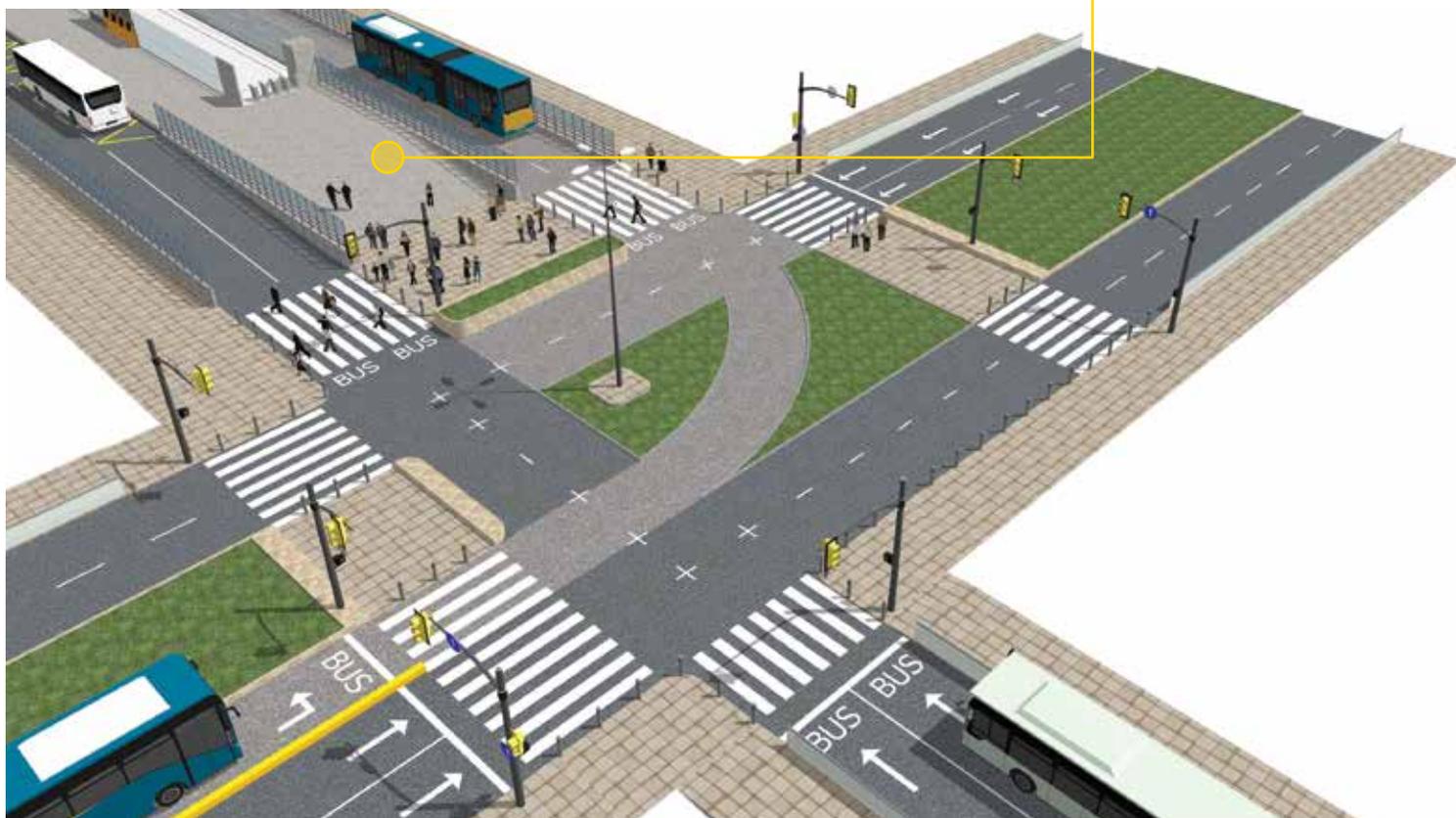


图 79 综合型公交首末站到站设计

图 80 几类公交首末站的布局



**TRANSMILENIO系统首末站：
PORTAL DEL NORTE**

该首末站位于Autopista Norte的中心保留区。公交车可从快速路直接驶入站内，乘客进站则需走过街天桥。首末站内设有两个平行的站台，主干线及支线车辆可停靠在站台任意一侧。首末站出入口处没有交通信号灯管制；公交车的驶入顺序由驾驶员自行决定。



**TRANSMILENIO系统首末站：
PORTAL TUNAL**

该首末站位于一条城市主干道的出口处，公交车可直接驶入站内，乘客进站则需走过街天桥。首末站内设有一个站台，公交车可在站台两侧停靠。



**TRANSMILENIO系统首末站：
PORTAL DEL SUR**

从安全和使用难度的角度上看，该首末站的布局较为合理，但建设成本也较高。首末站位于快速路出口处，往来两方向上的公交车可经由高架桥驶入站内，避免了上述两种设计所带来的诸多不便。

9.6 换乘其他交通系统：穿过交叉路口换乘常规公交系统

示例：瓜达拉哈拉市MACROBÚS系统

如果 BRT 系统或其他公交走廊与常规公交线路相交，则需要这种换乘方式。各类公交系统是单独运营的（如公交干线与支线）；因此，乘客在换乘过程中可能要前往不同的站台。为了方便乘客换乘、尽量为换乘乘客节省时间，并保证行人安全通过交叉路口，应尽量缩短各线路车站间的距离。乘客出站换乘其他线路时，需要通过交叉路口，所以这不是最安全的选择；然而，这种换乘方式的操作最为直接，并无需在各公交系统做协调，因而也最为简单易行。

当各公交系统分别由不同的公司进行管理时，由于统一换乘站比较困难，故系统间的换乘多采用这种方式。考虑到换乘乘客需要前往其他车站，因此应尽量缩短步行距离，并保证换乘路线的安全。BRT 系统及其他公交走廊的车站应尽量靠近交叉路口。在有换乘乘客经过的交叉路口，建议禁止车辆转弯，以免车辆撞倒行人。



图 81 换乘常规公交

9.7 换乘其他交通系统：整合BRT系统与自行车路网

这种设计方案旨在使 BRT 系统方便骑车人群搭乘，但不必在 BRT 走廊上修建自行车设施。需要做的工作是：在交叉路段划出自行车专用道，并在四个街角上分别划出自行车停车位。需要搭乘 BRT 线路的骑车人可以将自行车存放在停车位，然后步行前往 BRT 车站。

应禁止可能和过街行人相冲突的机动车右转，以保证行人安全。自行车道应设置在双向单车道的小型横向道路；城市主干道的机动车流量较大，不宜设置自行车道。

如果小型横向道路有机动车停车，那么自行车道则应设置在机动车停车带与人行道之间，并设有缓冲带（如路缘或隔离带），以防止骑车人被打开的车门碰到。



图 82 整合自行车网



中央BRT车站，巴西库里蒂巴市

研究与分析



研究过程中，我们对各类公交系统及公交优先设施的安全性进行了评价，并分析了安全评价可产生的经济价值。在这部分章节中，我们将对上述工作用到的数据及方法论进行说明。



巴西利亚市的常规公交线路及其基础设施

10.1 各类公交系统的安全性

在规划公交优先系统时，应首先了解各类系统的整体安全性能。国家层面的政府部门通常会对公交工程进行成本效益分析，而后依结果予以财政补贴。在现有的得到国家资助的工程中，不少个例都将交通安全作为可能的“效益”，纳入到成本效益分析的结果中。然而，尽管针对公交优先系统的安全影响的研究已开展了一段时间，却难见安全影响评估的量化成果。而即便是现有的公交优先车道方面的研究，也多集中在美国与挪威的案例上（Elvik, Vaa；2008年）。

量化发展中国家现有的城市公交优先系统工程的安全影响，有助于评估各工程在实施条件下的效益。这样做有助于了解开通公交优先系统后将对交通安全产生何等影响，是项目的初期规划中不可或缺的一步。而若能对当地情况进行量身评估，则又胜于借用美国

或欧洲的案例研究成果。在下面的论述中，我们将首先介绍各类公交优先系统的开通对交通安全带来的整体影响。此外，我们还会对评价安全影响的经济价值所用到的方法论进行对比，并说明这类评价在成本效益分析及补贴决策制定中所起到的作用。

