

高架自行车道纵坡度研究报告

中国城市建设研究院

目录

1. 概述	1
1.1 研究背景与必要性	1
1.2 研究内容	2
1.3 技术路线	3
2 高架自行车道发展现状	5
2.1 高架自行车道的定义及主要类型	5
2.2 高架自行车道的产生与发展	8
2.3 高架自行车道的特点与优势	10
3 高架自行车道案例分析	11
3.1 国外	11
3.1.1 丹麦	11
3.1.2 荷兰	15
3.1.3 伦敦	16
3.1.4 德国	18
3.2 国内	19
3.2.1 厦门	19
3.2.2 成都	24
3.2.3 北京	27
3.3 案例总结	29
3.3.1 相关技术指标	29
3.3.2 出入口纵坡设计形式	29
3.3.3 其他细节设计	30
4 自行车行驶特性分析	32
4.1 自行车行驶动力与行驶阻力	32
4.1.1 驱动力	32

4.1.2 阻力.....	33
4.2 自行车行驶条件.....	34
4.3 自行车行驶特性.....	34
4.3.1 行驶稳定性.....	34
4.3.2 制动性.....	36
4.4 自行车行驶速度.....	37
5 自行车纵坡设计研究.....	38
5.1 纵坡的概念.....	38
5.2 纵坡坡度设计.....	38
5.2.1 考虑因素分析.....	38
5.2.2 最大坡度值的确定.....	39
5.3 纵坡坡长设计.....	40
5.3.1 考虑因素分析.....	40
5.3.2 最大坡长的限制.....	41
5.4 现有规范及标准.....	42
6 数据调查与分析.....	45
6.1 数据调查的基本情况.....	45
6.1.1 骑行者的性别构成.....	45
6.1.2 骑行者的年龄构成.....	46
6.1.3 自行车车型构成.....	46
6.1.4 骑行速度分布.....	46
6.2 骑行速度与各调查参数之间的关系.....	48
6.2.1 性别、年龄与骑行速度的关系.....	48
6.2.2 车型、年龄与骑行速度的关系.....	49
6.2.3 性别、车型与骑行速度的关系.....	51
6.3 建议坡度值.....	52
7 总结.....	55

参考文献.....	56
附录：调查数据.....	58

1. 概述

1.1 研究背景与必要性

党的十九大报告明确提出，建设生态文明是中华民族永续发展的千年大计，并对新时代加快生态文明体制改革、建设美丽中国作出了全面部署。国务院提出五大发展理念——“创新、协调、绿色、开放、共享”，加强自行车道和步行道系统建设，倡导绿色出行。交通运输部把发展绿色交通作为行业践行绿色发展理念和加强生态文明建设的战略举措，着力完善行业节能环保制度和标准，加快节能环保运输装备和节能减排科技研发应用。长久以来，现代城市最大的挑战之一就是提供可持续且高效的交通出行服务。我们已经能很好的理解将更多的小汽车通行空间分配给绿色可持续交通体系，但是出现了新问题，那就是如何解决绿色交通体系的空间分配。



图 1-1 战略部署

自行车对环境可持续和人们生活水平的提高具有重要作用。这就是为什么城市将自行车作为可持续发展的重要推动力，放在优先位置。在这种模式下，鼓励在现代城市使用自行车，在设计和规划时将其纳入考虑范围，显得迫在眉睫。在西方，为自行车设计的独立路权的城市高架自行车道已经建成并成为提升自行车交通骑行品质的一个重要保障。我国的不少城市也在尝试建设类似的高标准自行车道，但关于自行车道设计的技术指标并不完善，尤其是关于自行车道纵坡度的规定较为简单，相关研究也较为缺失。本项目旨在通过多种实验手段结合调查分析，对自行车高架道路纵坡度提出相应指标，制定更为完善的高架自行车道路纵坡度推荐值。同时，该指标也可作为对现有规范的补充，指导一般城市自行车道

的设计。

自行车交通是绿色交通的代表，同时是非常受欢迎的一种交通工具，共享单车的火热表明在相当长的一段时期内，自行车仍然是城镇居民最主要的出行工具之一。已有诸多研究表明，高标准专用的自行车道路无论在通行效率还是在骑行安全上都远好于混行道路，随着自行车质量的不断提高和许多自行车爱好者的出现，中长距离的出行选择自行车也越来越普遍，为此，要求为骑行者提供更好的道路设施服务。目前，有不少类似的自行车高架道路正在筹划。有英国伦敦的“sky cycle”计划，布里斯托 Bicy-metro 计划，德国的气流自行车通道计划。而在我国的厦门已经试点建成自行车高架道路，这些高架自行车道，不仅极大提升了自行车的吸引力，同时也给城市带来了一道亮丽的风景线。但目前，围绕自行车高架道路的研究屈指可数，而自行车道的纵坡度不仅是设计自行车高架道一个重要指标，同时也是影响骑行的一个关键因素，骑行的舒适度、安全性都与纵坡度有密切关联，丰富完善该项指标的研究，对于完善自行车道设计标准，提高自行车道设计内容有着重要意义。

1.2 研究内容

本项目目标是通过研究分析，对自行车高架道路纵坡度提出相应指标，制定更为完善的高架自行车道路纵坡度推荐值。同时，该指标也可作为对现有规范的补充指导一般城市自行车道设计。

本项目研究的主要内容是城市自行车高架道路的纵坡度研究。从国外看，欧美发达国家早已经开始重新审视自行车的重要性，对自行车，无论在法律上、政策上、规划上还是管理上都予以倾斜，鼓励人们放弃机动车，使用自行车。但国外对自行车道纵坡度研究也较少，日本在 1979 年曾发布过一个规范，里面对自行车道的纵坡度坡长等指标有详尽的讨论，欧美近些年对自行车的规划、安全、以及自行车骑行行为、自行车相应的法律法规有较多研究，但涉及自行车道纵坡度的研究目前仍然较为缺乏。国内对自行车道纵坡度的也缺乏相应研究及技术指标确定，国内目前参照的城市道路设计规范，对自行车道的设计纵坡度规定较为宽泛，但我国台湾地区则发布过详细的自行车道设计规范，打破了一些传统认知限制，对自行车纵坡度规定更为细致，但并未涉及到高架的自行车道路这种形式。

整体上，国内外对自行车道纵坡度研究较少，本项目对该指标的研究将会推动自行车道的革新；对建设高架自行车道提供具体技术支持；对缓解交通压力、倡导绿色出行、提高城市居民的身心健康乃至提升城市的魅力都有巨大潜力。相信未来将会有更多的城市高架自行车道出现。

项目需要解决的关键科学问题是自行车道纵坡度的设计范围，自行车高架道路的一个技术难点在于需要合适的纵坡度为设计依据，目前的城市道路技术规范较为简单，不能适应现有的要求，重新对该指标进行研究并修正是十分必要的。

1.3 技术路线

本项目主要通过以下七部分展开研究。

第一部分主要是研究背景、必要性、主要研究内容以及拟解决的关键问题。

第二部分主要总结高架自行车道的发展现状，主要包括高架自行车道的定义、类型、产生与发展以及特点与优势等。

第三部分是国内外案例分析，国外选取丹麦、荷兰、伦敦和德国，国内选取厦门、成都和北京，从已有的这些案例中，分析总结到家自行车道设计的相关技术指标以及出入口纵坡设计形式等。

第四部分主要分析自行车的行驶特性，主要从自行车行驶驱动力、行驶阻力、行驶稳定性、制动性以及行驶速度等方面展开分析。

第五部分是自行车纵坡设计研究，分析纵坡坡度设计考虑因素和最大纵坡度以及纵坡坡长考虑因素和最大坡长限制，并归纳总结现有自行车道纵坡度及坡长设计规范。

第六部分是数据调查与分析，主要调查三个典型路段的坡长、坡度、非机动车道宽度等物理参数，调查自行车骑乘者的性别、年龄、骑行速度、自行车车型以及是否推行。通过这些参数来分析自行车坡度与速度等变量之间的关系。

第七部分是整个研究项目的总结。

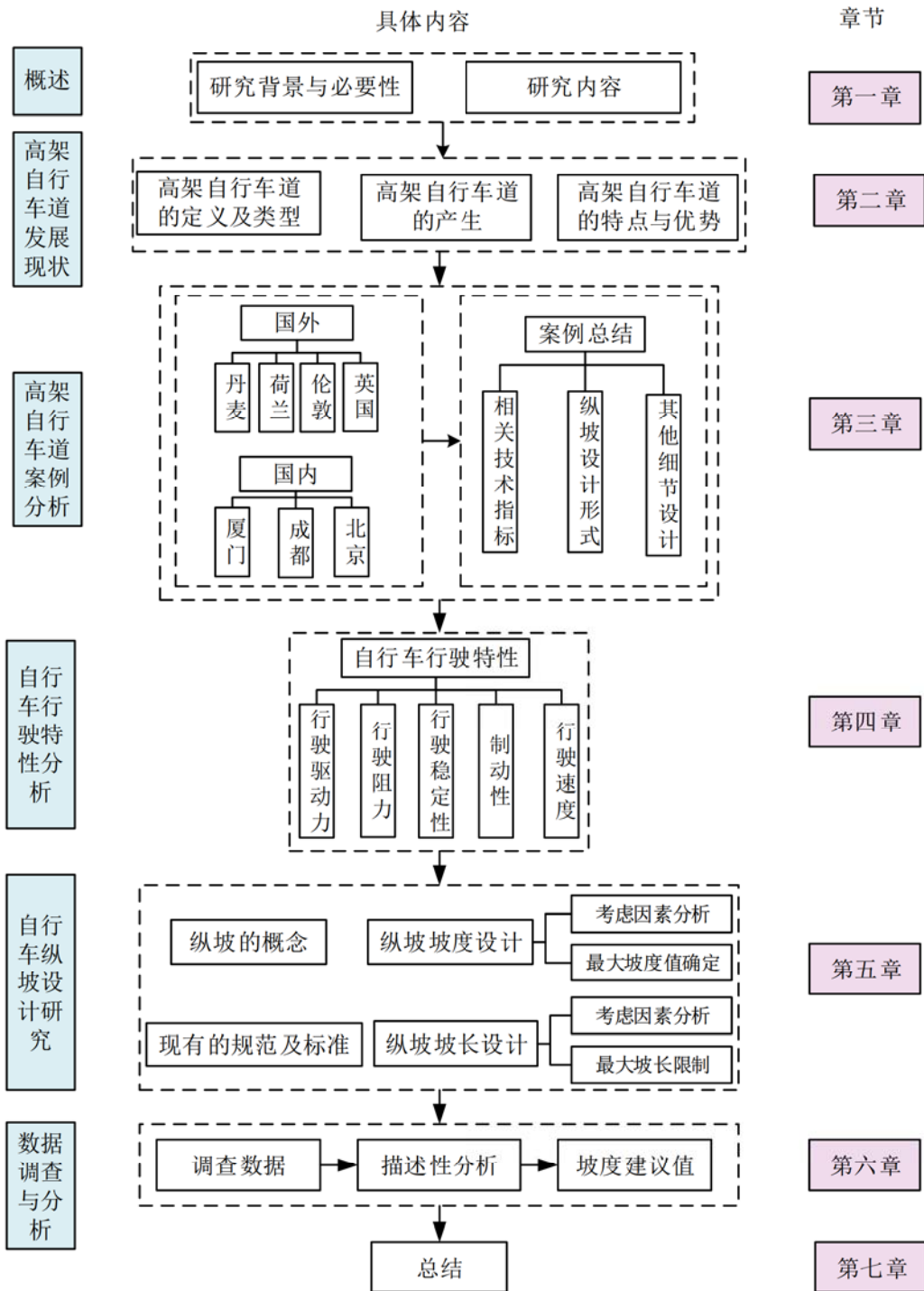


图 1-2 技术路线

2 高架自行车道发展现状

2.1 高架自行车道的定义及主要类型

自行车高速路（cycle superhighways），是指路面平坦宽阔、专门用于骑自行车的城市间交通线路。这些专用通道两边虽然不是全封闭的，但全程没有交叉路口，因此不用设红绿灯，路上禁止行人行走及汽车行驶，这使得骑车人能以极快的速度在两个城市间来往。自行车高速公路，目的是使自行车行驶更快、更安全，让市民骑自行车上班更加方便。并改善以自行车为出行方式的人们的骑车汽车环境，鼓励那些不热衷于骑自行车的人们开始新的交通方式，顺便保持体形，帮助减少交通拥堵，减少碳排。事实上虽然将自行车“高速路”在国外统称为 Cycle/Bicycle superhighway，但是不同国家也有不同的称呼方法，在英国、美国等国家将它称作为：Cycle/Bicycle superhighway，可以译为自行车高速路；在丹麦将它称为 Cykelmotorvej（bicycle motorway/erhighway）而在荷兰称其为 Fietssnelweg 或者 snelfietsroute，（bicycle highway, Highspeed cycle route 或者 fast cycle route）——自行车公路或者快速自行车路；在德国也将之称为 Radschnellweg（fast bike path）——快速自行车道。

自行车高架专用道，是指自行车享有独立行驶路权，不受行人及机动车干扰，全程与其它交通方式无交叉路口，保证出行便捷和安全，方便与其它交通站点及公共建筑物衔接的高架车道。

按照功能的不同，自行车高架专用道分为通勤出行型、休闲游憩型和局部节点型三类。

通勤出行型是目前最常见的类型，连接城市主要的居住区与商务办公、商业区，主要是为了满足市民通勤需求和日常出行需求。

休闲游憩型一般设置在城市主要公共空间，联系城市旅游资源点、公园和广场、滨水空间、休闲商业区等。

局部节点型主要是为了解决局部自行车通行问题，避免与行人和其它交通方式冲突而设置的自行车高架，如跨越十字路口、轨道、城市高速路或快速路、河

流等。

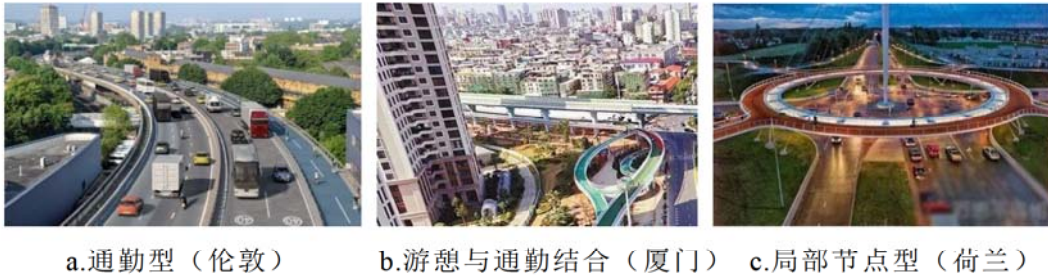


图 2-1 高架自行车道分类（按功能）

按结构形式，可以分为根据目前现有的自行车高速路一共分为了三种形式：全高架形式，局部高架形式，水平地面形式。

全高架形式：以厦门的“空中自行车道”和伦敦正在规划的“SkyCycle”为例，厦门空中自行车道是全国首条，目前世界上最长的高架车道；“SkyCycle”——一条在铁道上方的自行车道。高架形式主要是通过高架桥的形式将自行车道架在空中，主要存在如下几个问题：一则是成本高；二则出入口设置由于上下需要设置引道，如果高架路太高，需要长距离的引道才能满足标准，或者使用升降梯、螺旋形式的引道来保证骑行者可以上到道路，由于地形限制不能设置太多，对车道的使用造成了影响。三则是高度太高会对部分骑行者造成影响，也存在一定的危险性。

