

# 自行车道纵断面设计关键指标研究

乔静宇

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

**摘要:** 对自行车道纵断面坡度设计关键指标展开研究,重点探讨骑行爬坡的生物力学特性、刹车安全性及爬坡难度等核心问题。通过对比分析欧美规范与中国现行标准,提出复杂地形下高效安全的设计方法。基于人体功率输出模型,建立骑行者爬坡坡度与速度的量化关系。普通人在100 W输出功率下,可以在5 min以内以10 km/h的速度骑行通过4%的坡度,坡长约800 m;电动自行车输出功率在250 W以上,可以15 km/h的速度上7%~8%的坡,直到电池耗尽。针对下坡设计,建议采用刹车视距和最短竖曲线长度进行控制。引入环法自行车赛难度系数评估骑行难度,为自行车道规划优化提供理论支持。

**关键词:** 自行车;纵断面;坡度设计;刹车视距;爬坡难度

**中图分类号:** U412.33

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2026)02-0074-06

## Research on Key Indicators for Longitudinal Sectional Design of Bicycle Lanes

QIAO Jingyu

[Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

**Abstract:** The key indicators of longitudinal sectional slope design for bicycle lanes are studied. The focus is on discussing core issues such as the biomechanical characteristics of cycling uphill, braking safety and the difficulty of climbing. By comparing and analyzing the norms of Europe and America with the current standards of China, the design methods of efficiency and safety for complex terrains are proposed. Based on the human power output model, a quantitative relationship between the climbing slope and speed of a cyclist is established. An average person can ride through a 4% slope at a speed of 10 km/h within 5 minutes with an output power of 100 W, which is approximately 800 m long. And the electric bicycles with an output power of over 250 W can climb slopes of 7% to 8% at a speed of 15 km/h until the battery runs out. For downhill design, it is recommended to control the braking sight distance and the length of the shortest vertical curve. The difficulty coefficient of the Tour de France is introduced to assess the difficulty of cycling, providing theoretical support for the optimization of bicycle lane planning.

**Keywords:** bicycle; longitudinal section; slope design; braking sight distance; climbing difficulty

## 0 引言

自行车交通作为绿色出行的重要组成部分,其基础设施的优化设计具有重要的研究价值和实践意义。自行车道的坡度设计作为其中的关键要素,直接影响骑行的连通性、舒适性与安全性<sup>[1]</sup>。在城市交通网络中,自行车道能够显著提升末端区域的可达性,为短途出行提供更加便捷的选择,从而降低出行对机动车的依赖程度。特别是在城市自然演进生长的情境下,科学地贯通大江大河等关键节点<sup>[2]</sup>,更应提升居民出行的便捷性,增强城市交通韧性<sup>[3-4]</sup>。

本文在汇总分析国外同类规范的基础上,对比分析国内外影响自行车道设计的主要技术指标,提出合理的解决方案,拓展解决断点问题的方法和思路。

## 1 研究的意义

### 1.1 高峰期自行车与汽车时速差距小

2023年,在全国279个行政区县的路网工作日高峰小时数据中:有33个行政区县路网平均运行速度低于18 km/h,属于严重拥堵状态,其中3个平均运行速度低于15 km/h;有120个行政区县路网平均运行速度处于18~25 km/h之间,属于中度拥堵状态;有76个行政区县路网平均运行速度处于25~35 km/h之间,属于轻度拥堵,运行状态较好;有50个行政区县路网平均运行速度大于35 km/h,处于基本畅通状

收稿日期: 2025-06-12

作者简介: 乔静宇(1974—),男,学士,高级工程师,从事道路桥梁设计工作。

态。总体而言,中度和严重拥堵的行政区县约占一半(55%)<sup>[5]</sup>。2024年北京、天津、成都、昆明、武汉等城市共享电单车高峰速度为13.8 km/h,而性能较差的共享单车高峰速度为9.2 km/h<sup>[6]</sup>。

以上数据显示,非机动车因体积小、灵活度高,在拥堵路段仍能保持一定通行能力,速度下降幅度小于机动车,体现出其在复杂交通环境中的适应性优势。而且,在机动车严重拥堵的背景下,非机动车(尤其是电单车)的实际通行效率接近甚至超越低速行驶的机动车(如运行速度低于15 km/h的行政区县),成为短途通勤的高效选择。