通过查阅文献及分析数据，我们研究了部分现有公交优先系统的安全影响及附带的经济效益，并将在下文中予以说明。下文中提到的安全影响，均为实施公交优先后同一路段安全对比的结果。一般来说，公交优先工程的实施目标多为常规公交或非正规公交所经过的路段。然而，亦有例外。例如，波哥大市就是在取消了 Caracas 路上的公交线路后，才开通了 TransMilenio 快速公交系统。又如，瓜达拉哈拉市废除了已有的公交优先道，转而另铺设了 Macrobus 系统。

提升公共交通在城市交通中的地位，改善城市的交通安全

评估公交优先工程给交通安全带来的影响，关键在于研究其对交通事故的影响。交通事故数据的随机变化（特别是趋中心回归，或 RTM 效应），或其他国家级或市内政策规章所产生的作用，都不应被纳入研究范围内。当一个地区如果第一年的交通事故数极高或极低，在下一年中改数将更靠近平均数时，我们称这种情况为 RTM 效应（Barnett, van der Pols, Dobson; 2004 年）。因此，如果仅仅简单对比交通事故数，不考虑 RTM 的话，也不能精准地掌握事故发生的变化。因此，建议采用经验贝叶斯方法（“EB 方法”），以准确地评估公交优先工程（如开通 BRT 系统）对交通安全产生的影响。

在评估公交优先措施的安全性时，我们将实施措施后的实际情况与基准场景（对没有实施公交优先措施时的情况进行的模拟）进行了对比，而非分析实施前后的情况的异同。这样做能够区别哪些交通事故数量的变化是源自实施了有利措施（如 BRT 系统），而哪些变化不是。这在评估工作中是非常关键的。

发展中国家公布的交通事故伤亡人数通常低于实际人数，这给精确评估安全影响力带来了不利影响。各国对交通伤亡的定义的区别，以及统计数据时的一些失误，都有可能影响最后公布的数据（Hijar 等；2011 年）。世界卫生组织（WHO）特别制定了调整因子，以调整不同国家的数据统计（WHO，2013 年）。在我们的研究分析中，就用到了这些因子。

表 14 显示的是各国的公交系统对交通安全产生的影响。其中，评估影响所使用的数据来自当地；为了提升数据的准确性，我们使用了 WHO 推荐的调整因子。总整体上说，采用更为全面的公交优先措施（如改公交道为完整的 BRT 系统，或为公交线路配置公交专用道及信号灯优先权）对提升安全性有积极作用。

表 14 显示了积极的结果；在章节 5.3 中，我们将对其背后的原因进行分析。概括说来，公交系统本身对交通事故伤亡的影响并不明显。在实施了交通优先措施后，事故的伤亡之所以会得到缓解，主要是由于以下两个因素。

第一，公交优先措施通常都会伴随着对街道几何设计的改变，由此提升道路基础设施的安全性。这些措施可以包括：将公交车辆与其他车辆隔离开来；禁止一些车辆的转弯；缩短行人过路的距离。第二，实施公交优先措施后，公交线路更加便捷，从而吸引更多乘客。在拉美地区，实施 BRT 系统还提升了公交系统的运营效率（即：车公里的乘客数量）。在章节 5.3 中，我们对上述情况有详细的量化说明。

在分析表 14 中的数据时，我们使用了优势对数的分析方法，对实施公交优先措施可能产生的安全影响做了估算。在章节 5.3 中，我们将对估算的方法进行说明。表 1 中显示了不同国家的公交优先系统的加权平均安全影响力，以及 95% 置信区间的范围。可以看出，在发展中国家开通 BRT 系统，其产生的安全影响力要远大于发达国家的 HOV 车道改造。这是因为前者往往伴随着对道路结构和可达性的改造，这起到了事半功倍的效果。

表 1 显示的是实施某种公交优先的措施后，交通事故的严重程度减缓的百分比，其结果的呈现形式为最佳估计值及 95% 置信区间。

用于估算的数据的来源包括：墨西哥城 Metrobús 快速公交系统；瓜达拉哈拉市 Macrobus 快速公交系统；波哥大市 TransMilenio 快速公交系统；艾哈迈达巴德市 Janmarg 快速公交系统。其他城市若想参考表格中的估算结果，应首先考虑自身情况与上述四个数据来源城市的情况是否具有可比性。

表 14 几种公交系统的安全影响力

城市	开通前	开通后	走廊名称及长度	安全影响力, 每年每公里 (括号中为变化的百分比)		
				交通事故	致伤	致死
改非正式公交为BRT系统						
艾哈迈达巴德 ^a	非正式公交	单车道BRT系统	Janmarg系统 (49公里)	-2.8 (-32%)	-1.5 (-28%)	-1.3 (-55%)
墨西哥城 ^b	非正式公交	单车道BRT系统	Metrobús系统 3号线(17公里)	+7.5 (+11%)	-6.7 (-38%)	-0.3 (-38%)
改原有公交优先系统为BRT系统						
瓜达拉哈拉 ^c	公交优先车道	带超车道的BRT系统	Macrobus系统 (16公里)	-83.19 (-56%)	-4.1 (-69%)	-0.2 (-68%)
波哥大 ^d	简单公交系统	多车道BRT系统	Av. Caracas (28公里)	n/a	-12.1 (-39%)	-0.9 (-48%)
完善传统的公交系统						
墨尔本 ^e	传统公交系统	排队优先, 信号灯优先	SmartBus系统 900号线, 903号线 (88.5公里)	-0.09 (-11%)	-0.1 (-25%)	-0.03 (-100%)

注: a EMBARQ根据艾哈迈达巴德市环境规划与技术中心提供的数据而做出的分析; b EMBARQ根据墨西哥联邦区政府提供的数据而做出的分析; c EMBARQ根据哈利斯科州道路与交通运输秘书处, 以及瓜达拉哈拉大学公共卫生学院提供的数据而做出的分析; d EMBARQ根据TRANSMILENIO S.A.机构, 以及Bocarejo等2012年提供的数据而做出的分析; e数据来源: Goh等; 2013年。

10.1.1 评估安全影响的经济价值

目前, 尚未有文献介绍测算交通事故经济成本的方法。使用现有的几种方法进行统计, 所产生的结果又大不相同。此外, 有关交通事故的经济成本的研究多基于发达国家的情况(如 Blincoe 等, 2002年; BITRE, 2009年); 而对于事故给中低收入国家带来的经济损失, 则鲜有涉及。在新兴经济体中, 取而代之的是通过计算利益转移来估算事故成本, 即: 从针对发达国家的研究中选取参考值, 并根据发展中国家自身的情况对其加以调整。在本小节中, 我们将重点论述致伤及致死事故的利益转移计算, 具体将介绍几类方法论, 以及可选的参考值来源。

交通事故成本由多个方面构成。在一项由美国联邦道路交通安全管理局开展的研究中, Blincoe 等(2002年)将

表 15 发达国家VSL值及区间

VSL估算值 (美国, 2012年)	使用该数值的国家或地区	VSL来源
(1,200,000 – 4,130,000)	欧盟	交通运输成本及项目评估欧洲协调方法(HEATCO)
2,620,000	澳大利亚	澳大利亚基础设施、运输和区域经济发展局(BITRE)
2,740,000	英国	英国交通部, 交通运输分析指南(TAG)
7,060,000	美国	美国交通运输局(DOT)
8,430,000	美国	美国环保署(EPA)

交通成本细分为：事故受害人的收入损失；受害人家庭成员的收入损失；医疗支出；财产损失；保险花费；工作单位损失；法律诉讼成本。此外，Cropper 及 Sahin (2009年)指出，在计算成本时，还应考虑到人身伤亡及生活品质的下降，具体可参考“统计生命值(VSL)”，或“质量调整生命年(QALY)”这两个概念。

“统计生命值(VSL)”通常被定义为“一个人口群落中的个体，为避免会造成该群落整体中一个死亡案例的风险的发生，而愿意付出的代价的总和”(Cropper, Sahin, 2009年)。VSL值是指为使特定人口群落中减少一个个体死亡而避免的风险的值，而非一个个体预计生命的值。估算VSL值可从多方面入手——可以计算个体承担过往所得的意愿，也根据人均GDP估算。由于评估VSL的方法论种类繁多，因此相关的文献中也常出现不同的VSL数值。表15囊括了一些发达国家的交通与环境分析方面的权威机构所得出的VSL估算值。

