

场地

- 自行车赛道力学分析

- 自行车赛道计算机辅助设计

- 自行车赛道超高模型分析与优化

自行车

赛道设计与优化

程建川 孔繁星 李方◎著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

场地自行车赛道设计与优化

程建川 孔繁星 李 方 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

南京·2015

内容提要

本书在介绍国内外场地自行车赛道设计技术的基础上,从自行车赛道力学分析出发,选择典型自行车比赛轨迹线建立自行车赛道的超高模型进行分析、优化;运用计算机进行赛道几何设计和骑行线轨迹分析;并自创场地自行车赛道设计与分析系统——CTCAD软件对线形设计、超高过渡方案进行优化调整和骑行预分析,使设计者能在满足传统赛道设计要求的基础上,有效地改善设计成果质量,达到提高运动员比赛成绩的目的;最后针对具体的案例阐述运用 CTCAD 软件进行场地自行车赛道设计的具体步骤和优越性。

本书可供自行车场馆设计师、工程师阅读参考,也可作为相关专业师生和运动员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

场地自行车赛道设计与优化 / 程建川,孔繁星,李方著. —南京:东南大学出版社,2015.4

ISBN 978-7-5641-5651-0

I. ①场… II. ①程…②孔…③李… III. ①赛车场
自行车运动—赛车场—建筑设计 IV. ①TU245.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 066084 号

场地自行车赛道设计与优化

著 者 程建川 孔繁星 李 方
责任编辑 宋华莉
编辑邮箱 52145104@qq.com

出版发行 东南大学出版社
出 版 人 江建中
社 址 南京市四牌楼 2 号(邮编:210096)
网 址 <http://www.seupress.com>
电子邮箱 press@seupress.com
印 刷 南京玉河印刷厂
开 本 700 mm×1000 mm 1/16
印 张 7.25
字 数 118 千字
版 次 2015 年 4 月第 1 版第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-5651-0
定 价 36.00 元

经 销 全国各地新华书店
发行热线 025-83790519 83791830

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系,电话:025-83791830)

序 言

2008 年末,距离第十一届全国运动会不到一年时间,国家体育总局下属一个企业给我们来电,要求我们编制一套设计场地自行车赛道的软件,为济南全运会赛道设计做准备。这就是第一代 CTCAD 软件。

时过一年,奥运会老山自行车赛馆的施工单位——大连千森集团又要求我们编制一套“新一代”场地自行车赛道设计软件,并以他们的名义做个赛道方案参与广州亚运会自行车场馆投标。我们用了一个星期时间,将“新一代”软件原来每个缓和曲线的构成只是单一回旋线改成了两个不同参数的复合回旋曲线,投标方案也因有创新且属国内领先而中标。

虽然投标方案我们中了标,可是施工图设计却请的是德国舒尔曼公司,我就琢磨,为什么我们中了标却仍然让德国公司做呢?肯定是我们自己拿不出让国家放心的成熟设计理念与实践经验吧!于是下决心和志同道合者如东南大学程建川教授、南京李方繁星软件科技有限公司孔繁星一起,开始了可说“少人问津”的“场地自行车赛道设计与优化”的研究历程。

从 2008 年到 2014 年,漫长的 6 年多时间,从开始认知场地自行车赛道测量线不同于按二维处理的道路路线,而是给定某一长度(例如 250 m)的三维空间线,无法用传统的公式推导以求解;继而发现其超高模型极为复杂,几乎所搜集到的已建赛道相关资料无一相同,难于识别其优劣;随之发现德国设计的赛道缓和曲线是由多段未知曲线所构成;林林总总,不一而足。总之,许多出乎意料的技术障碍始终在企图摧毁我们想破解场地自行车赛道设计奥秘和开发高水平 CAD 软件的决心。

然而“中国梦、我的梦”给了我们力量,这一道道难关被我们克服了。我们的合作伙伴——大连千森集团利用他们的市场优势,借助我们的研究成果和设计软件,已在国内设计与建造了七八座高水平的场地自行车



木制专用赛道。我们当年还只是第二代的成果就已经用到了广州亚运会自行车场馆的建造中。与当时的最新设计理念不无联系的是,亚运会上选手们成绩优异,共打破六项亚洲纪录,因而赛场的建设也获得了国际自行车联盟(UCI)的高度认可。