1.2 国内自行车道设计灵活性弱

我国城市自行车道的设计参数严格遵循相关规范以确保骑行安全。从现行设计标准看,自行车道的平曲线最小半径、横坡和纵坡等关键参数,经多年使用,在用地局促的城市空间,其技术指标制约了跨越交通动脉(如高速公路、高铁、大江大河)的设计,而在实际工程应用中,又以现有规范为原则,因而制约了自行车交通的发展。

在目前的国内标准中,关键性节点工程通常需要解决的自行车道纵断面设计难题是:我国的自行车道骑行的最大纵坡为2.5%,极限值为3%,坡度不能满足时,没有更详细的规定<sup>[7]</sup>。因此,需要更进一步研究、拓展和完善现有规范的应用范围。

2 欧美的研究与应用

2.1 概述

1946年,Roos通过调研骑行者体验<sup>[8]</sup>,提出城市/乡村不同场景下的坡道难度感知差异,建议:长下坡坡度≤6%,短下坡坡度≤8%(控制车速);长坡道设置水平蓄力平台。该成果被欧洲部分国家采纳。

1984年,Laarhoven通过生理极限计算<sup>[9]</sup>,提出若干设计原则:长坡(高差>5 m)需要设置水平平台,长度≈设计速度行驶5~6 s(约25 m);首次纳入风速、气温等环境因素影响分析。

1993年至今,荷兰CROW基于Laarhoven理论,发布系列指南<sup>[10-12]</sup>(1993—2012年),核心改进包括:吸纳风力差异对舒适度的影响,保留平台间隔设计,但未解决复杂地形(如跨江/山丘)的连通性问题。

对中国而言,需要结合本土地形与气候特征,建立动态化、科学化的坡道设计标准:通过计算人体功率输出极限,并结合实时环境变量(如风力)优化坡度曲线;在保障骑行安全的前提下提升非机动车道

网络连通性,实现舒适性与功能性的平衡。

2.2 欧美现行标准

摘录部分欧美国家提出的设计车速要求、纵坡要求及刹车视距(见表1、表2)。

表1 各国设计车速、最大坡度、刹车视距表<sup>[13-17]</sup>

| 国家  | 下坡车速/<br>(km·h <sup>-1</sup> ) | 设计车速/<br>(km·h <sup>-1</sup> ) | 控制纵坡                                                         | 刹车视距           |
|-----|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------|
| 英国  | 40                             | 30~40                          | ≤5%                                                          | 20 km/h-17 m   |
|     |                                |                                |                                                              | 30 km/h-31 m   |
|     |                                |                                |                                                              | 40 km/h-47 m   |
| 荷兰  | 40                             | 20~30                          | 提供舒适度指标                                                      | 20 km/h-21 m   |
|     |                                |                                |                                                              | 30 km/h-40 m   |
| 比利时 | 45                             | 25                             | 一般≤4.4%                                                      | 20 km/h-21 m   |
|     |                                |                                | 极限≤6%                                                        | 30 km/h-40 m   |
|     |                                |                                | 极短的路段最大≤10%                                                  | 45 km/h-77 m   |
| 西班牙 | 50                             | 30~50                          | 2% 坡长<4 km 和 4% 坡长<2 km,可以维持速度15 km/h;当≤5%时,不限制坡长;坡度最大不超过1:4 | 公式(5)<br>(见后文) |
| 美国  | 48                             | 30(2%)<br>48(6%)               | 尽量≤5%                                                        | 公式(5)<br>(见后文) |
| 奥地利 | 40                             | 25                             | 平原地区≤3%                                                      | 20 km/h-15 m   |
|     |                                |                                | 丘陵地区≤6%                                                      | 30 km/h-25 m   |
|     |                                |                                | 山区≤8%                                                        | 40 km/h-40 m   |