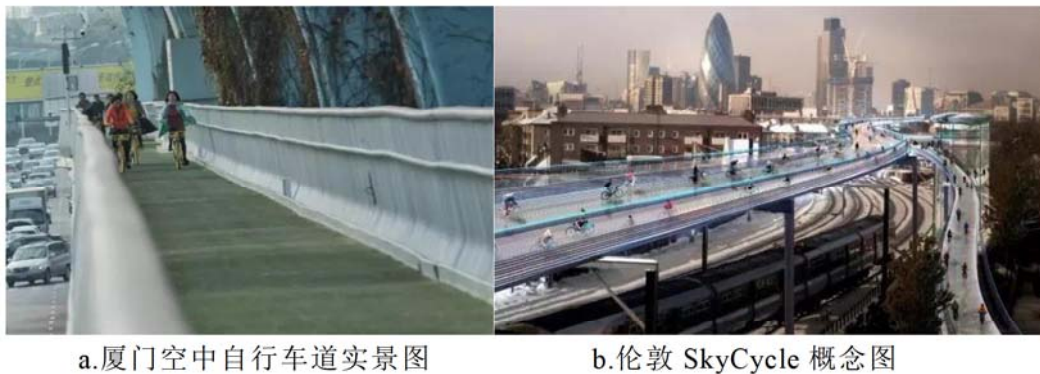


图 2-2 全高架自行车道

局部高架车道：局部高架顾名思义，就是在一部分通过河流、道路、困难路段甚至是在交叉口使用高架桥的形式，方便骑行者通过。大部分使用主要是通过河流，高速路等地段。如果是在交叉口设置，可以保证骑行者的通畅，但是每经过一个交叉口都需要上下坡，而且为了满足规范可能会造成第一个坡的引道还没

有结束，就要开始爬第二坡，对于这类形式的应用还需要在思考一下。

如荷兰的F325自行车快速路的跨河段来展示局部高架形式——F325自行车快速路，跨越瓦尔河连接阿纳姆与奈梅亨两座城。由于当地地形的限制、空间不足等问题，在路线南段起始段采用了高架形式，沿原有的铁路桥西侧设置，跨越了瓦尔河后，用平缓的坡道回到水平地面，全程高架路段共2公里。



图 2-3 顺着原有道路高架起来



图 2-4 沿着原有铁路桥，通过瓦尔河，可以看到左侧为铁道，右侧高架桥



图 2-5 通过将近 600 米的下坡，连接到地面

水平形式：通过改造优化现有的道路、设施，给骑行者提供独立的路权，用鲜艳的颜色引导骑行者。对于平面形式影响最大的是交通信号灯，影响了速度和

骑行体验。和周围道路的隔离、管理也需要需要下一番功夫来防止汽车占道，停放等问题。如伦敦的 CS3 和 CS7 这两条线部分路段处于伦敦市区，在人口较为密集的区域。



图 2-6 部分路段通过凸起的石头分开车道



图 2-7 部分路段较宽的隔离带

具体而言，自行车高架快速路在建设时可分为以下四种布设方式。

- 1.侧挂式：利用现有高架的结构，在旁边新增一条自行车专用道；
- 2.底挂式：利用现有高架的结构，在桥墩处加建自行车专用道；
- 3.现有高架改建：利用原有高架绿道改建；
- 4.新建高架：利用现有道路中央分隔带或路侧绿化带新建自行车高架。

2.2 高架自行车道的产生与发展

自行车高速公路最初起源于英美，成型于丹麦和荷兰，在近几年引进中国，于 2016 年 10 月正式落地于厦门。

早在 1897 年，一名美国洛杉矶人就提出了这个想法。当时美国还未进入汽车时代，当地富人有不少都喜欢骑自行车出行，名为 Horace Dobbins 的富翁就萌生了修建自行车专用道的想法。按照 Horace Dobbins 的设想，这条自行车专用道

将采用封闭收费运营，单程收费 10 美分，往返 15 美分，这也许也是之后汽车高速公路的雏形。不过，随着汽车在美国的快速普及，自行车高速公路的提议就被人们遗忘，这条路最终只完成了两公里。

1900 年，第一条自行车高速路在加州开通，连接了帕萨迪纳的格林和雷蒙德酒店。这条专为骑自行车的人修建的专用高速公路是木质的，使用者要为此付出 10 美分的代价——但它的成功是短暂的。当时，骑自行车的人数在下降，而且在本世纪末之前就被取消了。



图 2-8 1900 年，加利福尼亚帕萨迪纳的高架自行车道

在修建真正的自行车高速公路方面，丹麦人和荷兰人是伟大的先驱者。虽然丹麦的超级赛克西兰人集中在哥本哈根及其周边地区，但荷兰拥有一个遍布全国的约 20 个赛克西兰人的网络。2006 年，荷兰开始修建自行车高速公路，以应对交通堵塞。2012 年建成 The Hovenring，位于荷兰北布拉班特。丹麦第一条自行车高速路于 2012 年建成，连接哥本哈根市中心和阿尔贝特斯隆的市郊，长度为 22 千米。

截止目前，世界上只有五个国家建设了自行车高速路。但实际上从 19 世纪末期，洛杉矶就计划实施自行车高速路；多伦多在 2004 年计划建设一条玻璃全封闭式的自行车道，可以应付各种天气情况，没有汽车；瑞典在 2012 年计划建设自行车高速路连接隆德和马尔默，设置为两车道，用隔离墙将机动车分开，同时在侧面设置自行车服务车站；在 2012 年，墨尔本一个建筑师与工程师的联盟，想建设一条沿铁路的高架自行车道。但是这些计划最终都由于各种原因而被放弃。而且伦敦更是计划在未来建设 SkyCycle——“空中自行车道”，一个建在铁道上方的高架自行车道网络，可以想象如果这张覆盖伦敦的自行车网络成型，又将会

为我们打开自行车网络建设的新思路。

2.3 高架自行车道的特点与优势

实现高速骑行的主要手段，主要有三种：

一是减少交叉口数量，如郊区绿道，适合连接城区和郊区；二是路段消除机动车的干扰，交叉口通过优化交通信号实现自行车绿波，这种情况适合广大城市地区；三是全程封闭的高架桥或地道，适合特殊地段（跨越河道、铁路、局部空间紧张等）。自行车高架专用道有四大主要特点：

（1）独立路权，全程无交叉口。设置专门的高架用于自行车行驶，避免与机动车和行人的路权冲突，全程与其它交通方式无交叉，保障自行车行驶的快捷和安全。

（2）设置灵活，受用地限制小。自行车高架专用道较地面自行车专用道相比，所占用地小，且可利用现状高架桥的结构，设置在高架桥两侧或挂在高架桥桥墩上，部分路段甚至可以利用废弃的高架道路、铁道，或通过地下隧道的方式解决，设置灵活，受用地限制小。

（3）通行速度快。自行车高架专用道的设计时速 25km/h 以上，高于部分城市高峰时期主干道的汽车通行速度（如广州高峰主干道平均时速仅为 20.2km/h），大大节约市民的通勤成本。

（4）低碳环保，绿色出行。在倡导节约环保和可持续发展的今天，自行车作为绿色无污染的出行方式，不仅可以配合地面地下的公交及地铁系统，分流城市交通压力，也可以实现多元复合化的出行方式，满足不同的出行需求，大大提升城市公共交通的出行品质。

3 高架自行车道案例分析

3.1 国外

3.1.1 丹麦

2012年4月17日，丹麦的第一条自行车高速公路（从首都哥本哈根到阿尔贝特斯隆市）问世，全长22公里，该线路担负着连接首都中心和广阔郊区的重任。公路全程配备有先进的电子交通信号系统，以尽量避免上下班高峰时段可能出现的拥堵。总计划建设26条自行车高速路，总长度超过500千米，现在已建成开通4条线路，主要为平面形式。建设自行车高速路的初衷是由于5公里下的出行中有60%的人使用自行车，超过5公里只有20%的人使用自行车，为了鼓励居民使用自行车出行。而目标群体为通勤距离在5-15千米之间的通勤者。大部分自行车高速并没有使用鲜艳颜料进行区分，而是使用简单白线区分，或者高出机动车路面。此外沿途每隔1英里（1.6公里）处就设有一个服务站，集中了自行车充气处、修理处和停靠休息室，为骑车族提供种种方便。

图3-1为丹麦自行车高速网络，深橘色为已经建成，淡橘色为已经投资，灰色为已经规划。



图3-1 丹麦自行车高速网络

丹麦首都——哥本哈根素有“自行车之都”、“自行车最佳城市”和“世界最适宜居住城市”的美称，来到这个自行车远比汽车还要多的城市（约有四百多

万辆), 自行车不只是代步工具, 更是一种时尚流行。在哥本哈根光是专门为自行车开设的专用道就大约有 390 公里, 而且这个数字至今仍旧不断的在增加当中。丹麦政府以 2025 年成为世界第一个“零碳排放”城市为目标, 因此在绿色交通的建设上一直不遗余力。其实, 早在上个世纪的 80 年代, 哥本哈根政府就开始了整治空气污染的政策, 鼓励居民尽量用自行车作为日常交通工具, 并且开始规划建设自行车专用道。为了鼓励更多人骑自行车, 哥本哈根政府甚至连各部门首长也是骑着自行车上下班, 以真正达到带头作用。

哥本哈根技术和环境部的数据显示, 在 2016 年哥本哈根全方式出行中自行车占到了 29%, 在通勤出行中占到 41%。之所以有这样的成效, 与城市中便捷的自行车系统是密不可分的。

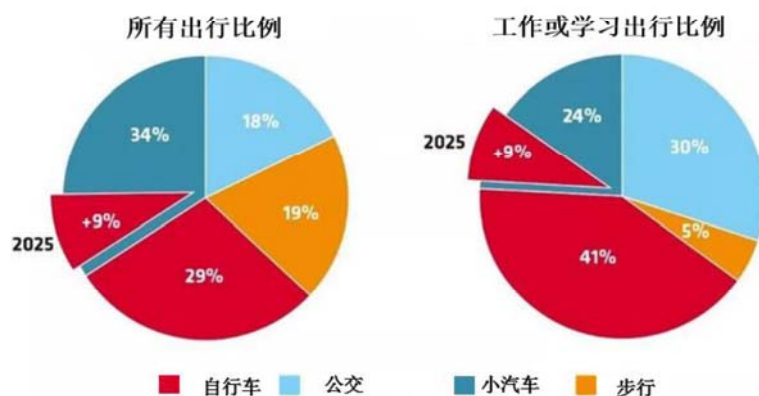


图 3-2 2016 年哥本哈根全方式和通勤方式比例

哥本哈根目前的自行车道长度总计超过 390 公里。市政府 2006 年至 2010 年总共斥资 2.5 亿丹麦克朗 (约合 4464 万美元) 建设自行车基础设施, 2011 年还要额外拨款 7500 万克朗 (1339 万美元)。在高峰时段, 自行车主要干道的交通灯系统会调至绿色, 骑自行车者因此可以优先通过。如果骑车者保持均匀的骑行速度, 比如大概每小时行驶 19 公里, 就可以借助这个系统一路骑过城区而不用等红灯。但因使用者过多, 自行车道也出现拥堵。因此哥本哈根已经预备建造国内外上批的自行车高速公路。

根据计划, 2011 年底, 两条从市中心通往郊区的 15 公里长的自行车高速路将建成。建设者将在街两旁各修一条 4 米宽自行车专门设计道 (哥本哈根街道相对狭窄); 沿途设立多处休息站, 提供充气服务, 并备有简单的修车工具和饮用

水；采用自行车优先交通信号系统，将引进“智能交通系统”，比如利用 FRID 或 GPS 导航技术，在自行车车把上安装一种装置，可以让骑车人组成“车群”，有效控制骑车节奏，实现一路绿灯、畅通无阻。到 2012 年，另一条 20 公里长的自行车高速路也将建成通车。

2015 年在哥本哈根市区，本地建筑公司 Dissing+Weitling 设计了“Cykelslangen”——一座横穿城市港口的高架自行车行车斜坡，全长 235m，连通了海港大桥和城市公路，这个设计将城市交通拥挤地段的步行者和自行车骑行者分开，从 Kalvebod Brygge 滨水空间跨越到达 Brygge 岛。方便了快速骑车人士超过缓慢的运货自行车及在码头驻足的行人，避免行人与自行车使用人的冲突，高架桥有足够的空间，足够快速骑行者超越相对较慢的运货自行车，快速到达购物中心主入口。丹麦首都的这项最新的可持续性首创项目避免了自行车与步行者的碰撞，使得步行者可以安全在整个码头穿行，同时为自行车骑行者提供了高效穿越这片区域的专用道路，在穿越过程中骑行者也会欣赏到独特的令人激动的景象。

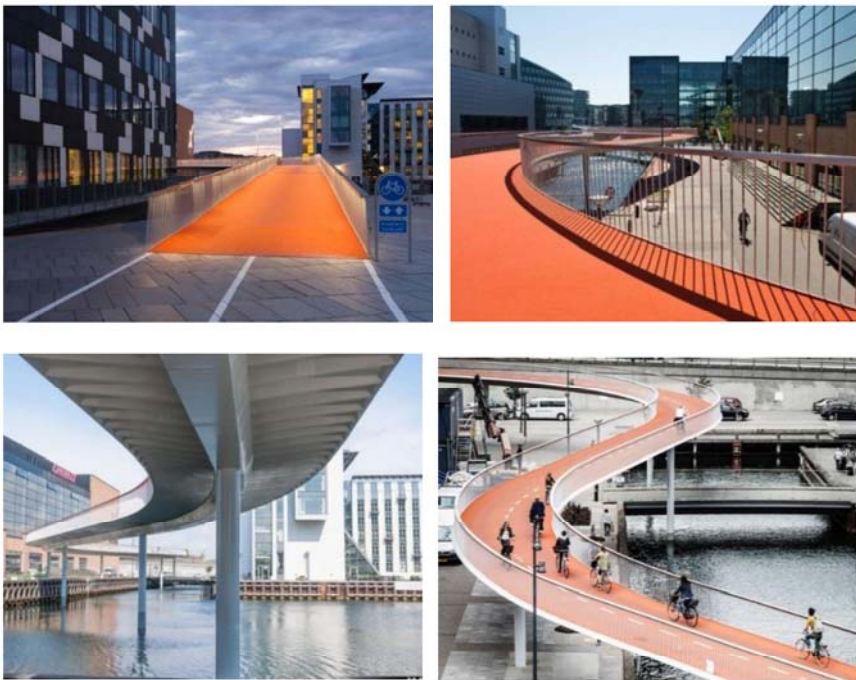


图 3-3 哥本哈根 cykelslangen 高架自行车道

目前，哥本哈根市政府已实现了四年前定下的目标：让至少一半的哥本哈根市民把自行车当作日常上下班的交通工具。市政府做出的下一个决定是：改造自

上一世纪 80 年代起修建的总长度约 400 公里的自行车专用道，其中有条件的尽力升级为自行车高速公路，最终首都周边将拥有 26 条完全达标的标准化自行车高速公路，以吸引更多的市民“以骑代驾”进出哥本哈根。随着越来越多自行车高速公路的达标，大多数丹麦人去 30 公里以内的地点的“第一选择”已是骑车。