不同国家，乃至一个国家中的不同机构，所得出的VSL

估算值都有可能不同。此外，许多机构时常修改自己的VSL估算值。这些情况给选择恰当的数值，特别是将数值应用到发展中国家，带来了相当的难度。对于如何选择“正确”的VSL数值，我们提出以下两点建议。第一，在对一个项目的各个方面（如安全、空气质量、对实体活动的影响）进行成本效益分析时，只使用一个VSL值。当然，为了解VSL值的改变对项目效益成本比的净现值的影响，也可事先进行敏感度的分析。

将VSL值应用到其他国家，最常见的方法论是：假定VSL值通常被定义为承担风险规避的意愿，则不同国家的VSL值应与国民总收入(GNI)成正比。将示例国家的VSL值应用到国家“i”时，可使用下面的计算公式。该公式的原型出自：Esperato, Bishai, Hyder, 2012年；以及Cropper, Sahin, 2009年。

目前，研究人员不仅缺乏对发展中国家致死交通事故所产生的成本的了解，对致伤事故亦是如此。而致伤事故数据精确度的不足，更加剧了这种情况。致伤事故的成本随伤

$$VSL_i = VSL_{reference} \times \frac{GNI_i}{GNI_{reference}} \times \epsilon$$

式中

VSL_i = 国家*i*的统计寿命值

$VSL_{reference}$ = 参考国的统计寿命值

GNI_i and $GNI_{reference}$ = 国家*i*的国民总收入及参考国的国民总收入

ϵ = 系数获取值，区间为1至1.5，所提供的VSL估算值更好地解释了利益转换中的不确定性

情的严重程度而有明显差异；因此，若要评估成本，首先应制定出一套详细伤情划分标准。

现有的标准之一是《简明创伤定级标准》(AIS 标准)。AIS 标准从解剖学的角度，将创伤分为从 1 至 6 的六个等级。其中，1 等创伤最为轻微，6 等为死亡。美国的研究人员依据 AIS 等级列出了不同的平均成本，其表现形式为数值及占死亡成本的比率（如 Blincoe 等；2002 年）。

然而，在大多数的交警报告中，AIS 创伤定级标准的应用并不广泛。交警的报告中，一般仅可看到“死亡、受伤、财产损失”三项事故种类，受伤程度鲜少被提及。这给准确评估发展国家的致伤事故成本带来了很大阻力。要解决这个问题，则急需开展更多的相关研究，并完善交通事故数据收集系统。如需了解交通事故的平均成本，可参考英国交通部的《交通运输分析指南》（见表 16）。

表 16 交通事故成本。数据来自英国交通部《交通运输分析指南》

创伤种类	致伤事故成本	
	总成本（2012年，美元）	占死亡成本的比率
所有创伤种类平均成本	84,835	0.03
轻伤	24,402	0.008
重伤	316,681	0.112

10.1.2 对比公交优先工程的安全影响与其他好处

通过对拉美地区公交优先工程进行成本效益分析，我们认为快速公交系统所带来安全性效益约占全部经济效益的8%至16%。

VSL 有多个数值。例如，图 83 中呈现了 VSL 高值与低值的两种情形，而两者的数据差别很大。然而，尽管 VSL 值不同，但安全性提升均位列第三位，排在节省出行时间与节省公交运营成本之后。由于安全优先工程的安全效益明显，因此应在成本效益分析中突出对它的分析，否则将可能严重影响工程效益与成本的比率。目前，我们在这方面的研究对象仅限于 BRT 系统。未来，应开展更多、更深入的研究，特别是要重点关注发展中国家城市本地的情况。

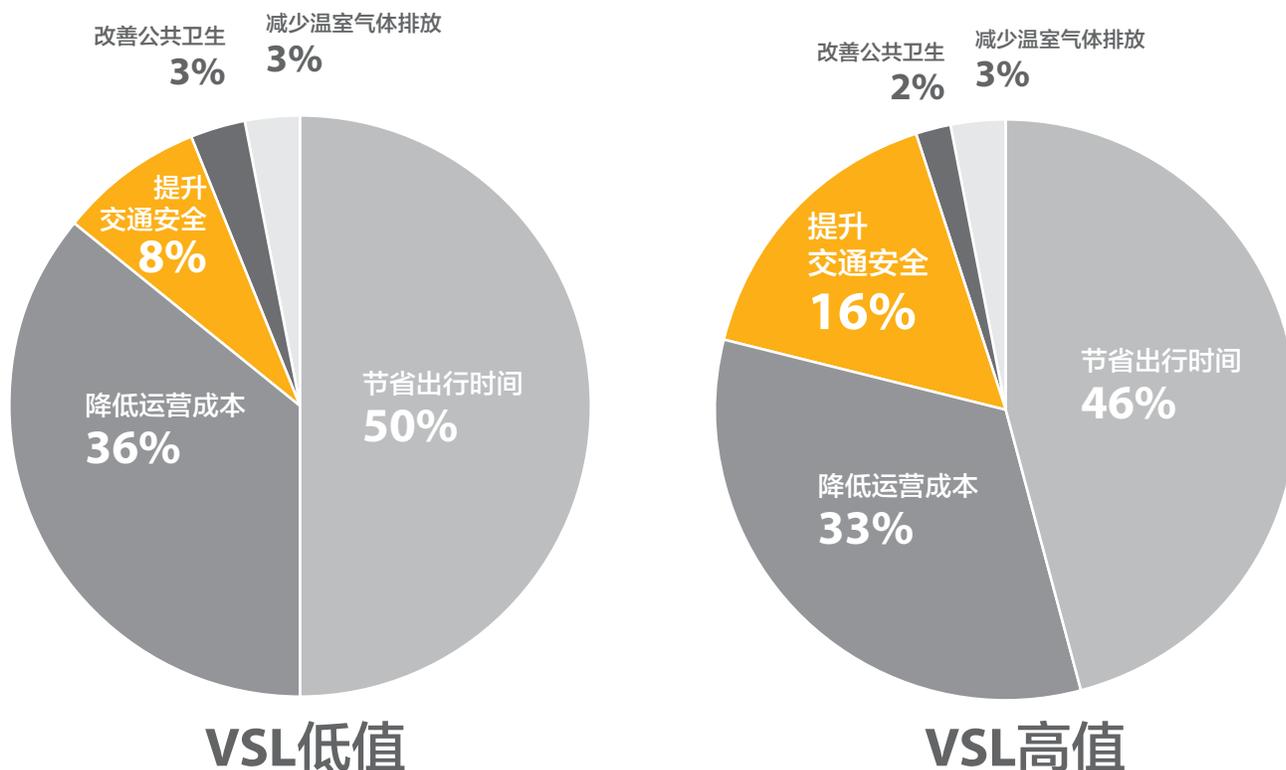


图 83 快速公交系统的安全效益所占全部经济效益的比重

数据来源：EMBARQ根据BRT系统效益评估所做的分析；所涉及的BRT系统包括墨西哥城Metrobús系统及波哥大市TransMilenio系统（Carrigan等；2013年）。“VSL低值”场景中，评估安全效益时用到的VSL参考值为381万美元（Esperato, Bishai, Hyder；2012年）。“VSL高值”场景用到的VSL参考值为840万美元（数值来自美国环保署）。

10.2 影响交通安全的因素

通常来说，公交系统越完善，对交通安全的积极作用则越大。例如，BRT系统与排队优先、信号优先的组合就可被称为完善的系统，其安全性要好于美国的公交系统（公交线路设有专用道，仅与其他车辆共享车道）。从表1中可以看出，不同的公交优先系统的安全性也不同。通过研究发现，发生在公交走廊上的交通事故中，90%都与公交车辆无关，发生地点也非公交车道。这就说明，交通事故的发生可能更取决于其他因素，如其他车道的设计。我们希望能够更好地了解公交优先工程——特别是发展中国家的城市公交优先系统——所带来的安全影响。为此，我们收集了拉丁美洲和亚洲公交优先城市的相关数据，并对其加以分析。在这一章中，我们将重点呈现分析得出的结论。

10.2.1 数据来源

用于分析的交通事故数据来自各城市的相关部门或机构。巴西的数据来自城市当地的公交运营单位。墨西哥的数据来自哈利斯科州交通运输秘书处及墨西哥城市政府。哥伦比亚的数据来自哥伦比亚交通部。印度的数据来自各城市的警察局。其中，波哥大市的TranMilenio公交运营集团已率先自主建设了交通事故数据库，并提供了我们需要的事故数据集。这套数据集不仅收纳了与TransMilenio公交车相关的交通事故数据，还囊括了其他公交车遇到的各类轻微事故，而后者在警察局的事故报告中是少有的。这些轻微事故虽不严重，但对分析BRT系统运营中的安全问题却有重要的意义。举例来说，司机紧急刹车导致车厢内乘客摔倒，或司机停靠公交车不到位致使车辆轻微受损，都可能引发一系列的安全问题。各城市所提供的数据，反映了城市近3至7年来每条公交走廊上发生的全部事故，为我们的研究提供了巨大的帮助。