表2 各国坡度对应最大坡长表

| 英国               |          | 荷兰/比利时            |          | 奥地利      |          | 西班牙      |          |
|------------------|----------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 纵坡/<br>%         | 坡长/<br>m | 纵坡/<br>%          | 坡长/<br>m | 纵坡/<br>% | 坡长/<br>m | 纵坡/<br>% | 坡长/<br>m |
| 2                | 150      |                   |          |          |          | <2       | 4 000    |
| 3                | 90       | 3                 | 任意       | 3        | 任意       |          |          |
| 4                | 50       |                   |          | 4        | 250      | <4       | 2 000    |
| 5                | 30       | 5                 | 120      | 5        | 120      | 5 ~ 6    | 240      |
|                  |          | 6                 | 90       | 6        | 65       | 6 ~ 7    | 120      |
|                  |          | 8                 | 45       |          |          | 7 ~ 8    | 90       |
|                  |          | 10                | 27       | 10       | 20       | 8 ~ 9    | 60       |
|                  |          | 12                | 18       | 12       | 8        | 9 ~ 10   | 30       |
| 纵坡间设置<br>5 m 水平段 |          | 纵坡间设置<br>25 m 水平段 |          |          |          | 10       | 15       |

可见,欧美国家普遍接受将<5%的坡度作为舒适骑行的最大坡度。西班牙的加泰罗尼亚地区甚至采用4%的坡度,其最大坡长可达2 000 m。

几乎所有国家的规范,除了规定用设计车速来控制平面几何设计指标,以此满足安全性和通过性之外,都提供了长下坡时的最高车速,并给出了在此速度下的刹车视距。美国 and 西班牙加泰罗尼亚的刹车视距都给出了计算公式(见后文公式5)。

另外,美国规范要求:一般情况下,自行车道最

大坡度应小于等于5%;如有必须跨越的障碍,使自行车道坡度无法避免地超过5%时,建议设置缓坡度以提高舒适性,并使用更高的下坡设计速度以实现自行车更大的制动距离,同时安装陡坡警告标志;坡度超过3%的路段必须采用铺装路面,以确保具有足够的摩擦系数,进一步保证行车安全。

3 基于人体低功率输出的最大坡度

3.1 上坡坡度

在一般工程项目中,一个高约30 m的障碍物是需要跨越的上限。若按坡长600 m、车速7 km/h估算,需要300 s的上坡时间,即5 min。

对照《训练与竞赛》(第三版)<sup>[18]</sup>Table-4.1,选用5 min或60 min的单位功率,与克服上述障碍物的用时相匹配。表3为《训练与竞赛》(第三版)车手功率输出表。

| 表3 《训练与竞赛》(第三版)车手功率输出表 |          |           |           |           | 单位:W/kg   |
|------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 车手级别                   |          | 持续时长      |           |           |           |
|                        |          | 5 s       | 1 min     | 5 min     | 60 min    |
| 男                      | 世界级*     | 23.0~25.1 | 10.6~11.5 | 6.8~7.6   | 5.9~6.6   |
|                        | 一般级*     | 12.1~13.6 | 6.4~7.0   | 3.0~3.5   | 2.5~2.9   |
|                        | 新手2      | 10.3~11.8 | 5.75~6.33 | 2.42~2.95 | 1.93~2.41 |
|                        | 新手1      | 10.05     | 5.63      | 2.32      | 1.84      |
|                        |          | 9.75      | 5.51      | 2.21      | 1.74      |
|                        |          | 9.44      | 5.40      | 2.11      | 1.65      |
|                        |          | 9.14      | 5.28      | 2.00      | 1.55      |
|                        |          | 8.84      | 5.16      | 1.89      | 1.46      |
|                        |          | 8.54      | 5.04      | 1.79      | 1.36      |
|                        | 世界级*     | 17.8~19.4 | 8.6~9.2   | 6.0~6.7   | 5.1~5.7   |
| 一般级*                   | 9.9~11.0 | 5.3~5.7   | 2.5~3.0   | 2.0~2.5   |           |
| 新手2                    | 8.6~9.7  | 4.75~5.22 | 1.97~2.45 | 1.58~2.0  |           |
| 女                      | 新手1      | 8.41      | 4.66      | 1.87      | 1.49      |
|                        |          | 8.19      | 4.57      | 1.77      | 1.41      |
|                        |          | 7.97      | 4.47      | 1.68      | 1.32      |
|                        |          | 7.75      | 4.38      | 1.58      | 1.24      |
|                        |          | 7.53      | 4.29      | 1.48      | 1.15      |
|                        |          | 7.31      | 4.20      | 1.38      | 1.07      |