哥本哈根对自行车在信号上的尊重，除了体现在较多路口设置了自行车专用信号灯外，还体现在一些主要道路上设置了自行车绿波带。为了提高自行车出行速度，在一些道路对信号灯进行协调，适应自行车的通行速度，从而减少骑车人旅途中在路口等待的次数。



图 3-4 哥本哈根自行车绿波带

同时，一些创新措施正在哥本哈根接受检验，其中包括：在高速公路两侧每隔一段距离加装固定的脚踏板，为的是让骑车人疲倦时不下车就可搁脚停车休息；新设计的“绿色波浪”电子系统可在车流最密集的高峰期，自动按照需求调节交通指示灯，以缓解偶尔可能出现的拥堵；特别设计一种以一定角度倾斜的垃圾桶，以便骑车人边骑行边投掷；开辟方便两人边骑车边交谈的“对话”车道；专为体弱的骑行者（如女性、老人或残疾人）在长途车道加设慢车道等等。

至于首都以外的其他城市，原有的自行车专道路况水平参差不齐，还有很大的改造空间。为了让骑车人能够把自行车骑得更远，丹麦的自行车高速公路规划者们喊出了这样一个口号：“让自行车高速公路超过州际公路”。这就意味着，前者不仅在密度和长度上须超越后者，而且在质量上也毫不逊色。

3.1.2 荷兰

荷兰有着世界上最早的自行车高速路，于 2003 建成，起初只是建设了一条 7 公里的示范段，全段使用沥青铺装，至少 3.5 米宽，目的是提供快速安全的骑行，同时也作为试验段来观察优质的自行车设施的设计能否增加自行车在城市和城镇的使用，结果相当成功，也为未来荷兰规划建设更多更完善的快速路网提供证据的支持。现在荷兰正在建设自己的高速路网络，已经完成了一小部分。高速路主要为平面形式，在跨河和一些路口处使用了高架的形式。图 3-5 为荷兰自行车快速路/高速路网，红色为已建成，蓝色为正在建设，绿色为有希望建设。



图 3-5 荷兰自行车快速路/高速路网



图 3-6 荷兰 F325 高速路实景图

荷兰交通部门近些年来平均每年都要投入数千万欧元，用以建造自行车高速公路。目前荷兰已拥有阿姆斯特丹至乌德勒支、布雷达至埃滕勒尔、海牙至莱顿、阿纳姆至奈梅亨等自行车高速公路线，另有五条也正在修建之中。

2012 年建成 Hovenring，位于荷兰北布拉班特。这个直径 72 米的圆环自行车交通天桥位于荷兰埃因霍温，位于城市的门户。附近房地产项目的发展导致原有道路不能满足交通需求，而地下的自行车交通道路和迂回的自行车线路都是政府不希望要的方案，最后，荷兰的桥梁专家用一个漂亮的圆环斜拉桥方案，满足了所有要求。桥由一个高 70 米的塔、24 根钢索和一个圆环形的桥面组成。钢索均匀分布拉住桥面的内侧防止桥面受力不均，地上的 M 支撑结构也保证了桥面的稳定。

项目的挑战之一便是整合空间，现有的基础设施会影响链接桥体的坡道斜率，为此将壳体下方的路面降低了 1.5 米，保证桥体与自行车道相连的坡道有一个舒适的倾斜度。此外造型优美轻薄的桥也克服了许多结构和技术上的挑战。

该城市的风离谱灯光公司为桥量身设计夜晚照明效果，将其打造成为壮观的“城市之光”。其中一条光带分布在路面的下方内侧，形成强烈的环带照明效果。栏杆上装置的 LED 灯照亮路面，保证夜间骑行安全。无论白天黑夜，这座塔桥都是一个直击人心的壮观存在。



图 3-7 荷兰 Hovenring 高架自行车道

3.1.3 伦敦

伦敦的高速自行车道称为自行车专用高速公路（Cycle Superhighway），第一条自行车高速路（CS）于 2010 年建成，现有 7 条自行车高速路，计划共建设 12 条，分别是南北自行车高速路，东西自行车高速路，CS1~CS5，CS7~CS11，呈网络状覆盖伦敦区域。主要是添加了自行车专用道；重新设计了交叉口，提高了自行车的优先度；改变了巴士站，为骑行者增加了新的支路；部分道路禁止机动车转向，为骑行提供更好的环境等，主要为平面形式。而且英国使用一种叫做

“Quietway”的自行车道，暂译为“静道”，建在交通流相对较小的街道上，来补充自行车高速网，主要给骑行者提供安全的骑行体验。截止到2015年，总共建成12条自行车高速路，由伦敦外围区通向市中心，骑行时速最高可达24km/h。

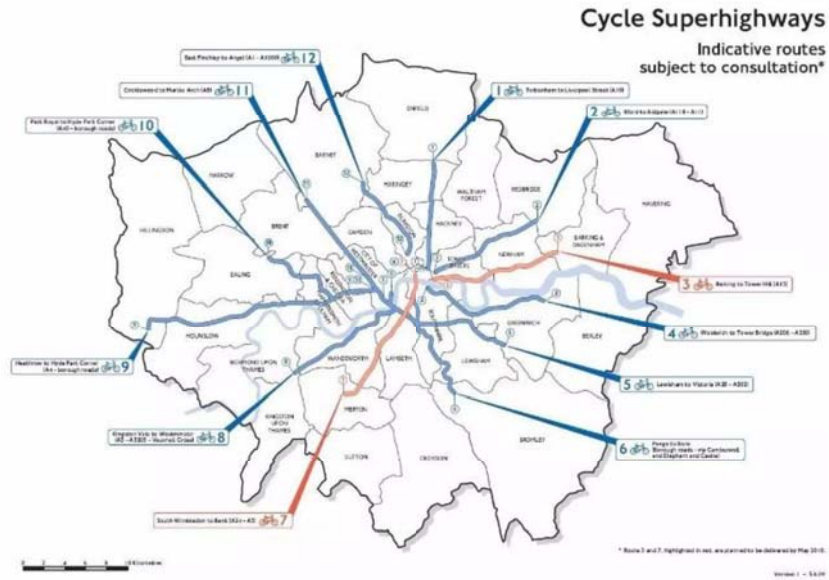


图 3-8 伦敦地区自行车高速路线示意图



图 3-9 伦敦自行车高速实景图

另外，是伦敦的自行车道拥有独立的交通信号系统，可以最大程度的避免自行车和汽车发生碰撞。事实上，该自行车道每小时可以输送 6000 人次，相当于 20 列地铁或者 82 辆巴士的运量。



图 3-10 伦敦的自行车道独立交通信号系统

伦敦计划在未来建设 SkyCycle——“空中自行车道”，一个建在铁道上方的高架自行车道网络，总共 221 公里，设置有 209 个出入口，宽度为 15 米，计划在高峰时期可以服务 40 万左右的骑行者。



图 3-11 SkyCycle 现阶段规划图

3.1.4 德国

拥有汽车王国之称的德国，也修建了属于自行车的高速公路。德国正在建设一条超过 100 公里的自行车高速路，称作 Radschnellweg 1 (RS1)，同时也正在规划建设总共 9 条连接不同地区的自行车高速。RS1 大部分是沿着鲁尔工业区废弃的铁轨展开，全部建成后，将连接 10 个德国西部城市与 4 所大学自行车高速车道为双向专用车道，宽度为 4 米，中间设有有分隔区。目标群体为居住在高速路附近 2 公里内的居民作为日常通勤使用。主要为平面形式，小部分也用了高架形式。

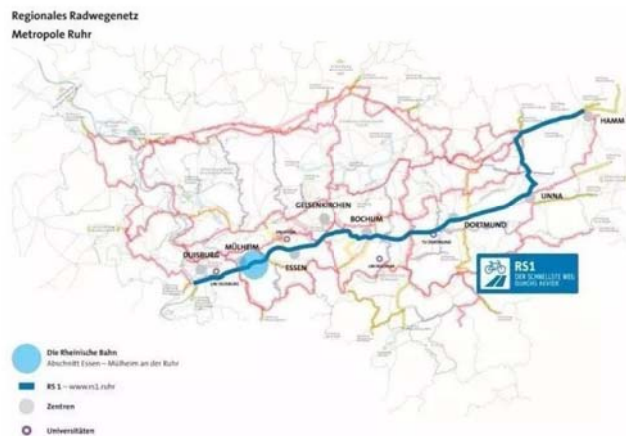


图 3-12 德国 RS1 路线示意图



图 3-13 德国 RS1 实景图

通过对于其他国家自行车高速目前情况的介绍，可以发现他们都是在将高速路呈网络状建设，覆盖大片地区，鼓励居民骑自行车进行出行。德国虽然只是一条，但是他们计划修建更多的自行车高速。而且可以从图片中看到，他们并没有将高速路一味地和周围相隔离，也会和周围有着很好的互动，并不是一提到“高速”就是从一个点到达另一个点的交通，毕竟自行车不同于汽车，骑车既是一种现代的交通方式，更是体验城市、观察别人的一种方式。

3.2 国内

3.2.1 厦门

2013 年，厦门全面启动岛内公共自行车系统建设，现已完成一期建设计划（约 100 公里），二期计划也相继启动（约 80 公里）。然而，传统的人非共板自行车道并未能带来舒适、连续、安全的骑行体验，甚至引发一系列人、车冲突。为了彻底改变这一局面，厦门城市建设管理者秉承科学规划理念，满足广大群众所需，并结合国外先进城市自行车高速路的规划建设案例，提出在岛内建设快速

自行车专用道,经过一系列研讨与论证,最终厦门云顶路空中自行车道应运而生。

《厦门市自行车道路系统初步规划》中将自行车道分为3种,见表3-1。根据该规划,厦门市的自行车道路网主要包括:①3条自行车高(快)速道,由沿铁路及海堤进出岛线、BRT沿线通道构成;②自行车主干道,由环岛线、部分主要绿道、岛内主要干道和部分次干道构成;③一般自行车道。其中,自行车高(快)速道的功能定位为:最大限度地避免机动车和行人对自行车道的干扰,提供快速、安全、舒适的骑行环境,以实现中、长距离(5 km)的通勤功能。其核心是拥有独立的路权。

表 3-1 自行车道分类表

车道类别	功能定位	路权形式	交叉形式	设计车速 (km/h)
自行车高(快)速路	骨干线,	专有	与人、机动车完全 分离	25~35
自行车专用道	承担骨架功能	专有	可与机动车平面 交叉	15~30
一般自行车道	自行车次干线、绿 道、旅游道、网络 主体	开放	与道路结合,平面 交叉	10~20

1. 设计过程

这座空中高架桥杰作作品背后的设计者,是来自丹麦的 Dissing+Weitling 建筑风格的建筑事务所完成。这条空中自行车高架桥刷新了世界纪录——是世界上长度最长的一座自行车高架桥,每次可行驶 2023 辆自行车。

途径多个市民聚焦点

这条示范段将与二个片区、五个大型居住社区、三个重要公建、四个大型商业广场及沿线公园、学校相衔接,沿途可服务瑞景商业广场、瑞景中学、忠仑公园、蔡塘广场、市政大厦、金尚小区、金山小区、市行政服务中心、湖里高新技术园、五缘湾等市民聚焦点。

与公共交通交互

为了满足市民多层次的出行需求，云顶路自行车专用道示范段的选址还特别注意与公共交通之间的交互。根据初步规划，全线将与普通公交 11 个站点、BRT6 处站点进行接驳，待未来地铁建成后，也有地铁 2 处站点供骑自行车的市民换乘。

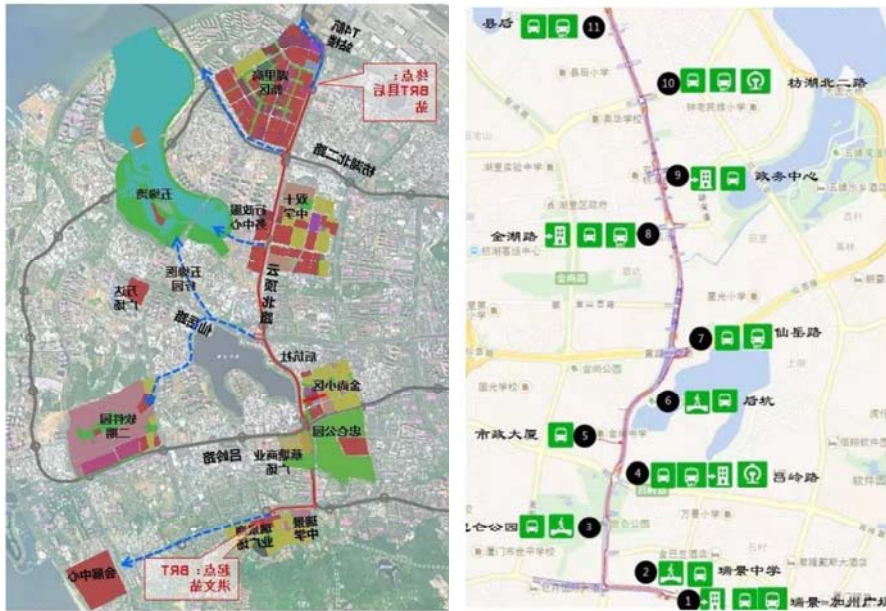


图 3-14 云顶路自行车专用道示范段选址示意图

厦门自行车高速是因地制宜的一个情况，因为它这条路上是一个 BRT 的全程高架，所以因地制宜地采用了全程高架的方式，主要采用钢箱梁的这种形式。如果这个 BRT 下面的净空足够，就采用那种分浮的，就是跨在这个 BRT 高架墩柱的两边，离 BRT 上面的净空大概是 2.5 米，离地面的净空大概是 5 米，单侧单道的两车道净宽是 2.5 米，总宽大概是 2.8 米。如果 BRT 下面净空不足，则把两个分浮合并起来甩到 BRT 路边上，大概净宽是 4.5 米，总宽是 4.8 米，这样就相当于是两个车道合并起来的一个情况，都是采用钢箱梁的造型，大概是 30 米做一个墩柱。