10.2.2 研究方法论

交通事故数据分析是评估工作中的重点。由于各城市的事故报告标准不同，对交通事故及事故创伤的界定也各异，因此不宜对各城市的情况进行比较研究。基于这种考虑，我们转而将每个城市制定成一个个案，并开展了案例分析。我们的数据分析对象为城市中的公交系统，目标是找出影响事故发生次数的因素，如行人过路距离或是否划出了中央隔离带。下一步，我们运用同样的方法对其他城市进行分析，以辨别此前的结论是否具有普遍性。其中，设计类因素（如交叉路口的路口数量）对各城市的事故影响力较为一致；而一



中央公交专用道上
少有事故发生；
事故大多发生在其他
车道，且不涉及
公交车辆

些因素（如交叉路口的左转弯数量）在各城市中的影响力则存在较大差异。

在进行统计工作时，我们选择了使用交通事故发生频率模型。在设定基本情况（即：机动车或行人的数量）的前提下，我们了解了影响不同地区事故发生几率的因素，如道路与交叉路口布局，公交系统的设计及土地利用情况。

交通事故数据属于计数变量，理论上应用泊松分布模型（Ladrón de Guevara, Washington, Oh; 2004年）。然而，过去的研究中也提到，事故数据也呈过度离散（即：方差远大于平均数）。因此，也常用负二项分布（也称泊松-伽马分布）模型。不同于泊松分布，负二项分布允许方差偏离平均数（Dumbaugh, Rae; 2009年）。因此，在建立交通事故频率模型时，大多选用负二项（NB）分布作为概率分布统计的首选工具。在大多数模型中，我们选用的是NB回归。一个例外是瓜达拉哈拉市的行人事故模型。该模型中的因变量离散不完全，因此更适宜使用泊松回归。

模型的针对范围是非常重要的。过往研究中，事故发生频率的模型针对范围各不相同，涵盖面可能是交叉路口，也可能为路口所在的街区，甚至是使用同一邮编的城市片区。我们的研究目标是了解设计对交通事故的影响，因此划定的研究范围也较小，仅为交叉路口或路段。数据集的

结构，特别是事故发生地的汇报形式，也影响着对研究范围的划分。在研究中涉及的大多数城市中（巴西的城市除外），对事故发生地的汇报要首先说明道路名称，其次是距离最近的安全岛。此外，还要按距离实际发生地最近的交叉路口，将交通事故分组。这组做法，会带来交叉路口与安全岛的事故的混淆。

这种设置所导致的结果是，数据集中的每项观测都对应着交叉路口，以及主干道上通往该路口的车道。在无法区分交叉路口事故与安全岛事故的情况下，我们为交叉路口设计和道路设计设置了单独的变量，以分别研究二者对事故的影响。随后，就可以看出交叉路口结构的变量包括行人数量、左转数量或车道流量失衡；而道路的变量则包括车道数量或是否有中央隔离带。为分析一些逆向公交车道，我们还特别设计了虚拟变量。

仅有 4 个城市提供了可用于建设统计模型的数据，分别为：墨西哥城、瓜达拉哈拉、波哥大及阿雷格里港。巴西的一些城市建立了较为完善的发生地汇报系统，不仅可显示地理坐标，还可区分交叉路口事故与安全岛事故。我们针对阿雷格里港的情况设置了交叉路口模型，以期尽可能地保证各案例研究结果的一致性。

当事故种类不同，或创伤等级不同时，即便是同一变量也可能产生不同的影响。基于此，我们依照事故种类（如机动车相撞，行人事故等）及事故性质（致伤或致死事故）设计了不同的模型，以区分轻微及重大事故。

10.2.3 事故频率模型分析结果

泊松及 NB 模型能够预测因变量的自然对数。在评估安全影响力时，我们通过求幂得到了系数，并从相对发生率指数 (IRR 指数) 的角度对其进行了分析。IRR 指数指的是因变量发生一个单位的变化时事故变化的百分比。接下来，通过使用优势对数计分法分析，我们对四个城市（墨西哥城、瓜达拉哈拉、波哥大及阿雷格里港）各变量的安全影响力加权平均值进行了估算（如需了解分析的过程，请参考 Elvik, Vaa, 2008 年）。其中，权重与每个案例中 IRR 指数的标准误差相对应。随后，就可以计算下表中每项设计或交通变量的安全影响力平均值，以及 95% 置信区间的范围了。如果系数为正，则说明发生事故的几率较高；如果系数为负，则说明该变量不易引发交通事故。

10.2.4 公交系统设置对安全的影响

研究显示，逆向公交车道更易引发机动车及行人交通事故（表 17），各案例城市的分析结果都证实了这一发现。因此，至少对于本报告的案例城市来说，逆向公交车道是较为危险的一种设计元素。对于数据相对缺乏、无法建立模型的城市，我们所做的基础数据分析也证实了这一点。例如，巴西库里蒂巴市的“南线”公交系统中，一部分线路铺设在逆向公交车道上，而此处每车道公里发生的交通事故数量是其他线路段（如中部车道）的 4 倍之多。对于逆向车道，我们将在下面的小节中作更多的说明。

从表 1 可以看出，几个城市的 BRT 系统都使各个级别的交通事故数量发生了明显下降。然而，通过使用事故发生频率模型发现，开通 BRT 系统这一虚拟变量的出现并未从统计学意义上对交通事故的发生有显著影响，因此这一虚拟变量被从模型中移除了。另一个类似的虚拟变量是路侧式公交车道，它的出现增加了事故发生率，说明在道路最外侧设置公交车道可能会带来安全隐患。

分析结果说明，BRT 系统本身并不能改善交通安全，而是建造 BRT 过程中对街道几何设计的改造产生了安全效益。为了容纳新增的 BRT 系统，需要在道路上增设或拓宽中央隔离带，这就缩短了行人过路的距离；一些十字路口也被改造成了丁字路口。此外，为了容纳公交基础设施（如公交车道和车站），还需要减少二至四条普通车道。各类模型运作均显示，上面提及的改造工作（减少交叉路口方向、减少车道、缩短行人过路距离、设置中央隔离带）确实对降低交通事故发生频率具有统计学意义上的积极作用。

表 17 根据负二项及泊松交通事故频率模型的系数计算加权平均影响力。数据来源城市：墨西哥城、阿雷格里港、瓜达拉哈拉、波哥大

	加权平均影响力	交通事故频率变化 (%)	95% 置信区间
增加一个岔口	致伤或致死事故	+78%	(+56%, +103%)
	车辆相撞	+65%	(+46%, +87%)
将十字路口改为丁字路口	致伤或致死事故	-66%	(-88%, -1%)
	全部事故	-57%	(-70%, -37%)
增加一条车道	致伤或致死事故	+17%	(+12%, +21%)
	车辆相撞	+14%	(+10%, +18%)
行人过路距离 (每增加1米)	致伤或致死事故	+2%	(+0.04%, +4%)
	行人事故	+6%	(+2%, +9%)
增加一个左转	致伤或致死事故	+28%	(+14%, +48%)
	车辆相撞	+35%	(+11%, +75%)
划出中央隔离带	致伤或致死事故	-35%	(-55%, -8%)
	车辆相撞	-43%	(-56%, -26%)
集市区域	行人事故	+94%	不适用*
	致伤或致死事故	+83%	(+23%, +171%)
逆向公交车道	车辆相撞	+35%	(+0.02%, +86%)
	行人事故	+146%	(+59%, +296%)
大型丁字路口	车辆相撞	+112%	(+27%, +253%)
	致伤或致死事故	+3%	(+1%, +5%)
街区长度 (每增加10米)	全部事故	-2%	(-4%, -0.03%)
	行人事故	+5%	(+1%, +8%)
在快速车道上修建行人过街天桥	行人事故	-84%	(-94%, -55%)
在主干道上修建行人过街天桥	行人事故	+67%**	(-23%, +262%)