注:\*从一般级到世界级,一共有7个等级,每个等级又划分6区间,在此不详细摘录。

由表3得,50 kg普通女子的功率输出为1.87 W/kg,推算,可以输出93.5 W。

骑行爬坡时,骑手需要克服风阻力、摩阻力及重力做功,总功率 $P_{\text{all}}$ 如公式(4)(单位:W)。

克服风阻需要的功率:

$$P_d = 1/2 \cdot \rho \cdot v_a^2 \cdot v_r \cdot C_D \cdot A$$
 (1)

克服爬坡需要的功率:

$$P_i = v_r \cdot m \cdot g \cdot \sin[\text{atan}(i)]$$
 (2)

克服摩阻力需要的功率:

$$P_R = v_r \cdot m \cdot g \cdot \cos[\text{atan}(i)] \cdot C_{rr}$$
 (3)

爬坡时需要总的功率:

$$P_{\text{all}} = P_d + P_R + P_i$$
 (4)

式(1)至(4)中: $\rho=1.23 \text{ kg/m}^3$ ,15 °C时海平面空气密度; $v_r$ 为相对于地面的骑行速度,m/s; $v_a$ 为逆风风速3 m/s; $C_D$ 为风阻系数0.9; $A$ 为风阻折算面积,取为0.8 m<sup>2</sup>; $i$ 为坡度; $m$ 为质量,人50 kg,自行车15 kg; $C_{rr}=0.016$ 滚动摩擦系数。

以速度 $v_r$ 为横坐标,坡度 $i$ 为纵坐标,可以得到图1,显然,横坐标为10 km/h时,对应的纵坐标为4%,输出功率小于103 W,接近93 W。

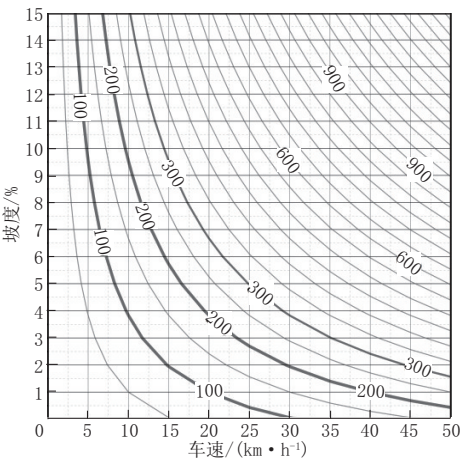


图1 坡度-车速-输出功率关系图(单位:W)

在上海某隧道试验时,在4.9%平均坡度、740 m长坡道上,录得7.4 km/h的最小上坡速度。电动自行车的输出功率约为400 W,较差的也配有250 W的电机,可以15 km/h的速度上7%~8%的坡,通常可持续60 min以上,即坡长可达15 km。

3.2 下坡坡度

自行车下坡不受功率限制,相较中国规范而言,欧美国家普遍对最大下坡规定较为宽松,设计时,为避免下坡时因速度过高引发安全问题,另须验算刹车视距。通常将最大下坡速度确定为40 km/h,加泰罗尼亚规范甚至高达50 km/h。

在上海某隧道试验740 m长坡道上,录得44 km/h的最大下坡速度。

综合以上,有确实需要跨越的非常规障碍物时,建议国内可参考西班牙加泰罗尼亚的规范作为设计指标,包括纵坡坡度、控制坡长及最大下坡速度。

3.3 小结

本节通过计算骑手爬坡时的功率,并结合现代



统计生物学中的人体低功率输出数据,旨在论证一般人群在持续爬坡时所能克服的坡度,并得出结论:普通人,在 100 W 左右的输出功率下,可以在 5 min 内以 10 km/h 的速度骑行通过 4% 的坡度,坡长约 800 m;电动自行车,输出功率在 250 W 以上,可以 15 km/h 的速度上 7%~8% 的坡,直到电池耗尽。