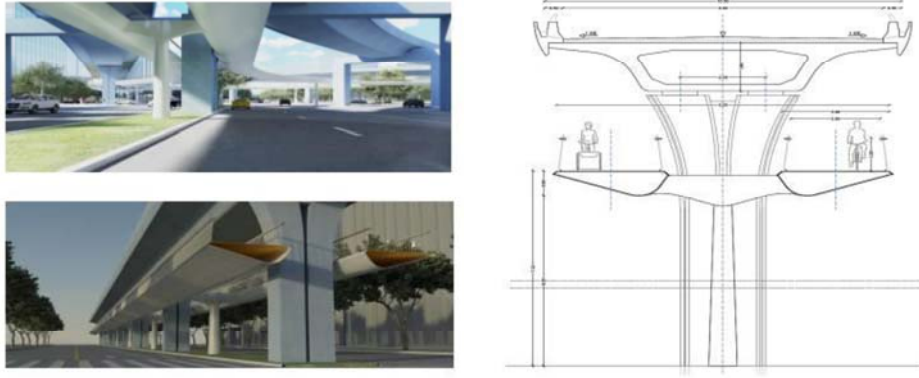


图 3-15 造型设计，采用高架形式

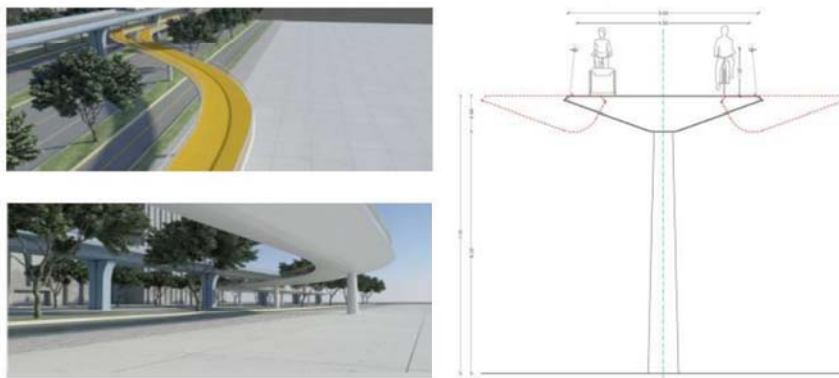


图 3-16 BRT 下面净空不足 2.5m 时，合并断面并甩至路侧

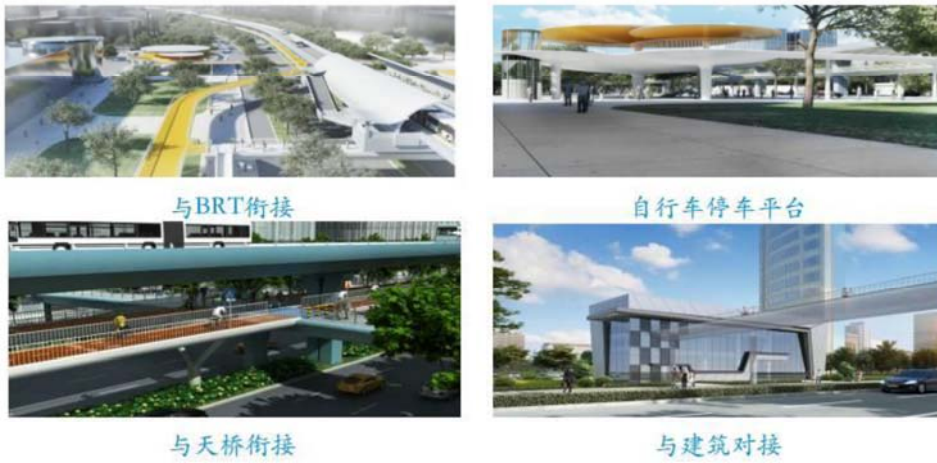


图 3-17 与周围附属设施的连接情况



图 3-18 坡道设计

2. 实施效果

2017年1月26日，全国首条空中自行车道——厦门云顶路自行车快速道示范段试运营，这是一个独立的骑行系统，为单侧单向两车道，净宽2.5米，总宽2.8米；合并段为双向四车道，净宽4.5米，总宽4.8米。空中自行车道每天开放的时间为上午6:30至晚间22:30，仅供公共自行车和社会自行车使用，禁止机动车辆、电动车和行人通行，设计峰值流量为单向2023辆/小时（达到80%时进行流量管控），设计时速为25 km/h。全线共建设了7个平台，共设置了355个公共自行车停车位和253个社会自行车停车位，每个平台都配备了自行车调度升降梯。厦门市公共自行车管理有限公司透露，自行车专用道通过采用多重传感监测技术、可见光及红外图像采集处理等技术途径实现对自行车、电动车和摩托车的快速通过式检测识别，并针对性地设计了自行车通行闸机和识别一体机等设备，可以保障自行车在专用道快速通行。



图 3-19 云顶路自行车快速道外观图



图 3-20 云顶路自行车快速道运营现状

全线共设置 11 处出入口，与 BRT 站点及建筑衔接的出入口均设置有停车平台，与地面衔接的出入口基本设置了自行车坡道，给予使用者提供了极大的方便。路段及节点位置指示标志齐全，同时部分节点设置了智能提示屏，停车等候区以及自行车减速带等，此外共设置了 7 处停车平台，同时保证了公共自行车以及社会自行车的停车需求。这些细节无不体现出设计者的用心及人文关怀。

有待提升的是部分路段坡度较大，骑行困难。空中自行车道全程高架设置，受地形地势影响，部分路段进行了长坡道设置，但坡度依然偏大，致使骑行体验度下降。



图 3-21 大坡度路段示意图

3.2.2 成都

1. 实施现状

2018 年 9 月 1 日上午，成都首条封闭式自行车“高速路”在邛崃市开通。

该自行车高速路全长 12.5 公里，采用彩色沥青混凝土行车道，路面宽 4.5 米，总投资约 1.3 亿元。该道路与其他道路立体交叉，并与社区级绿道无障碍联通。全段设置 3 个服务驿站，预计每年可实现交通分流 30 万人次。



图 3-22 成都高架自行车道规划路线

以这条自行车高速路为重要载体，邛崃市正在规划建设自行车高速生态文化旅游走廊，串联沿线历史文化和生态旅游资源，通过“政府引导+社会资本运营”，重点打造集旅游、文化、休闲、健身、景观、生态为主的“自行车高速品牌”。

旅游自行车高速公路实施全封闭运行，与道路相交时则采取立体交叉，实现无障碍联通，骑上自行车在道路行驶可谓“一路绿灯”畅通无阻。



图 3-23 成都高架自行车道建成现状

高架自行车道沿途有十方堂服务驿站、桃园驿站、平乐游客中心服务驿站为骑行游客提供各类服务。驿站主要有两个方面的功能：一是为骑行爱好者提供综合服务，包括骑游设备销售、租赁、维修、换洗、休憩、能量补充、医疗保障等，

让他们拥有更好的骑游体验；二是重点展示邛崃“名优特”产品及在“大众创业、万众创新”中创造出来具有邛崃特色的伴手礼。



图 3-24 高架自行车道途中驿站

2. 高速自行车道的作用：

1) 有力助推全市绿色低碳出行。

绿道线路主动衔接城市交通枢纽、城市换乘设施，尤其与高铁片区结合，实现绿道与交通枢纽的无缝衔接。城区居民、游客可通过邛崃市四通八达的城市绿道体系欣赏城市风光，也可通过城市绿道直接进入旅游自行车高速观田园山水、品特色农家、体验特色小镇旅游，实现全程绿色低碳骑行，减少碳排放，实现低碳环保。

2) 实现了特色区域的快速连通。

旅游自行车高速全程不设红绿灯、无交叉路口，通过自行车道物理隔离实现自行车专属路权，极大提高自行车出行分担率，在特色区域设立驿站，将十方堂邛窑文创片区、郭山村林盘、平乐古镇等文化、商业、旅游特色区域串珠成线形成整体，实现区域间快速连通。

3) 实施功能叠加，助推乡村振兴。

旅游自行车高速将邛崃文君相如文化、南丝路文化元素融入，成为邛崃对外形象展示窗口。同时其良好的基础条件，为我市对外举办各类大型活动创造了条件，借助该绿道举行如马拉松赛事、自行车特色赛事等，对城市推广起到了积极作用。并且旅游自行车高速沿途经过猕猴桃、柑橘、茶叶、青藤椒等特色农产品产业区，有力推动农业产业化项目与现代乡村旅游业，实现绿道“文体旅商农”经济的同步发展。

当前邛崃正依照“景观化、景区化、可进入、可参与”的理念，依托特有的文君相如文化、南丝路文化等文化资源以及自然景观构建全市绿道网络计划到2035年累计建成自行车专用道768公里。

3.2.3 北京

2016年，北京市城市规划设计研究院正在编制《北京市自行车出行环境改善示范项目——自行车“高速路”（回龙观—上地—中关村）》。北京拟建设首条自行车高速路线：可能两条线路方案：

第一种线路方案：从体育公园开始，南行至龙旗购物中心后继续往南，一公里后向西，穿越京藏高速和京新高速到达上地产业园。

第二种线路方案：途经材料创新园、清河，一共15.3公里。因其穿越了很多绿化带，可以成为休闲型的骑乘路线。



图 3-25 北京回龙观高架自行车道选线方案

自行车高速路建成后，按照直线距离算，以每小时15公里的正常骑行速度，

回龙观到上地 6.3 公里，需要 25 分钟；回龙观到中关村 13.9 公里，需要不到 1 小时。

其中 5.5 公里为起点到西二旗北路，是新建的道路；西二旗北路到终点有 1 公里，是用现有道路改造。“之所以选从回龙观到上地，一是因为距离上看，直线距离 3.8 公里，骑行距离适合；二从需求上来看，是大型居住区到高新产业区，1.16 万人有早晚通勤需求，占回龙观地区工作人口的 13.8%，但现在有道路拥堵、轨道限流、公交速度慢等等问题。”其设计特点有：

1. 时速 20 公里，8 对出入口

这首条自行车专用路宽度的确定，论证后决定为双向 6 米，中间没有硬隔离、采用划线方式，设计速度 20 公里/小时，全线有 8 对出入口。

2. 将设闸机，严禁电动车通行

专用路是双向 4 车道，中间设有多功能车道（有潮汐车道、超车道功能），不允许机动车、电动车、行人进入，用闸机保障电动车、机动车进不了，骑行者右侧单向通行，不得逆向行驶，除专门设置的停放点和服务点外，专用路上禁止停车。

规划：延伸至中关村

目前八达岭附近居民跨京藏高速不方便，经常有人通过铁路穿行，非常危险。这次建设专用路专门设计了过街功能，八达岭区域加宽到 10 米，除了 6.5 米专用路，还留了 3.5 米给沿线居民过街使用。”另据透露，这 6.5 公里是一期，“今后上地软件园往西计划还有 2.5 公里二期的规划，中关村大街往南会有三期，远期规划考虑则一直想做到中关村、四环。”

管理：研究北京模式

北京市路政局道路建设工程项目管理中心主任表示，自行车专用路在国外比较成熟，荷兰、德国、丹麦都有，骑行速度可达 20 公里/小时，甚至更快。国内比如厦门也有第一条自行车专用路，设计时速最高为 25 公里/小时，它是一条封闭道路，6 点半到 10 点半开放，其余时间关闭。自行车专用路是点对点定向通

行，直达，少爬坡。

3.3 案例总结

3.3.1 相关技术指标

通过以上案例，高架自行车道的设计指标主要有以下几点：

1. 自行车高架快速路设计净空高度在 4~4.5 米；
2. 高架车道宽度设计为来回方向双车道约 4 米宽；
3. 一般自行车的行驶速度在 10~15km/h，而在高架快速路行驶的自行车理想速度应不低于 25km/h；
4. 自行车高架快速路的纵断面上坡设计坡度 1.5~2%，纵断面下坡设计坡度 2.5~3%；
5. 自行车上下高架的混合梯设计高度约为 3~3.5 米；
6. 匝道形式应尽量防止电动车和摩托车等上高架。

3.3.2 出入口纵坡设计形式

1. 出入口匝道形式

厦门在部分的地方使用了螺旋而上的方法，荷兰的高架桥或桥梁，如果沿原线路则使用了长坡道上下，如果中途进入使用了电梯或升降梯或楼梯的方式进出。可以总结为以下三种：

- ①长坡道或螺旋上升的引道；
- ②电梯、升降梯或楼梯，若为楼梯则应设置专门推行自行车的轨道；
- ③坡道踏步混合梯的形式，一方面这样的结构形式占地面积较小，另一方面，这种形式方便于骑车人和自行车的上下坡出入，还能阻止其他三轮车、电动车等进入自行车高架。



螺旋而上

电梯或者升降梯

自行车轨道

图 3-26 高架自行车到进出口部分设计形式

2. 出入口数量

按照自行车高速最小设计时速 25km/h 为标准，建议出入口之间最小间距为 400m。

3.3.3 其他细节设计

1. 平面交叉路口通行方式

自行车快速道虽然属于非机动车道，但骑行速度可达 25~35 km/h。为了保证自行车的通行和人行通道上行人的安全，自行车快速道在与横向人行天桥等设施交叉时，其道口应设置如下交通设施：

- ①自行车道设置停车让行警示标志、标线；
- ②进入路口段前 30m 采用醒目的颜色铺装；
- ③栏杆边设踏板，以方便骑行者免下车搁脚支撑；
- ④设置可辨别行人与骑行者的识别系统，并设置仅针对骑行者开启的闸口；
- ⑤若为较大型交叉口，可适当设置信号灯控制。

2. 桥梁栏杆高度

各国规范规定的自行车桥梁栏杆高度各不相同。其中，丹麦的栏杆高度为 1.2m；荷兰根据骑车人重心高度 1.2m（荷兰人平均身高全球第一）而规定栏杆高度为 1.2~1.3m；美国规范规定不可低于 42 英寸（1.07m）；英国规范的推荐值为 1.4m。

从国内的情况来看，在设计厦门云顶路自行车快速道时，为了确定该自行车快速道的桥梁栏杆高度，工作人员在厦门市的天桥上进行了实地测试。骑行模特身高 1.76m，重心位置约 1.05m。骑行模特分别体验了 1.5m 和 1.3m 两种高度的栏杆，最后通过测试决定选用 1.3m。该栏杆高度既能满足骑行者的安全性要求，又不会对骑行者产生太大的压迫感。

3. 标识

英国在小部分的路口处设置了“give way”的标志，提醒机动车给自行车让行，而荷兰在标志下加入了自行车和相对的箭头来提醒机动车。



图 3-27 自行车高速路标识

4. 观景台/休息平台

观景台/休息台多设置在高架桥，或者自行车桥上，给予行人或者骑行者观赏周围风景和短暂提供便利。可以根据实际情况设置观景台，休息平台的位置。下图分别给了 De Oversteek 桥，和高架桥设置的观景台/休息平台的图片。



图 3-28 自行车高速路观景台/休息平台设计

通过以上案例总结可以看到，对于高架自行车道纵坡的设计并没有一个统一完整的指标体系。以上案例都是根据普通自行车道纵坡的设计规范展开。所以，完善该项指标的研究，对于完善自行车道设计标准，提高自行车道设计内容有着重要意义。

4 自行车行驶特性分析

自行车在行驶中与道路条件密切相关的特性主要有动力特性、行驶的稳定性和制动性。而研究自行车的动力特性，就是确定自行车沿行驶方向的运动状态。为此，需要研究自行车的驱动力和行驶阻力。在本文中骑行者质量为 m ，人与车的总质量 M ，前后轮半径为 R ，链轮齿数与飞轮齿数分别为 n_0, n_1 ，速度比 $i_g = n_0/n_1$ 。（本文只考虑后轮驱动）。

4.1 自行车行驶动力与行驶阻力

4.1.1 驱动力

自行车在行驶的过程中需要克服各种运动阻力，为了克服这些阻力，自行车必须具有足够的动力。自行车不同于机动车，机动车的动力来自于它的内燃发动机，将热能转变成机械能，而自行车的动力是人的踏动力，通过简单的传动关系，把人依赖于自身重量对车拐踏板的踏动力转化为驱动自行车运动的推动力，从而提高自行车的速度。

决定驱动性能的因素主要有两个：一个是速度比，即大链盘与飞轮的齿数比，速度比过大或者过小都不能最好地发挥人的蹬力；另一个是脚踏曲柄的长度。人凭自身重力 mg 或部分重量踏曲柄，对前链轮产生一个顺时针的力矩。