目前,我们已在最新的研究成果基础上开发出极具优势的第三代CTCAD软件,这一软件将更能让设计者随心所欲地设计出他所希望的场地自行车赛道线形,同时优化出相当理想的超高模型。

不仅如此,两年来应许多部门的要求,我们开始了关于室内外山地自行车赛道与滑板运动场地设计的研究,原计划将山地车赛道已有成果与本书一道出版,但总觉仓促,只得等更成熟些再说。

俗话讲,“学海无涯,进无止境”。我们虽然在自行车运动赛场与设施研究上获得了一定的成绩,但我们知道自己已经做了什么,也知道自己该继续做些什么。我们愿以唐代著名诗人王之涣的《登鹳雀楼》自勉:

“白日依山尽,黄河入海流。欲穷千里目,更上一层楼。”

东南大学交通学院退休教授

2015年1月10日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 国外发展概况	1
1.2 国内发展概况	2
1.3 广州自行车馆木制专用赛道超高模型优化设计的研究及技术路线	3
1.3.1 主要研究内容	3
1.3.2 技术路线	4
第 2 章 自行车赛道力学分析	5
2.1 骑行轨迹线的确定	5
2.2 行驶阻力类型分析	7
2.2.1 空气阻力	8
2.2.2 滚动阻力	8
2.2.3 坡度阻力	9
2.2.4 加速阻力	9
2.3 车辆行驶力学模型分析	10
2.3.1 横断面受力分析	10
2.3.2 纵断面受力分析	11
2.4 不同超高模型与不同轨迹线时的骑行分析	12
2.4.1 沿测量线骑行分析	13



2.4.2 争先资格赛轨迹线骑行分析·····	14
2.5 竖向离心力及竖向曲率分析·····	15
第3章 自行车赛道计算机辅助设计 ·····	16
3.1 赛道几何设计·····	17
3.1.1 赛道几何设计系统的总体结构·····	17
3.1.2 赛道设计系统的主要功能·····	19
3.1.3 赛道模型的几何计算·····	25
3.1.4 赛道设计图纸的绘制·····	45
3.2 赛道骑行分析·····	56
3.2.1 研究意义及基本流程·····	56
3.2.2 骑行线轨迹线定制及基础数据的采集·····	56
3.2.3 骑行速度分析·····	59
3.2.4 竖向离心力及竖向曲率的分析·····	62
第4章 自行车赛道超高模型分析与优化 ·····	64
4.1 现有赛道超高方式的分析·····	64
4.1.1 赛道一·····	64
4.1.2 赛道二·····	69
4.1.3 赛道三·····	72
4.2 超高模型的优化概述·····	76
4.2.1 超高模型优化变量·····	76
4.2.2 超高模型优化的目标函数·····	76
4.2.3 超高模型优化的实用方法·····	76
4.3 优化后的超高模型·····	78
4.3.1 优化模型一·····	78
4.3.2 优化模型二·····	79
4.4 优化后超高模型分析·····	87

4.4.1 赛道三平面	87
4.4.2 赛道一平面	88
4.4.3 赛道二平面	90
4.4.4 广州赛道平面	91
4.4.5 基于广州赛道平面的超高模型再优化	93
 第5章 结语	 98
 参考文献	 100
 图表索引	 103
 后记	 108

第1章 绪论

我国在自行车保有量上堪称世界第一大国,但自行车运动成绩却比较落后,其中缺乏自行车运动设施,包括高水平的自行车专用赛道是原因之一。随着国民经济的发展,各项大型体育赛事不断增多,各地对现代化体育设施建造的需求亦迅速增加,建设工程也已付诸实施。然而,由于缺乏理论研究和实践经验,对高水平自行车比赛场馆的设计,特别是允许进行国际比赛而必须由国际自行车联盟(UCI)验收的比赛场馆,至今不得不依赖于国外的设计机构。为此,加强对自行车赛道的平面线形、运动员典型骑行轨迹、超高过渡模型的优化等关键课题的研究,将具有重大意义。