4 大纵坡高速下坡时的刹车安全

4.1 刹车视距

欧美各国在进行纵断面设计时,除考虑普通人在骑行过程中爬坡的舒适性外,对下坡时可能产生的高速行驶的安全性进行了规定。在高速行驶情况下,停车视距是保证不发生碰撞的最重要指标。在坡度转折处,竖曲线本身可能遮挡视线。在目前国内的设计规范中,对最小的刹车距离和竖曲线长度讨论较少。

为了确保道路使用者能够及时发现并应对突发状况,自行车道的设计必须预留充足的停车视距。计算这一距离时,需要考虑从感知到制动反应时间、初始速度、车轮与路面间的摩擦系数以及制动系统的性能和等级。这些因素共同决定了用户到达完全控制状态的停车点所需的距离。该距离可由公式(5)确定。

$$D = \frac{(v_r)^2}{254(f \pm i)} + v_r t \tag{5}$$

式中: $D$ 为刹车视距,m; $v_r$ 为相对于地面的骑行速度,m/s; $f$ 为车轮滑动摩擦系数; $i$ 为坡度,下坡时取为负值; $t$ 为从感知到制动反应时间,s。

由公式(5)知,在速度确定的情况下,反应时间和路面行驶状况决定的摩擦力,对刹车视距起主要作用。中国在公路设计中,采用小客车视点高度 1.2 m、障碍物高度 0.1 m 确定,规范采用的最小速度为 20 km/h。在城市道路工程设计规范中采用 2.0 m 货车视点,障碍物高度 0.1 m,明确采用 1.2 s 的反应时间,路面摩擦系数采用 0.4。表 4 所示为欧美各国刹车视距汇总表。

表 4 欧美各国刹车视距汇总表

| 国家         | 反应时间/s | 眼部水平/m  | 障碍物高度/m |
|------------|--------|---------|---------|
| 荷兰         | 2      |         |         |
| 西班牙(加泰罗尼亚) | 2.5    | 1.4     | 0.0     |
| 英国         | 2      | 0.8~2.2 | 0.0~2.4 |
| 美国         | 2.5    | 1.4     | 0.0     |

注:除西班牙加泰罗尼亚和美国以外,其余国家的反应时间均参考平曲线设计参数。

在表 4 中可以看到,西班牙加泰罗尼亚(2008)和美国 AASHTO2012 规范均以 1.4 m 视点高度、0 m 障碍物高度、2.5 s 反应时间作为计算参数。在 4% 的坡上,用 40 km/h 速度降坡,反应时间为 2.5 s,需要 80.27 m 的刹车视距,而反应时间为 1.2 s 时,则需要 65.82 m 的刹车视距。

摩擦系数是影响最短竖曲线长度的关键参数。一般在干燥条件下,自行车刹车时的摩擦系数为 0.32,但不同的运动方式在路面上的摩擦系数有所不同,如直排轮滑为 0.20,躺式自行车为 0.30。出于安全考虑,美国给出的摩擦系数选用较低的 0.16,适用于湿滑路面;西班牙加泰罗尼亚规范的摩擦系数则采用 0.25。对于铺装路面,一般认为采用 0.25 的摩擦系数安全能得到保障。表 5 为公式(5)计算得到的刹车视距。

表 5 式(5)计算得到的刹车视距

| 行驶速度 $v_r$ /<br>(km·h <sup>-1</sup> ) | 坡度 $i=0\%$  | 坡度 $i=-5\%$ | 坡度 $i=-10\%$ |
|---------------------------------------|-------------|-------------|--------------|
|                                       | 刹车视距 $D$ /m |             |              |
| 5                                     | 2.1         | 2.2         | 2.3          |
| 10                                    | 4.9         | 5.3         | 6.0          |
| 15                                    | 8.5         | 9.4         | 10.9         |
| 20                                    | 13.0        | 14.5        | 17.2         |
| 25                                    | 18.2        | 20.6        | 24.7         |
| 30                                    | 24.2        | 27.7        | 33.6         |
| 35                                    | 31.0        | 35.8        | 43.8         |
| 40                                    | 38.5        | 44.8        | 55.3         |
| 45                                    | 46.9        | 54.9        | 68.1         |
| 50                                    | 56.0        | 65.9        | 82.3         |