*摘自Duduta等; 2012年 ** 在95%置信区间内不具备明显的统计学意义

10.2.5 逆向公交车道

一些交通部门可能会希望将原来的单向混合车道改造为公交能双向运营的通道，因而会选择逆向公交车道（见图 84）。在拉美地区，一些城市采用的办法是为普通交通保留单向车道，而为公交系统开设双向公交车道。双向车道可能在道路中部（如墨西哥城的 Eje 4 Sur 路），也可能在道路的外侧（如墨西哥城的 Eje Central 路）。逆向车道的另一个优势是更好地兼容左转功能，且不需要另设单独的左转信号灯。

“逆向车道”可包括各种各样的设计（见图 84）。这种设计的共同点是，它们对机动车和行人来说都较为新颖，需要一段时间来适应

通过研究，我们发现设置逆向车道可能会造成各类交通事故的增加（致伤或致死事故上升 83%，行人事故上升 146%，机动车相撞事故上升 35%）。拉美地区城市道路安全审计与检查的结果亦显示，逆向车道对道路安全有不利影响。其中，主要的安全隐患在于逆向设计与人们的日常习惯向左，可能会给道路使用者带来困扰，使其不能及时发现逆向驶来的车辆。

因此，在规划公交优先系统时，应尽可能地避免采用逆向设计，而采用传统的单向或双向道路模式。如果确实需要在单向道路上铺设双向公交车道，也应该将整条街道改造为双向道路（包括普通车道）。对于车辆左转的问题，应增加单独左传信号灯的时长，或用环路来替换左转功能，而不应意图通过开辟逆向车道来保留左转功能。

在墨西哥城，替换逆向车道的工作已经展开。进展最好的部分是 Eje 3 Oriente Eduardo Molina 路——墨西哥城已经在这条道路上开通了 Metrobús 快速公交系统 5 号线。这条路的外侧车道为普通车道，中部车道则为逆向车道（见图 85）。为了开通 5 号线，该市将道路改造为更为合理的双向道路（见图 86），并使用环路替代了左转功能。我们的研究结果显示，这项改造工程将有助于提升道路的安全性。



示例：墨西哥城 Eje 1 Norte 路



示例：墨西哥城 Eje 4 Sur 路



示例：伊斯坦布尔市 Metrobús 快速公交线路

图 84 逆向公交车道



图 85 改造前的Eje 3 Oriente Eduardo Molina路，带有逆向设计，道路上车辆可逆向行驶



图 86 改造后的Eje 3 Oriente路，包括了Metrobús系统5号线的公交车道及更加完善的行人设施

10.2.6 街道几何设计对安全的影响

正如预计的那样，交叉路口的尺寸和复杂度比公交系统本身更能影响交通事故的发生频率。据统计，仅有9%的事故发生在公交车上，而绝大多数事故都发生在普通车道上，且与公交车没有关联。

交叉路口的主要安全因素包括：路口岔口的数目、每个岔口上有几条车道，以及行人过路的最大距离。允许横向道路的车辆驶过公交走廊的路口，比仅允许车辆右转的路口更加危险。因此，可以考虑在干道上划出隔离带，将一个十字路口隔成两个丁字路口，以提升路口的安全性。然而，不宜在没有安装信号灯的交叉路口进行这种改造。需要注意的是，两个丁字路口的设计通常都不带信号灯或者人行横道，这能让公交车能快速通过，但是对行人是更高的风险。

10.2.7 街区大小及车辆时速对安全的影响

车辆的行驶速度对交通安全的影响尤为突出。在我们的模型模拟测试中，样本城市路段没有安装测速设备。由于缺少车速数据，故没有设置车速的自变量。在这种情况下，我们使用带信号灯交叉路口的间距作为一个替代变量，因为这一间距与车速有很强相关性。交通事故频率模型测试的结果可在表 17 中找到。其中，瓜达拉哈拉市的结果显示，两个信号灯路口的间隔越大，则车速越高，总的事故数越小。这是由于信号灯路口处容易发生交通流的冲突。然而，虽然事故总数有所降低，但事故性质却更为严重，且时常有行人受到伤害。从结果中可以看出，信号灯的间隔每增加 10 米，则交通事故的总数下降 2%，而重大事故的数量则上升 3%，行人事故的数量上升 5%。

10.2.8 走廊附近的土地利用对安全的影响

如何利用道路两旁的土地，对交通安全亦会构成显著影响。墨西哥城的经验表明，交通事故发生的几率与土地利用情况有很大关系。例如，在走廊旁修建大型市场会使附近的行人发生交通事故的几率大幅上升，涨幅可达 94%（详情参见 Duduta 等；2012 年）。其背后的原因有二，即：市场附近的行人数量较多，且市场本身的设计对保证行人安全不利。以该市的 Merced 市场为例，其周边人行道基本为小商贩所占据。行人无路可走，只得走在车道上。另一方面，大量的商贩及其杂物阻挡了车辆驾驶员的视野，使其不能及时发现并避让行人。总结墨西哥城的经验，我们建议设计人员充分考虑道路所在的环境，再行设计。

名词术语解释

快速公交系统 (BRT): 一类特殊的公交系统, 在文中有时亦作“公交”。在这部分章节中, 我们将对公交系统中常见的表达方式做进一步的说明。

常规公交系统: 在普通车道上运营的公交系统, 不享有专用道及信号优先权, 售检票在车上进行。这是最为常见的公交系统, 从体制层面讲, 通常由城市当地的公交部门负责运营, 在欧洲及北美地区尤为常见。而, **非正式公交**是指个人用私有车辆 (一般为面包车或小客车) 经营的客运服务。这类公交形式常出现在非洲或拉美地区, 受政府部门的监管的力度因地而异。

常规公交与非正式公交的体制性质, 很大程度上决定了其各自的安全性。非正式公交需要自行招揽生意, 其运营活动缺少规范的监管, 运营形式较为松散, 经常随意停靠揽客, 因而较为危险。而常规公交系统是稳定的交通系统, 又有专门的运营部门负责系统的运转、维护及驾驶员培训, 因而较为规范, 也更加安全。

公交优先: 并不是指称某一种基础设施改造, 而是对一类基础设施改造的总称。这类改造工作的目标是为公交系统提供较其他交通形式更为优越的运营条件, 如公交优先道、公交专用道、高峰时段公交专用道、排队优先权、信号优先权, 以及快速公交设施。

公交优先道: 优先让公交车行驶, 在某些情况下也允许其他车辆使用的车道。这类车道常铺设在一条道路的最外侧, 在供给公交车使用的同时, 也方便其他车辆右转。⁶

公交专用道: 仅供公交车行驶的车道。除特殊情况外, 其他车辆在任何时段均不得占用。**高峰期公交车道**: 在高峰时段供公交车单独使用或优先使用的车道。通常情况下, 一条道路的两个方向分别设有上班和下班时段的高峰期公交车道。

逆向公交车道: 与其他车道通行方向相反的公交优先道、高峰期优先道、或专用道。在本报告中, 逆向车道的偶三种情况:

- 单向多车道道路的最外侧车道为公交车道, 且通行方向与其他车道相反 (如墨西哥城 Eje Central 路)
- 道路一侧设有可双向行驶普通车道, 另一侧设有可双向行驶的公交车道 (如布里斯班快速公交系统, 库里蒂巴市的部分 BRT 线路)

- 单向道路中部的 BRT 走廊, 可双向行驶 (如墨西哥城 Eje 4 Sur 路上的 Metrobús 系统 2 号线)

排队优先: 道路上的公交超车带; 公交车在信号灯路口处使用专用的超车带优先通行。施行排队优先, 常见的做法是在接近交叉路口的地方设置一条公交专用道, 以便公交车超过其他等候的车辆, 在绿灯时首先通过路口。排队优先的辅助措施是信号灯优先。信号灯优先是针对信号灯做出的设置, 如自动感应功能就能够探测到驶来的公交车辆, 并为其开放绿灯。

公交专用道: 在中部车道安装有公交专用设施 (专用车道和车站) 的道路, 或独立的公交车道。较为典型的案例有: 德里市的公交专用道; 阿雷格里港的 Avenida Protásio Alves 路, 以及 Avenida Bento Gonçalves 路。公交专用道与 BRT 系统不完全相同, 其主要区别在于后者拥有更完善的服务, 如站台售检票系统、无障碍上车, 以及中央控制系统。典型的 BRT 系统包括: 波哥大市的 TransMilenio 系统, 墨西哥城的 Metrobús 系统, 以及艾哈迈达巴德的 Janmarg 系统。