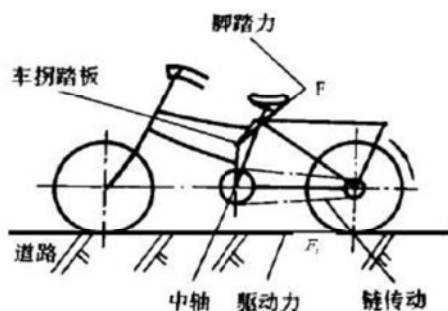


图 4-1 自行车驱动力示意图

$$M_t = F * L \quad (4-1)$$

式中：

M_t ——人踩踏时产生的力矩；

F ——人的脚踏力，(N)；

L ——曲柄的长度，(m)。

人的脚踏力通过曲柄带动链轮的转动，链轮又通过链条带动飞轮的转动，飞轮进而带动后轮转动。在这个力矩传动过程中会产生一部分的损失，就是我们所说的机械的传动效率。

踩踏关节的损失： $\eta_1 = 0.97$

链传动的损失： $\eta_2 = 0.96$

滑动轴承（一对）： $\eta_3 = 0.97$

则 $\eta_t = \eta_1 \eta_2 \eta_3^2 = 0.88$

而作用于自行车的驱动力

$$F_t = \frac{M}{R} = \frac{M_t i_g \eta_t}{R} \quad (4-2)$$

式中：

i_g ——速度比，取 2.5；

R ——轮胎半径，一般自行车的轮胎半径为 0.33m；

η_t ——机械的传动效率。

4.1.2 阻力

1. 坡度阻力

在具有纵向坡度的路面上，当自行车上坡时，由于重力的作用，会受到在平行于路面方向与骑行的方向相反的上坡阻力；下坡时，会受到重力引起的在平行于路面方向与骑行方向相同的下坡阻力。

坡道阻力 F_i ，上坡为正，下坡为负。

2. 加速阻力

部分是自行车旋转的旋转质量。加速时，不仅平移质量产生惯性力，旋转的质量也要产生惯性力偶矩。为了方便换算，将惯性力偶矩转化为平移质量的惯性力。

$$F_j = m \frac{du}{dt} + \frac{I}{r} \frac{dw}{dt} = \left(m + \frac{I}{r^2}\right) \frac{du}{dt} \quad (4-3)$$

综上所述，自行车的总的行驶阻力为

$$\sum F = F_f + F_w + F_i + F_j = F_z f + \frac{1}{2} C_D A \rho u_r^2 + G_i + \left(m + \frac{I}{r^2}\right) \frac{du}{dt} \quad (4-4)$$

4.2 自行车行驶条件

1. 自行车行驶的必要条件

自行车要想在道路上行驶，必须要有足够的驱动力来克服各种行驶阻力。当驱动力与各种行驶阻力的代数和相等的时候，驱动平衡，自行车就会等速行驶；当驱动力大于各种阻力之和时，自行车就会加速行驶；当驱动力小于各种阻力之和时，自行车就会减速行驶，直到停车。所以，要使自行车行驶，必须具有足够的驱动力来克服各种阻力，即 $F_i \geq F_f + F_w + F_i + F_j$ 。

2. 自行车行驶的充分条件

若自行车的驱动轮与路面之间的附着力不够大，车轮将在路面上打滑，不能行进。所以自行车要正常行驶，还要看轮胎与路面之间的附着条件。自行车行驶的充分条件是驱动力小于或等于轮胎与路面之间的附着力，即 $F_i \leq \phi G_k$ 。

ϕ 为附着系数，主要取决于路面的粗糙程度和潮湿泥泞程度、轮胎的花纹和气压以及车速和荷载等，良好沥青路面取 0.51-0.56； G_k 为驱动轮荷载，一般为自行车和人总重的 0.5-0.6 倍。

4.3 自行车行驶特性

4.3.1 行驶稳定性

自行车是一种两轮机构，不具有传统的三角稳定性，所以它具有摇摆特性，自身的平衡能力较差。在自行车行驶过程中，并不是沿着一条直线运动，而是围绕着这条直线做左右摇摆，呈一定的正弦性，预示着自行车在运动的过程中不断地进行着转向运动。而且自行车的转向运动与三轮或者四轮车辆有着本质的区别，它主要依靠人车共同作用，使离心力和重力相对于地面接触点达到力矩平衡，以

达到转向的目的，具体力学图如下所示。

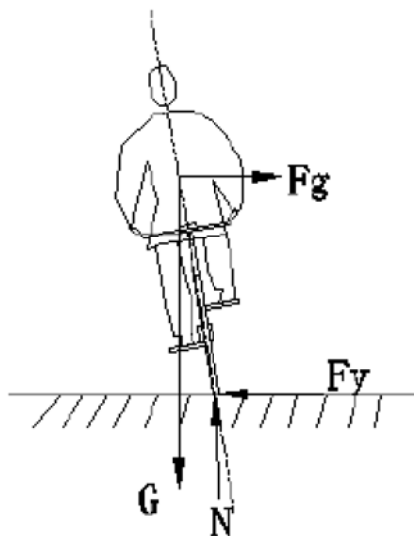


图 4-2 自行车转弯力学分析

自行车向内倾斜角为 α ，离心力 F_g 相对于轮胎接地点的力矩企图使自行车能够向外侧翻转，而重力 G 相对于轮胎接地点的力矩则是企图自行车向内翻转，根据力矩平衡原理，则应有

$$G \sin \alpha = F_g \cos \alpha \quad (4-5)$$

而

$$F_g = \frac{Gv^2}{gR} \quad (4-6)$$

将公式 (4-6) 代入公式 (4-5) 可得

$$\tan \alpha = \frac{v^2}{gR} \quad (4-7)$$

式中：

α ——自行车向内倾斜角度；

v ——自行车行驶速度；

R ——行驶轨迹的曲率半径。

分析可以得出，向内侧倾角随着自行车车速 v 的增大而增大，随着行驶轨迹

的曲率半径 R 的增大而减小。当自行车以低速行驶时, α 角应很小, 或者通过骑行者身体向内倾斜而保持自行车车体的稳定, 随着车速的增大, 车体倾斜越来越明显。这样一来使车和车之间的安全距离变大, 与同车道行驶车辆接触的机会增大, 安全性降低。当自行车直线行驶时, 随着车速的增加, 自行车的横向稳定性越好, 代表 α 角越小, 那么行驶轨迹的曲率半径应该增大, 越来越接近于直线行驶, 自行车的行驶稳定性越好。要维持自行车的高速和大的内倾角, 则必须保证自行车不发生侧滑现象。自行车侧滑时的临界速度为 v_0 , 发生侧滑时的侧滑力为 F_y , 由路面切向平衡条件可得

$$F_g = F_y = \varphi G \quad (4-8)$$

将公式 (4-8) 代入公式 (4-6) 可得

$$v_\varphi = \sqrt{gR\varphi} \quad (4-9)$$

将公式 (4-9) 代入公式 (4-7) 可得

$$\tan \alpha = \frac{gR\varphi}{gR} = \varphi \quad (4-10)$$

式中:

φ ——路面附着系数;

即 α 角最大值不应该超过路面附着系数 φ , 否则将发生侧滑。

4.3.2 制动性

自行车的制动性能跟行驶安全性紧密相关。自行车的制动性不同于机动车, 机动车采用的是液压制动, 可以获得较大的制动力, 实现很快的减速, 而自行车是靠手刹制动, 通过手闸使得闸皮和车轮之间发生摩擦而产生制动力, 使自行车慢慢减速直至安全平稳的停住。自行车减速较慢, 减速度一般为 -2m/s^2 。

自行车紧急制动时, 如果前闸比后闸效果好, 即前轮先停止, 由于惯性的作用自行车的重心会前移, 前轴位置固定, 人车的重心水平位置高于前轴, 惯性将导致人车前滚翻。后轮先停止时, 因为车辆刹车时由于惯性会导致重心前移, 刹车力度大时, 后轮对地面的压力会减为零, 这样摩擦力也就为零, 非常容易导致

车辆侧滑。在我国，自行车的制动性能的评价指标是自行车的制动距离。

GB3565-2005《自行车安全要求》中对制动性能的技术要求见下表。

表 4-1 制动试验的速度和制动距离

实验条件	实验速度 (km/h)	使用车闸	制动距离 (m)
干态	25	使用两个闸	7
		单用后闸	15
湿态	16	使用两个闸	9
		单用后闸	19

4.4 自行车行驶速度

自行车的速度对道路曲线半径、超高等设计指标的确定起重要作用。

自行车的速度因人而异，骑车人的出行目的、年龄和身体状况的不同都会导致自行车速度的差异。此外，道路条件也会对自行车的速度产生影响，比如：自行车与机动车分隔情况，路边的停车点及障碍物，车道宽度、道路的坡度等。当然，天气的变化也会影响行车速度，尤其是风、雨天气的影响较大。在设计自行车道时所考虑的自行车的设计速度一般采用良好天气下正常骑车人的速度。

自行车的速度分为瞬时速度、时速、巡航速度和平均速度四类。所谓瞬时速度是指自行车在骑行中任一个瞬间达到的速度，由于瞬时速度受许多不确定因素的影响，差异较大，不具有代表性，故不作为研究对象。而时速、巡航速度（骑行中状态比较稳定、在比较长的一段时间内变化很小的保持的速度）和平均速度相对稳定，具有路段代表性，故一般以平均速度作为研究对象。对大量自行车的速度数据调查显示，有分隔带的自行车道的自行车平均速度为 20km/h，划线分隔的自行车道的自行车平均速度为 16km/h。自行车的骑行速度范围一般为 5km/h~30km/h，自行车在爬坡路段速度可能达到最小速度 5km/h，自行车道平路的设计速度建议采用 10km/h~30km/h。

5 自行车纵坡设计研究

5.1 纵坡的概念

城市道路线形指标包括平面线形指标和纵断面线形指标。平面线形指标主要控制直线与平曲线的长度，圆曲线的半径与超高；纵断面线形指标主要控制纵坡的坡度与坡长以及竖曲线的半径和长度。城市道路线形设计是否合理，直接影响道路的交通安全。

其中，纵坡度是路基（路面）纵向的坡度，简称纵坡，也即平常我们所说的路线的坡度。如图 5-1 所示，在一个坡高 H ，坡长 L 的坡上，纵坡就是高差 H 与水平距离 L_0 的比，也就是坡角 θ 的余切值，即 $\tan \theta = H/L_0$ ，纵坡一般用百分比表示。

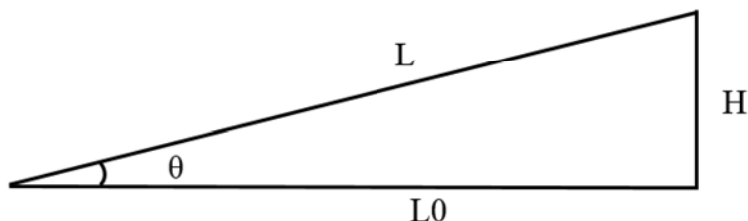


图 5-1 路面纵坡示意图

5.2 纵坡坡度设计

纵坡坡度是道路纵断面设计的关键性设计指标之一，合理的纵坡坡度可以减少交通事故，提高通行能力。而现有的坡度指标多以机动车的受力和动力性能为研究对象，忽略了人们日常出行中占有一定比例的自行车。由于城市道路一般比较平缓而自行车的动力远小于机动车的动力，所以城市道路的最大纵坡对自行车来说过大，在设计高架自行车道的纵坡时，需要重新考虑自行车的行驶状况。

5.2.1 考虑因素分析

1. 车辆的动力特性

不同类型的车辆的动力特性和制动性能各不相同，其上坡的爬坡能力和下坡的制动效能也不同，通常自行车道都是与机动车道在同一个断面上，道路纵坡设计更多是以机动车道为主兼顾自行车。由于机动车的爬坡能力优于自行车，制动

性能与自行车也大有不同,所以专用自行车道的设计应当以自行车的动力特性为主进行。

2. 道路等级

对城市道路设计有不同的道路等级,不同道路等级对应不同的设计速度,而车辆的爬坡能力与行驶速度成反比。道路的等级较高时,通行能力大,车速较快,相应的要求其纵坡应平缓。

3. 自然因素

考虑到城市地区的地形起伏情况、降雨、冰雪等自然因素对骑行爬坡能力都会产生影响,如阴湿多雨、长期冰冻的地区,地面的附着系数小,为了安全考虑,应避免过大的纵坡。

5.2.2 最大坡度值的确定

从爬坡能力考虑,自行车在爬坡过程中慢慢减速到匀速运动,匀速骑行克服的坡度就是自行车的最大爬坡度。因为 $a=0$, 不计加速阻力,根据自行车行驶过程中受力平衡的条件,我们可以得出自行车在爬坡过程的受力方程:

$$F_t - F_w = F_f + F_i \quad (5-1)$$

将上式两端分别除以车辆的总重得:

$$\frac{F_t - F_w}{G} = f + i \quad (5-2)$$

令 $D = \frac{F_t - F_w}{G}$, D 称为动力因数,则自行车上坡过程中所能克服的坡度为

$$i = D - f。$$

正常人蹬踏自行车的力量约为 30N~40N。考虑到在公路的最大纵坡时,人应该全力地蹬脚踏使得自行车稳定行驶,即取蹬踏力 40N。将其他参数带入公式(5-2),可得自行车道的最大纵坡如表 5-1。

表 5-1 自行车道最大纵坡

自行车速 (km/h)	30	25	20	15	10	5
计算最大纵坡 (%)	3.2	3.4	4.0	4.3	4.5	4.6

如果坡度过大,自行车在下坡过程中速度越来越快,速度过快会给骑乘者在

心理上产生很大的压力。为了降低速度，人们会采取刹车制动，自行车一般采用后刹制动，当速度过快时人们会选择采取双刹制动。如果快速行驶时急刹车，前轮先停止运动会使后轮出现腾空现象，非常危险。

表 5-2 公路最大纵坡

设计车速 (km/h)	80	60	40	30	20
最大纵坡 (%)	5	6	7	8	9

公路的最大纵坡值较计算所得的自行车道最大纵坡值大。如果机动车道按照自行车道的标准设置最大纵坡度，会造成巨大的经济投资。当机动车的车速较高时，如若采用较大的纵坡，自行车的速度会降到最低，低速下爬坡会使蛇形轨迹更加明显，紧邻自行车道的机动车快速驶过，巨大的车速差异会给自行车骑乘者带来较大的危险感。

综上所述，纵坡度不宜太小(不利于排水)，不宜过陡(不利于行车及安全)，同时对其坡长还有一定的限制。当采用城市型道路时，地面雨水排至路面，然后沿着路缘石排水槽，排入雨水口。所以为了保证路段的排水畅通性，防止水渗入路基破坏路基的稳定性，道路原则上不应有平坡段，最小纵坡应为 0.3%，坡长不应大于 200m。

5.3 纵坡坡长设计

自行车骑乘的理想坡度是 2.5%。然而在公路实际设计中由于地形条件的限制，这种坡度不是总能满足的，公路纵坡会大于理想的最大纵坡，这样人们在上坡的过程中由于自身体力和耐力的限制，骑行速度会越来越低，坡长太长会使人们体力不支而下车推行。为了使人们能顺利骑到坡顶，我们需要对坡度大的路段的坡长加以限制。

5.3.1 考虑因素分析

1. 速度差

自行车在上坡的过程由于产生速度损失，运行速度会慢慢降低，如果速度降低得过大对后方自行车的通行产生干扰，影响道路的通行能力和服务水平。为了使速度降低在一定的限度内，一般要保证骑行速度在上坡过程中保持其设计速