4.2 最短竖曲线长度与最小竖曲线

对于凸形竖曲线,曲线本身会遮挡车手视距,因此须检算最短曲线长度,可通过平面几何方法计算得到,见公式(6)、(7),取其大值。美国规范和西班牙加泰罗尼亚规范均采用以上两个公式的大值控制最短竖曲线长度。

$$L = 2D - \frac{200(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{i} \tag{6}$$

$$L = \frac{iD^2}{100\left(\sqrt{2h_1} + \sqrt{2h_2}\right)^2} \tag{7}$$

式中: $L$ 为竖曲线最小长度,m; $h_1$ 为视点高度,m; $h_2$ 为障碍物高度,m。

表 6 列出了计算得到的不同坡度情况下的竖曲线最小长度,供参考。

易知,竖曲线最小半径  $R_{\min} = L/i$ ,当以 40 km/h 速度下 5% 的坡时,需要的刹车视距依据公式(5)可计

表6 不同坡度情况下的竖曲线最小长度 单位:m

| 视距 | 坡度 |    |    |    |     |     |     |     |     |
|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
|    | 2% | 3% | 4% | 5% | 6%  | 7%  | 8%  | 9%  | 10% |
| 15 |    |    |    |    |     |     |     |     | 2   |
| 20 |    |    |    |    |     |     | 5   | 9   | 12  |
| 25 |    |    |    |    | 3   | 10  | 15  | 19  | 22  |
| 30 |    |    |    | 4  | 13  | 20  | 25  | 29  | 32  |
| 35 |    |    |    | 14 | 23  | 30  | 35  | 39  | 44  |
| 40 |    |    | 10 | 24 | 33  | 40  | 46  | 51  | 57  |
| 45 |    |    | 20 | 34 | 43  | 51  | 58  | 65  | 72  |
| 50 |    | 7  | 30 | 44 | 54  | 63  | 71  | 80  | 89  |
| 55 |    | 17 | 40 | 54 | 65  | 76  | 86  | 97  | 108 |
| 60 |    | 27 | 50 | 64 | 77  | 90  | 103 | 116 | 129 |
| 65 |    | 37 | 60 | 75 | 91  | 106 | 121 | 136 | 151 |
| 70 |    | 47 | 70 | 88 | 105 | 123 | 140 | 158 | 175 |

算得到44.8 m,查表6可知,最小竖曲线长度为34 m, $R_{\min}=34\text{ m}/5\%=680\text{ m}$ 。这个数值较城市道路设计规范的最小竖曲线半径400 m大。

4.3 小结

为确保自行车道在长纵坡高速下坡时的安全性,设计时必须充分考虑刹车视距和最短竖曲线长度。这需要综合骑手反应时间、路面摩擦系数、视点高度、障碍物高度等多种因素。本节参考国际先进规范,并采用国内相关参数进行演算,建议反应时间采用1.2~2.5 s,摩擦系数采用0.25,同时讨论了在这种假定条件下的最小竖曲线长度和最小竖曲线半径。计算结果表明,在设计高速的自行车专用道时,应加强校核最小竖曲线长度和最小竖曲线半径。

5 骑行难度评价

比利时和荷兰的规范通过计算平均坡度和坡长来衡量骑手爬坡的费力程度 $Z$ ,可通过公式(8)计算:

$$Z=(i)^2\times L=H^2/L$$
 (8)

式(8)中: $Z$ 为费力程度; $i$ 为坡度; $L$ 为坡长,m; $H$ 为坡高,m。

这两本规范将 $Z$ 的目标设置为0.033 3~0.2,并以0.075为舒适值。当风阻较大时,取下限0.033 3;风阻较小时,取上限0.2。对应的坡度最大值为6.67%~10%,舒适的坡度为7.5%。

在具体使用时,比如在风阻较小的情况下,类似隧道或地下通道,可以选择更陡峭的坡度。相反,在风阻较大的情况下,如开阔地面上的桥梁,则倾向于选择较为平缓的坡度。显然,即使在风阻较小或几乎没有风阻的情况下,也可以选择较平缓的坡度以