此外, 我们还在报告中探讨了不同种类的 BRT 系统及公交专用道。例如, **单车道 BRT** 或公交专用道, 其每个方向上仅有一条公交专用道 (如墨西哥城 Metrobús 系统)。带**超车道**的 BRT 或公交专用道的车站之间是单车道, 车站处加开一条车道, 以便不经停的车辆快速通过车站 (如里约热内卢市 TransOeste 系统; 瓜达拉哈拉市 Macrobús 系统)。在**多车道 BRT** 或公交专用道的全部或大部分路段, 每个方向上至少开设了两条公交专用道。

致谢

本研究报告由布隆伯格慈善基金会的特别赞助完成。

感谢参与数据收集及分析、道路测试，以及提供理论知识、修改意见、并协助实地考察的工作人员。

感谢莱斯大学的 Rebecca Jaffe 对阿雷格里港、墨西哥城及波哥大市的数据收集及分析提供的支持。感谢麻省理工学院的 Qianqian Zhang 对交叉路口行人行为研究提供的支持。感谢 EMBARQ 巴西分部的 Paula Manoela dos Santos da Rocha 提供的 EMBARQ BRT 模拟器，以支持安全保障措施对运营效率的影响分析。

感谢 Saúl Alveano Aguerrebere, Marco Tulio Priego Adriano, 以及 Yorgos Voukas 协调墨西哥城 Metrobús 系统及瓜达拉哈拉市 Macrobus 系统的数据收集工作。感谢哈利斯科州交通运输协会的 Jesús Alberto Leyva Gutiérrez 及 Diego Monraz Villaseñor 提供了瓜达拉哈拉市大都会地区的交通事故数据，并感谢 EPS 机构 (Estudios, Proyectos y Señalización Vial S.A. de C.V.) 的 Joel Ivan Zúñiga Gonsálvez 分享了瓜达拉哈拉市交通流量统计数据，协助我们设计了交通事故发生频率模型。

感谢墨西哥城 Metrobús 系统运营主管 Jorge Coxtinica Aguilar, 以及技术主管 Jorge Casahonda Zentella 帮助 EMBARQ 工作人员了解 Metrobús 系统。

感谢波哥大市 TRANSMILENIO S.A. 机构的运营主管 Mario Alberto Valbuena Gutiérrez, 以及安全负责人 Carlos Gutiérrez, Martín Salamanca 及 Jaison Lucumí 提供了 TransMilenio 系统数据库，并引导 EMBARQ 工作人员参观了 TransMilenio 走廊。感谢哥伦比亚交通部的 Myriam Haidee Carvajal López 及 Beatriz Elena Jurado Flóres 提供了哥伦比亚国家道路安全数据库中的相关信息。

感谢 EMBARQ 巴西分部的 Brenda Medeiros 及 Marta Obelheiro 协调巴西城市的数据收集工作，并协助了巴西 BRT 系统的安全审计及检查。她们的工作为本报告提供了宝贵的资料来源。感谢 EPTC 机构 (Empresa Pública de Transporte e Circulação) 及 Matricial Engenharia Consultiva Ltda. 机构提供了阿雷格里港交通事故及交通流量统计数据。感谢 URBS 机构 (Urbanização de Curitiba S.A.) 提供了库里蒂巴市 BRT 走廊的交通事故数据。感谢 BHTrans 机构 (Empresa de Transporte e Trânsito de Belo Horizonte S.A.) 提供了贝洛奥里藏特市部分公交走廊交通事故的数据，以及 CET-SP 机构 (Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo) 提供了圣保罗市快速公交走廊的交通事故数据。

感谢 EMBARQ 印度分部的 Madhav Pai 及 Binoy Mascarenhas 协调印度城市的数据收集工作，包括德里 BRTS 公交走廊及艾哈迈达巴德市 Janmarg 快速公交系统的数据收集。

感谢国际道路风险评估组织 (iRAP) 的 R 提供了澳大利亚昆士兰州布里斯班市的“东南”快速公交走廊上的行人交通事故信息。

感谢利马市 Instituto Metropolitano Protransporte de Lima 机构的 Ricardo Rivera Salas 及 Vladimir Américo García Valverde 分享了利马市 Metropolitano 快速公交系统的交通事故数据库。

感谢 Rio Ônibus 集团的 Alexandre Castro 介绍了里约热内卢市 TransOeste 系统的运营与安全检查的经验。

感谢智利天主教大学的 Luis Rizzi 及 Diego Pinto 提供了智利圣地亚哥 Transantiago 公交系统的交通事故数据库，并对本报告提供了宝贵的修改意见。

感谢 EMBARQ 土耳其分部的 Ali Doğan Şalva, Elif Can Yüce 及 Serdar Oncel 协调伊斯坦布尔市的数据收集工作，并参与了伊斯坦布尔 Metrobüs 快速公交系统的道路安全检查。感谢伊斯坦布尔市 IETT 机构的 Mümin Kahveci 及其他工作人员分享了 Metrobüs 系统的交通事故数据，提供了系统运营与安全方面的经验，并为报告草稿中土耳其语的部分提供了语言翻译支持。

特别感谢世界银行国际道路安全机构 (GRSF) 的 Tawia Addo Ashong, 以及世界银行的 Karla Gonzalez Carvajal 主持了位于华盛顿特区及亚的斯亚贝巴的相关研讨会与培训。他们收集到了大量来自专家及利益相关方的宝贵意见。

此外，感谢下列机构及其工作人员对本报告及相关研究工作所提供的宝贵支持：Fred Wegman, Jacques Commandeur 及 Atze Dijkstra (荷兰国家道路安全研究员)；Steve Lawson (iRAP)；Tony Bliss, Said Dahdah, Sam Zimmerman, O. P. Agarwal (世界银行)；Subu Kamal, Sanjay Vadgama (交通研究实验室)；Lilia Blades (联合国人居署)；César Durán Arróspide (秘鲁阿雷基帕市政府)；Juan Carlos Muñoz (智利天主教大学)；Alexandra Rojas 及 Claudia Puentes (哥伦比亚 Fondo de Prevención Vial 机构)；Janet Ranganathan, Holger Dalkmann, Clayton Lane, David Tomberlin, Benjamin Welle, Aileen Carrigan, Aaron Minnick, Benoit Colin, Heshuang Zeng, Katherine Filardo (世界资源研究所)；以及 Paulo Custodio, Gerhard Menckhoff。