度的 70%~80%。

2. 人的体能和耐力

骑自行车上坡的过程是将动能转化为势能的过程。自行车的行驶主要是靠两脚交替对脚踏板的蹬力，通过自行车的转动部分转化为车轮与地面的摩擦力。人输出的功率随着骑车人的体格、体力、骑车姿势、持续时间和速比等的变化而变化。一般成年男人的最大输出功率约为 0.7 马力 (0.51kw)，但只能持续 10s 左右。如果骑行 10 分钟以上，其值要小得多，平均马力只有 0.3 马力，若连续骑行 30 分钟以上，大约只有 0.1~0.2 马力 (0.07kw~0.15kw)。女子的平均输出马力约为男子的 70%。

4. 下坡安全性

纵坡值和坡长不仅影响上坡，也对自行车下坡有一定影响。在下坡路段为陡坡时，由于存在加速度，行驶速度变大，使骑行处于危险状态。此外在长距离下坡骑行时，为了安全起见，人们会长时间按着刹车不放，而当时间过长时，刹车系统的温度会升高，容易导致刹车失灵，造成交通事故。

5.3.2 最大坡长的限制

日本规定，下坡超过 40km/h 会有危险，为防止发生危险，规定下坡坡度大于 3%、且坡度与坡长乘积之和大于 500 的路段，要把自行车道或自行车专用道的每条车道线分开。

综合考虑，自行车道的纵坡坡度小于 2.5%时，可以作为缓和坡段来设计，一般不限制坡长；当大于 2.5%时，要对坡长加以限制，这种情况对行车安全不利。

《城市道路工程设计规范》规定自行车道的最大坡长见表 5-3，《公路路线设计规范》中对公路的最大坡长见表 5-4。

表 5-3 城市道路自行车道最大坡长

纵坡 (%)	3.5	3	2.5
最大坡长 (m)	150	200	300

表 5-4 公路不同纵坡下的最大坡长

设计速度 (km/h)		80	60	40	30	20
纵坡坡度 (%)	3	1100	1200	—	—	—
	4	900	1000	1100	1100	1200
	5	700	800	900	900	1000

通过对表格指标的对比发现,自行车道的最大坡长要比机动车道的最大坡长小的多。当自行车道和机动车道共断面的时候,要按照自行车道的坡长限制最大坡长。如果受地形条件的限制,坡长较大,可以将机动车道和自行车道的断面进行暂时分离,适当增加机动车道的坡长,自行车道的坡长按照标准限制,以保证自行车的行驶要求。

5.4 现有规范及标准

世界各国及地区对纵坡和限制坡长的规定各不相同,总结为表 5-5。

表 5-5 世界各国及地区关于自行车道的技术指标表

国家或地区	设计速度 (km/h)	车道宽度	纵坡	横坡	线形要求	指标依据
美国 (一级自行车路)	32.2	单向最小值 1.5m, 双向最小值 2.4m (交通量大时,可增至 3.6m 或更大)	推荐值<5%; 需采用更大坡度时,坡长<50m	1%~2%	平曲线最小半径为 27.4m, 凸曲线长度限制	《高速路设计手册 (自行车交通设计章节)》
英国 (自行车专用道)	32.2	双向推荐值 3.5m, 双向一般值 2.5m, 双向最小值 2m (短距离)	推荐值<3%; 当坡度取 3%~5%时,坡长≤100m; 极限值 7%时,坡长<3%	2.5%	各自行车车型对应限定转弯半径,提供良好转弯视角	《自行车交通设计手册》

丹麦 (自行车 高速路)	20	单向最小值 2.2m, 最大 值 3.5m; 双 向推荐值 4m, 最小值 2.5m	5%, 坡长 <50m; 4.5%, 坡长<100 m; 4%, 坡长 <200m; 3.5%, 坡长 <300m; 3%, 坡长<500m	2.5%	平曲线半 径要求能 以 30km/h 的速度安 全舒适通 行, 转弯 视线要好, 平曲线 与竖曲线 应综合 考虑	《自行车 高速路设计 标准基本 原则》
荷兰 (自行车 专用道)	20	单向最小值 1.5m, 双向 推荐值 2.5m	坡度<7%, 坡 长控制	1.5%~2.5%	线形要求 能安全舒 适通行, 提供良好 转弯视角	《自行车 交通设计 指南》
台湾 地区 (自行车 专用道)	10~30	单向宜大于 1.5m, 最小 1.2m; 双向 宜大于 3.0m, 最小 2.0m	推荐值<5%, 最大 8%。 3%, 坡长 <500m; 4%, 坡长<200m; 5%, 坡长 <100m; 6%, 坡长<65m; 7%, 坡长 <40m	推荐值 2% , 最小 值 0.5%	30km/h 时, 最小 半径 30m; 20km/h 时, 最小 半径 15m; 10km/h 时, 最小 半径 3m	《市区道 路及附属 工程设计 规范》
中国 内地		单向最小值 3.5m, 双向 最小值 4.5m	宜小于 2.5%。3.5%, 坡长<150m; 3.0%, 坡长 <200m; 2.5%, 坡长 <300m			《城市步 行和自行 车交通系 统规划设 计导则》; 《城市道 路工程设 计规范》

从表 5-5 可以看到, 丹麦、日本以 5%为最大纵坡值, 台湾规定纵坡值最大为 8%, 但其还是明确强调了以 5%以下为宜。而中国大陆目前的规范中, 纵坡最大值只到 3.5%。从与纵坡相对应的坡长选择来看, 5%对应 100m 为一般规范推荐最大长度, 只有丹麦将长度控制在 50m。而我国台湾地区对纵坡和坡长同时规定, 最大纵坡度以 5%以下为宜, 如为桥梁、立体交叉处且受地形或其他特殊

限制者不得大于 8%。日本则规定，最陡的纵坡度，原则上采用 5%，但立体交叉、桥梁及高架自行车道的引道，不受此限。同时日本的规范也认为在设计自行车道时，实际上最难以处理的是纵坡度。在以变速自行车为对象时，上坡有一定的陡坡也可以考虑；但在下坡路段为陡坡时，由于加速度，行驶速度变大，处于危险状态，这种情况对行车安全不利。

我国规范规定，非机动车道纵坡宜小于 2.5%。目前在我国不少城市设计立交的非机动车道时，对纵坡都控制得比较严格，一般以小于 2%为原则。这个数值基本上能满足各种非机动车爬坡的需要，但是没有规定相应的坡长限制。

厦门市云顶路空中自行车快速道是一条与行人、机动车完全分离的自行车道，该道的设计速度为 25 km/h，其示范段的主要技术指标见表 5-6。

表 5-6 云顶路自行车快速道示范段主要技术指标

设计速度 (km/h)	道路宽度	纵坡	横坡	线形要求
25	单向 2 车道净宽 2.5m, 双向 4 车道 净宽 4.5m	主线最大纵坡 3%, 出入口坡道 一般不大于 7%	1.0%(实际使用偏 小, 建议改为 1.75%)	最小平曲线半径 一般值 30m, 极限 值 25m

6 数据调查与分析

6.1 数据调查的基本情况

此次调查选取了三个典型路段，分别调查了各个路段的坡长、坡度、非机动车道宽度等物理参数，调查了自行车骑乘者的性别、年龄、骑行速度、自行车车型以及是否推行。通过以上参数来分析自行车坡度与速度等变量之间的关系。

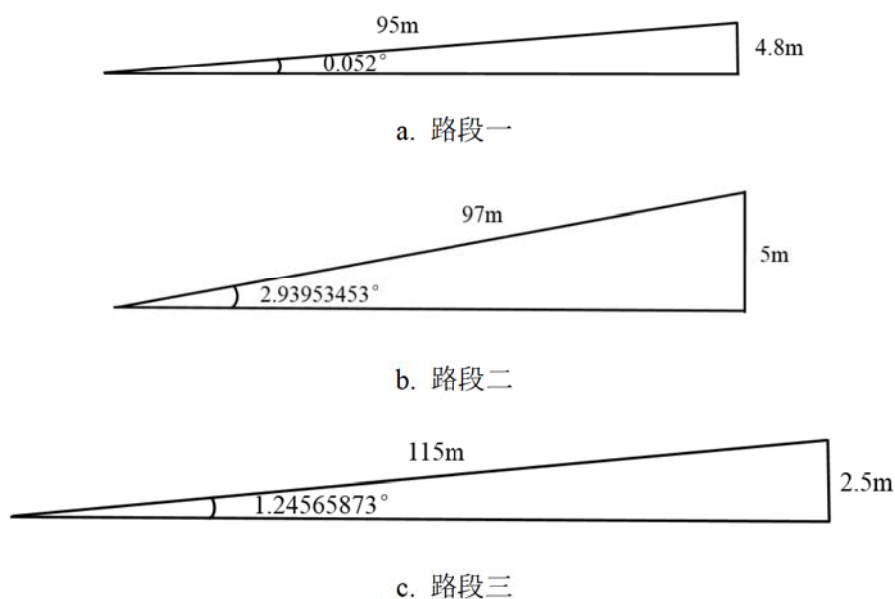


图 6-1 调查路段纵断面示意图

6.1.1 骑行者的性别构成

在调查的三个路段的骑行者中，路段一的男性比例为 54%，女性比例为 46%；路段二的男性比例为 60%，女性比例为 40%；路段三男性比例为 62%，女性比例为 38%。

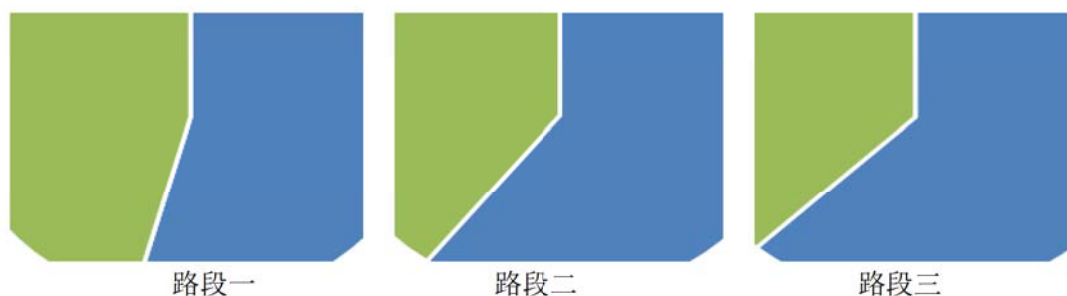


图 6-2 调查路段骑行者的性别构成

6.1.2 骑行者的年龄构成

在调查的三个路段的骑行者中，路段一青年人比例为 26%，中年人比例为 38%，老年人比例为 36%；路段二青年人比例为 30%，中年人比例为 40%，老年人比例为 40%；路段三青年人比例为 22%，中年人比例为 54%，老年人比例为 24%。总体来看，骑行者以中年人为主。

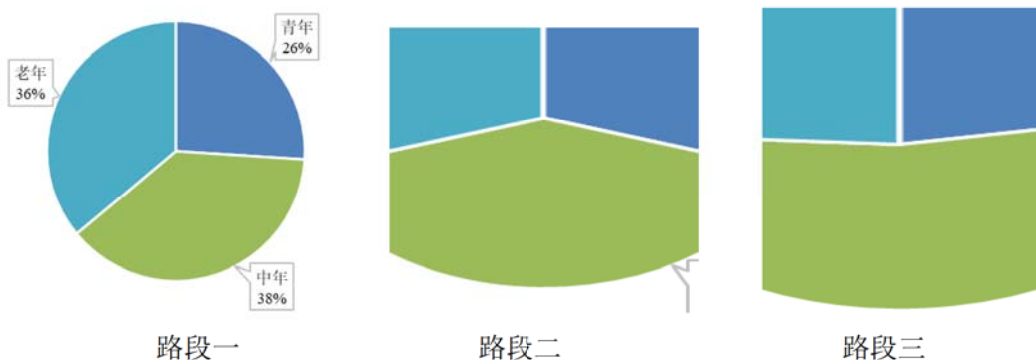


图 6-3 调查路段骑行者的年龄构成

6.1.3 自行车车型构成

在调查的三个路段的车型中，路段一的普通自行车比例为 79%，变速自行车比例为 15%，折叠自行车比例为 6%；路段二的普通自行车比例为 75%，变速自行车比例为 25%；路段三普通自行车比例为 87%，变速自行车比例为 7%，折叠自行车比例为 24%。总体来看，选择普通自行车出行的骑行者居多。

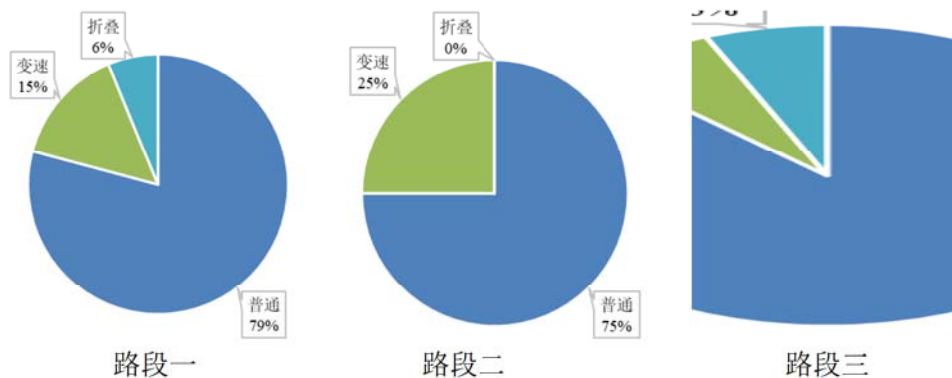


图 6-4 调查路段自行车的车型构成

6.1.4 骑行速度分布

1. 频数分布直方图

对各个路段的骑行速度进行分组统计，得到如图 6-5 所示的骑行速度频数分

布直方图。

路段一的坡度最为平缓，骑行过程中所受到的阻力最小，因而速度值的分布比较离散，整体来看以 8~14km/h 居多。路段二和路段三的速度分布比较接近正态分布，其中，路段二的速度主要分布在 8~13km/h，路段三的速度主要分布在 10~14km/h，这与路段二的坡度大于路段三的坡度相吻合。