提高骑行舒适度。图2展示了目标值(中心线)及其舒适范围。

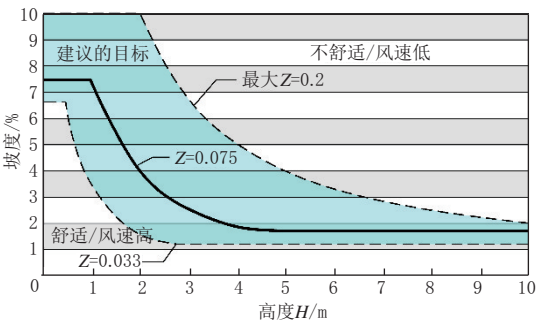


图2 荷兰规范坡道难度Z评价范围

图2参考1984年Laarhoven的研究成果,以更舒适的骑行体验为目标,并以荷兰这种平原国家的一般工程为调研对象来确定坡道难度评价范围,对需要翻越较大的障碍物的设计应用较为受限,比如爬坡超过3 m时,坡度需要在2.5%以下。

对于更高更远的爬坡路线,其评价方法可以参考环法自行车赛的标准。

环法自行车赛在1933年开始提出了一个赛段难度分类方法<sup>[19]</sup>,此方法被全球自行车赛事广泛接受并采纳,当各路段坡度不同时可分段累加:

$$D_{\text{总}}=i^2\times\frac{L}{100}$$
 (9)

式中: $D_{\text{总}}$ 为路段难度; $i$ 为坡度; $L$ 为坡长,m。

4级坡,  $0<D_{\text{总}}\leq15$ ; 3级坡,  $15<D_{\text{总}}\leq90$ ; 2级坡,  $90<D_{\text{总}}\leq180$ ; 1级坡,  $180<D_{\text{总}}\leq360$ ; HC级,  $360<D_{\text{总}}$ 。

与荷兰规范比较,采用坡度和距离两因子的乘积表达难度系数,其适用范围更广。

用需要跨越30 m高的山坡试设计:采用4%的坡,坡长750 m,  $D_{\text{总}}=120$ ,属于2级坡;若采用2.5%的坡,坡长1 200 m,  $D_{\text{总}}=75$ ,属于3级坡。当采用80 m高4%的坡时,难度系数将达到320,属于1级坡;当采用100 m高2.5%的坡时,难度系数也达到200,也属于1级坡。显然,3级坡以下的坡度其舒适度较高。

采用本骑行难度评价,可以综合考虑坡度以及骑行距离之间的相关影响,而且可以拓展到设计特殊地形时产生的长大纵断面的方案评估。

6 结 语

(1)本文建立了骑行者在特定输出功率条件下爬坡坡度与骑行速度之间的量化关系,并将其扩展至电动自行车场景。普通人在100 W输出功率下,可以在5 min内以10 km/h的速度骑行4%的坡度,坡

长约800 m。电动自行车输出功率在250 W以上,可以15 km/h的速度上7%~8%的坡,直到电池耗尽。

(2)为确保自行车道在长纵坡以较高速度下坡时的安全性,设计时必须预留足够刹车视距和最短竖曲线长度。建议反应时间采用1.2~2.5 s,摩擦系数采用0.25。在设计高速的自行车专用道时,应加强校核最小竖曲线长度和最小竖曲线半径。