参考文献

- Barnett, A. G., J. C. van der Pols, and A. J. Dobson. 2004. "Regression to the Mean: What It Is and How to Deal with It." *International Journal of Epidemiology* 34, no. 1: 215–20.
- BITRE (Bureau of Infrastructure, Transport, and Regional Economics). 2009. *Road Crash Costs in Australia, 2006*. Report 118. Canberra: BITRE, November.
- Blincoe, L. J., A. G. Seay, E. Zaloshnja, T. R. Miller, E. O. Romano, S. Luchter, and R. S. Spicer. 2002. *The Economic Impact of Motor Vehicle Crashes, 2000*. Report DOT HS 809 446. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration.
- Bocarejo, J. P., J. M. Velasquez, C. A. Diaz, and L. E. Tafur. 2012. "Impact of BRT Systems on Road Safety: Lessons from Bogota." Paper presented at Transportation Research Board Annual Meeting, Washington DC.
- Carrigan, A., R. King, J. M. Velasquez, M. Raifman, and N. Duduta. 2013. *The Social, Environmental, and Economic Impacts of BRT Systems*. Washington, DC: EMBARQ.
- Cooper, J., R. J. Schneider, S. Ryan, and S. Co. 2012. "Documenting Targeted Behaviors Associated with Pedestrian Safety." Paper presented at the 91st Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC, January.
- Cropper, M., and S. Sahin. 2012. "Valuing Mortality and Morbidity in the Context of Disaster Risks." Background paper for the joint World Bank–UN Assessment on Disaster Risk Reduction, Washington, DC.
- Diogenes, M. C., and L. A. Lindau. 2010. "Evaluating Pedestrian Safety at Midblock Crossings in Porto Alegre, Brazil." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2193: 37–43.
- Duduta, N., C. Adiazola-Steil, D. Hidalgo, L. A. Lindau, and R. Jaffe. 2012. "Understanding the Road Safety Impact of High Performance BRT and Busway Design Characteristics." *Transportation Research Record* 2317: 8–16.
- Duduta, N., C. Adiazola-Steil, D. Hidalgo, L. A. Lindau, and P. dos Santos da Rocha. 2013. "The Relationship between Safety, Capacity, and Operating Speed on Bus Rapid Transit." Paper presented at the 13th World Conference on Transport Research (WCTR), Rio de Janeiro.
- Duduta, N., L. A. Lindau, and C. Adiazola-Steil. 2013. "Using Empirical Bayes to Estimate the Safety Impacts of Transit Improvements in Latin America." Paper presented at the International Conference in Road Safety and Simulation, RSS 2013, Rome.
- Duduta, N., Q. Zhang, and M. Kroneberger. Forthcoming 2014. "The Impact of Intersection Design on Pedestrians' Decision to Cross on Red." *Transportation Research Record*.
- Dumbaugh, Eric, and R. Rae. 2009. "Safe Urban Form: Revisiting the Relationship between Community Design and Traffic Safety." *Journal of the American Planning Association* 75, no. 3: 309–29.
- Elvik, R., and T. Vaa. 2008. *The Handbook of Road Safety Measures*. Bingley, UK: Emerald Group.
- Esperato, A., D. Bishai, and A. Hyder. 2012. "Projecting the Health and Economic Impact of Road Safety Initiatives: A Case Study of a Multi-country Project." *Traffic Injury Prevention*, 13, suppl. 1: 82–89.
- Goh, K. C. K., G. Currie, M. Sarvi, and D. Logan. 2013. "Investigating the Road Safety Impacts of Bus Rapid Transit Priority Measures." Paper presented at the Transportation Research Board 92nd Annual Meeting, Washington DC.
- Hidalgo, D., and A. Carrigan. 2010. *Modernizing Public Transportation: Lessons Learned from Major Bus Improvements in Latin America and Asia*. Washington, DC: World Resources Institute.
- Híjar, M., A. Chandran, R. Pérez-Núñez, J. C. Lunnen, J. M. Rodríguez-Hernández, and A. Hyder. 2011. "Quantifying the Underestimated Burden of Road Traffic Mortality in Mexico: A Comparison of Three Approaches." *Traffic Injury Prevention* 13, suppl. 1: 5–10.
- Klaver Pecheux, K., and H. Saporta. 2009. "Light Rail Vehicle Collisions with Vehicles at Signalized Intersections: A Synthesis of Transit Practice." TCRP Synthesis 79. Washington, DC: Transportation Research Board.
- Ladrón de Guevara, F., S. P. Washington, and J. Oh. 2004. "Forecasting Crashes at the Planning Level: Simultaneous Negative Binomial Crash Model Applied in Tucson, Arizona." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1897: 191–99.
- Moreno González, E. G., M. G. Romana, and O. M. Alvaro. 2013. "Effectiveness of Reserved Bus Lanes in Arterials." Paper presented at the 92nd Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC, January.
- NACTO. 2011. *Urban Bikeway Design Guide*. Washington, DC.
- Pereira, B. M., L. A. Lindau, and R. A. Castilho. 2010. "A importância de simular sistemas Bus Rapid Transit." In *Proceedings of XVI CLATPU*. Mexico City.
- Rickert, T. 2007. *Bus Rapid Transit Accessibility Guidelines*. Washington, DC: World Bank.
- Rosén, E., and U. Sander. 2009. "Pedestrian Fatality Risk as a Function of Car Impact Speed." *Accident Analysis & Prevention* 41, no. 3: 536–42.
- Transportation Research Board (TRB). 2010. "Signalized

Intersections. Pedestrian Mode." In *Highway Capacity Manual (HCM)*. Transportation Research Board, Washington, DC.

Vuchic, V. 2007. *Urban Transit: Systems and Technology*. Hoboken, NJ: Wiley and Sons.

WHO. 2013. *Global Status Report on Road Safety*. Geneva: World Health Organization.

Wright, L., and W. Hook, eds. 2007. *Bus Rapid Transit Planning Guide*, 3rd ed. New York: Institute for Transportation and Development Policy.

Yazıcı, M.A., H. Levinson, M. Ilıcalı, N. Camkesen, and C. Kamga. 2013. A Bus Rapid Transit Line Case Study: Istanbul's Metrobüs System. *Journal of Public Transportation* 16, no. 1, 153-177

Zhou, Z., G. Ren, W. Wang, Z. Yong, and W. Wang. 2011. "Pedestrian Crossing Behaviors at Signalized Intersections: Observational Study and Survey in China." Paper presented at the 90th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC, January.

尾注

- 1 如需了解世界各地的BRT工程进度，请访问：brtdata.org。
- 2 基于墨西哥城及波哥大市的BRT系统成本效益分析中的统计寿命做的估算（有关VSL的说明，参见报告10.1章节；有关BRT系统分析，参见Carrigan等，2013年）。
- 3 来源：EMBARQ分析；Duduta, Lindau, Adriaola-Steil, 2013年；Goh等，2013年。计算方法包括：贝叶斯方法（应用在瓜达拉哈拉市及墨尔本市），在控制城市交通流势的情况下对比交通事故数量（应用在墨西哥城及波哥大市），前后交通事故数量对比（应用在艾哈迈达巴德市）。
- 4 有关EMBARQ的BRT系统模拟器的说明、校准及过往应用案例，参见Pereira, Lindau, Castilho；2010年。
- 5 EMBARQ对伊斯坦布尔市Metrobüs快速公交系统的旋杆种类及购票方式所做的评估。
- 6 车辆靠道路右侧行驶。除非有特殊说明，否则报告均默认车辆靠右行驶。

图示列表

图 1	常见拉美地区BRT系统中安全影响在经济效益中所占的比重	4
图 2	拉美地区针对BRT系统所做的常见街道设施改造（图中为瓜达拉哈拉市的Macrobús系统），及其带来的安全性效益（图片来源：ITDP/flickr）	8
图 3	瓜达拉哈拉市Calle Independencia（独立路）2007至2011年间的交通事故	8
图 4	公交走廊上的死亡案例分类（数据来自墨西哥城、瓜达拉哈拉德里、艾哈迈达巴德、库里蒂巴、阿雷格里港、贝洛奥里藏特）	10
图 5	中央式公交专用道或BRT的常见交通事故	11
图 6	路侧式公交专用道的常见交通事故	12
图 7	发生在多车道BRT系统主要车站附近的常见交通事故	13
图 8	行人在路中段横穿BRTS快速公交走廊，德里市	23
图 9	城市主干道的路中段人行横道	24
图 10	行人违规横穿BRT系统TransMilenio的公交专用道，波哥大市	25
图 11	阿雷格里港交通事故发生地点汇总。 数据来源：阿雷格里港Empresa Pública de Transporte e Circulação (EPTC)，2011年	25
图 12	狭窄道路上的路中段人行横道	26
图 13	墨西哥莱昂市的斜坡过街天桥	27
图 14	相较于过街天桥，行人选择翻越护栏并横穿马路。德里市	27
图 15	路侧式公交车道设计	28
图 16	行人在Eje 1 Oriente公交线路的路侧专用道上行走，墨西哥城	29
图 17	公交车辆交通事故分类，墨西哥城Eje Central路侧公交走廊，2006至2010年	29
图 18	行人推手推车在Eje Central大道路侧式公交车道上行走，墨西哥城	29
图 19	里约热内卢市TransOeste快速公交系统	30
图 20	通过减小缘石半径，以及人行道拓宽改造（红色部分）减少交叉口的面积	35
图 21	“曝光”与安全岛	36
图 22	设有路面标记的道路与没有标记的道路	37
图 23	通过减少某一方向上的车道数量或设定转弯专用道来取得车道平衡	38
图 24	环路方案1：在禁止左转的交叉路口之后	39
图 25	环路方案2：在禁止左转的交叉路口之前	39
图 26	两种环路的建议方案	39
图 27	禁止左转的大型十字交叉路口	40
图 28	行人安全岛详解	41
图 29	允许左转的大型十字交叉路口	42
图 30	交通事故图：小汽车在公交车前左转——中央式BRT或公交走廊上最常见的公交车事故	43
图 31	带自行车道的交叉路口	44
图 32	自行车专用道的标志及道路标记	45
图 33	穿过交汇道路的小型十字交叉路口	46