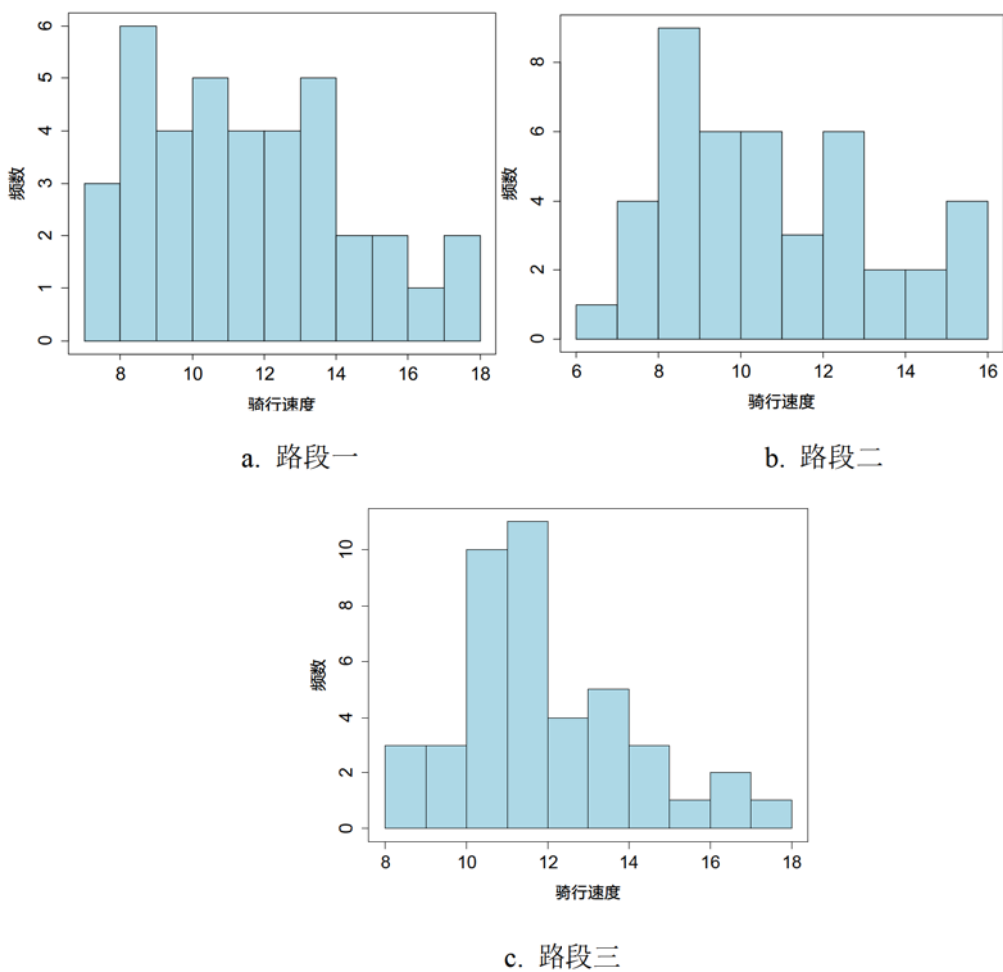


图 6-5 调查路段的骑行速度频数分布直方图

2. 箱形图

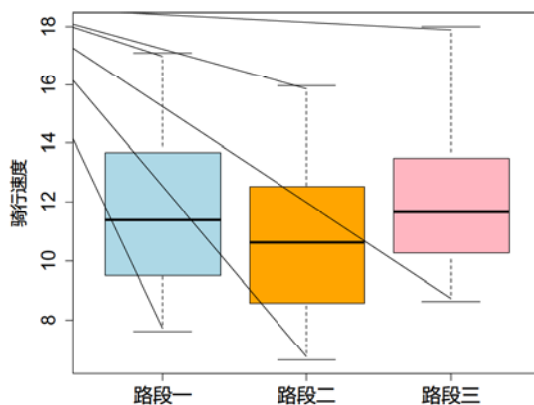


图 6-6 调查路段的骑行速度箱形图

由箱形图可以看到，路段一的骑行速度的最大值为 17.1km/h，最小值为 7.6km/h，中位数为 11.40km/h，50%的值落在 9.5km/h~13.68km/h；路段二的骑行速度的最大值为 15.954545km/h，最小值为 6.622642km/h，中位数为 10.636364km/h，50%的值落在 8.560976 km/h~12.535714km/h；路段三的骑行速度的最大值为 18km/h，最小值为 8.64000km/h，中位数为 11.67568km/h，50%的值落在 10.41115 km/h~16.61538km/h。

6.2 骑行速度与各调查参数之间的关系

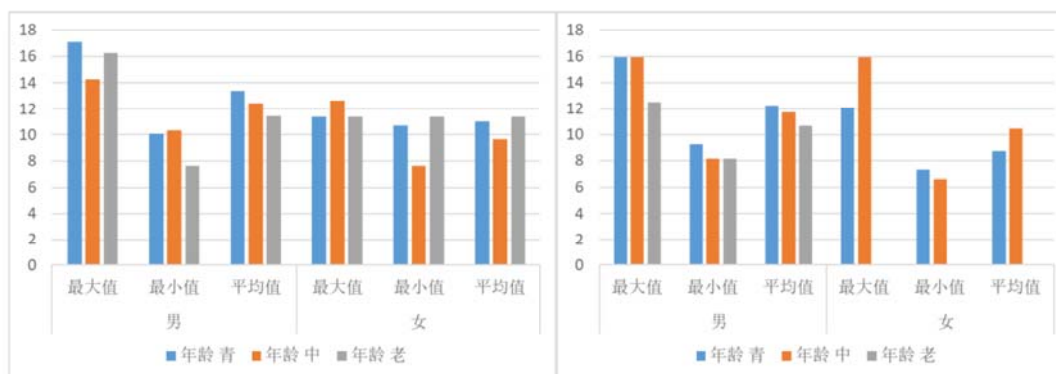
6.2.1 性别、年龄与骑行速度的关系

从下表可以看出，尽管不同路段的坡长、坡度、路面宽度等环境因素不尽相同，但男性的骑行速度通常高于女性，在年龄方面，青年人的骑行速度一般最高，其次是中年人和老年人。

表 6-1 不同性别、年龄下的骑行速度统计

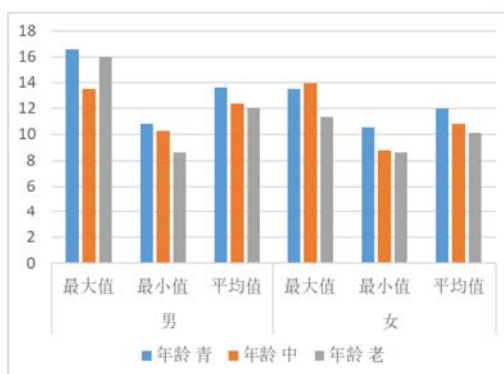
性别		速度	年龄		
			青	中	老
路段一	男	最大值	17.1	14.25	16.2857
		最小值	10.588	10.3636	7.6
		平均值	13.381946	12.423409	11.457920
	女	最大值	11.4	12.6667	11.4
		最小值	10.6875	7.6	11.4
		平均值	11.043750	9.669370	11.4
路段二	男	最大值	15.95455	15.95455	12.53571
		最小值	9.236842	8.162791	8.162791
		平均值	12.28006	11.73685	10.65598

	女	最大值	12.10345	15.95455	/
		最小值	7.3125	6.622642	/
		平均值	8.746975	10.46207	/
路段三	男	最大值	16.61538	13.5	16
		最小值	10.8	10.28571	8.64
		平均值	13.61096	12.38594	12.03502
	女	最大值	13.5	13.93548	11.36842
		最小值	10.53659	8.816327	8.64
		平均值	12.01829	10.82929	10.09805



a.路段一

b.路段二



c.路段三

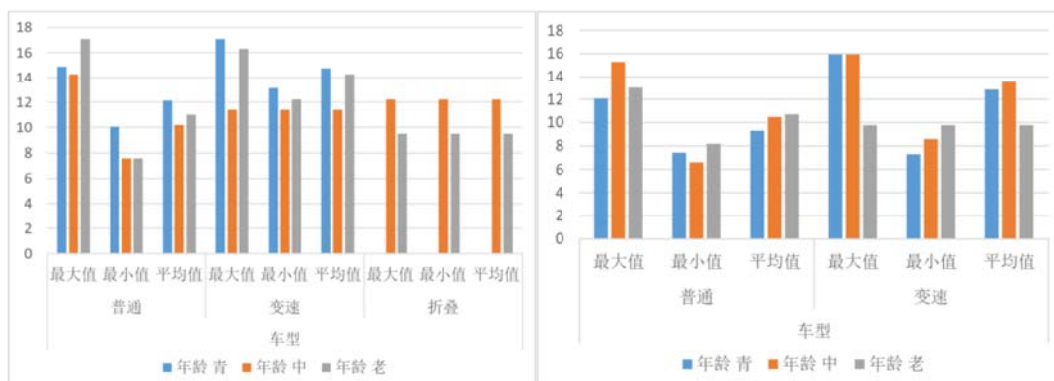
图 6-7 不同性别、年龄下的骑行速度统计图

6.2.2 车型、年龄与骑行速度的关系

从下表可以看出，变速自行车和折叠自行车的使用情况较为少见，人们出行还是更多地选择普通自行车，尤其是老年人。而且，变速自行车的骑行速度通常高于普通自行车和折叠自行车，在坡度稍大的路段，变速自行车的优势比较明显。

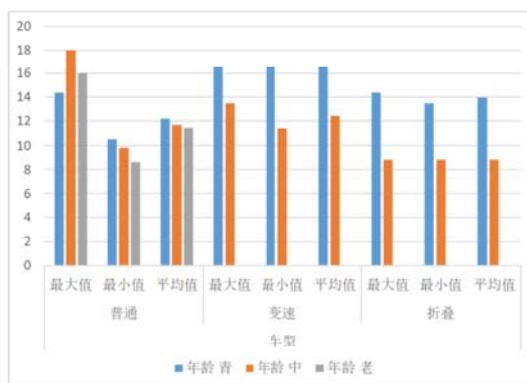
表 6-2 不同车型、年龄下的骑行速度统计

车型		速度	年龄		
			青	中	老
路段一	普通	最大值	14.8696	14.25	17.1
		最小值	10.0588	7.6	7.6
		平均值	12.119226	10.187879	10.997399
	变速	最大值	17.1	11.4	16.2857
		最小值	13.1538	11.4	12.2143
		平均值	14.738287	11.4	14.25
	折叠	最大值	/	12.2143	9.5
		最小值	/	12.2143	9.5
		平均值	/	12.2143	9.5
路段二	普通	最大值	12.10345	15.26087	13
		最小值	7.468085	6.622642	8.162791
		平均值	9.26587	10.45137	10.73835
	变速	最大值	15.95455	15.95455	9.75
		最小值	7.3125	8.560976	9.75
		平均值	12.83569	13.49002	9.75
	折叠	最大值	/	/	/
		最小值	/	/	/
		平均值	/	/	/
路段三	普通	最大值	14.4	18	16
		最小值	10.53659	9.818182	8.64
		平均值	12.20063	11.66752	11.45393
	变速	最大值	16.61538	13.5	/
		最小值	16.61538	11.36842	/
		平均值	16.61538	12.43421	/
	折叠	最大值	14.4	8.816327	/
		最小值	13.5	8.816327	/
		平均值	13.95	8.816327	/



a.路段一

b.路段二



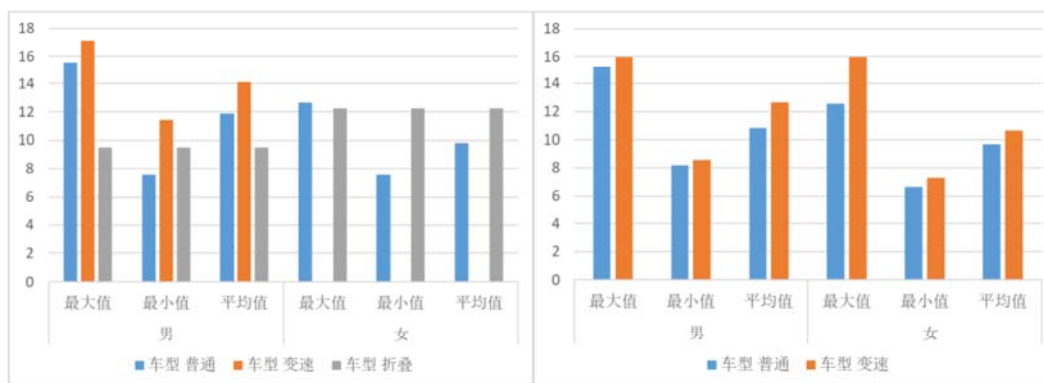
c.路段三

图 6-8 不同车型、年龄下的骑行速度统计图

6.2.3 性别、车型与骑行速度的关系

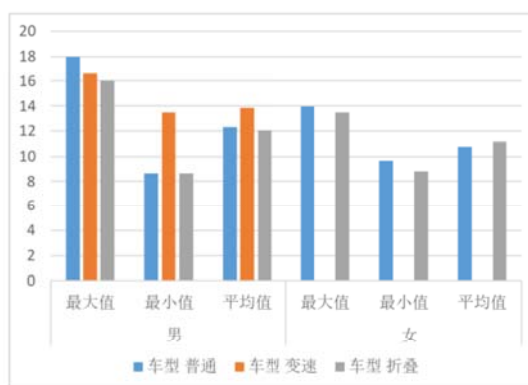
表 6-3 不同性别、车型下的骑行速度统计

性别		速度	车型		
			普通	变速	折叠
路段一	男	最大值	15.5455	17.1	9.5
		最小值	7.6	11.4	9.5
		平均值	11.858696	14.121878	9.5
	女	最大值	12.6667	/	12.2143
		最小值	7.6	/	12.2143
		平均值	9.818176	/	12.2143
路段二	男	最大值	15.26087	15.95455	/
		最小值	8.162791	8.560976	/
		平均值	10.8195	12.65488	/
	女	最大值	12.53571	15.95455	/
		最小值	6.622642	7.3125	/
		平均值	9.695469	10.60934	/
路段三	男	最大值	18	16.61538	16
		最小值	8.64	13.5	8.64
		平均值	12.29499	13.82794	12.03502
	女	最大值	13.93548	/	13.5
		最小值	9.64	/	8.816327
		平均值	10.79547	/	11.15816



a.路段一

b.路段二



c.路段三

图 6-9 不同性别、车型下的骑行速度统计图

6.3 建议坡度值

由于此次调查的数据类别较多,根据各个路段所有样本的骑行速度平均值来分析速度和坡度的关系不合理,考虑到满足普通自行车的最大坡度,折叠和变速自行车一般都可以满足,所以仅选取普通自行车的样本数据,统计不同性别、不同年龄骑行普通自行车的最大速度,分别拟合各类型对应的速度与坡度的曲线。统计结果如下表所示,其中,路段一、路段二、路段三的坡度值分别为 0.03%、5.14%、2.18%。

表 6-4 不同性别、年龄下的普通自行车的骑行速度统计

最大速度 (km/h)		普通自行车		
		路段一	路段二	路段三
男	青年	14.8696	9.75	14.4
	中年	14.25	10.96875	12.70588
	老年	17.1	12.53571	14.4
女	青年	11.4	9.236842	10.53659