(3)为评估骑行难度,本文提出引入环法自行车赛难度系数作为路线设计的评价参考,更适合我国国情。

#### 参考文献:

- [1] 左廷伟, 衡恒. 自行车道网络规划连通性优先与公交衔接的多准则决策分析[J]. 交通运输研究 A 辑: 政策与实践, 2019(127): 102-115.
- [2] BIKE EAST BAY. Richmond-San Rafael Bridge Pathway Pilot Q&A[EB/OL]. (2019-11-13) [2025-07-21]. <https://bikeeastbay.org/rsrbridgepilot>.
- [3] ZHANG Y P, MI Z F. Environmental benefits of bike sharing: A big data-based analysis[J]. Applied Energy, 2018(220): 296-301.
- [4] STEINACKER Christoph, STORCH David-Maximilian, TIMME Marc, et al. Demand-driven design of bicycle infrastructure networks for improved urban bikeability[J]. Nature Computational Science, 2022, 2(10): 1-10.
- [5] 住房和城乡建设部城市交通基础设施监测与治理实验室, 中国城市规划设计研究院. 2023年度中国主要城市道路网密度与运行状态监测报告[R]. 北京: 住房和城乡建设部, 2023.
- [6] 中国城市规划设计研究院. 2024年度中国主要城市共享单车/电单车骑行报告[R]. 北京: 中国城市规划设计研究院, 2024.
- [7] JTG 2112—2021 城镇化地区公路工程技术标准[S].
- [8] ROOS L. Rijwielpaden en voetpaden[J]. Wegen, 1946(11): 45-52.
- [9] VAN LAARHOVEN A J M. Ontwerpen van hellingen voor fietsers[J]. Verkeerskunde, 1984, 35(12): 34-40.
- [10] CROW-werkgroep Fietsvoorzieningen. Tekenen voor de fiets: Ontwerpwijzer voor fietsvriendelijke infrastructuur[S]. (1993). SN 90-6628-157-X.
- [11] CROW. Ontwerpwijzer fietsverkeer[S]. Ede: CROW, 2006.
- [12] CROW. Design Manual for Bicycle Traffic 2012[EB/OL]. (2012-01-01) [2025-06-12]. <https://crowplatform.com/product/design-manual-for-bicycle-traffic/>.
- [13] Department for Transport (UK). Cycle Infrastructure Design (Local Transport Note 1/20)[S]. London: Department for Transport, 2020.
- [14] Bruxelles Mobilité. Vadémécum vélo en Région de Bruxelles-Capitale Cahier Cyclostrades[S]. Bruxelles: Bruxelles Mobilité, 2020.
- [15] Generalitat de Catalunya. Manual per al disseny vieses ciclistes a Catalunya[S]. Barcelona: Generalitat de Catalunya, 2018.
- [16] AASHTO. Guide for the Development of Bicycle Facilities-2012[S]. Washington D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [17] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV). Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) 03.02.13 - Radverkehr[S]. Wien: FSV, 2022.
- [18] Hunter Allen, Andrew R, Coggan, Stephen McGregor. Training and Racing with a Power Meter[M]. 3rd ed. Boulder: VeloPress, 2019.
- [19] Velowire. À votre Tour : CLASSIFICATION DES COLS ET COTES [EB/OL]. (2015-04-05) [2025-06-12]. <https://www.velowire.com/avotretour/thread/398/8/classification-des-cols-et-cotes.html>.
- [4] 黄学文, 吴新国. 层间处治技术对水泥混凝土桥面沥青铺装抗剪性能影响的研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(6): 104-6.
- [5] 徐永钢. 钢桥面 ERS 结构界面处治方案研究[J]. 公路交通技术, 2016, 32(4): 83-5.
- [6] 万晨光, 申爱琴, 郭寅川, 等. 混凝土桥桥面铺装层间结构剪切行为[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(1): 1-8.
- [7] 黄飞. 混凝土桥面界面处治方式的研究和探讨[J]. 交通建设与管理, 2013(6): 80-1.
- [8] HELSEL M A, MUÑOZ J F, HABER Z B, et al. Effect of bridge deck surface preparation on the consolidation and bond of UHPC overlays[J]. Construction and Building Materials, 2023, 364: 129860.
- [9] 胡海波, 刘刚, 钱振东, 等. 武汉青山长江公路大桥混凝土桥面防水粘结层试验研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(增刊1): 57-62.
- [10] 朱定, 张劲文. 港珠澳大桥钢桥面铺装精益施工管理[J]. 公路, 2019, 64(2): 200-2.
- [11] 李嘉, 邹衡, 张恒龙, 等. 基于数字图像技术的 UHPC 表面特性与黏结性能识别[J]. 公路交通科技, 2023, 40(1): 76-84.
- [12] 石长洪, 郑俞, 严二虎, 等. 长寿命路面结构层间处治方案及黏结性能[J]. 公路交通科技, 2022, 39(7): 30-39.
- [13] HE H, AI C, LIU Y, et al. Characterization of interlayer bonding mechanism based on interface morphology in double-layered asphalt systems[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(6): 04023121.
- [14] YANG K, LI R, YU Y, et al. Unified laboratorial evaluation of interlayer bond property in asphalt pavements based on strength parameters[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121738.

(上接第 69 页)