图 34	禁止直行的交汇道路.....	47
图 35	小型十字交叉路口自行车转弯.....	48
图 36	自行车左转第一步：自行车应该在绿灯时沿公交走廊直行，停在右手边的等候区等待.....	49
图 37	自行车左转第二步：等支路绿灯亮起，自行车可以和其他车流一起直行穿越公交走廊.....	49
图 38	路侧式BRT交叉路口.....	50
图 39	通往交叉路口的一条公交车道.....	50
图 40	墨西哥瓜达拉哈拉市三类公交走廊的安全性比较.....	51
图 41	带公交优先车道或混合车道的交叉路口.....	51
图 42	路侧式公交走廊上各类车辆的事故占比，瓜达拉哈拉Alcalde路.....	51
图 43	行人闯红灯现象：伊斯坦布尔市Eminönü公交车站（左）； 里约热内卢市快速公交Salvador Allende车站（右）.....	52
图 44	在交叉口处，行人闯红灯的百分比，基于信号延时（Duduta, Zhang, Kroneberger, 2014年）.....	54
图 45	红灯时，行人在车辆空隙间横穿马路，里约热内卢市.....	55
图 46	新添加的交通标识及路面标记，旨在提示车辆即将从共享路段进入公交专用道，其他车辆必须右转.....	57
图 47	墨西哥城在开通Metrobús系统4号线前后，历史城区的典型交叉路口及公交系统.....	56
图 48	行人为逃票而试图横穿公交车道进入车站，波哥大市TransMilenio快速公交系统.....	61
图 49	城市主干道车站的可达性.....	60
图 50	TransMilenio系统Calle 72站出站口处的人潮.....	61
图 51	路中式车站.....	62
图 52	当公交专用道和普通车道间没有隔离时，行人在车站前横穿公交道，波哥大市.....	62
图 53	库里蒂巴市BRT系统车站的屏蔽门。尽管公交车没有到站，屏蔽门处于开启状态。 这对于一个拥挤的车站是一个安全隐患，因为乘客有可能会掉下站台。.....	62
图 54	TransMilenio系统换乘设计，2006年.....	63
图 55	TransMilenio系统换乘设计，2011年.....	63
图 56	TransMilenio系统车站上的乘客强行让屏蔽门开启.....	63
图 57	快速公交车道.....	64
图 58	车站发生的公交车间相撞事故.....	65
图 59	行人从错误的出口离开TransMilenio接驳公交车站.....	66
图 60	车站的可达性.....	66
图 61	行人出站后直接横穿马路，德里市BRTS快速公交走廊.....	67
图 62	行人横穿公交车道到达站台，德里市BRTS快速公交走廊.....	67
图 63	公交车在路侧公交站绕开停在路旁的车辆，智利圣地亚哥Transantiago公交系统.....	68
图 64	路侧式车站.....	68
图 65	公交优先车道及常规公交车道.....	69
图 66	伊斯坦布尔市Metrobüs快速公交系统中的Mecidiyeköy站.....	70
图 67	高速路BRT系统较为常见的几类致伤交通事故。 资料来源：EMBARQ针对IETT公司提供的数据所做的分析.....	72

图 68	图解双侧防撞阻挡及高护栏，建议应用在高速路BRT系统上.....	73
图 69	Metrobús系统老旧路段之一，Cevizlibag车站晚高峰时段的拥挤客流； 右：改进后的车站：位于公交走廊上方的步行广场上，且加装了十字转门.....	74
图 70	通过优化车站设计，增加乘客承载力，缓解高速路中央式BRT车站的人流拥挤.....	75
图 71	墨西哥城Indios Verdes站鸟瞰，该站是BRT、地铁和小型公交的换乘站。 图片来源：Google Earth.....	78
图 72	公交干线间的换乘.....	80
图 73	图解右转公交车与直行车辆间可能发生的相撞事故。此类事故在TransMilenio系统中出现过.....	81
图 74	TransMilenio快速公交系统三条走廊——NQS, Avenida Suba, 以及Calle 80——的交汇点.....	81
图 75	跨交叉路口换乘.....	82
图 76	公交干线间的换乘.....	84-85
图 77	综合型首末站.....	86
图 78	图解TransMilenio首末站的典型布局。 左：绿色的支线车辆停靠在站台左侧。右：红色干线铰接式车辆停靠在同一站台的右侧.....	87
图 79	综合型公交首末站到站设计.....	88
图 80	几类公交首末站的布局设计.....	89
图 81	换乘常规公交.....	90
图 82	整合自行车路网.....	91
图 83	快速公交系统的安全效益所占全部经济效益的比重.....	98
图 84	逆向公交车专用道.....	102
图 85	改造前的Eje 3 Oriente Eduardo Molina路，带有逆向车道，会有行驶方向的改变.....	103
图 86	改造后的Eje 3 Oriente路，包括了Metrobús系统5号线的公交专用道及更加完善的行人设施.....	103

表格列表

表 1	公交优先对安全性的影响	7
表 2	伴随公交优先系统的普通基础设施改造所带来的安全影响	9
表 3	拉丁美洲、印度及澳大利亚主要公交优先系统安全影响力评估结果	10
表 4	公交道布局对交通安全的影响	15
表 5	不同等级道路的85百分比行驶速度	20
表 6	人行天桥对安全的影响	27
表 7	2016年情景模拟结果显示改进公交系统安全对效率的影响	33
表 8	道路及交叉路口的设计对安全性的影响	36
表 9	在交叉路口处取消左转所带来的安全影响	42
表 10	将十字路口改造为丁字路口所带来的安全影响	46
表 11	使用二分变量logit模型预测行人在交叉路口闯红灯的几率	53
表 12	信号灯相位设计与行人延迟的关系	54
表 13	不同公交系统在其所属道路上的运营时速	72
表 14	几种公交系统的安全影响力	95
表 15	发达国家VSL（统计生命价值）及取值区间	96
表 16	交通伤害成本。数据来自英国交通部《交通运输分析指南》	97
表 17	根据负二项及泊松交通事故频率模型的系数计算加权平均影响力， 模型来自墨西哥城、波尔图、瓜达拉哈拉以及波哥大	101

摄影:

EMBARQ / EMBART墨西哥分部 / EMBARQ巴西
分部 封面、内页及配图: 8, 10, 13, 14, 16, 18,
19, 32, 43, 45, 46, 47, 48, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 59,
61, 62, 63, 66, 69, 71, 78, 85, 86
页码: 10, 16, 17, 18, 22, 34, 58, 92, 93

瓜达拉哈拉市BRT系统: Bernardo Baranda
Sepúlveda/ITDP 2009 Flickr Image
图: 2

Lucho Molina- Flickr Image
图: 56

地图数据: Google, DigitalGlobe, INEGI
Page: 76

地图数据: Google, DigitalGlobe
Figure: 74, 80

ISBN: 978-1-56973-830-6



世界资源研究所(WRI)可持续交通中心（以下简称“EMBARQ”）隶属WRI罗斯可持续城市中心，是为推动城市交通的可持续发展而建立的关系网络。

EMBARQ从城市可达性及城市规划的角度切入，致力于推动城市的环境、社会和经济可持续发展，并力争改善居民的生活质量。自2002年成立伊始，EMBARQ的网络已覆盖了全球多个国家和地区，并在巴西、中国、印度、墨西哥及土耳其等国设立了分部。

EMBARQ 与各国国家和地方政府、商业机构、研究机构及民间组织建立了紧密的战略关系，以期共同应对环境污染、公共卫生等问题，完善城市交通系统，为人类打造一个安全、便捷、舒适的城市环境。



EMBARQ总部

10 G Street, NE, Suite 800
Washington, DC 20002
USA
+1 (202) 729-7600



EMBARQ BRASIL 巴西区

Av. Independência,
1299/ 401, Porto Alegre, RS,
Brasil 90035-077
+55 (51) 33126324



EMBARQ CHINA 中国区

Unit 0902, Chaowai SOHO Tower A
Yi No. 6
Chaowai Dajie, Chaoyang District
Beijing 100020, China
+86 10 5900 2566



EMBARQ INDIA 印度区

Godrej and Boyce Premises
Gaswork Lane, Lalbaug
Parel, Mumbai 400012
+91 22 24713565



EMBARQ MÉXICO 墨西哥区

Calle Belisario Dominguez #8,
Planta Alta
Colonia Villa Coyoacán, C.P. 04000
Delegacion Coyoacán, México D.F.
+52 (55) 3096-5742



EMBARQ TÜRKİYE 土耳其区

Sürdürülebilir Ulaşım Derneği
Gümüşsuyu Mah. İnönü Cad.
No:29 Saadet Apt. Kat:6 D:7
Taksim, Beyoğlu, İstanbul
Tel: 0 (212) 243 53 05

A program of the

 WORLD RESOURCES INSTITUTE

www.embarq.org