	中年	12.6667	10.96875	12
	老年	11.4	/	11.36842

通过以上统计，剔除不完整数据和异常数据，最终选取男性青年、男性中年、男性老年、女性青年、女性中年的最大骑行速度来拟合坡度值。

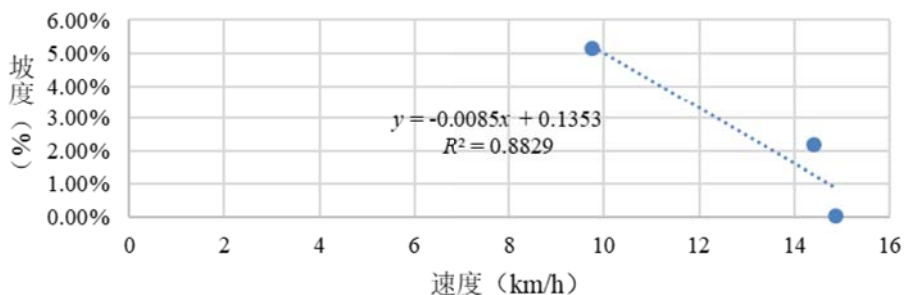


图 6-10 男青拟合曲线

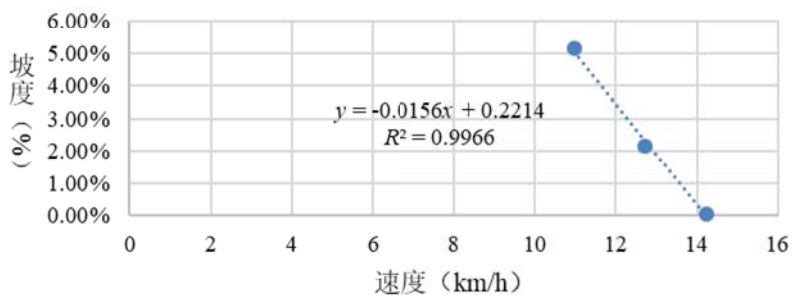


图 6-11 男中拟合曲线

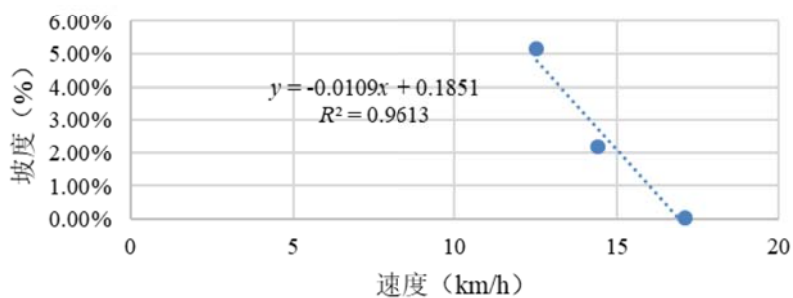


图 6-12 男老拟合曲线

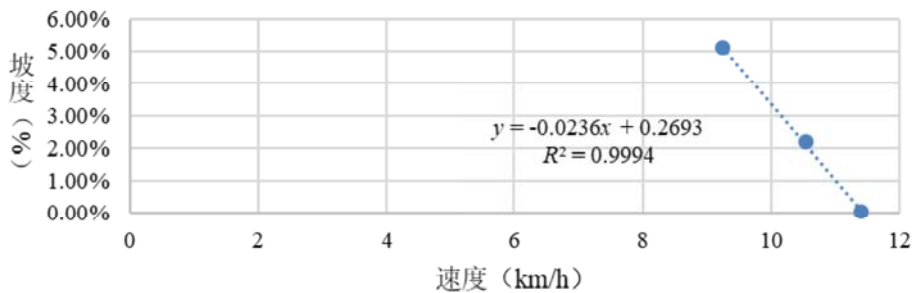


图 6-13 女青拟合曲线

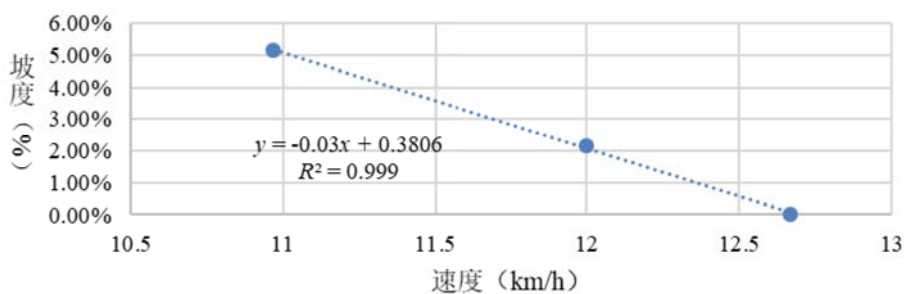


图 6-14 女中拟合曲线

在 5.2.2 节中，由表 5-1 可知，根据力学原理确定的自行车骑行速度最小值为 5km/h，将骑行速度作为自变量代入以上五个拟合公式，可以确定其对应的纵坡坡度值。当速度为 5km/h 时，纵坡值分别为 9.27%、14.34%、13.06%、15.13%、23.06%；当速度为 10km/h 时，纵坡值分别为 5.02%、6.54%、7.61%、3.33%、8.06%。

参考已有的工程案例和骑行的受力情况，取男性青年拟合曲线的纵坡值计算结果 9.27%（速度为 5km/h 时），作为本研究报告的高架自行车出入口坡道建议最大纵坡值。

7 总结

建立“优先、便捷、安全”的骑行通道，绝非仅仅在现有的城市道路上添加护栏或者增加一条机非分割线这么简单，而是要给自行车以前所未有的路权，建立完全独立的自行车道，这条自行车道与机动车道没有任何交叉，尤其在交叉口，骑行者通过高架形式可以快速通过。这种自行车道，普遍行驶速度在 15~20km/h，完全超过高峰时期的公交速度。这样的自行车道带来的经济效益和环境效益是相当可观的，尤其是它改变了城市交通的一种理念，势必会对城市的发展带来一场革命。而这种理念，在国外也得到了认同并化为实践。在这种模式下，鼓励在现代城市使用自行车，在设计和规划时将其纳入考虑范围，显得迫在眉睫。所以，完善关于自行车道设计的技术指标，尤其是关于自行车道纵坡度的规定很有必要。

本项目通过案例总结结合调查分析，将研究重点放在城市高架自行车道这一较为前卫的交通设施，对其重要的设计指标——纵坡度进行分析，为其能在更多地方“落地”做坚实的基础。通过研究确定城市高架自行车道出入口坡道的最大纵坡度的建议值为 9.27%，为自行车道的设计提供有力参考。同时，该指标也可作为对现有规范的补充，指导城市一般自行车道的设计。

参考文献

- [1] 冯国川. 伦敦要建 200 公里“自行车高速”[J]. 共产党员, 2014(3):61-61.
- [2] 路启, 陈彦美. 大城市自行车交通系统发展对策--以天津市为例[J]. 城市, 2011(9):67-70.
- [3] 张勇. 自行车高速路现状及发展浅析[J]. 城市建设理论研究:电子版,2016(13).
- [4] 梁俊勤, 宋敏, 侯静文,等. 德国 自行车高速公路[J]. 明日风尚, 2012(2):15-15.
- [5] 李忠东. 伦敦打造自行车高速公路[J]. 文体用品与科技, 2014(5):20-21.
- [6] 张达明. 童话王国打造“自行车高速路”[J]. 做人与处世, 2012(16):62-62.
- [7] 长平. 自行车高速公路[J]. 道路交通管理, 2000(7):40.
- [8] 黄凤娟. 北京市自行车高速路有望 2018 年开建[J]. 人民公交, 2017(10).
- [9] 苏子孟. 北京京密路明年开工架起快速路 计划 2018 年竣工(附图)[J]. 工程机械, 2015.
- [10] 莎丽·麦格雷恩, 南风. 哥本哈根的“自行车高速公路”[J]. 读者.原创版, 2012(9):67-67.
- [11] 林朝晖. 给自行车修一条高速路[J]. 新城乡, 2018(3).
- [12] 肖才. 21 世纪城市交通新趋势——自行车高速公路系统[J]. 中国橡胶, 1998(19):32.
- [13] 佚名. 欧洲国家的“自行车高速公路”[C]// 养护与管理. 2016:45.
- [14] 安圣植. 驱动力累积自行车:, CN1131108[P]. 1996.
- [15] 吕頔豪. 自行车运动力学分析[J]. 中国科技信息, 2018(6):31-33.
- [16] 张健, 李昕. 对自行车运动员在骑行过程中踏蹬动作的生物力学分析[J]. 首

- 都体育学院学报, 1997, 9(1):52-55.
- [17] 杨建新. 自行车运动中长距离与短距离骑行技术差异的生物力学分析[J]. 中国体育教练员, 1994(2):18-19.
- [18] 吴翠娥, 袁鹏, 刘伟民. 自行车运动员不同负荷下踏蹬动作研究[C]// 全国运动生物力学学术交流大会. 2008:103-104.
- [19] 刘彬生. 有关自行车的力学、机械学和社会学[J]. 教育与装备研究, 2002(3):3-5.
- [20] 袁春平. 自行车转弯技术及其力学分析[J]. 湖北体育科技, 2004, 23(1):35-36.
- [21] 严旒伟, 贾晟灵, 左建业,等. 自行车仿真分析与动力学建模[J]. 科技创新导报, 2018(10).
- [22] http://www.360doc.com/content/16/0802/00/33470001_580132939.shtml
- [23] http://www.360doc.com/content/16/0727/11/35266221_578714940.shtml
- [24] http://www.360doc.com/content/16/0714/17/34652594_575493740.shtml
- [25] <https://club.autohome.com.cn/bbs/thread/61871866d98d766c/75512483-1.html>
- [26] http://www.xinhuanet.com/local/2018-09/01/c_1123365175.htm
- [27] http://www.sohu.com/a/253017459_551718
- [28] <http://wemedia.ifeng.com/76393246/wemedia.shtml>
- [29] http://www.360doc.com/content/14/0524/17/642066_380518704.shtml
- [30] http://www.360doc.com/content/16/0522/12/31537845_561293355.shtml
- [31] http://www.360doc.com/content/11/1206/11/5707568_170067150.shtml
- [32] http://www.360doc.com/content/16/0522/11/31537845_561288490.shtml
- [33] http://www.360doc.com/content/14/1119/11/17132703_426355319.shtml

附录：调查数据

样本一：

物理参数	坡长 (m)	100	坡度	0.052	非机动车道宽 (m)	3	坡高 (m)	4.8				
编号	性别		年龄			车型			骑行时间 (s)	骑行速度 (km/h)	载物 (载人)	是否推行
	男	女	青	中	老	普通	变速	折叠				
1	*				*	*			22	16.364		
2	*				*	*			45	8		
3	*		*				*		20	18		
4	*		*			*			25	14.4		
5	*			*		*			33	10.909		
6		*		*								*
7	*				*			*	36	10		
8		*		*				*	28	12.857		
9		*		*		*			30	12		
10		*			*							*
11	*			*			*		30	12		
12	*				*		*		21	17.143		
13	*		*				*		22	16.364		
14		*			*	*						*
15	*			*		*			24	15		
16		*		*				*				
17	*				*	*			20	18		
18	*				*		*		28	12.857		*
19	*			*		*						*
20		*		*		*			27	13.333		
21	*		*			*			33	10.909		
22	*		*			*			25	14.4		
23		*			*	*						*
24	*			*		*			25	14.4		
25	*		*			*			28	12.857		
26		*			*	*						*
27	*		*				*		26	13.846		
28		*		*		*			35	10.286		
29		*		*		*			41	8.7805		
30		*		*		*						*
31		*		*		*			45	8		
32	*		*				*		26	13.846		
33		*	*			*						*
34	*				*	*			43	8.3721		

附录：调查数据

35		*		*		*			40	9		
36	*				*	*			40	9		
37		*			*	*						*
38	*				*	*			35	10.286		
39		*	*			*			30	12		
40	*		*			*			34	10.588		
41	*				*	*						*
42		*			*	*			30	12		
43		*		*		*			38	9.4737		
44	*				*	*						*
45		*		*		*			39	9.2308		
46		*		*		*			40	9		
47		*	*			*			32	11.25		
48	*		*			*			23	15.652		
49		*		*		*			36	10		
50	*				*	*			34	10.588		

样本二：

物理参数	坡长 (m)	97.5	坡度°	2.93953454			非机动车道宽 (m)			3.0m	坡高 (m)	5	
编号	性别		年龄			车型			骑行时间(s)	骑行速度 (km/h)	载物 (载人)	是否推行	
	男	女	青	中	老	普通	变速	折叠					
1		*	*			*			47	7.4681			
2		*	*				*		48	7.3125			
3	*			*		*			43	8.1628			
4		*	*			*			45	7.8			
5		*		*		*			53	6.6226			
6	*			*			*		41	8.561			
7		*	*				*		41	8.561			
8	*			*		*			36	9.75			
9	*				*	*			43	8.1628			
10		*		*		*			50	7.02			
11	*				*	*			37	9.4865			
12		*		*		*			41	8.561			
13		*	*			*			38	9.2368			
14		*		*		*			39	9			
15	*		*				*		31	11.323			
16	*			*		*			32	10.969			
17	*				*		*		36	9.75			
18		*	*			*			29	12.103			
19		*		*		*			33	10.636			
20	*				*	*			41	8.561			
21	*				*	*			34	10.324			
22		*		*		*			25	14.04			
23	*		*			*			36	9.75			
24	*		*			*			38	9.2368			
25	*				*	*			31	11.323			
26		*	*									*	
27	*				*	*			41	8.561			
28		*		*		*						*	
29	*		*				*		28	12.536			
30	*		*				*		28	12.536			
31	*				*	*			26	13.5			
32	*		*				*		22	15.955			
33	*				*							*	
34	*		*				*		24	14.625			
35	*			*		*			23	15.261			
36		*		*		*			28	12.536			

附录：调查数据

37	*				*							*
38		*		*		*			40	8.775		
39	*			*			*		22	15.955		
40	*			*		*			26	13.5		
41	*				*	*			28	12.536		
42	*				*	*			27	13		
43	*				*	*			30	11.7		
44	*		*									*
45		*		*			*		22	15.955		
46	*			*								*
47		*			*							*
48	*				*	*			32	10.969		
49		*		*		*			32	10.969		
50		*		*		*			32	10.969		

样本三：

物理参数	坡长 (m)	120	坡度°	1.19374846			非机动车道宽 (m)		3.5		坡高 (m)	2.5	
编号	性别		年龄			车型			骑行时间 (s)	骑行速度 (km/h)	载物 (载人)	是否推行	
	男	女	青	中	老	普通	变速	折叠					
1	*			*		*			34	12.706			
2		*			*	*			42	10.286			
3	*			*		*			35	12.343			
4	*			*		*			36	12			
5	*			*		*			36	12			
6		*		*		*			42	10.286			
7		*			*	*			38	11.368			
8	*			*			*		32	13.5			
9	*				*	*			27	16			
10	*				*	*			37	11.676			
11	*			*								*	
12	*		*			*			39	11.077			
13		*		*		*			40	10.8			
14		*		*		*			42	10.286			
15	*			*		*			24	18			
16	*				*	*			50	8.64			
17		*		*		*						*	
18		*		*		*			39	11.077			
19	*		*		*				26	16.615			
20	*			*		*			41	10.537			
21	*			*		*			34	12.706			
22	*				*	*			38	11.368			
23		*		*				*	49	8.8163			
24	*				*							*	
25		*		*		*			31	13.935			
26	*				*	*			44	9.8182			
27	*		*			*			40	10.8			
28		*	*			*			41	10.537			
29		*		*		*			36	12			
30		*	*					*	32	13.5			
31	*		*				*		26	16.615			
32		*			*	*			50	8.64			
33	*			*			*		38	11.368			
34	*		*					*	30	14.4			
35	*		*			*			33	13.091			
36	*			*		*			42	10.286			

附录：调查数据

37	*			*		*						*
38		*		*		*			44	9.8182		
39	*			*		*			40	10.8		
40	*				*	*						*
41	*		*			*			30	14.4		
42		*		*		*			42	10.286		
43	*				*	*			35	12.343		
44	*		*			*			36	12		
45		*		*		*						*
46		*		*		*						*
47	*				*	*			30	14.4		
48		*		*		*			44	9.8182		
49		*		*		*			36	12		
50	*		*			*			32	13.5		