2010年11月12日至27日在中国广州举办的第16届亚运会,是继2008年北京奥运会后又一个推进我国自行车运动发展的大好机遇。在广州大学城体育中心建造的、设有2500个座位的自行车馆采用了木制专用赛道。为了配合该赛道的设计,尽可能提高运动员的比赛成绩,我们就其超高过渡模型在国内外已有赛道资料的基础上进行了优化设计研究,并利用广州大学城体育中心建成的木制专用赛道测试数据进行了验证,结果表明,我们的该项研究获得了显著成效。

1.1 国外发展概况

在自行车赛道设计技术方面处于领先地位的是美国和德国。德国早在1926年就已建成第一座木制赛道,目前全世界建成的木制赛道已达130座左右。在设计理论上,已产生“X”“Y”两个方向(椭圆形赛道的长



轴方向为“X”方向,短轴方向为“Y”方向)不对称的设计概念以及直线段赛道并非直线的新概念。就赛道横坡而言,首先是改变过长固定直道倾斜角的距离的设计;其次,在运动员进入弯道时,要适当减缓弯道倾斜角的变化速率,以克服“超重”现象,而在运动员驶出弯道时,要适当加大弯道倾斜角的变化速率,以提高行驶速度;第三,减少圆曲线段倾斜角是一定值的长度,以克服“超重”和“失重”的感觉,以满足最小加速度变化率的运动条件。这些其实就是如何优化赛道超高模型的问题。

虽然国外已建成众多自行车赛道,但其超高模型不尽相同,这说明对于自行车赛道超高变化的设置还在探索阶段,尚未找到最佳的变化方式。同时,关于自行车赛道设计的研究也较少,相关的研究包括:对 2012 年伦敦奥运会场地自行车赛利用各种模拟技术进行场馆设计建造的介绍;通过激光扫描的办法对场地自行车赛道线形进行的采集和收录;考虑场地自行车赛道设计对选手比赛成绩的预测;F1 汽车赛最佳行驶路线的比选与确立;通过采集自行车赛比赛视频对选手比赛行为的分析;针对自行车比赛中空气阻力影响的计算和研究;基于数学模型的选手比赛策略优化和论证;着眼于选手生理、心理因素的自行车赛影响因素的调查与研究;基于生物机械电子学理论对提高自行车赛成绩的方法讨论等。这些研究的重点并不在场地自行车赛道线形设计上,从而也就说明本课题的研究是非常有意义的。

1.2 国内发展概况

迄今为止,国内自行设计的自行车赛道基本是参考国外的资料完成的,没有自己的理论,其技术依据基本是:直线段(两个),圆曲线段(两个),缓和曲线段(四个)组成一个闭合线,并假设闭合线的赛道是关于“X”“Y”两个方向完全对称的;不仅圆曲线段的倾斜角固定,甚至有些直线段的倾斜角也是完全固定的;设计最高时速偏低(75 km/h);缓和曲线段由一段回旋线或几段圆曲线构成。对照国外已建赛道,这样的设计方法是被公认为相对落后的。

目前我国仅建有很少的几座木制自行车赛道,其中北京某自行车场

馆,是我国参照德国资料设计的全木制赛道。这条赛道长度(测量线)为250.006 m,道面宽度8 m,南北长轴方向长约140 m,东西短轴方向长约80 m,直道长度35.260 m,直道最小坡度 13° ,弯道最大坡度 45° ,设计最高时速85 km/h。该赛道采用了直线段部分不断超高的设计。因为没有向国际自行车联盟申请验收,所以目前只允许举办国内比赛。

2007年10月竣工的奥运场馆——北京老山自行车馆,其木制赛道是由德国舒尔曼建筑事务所设计。老山自行车馆赛道打破以往国内的赛道都是以长短轴对称设计的“惯例”,而采用了 45° 轴对称设计,充分考虑了赛车选手上、下坡时运动轨迹的特点,使选手骑行时更顺畅也更安全。但在奥运会比赛后,仍有运动员反映在该赛道骑行时会有失重的感觉,由此也说明其赛道超高模型的设置存在一定缺陷。

1.3 广州自行车馆市制专用赛道超高模型优化设计的研究及技术路线

1.3.1 主要研究内容

(1) 典型骑行轨迹线的确定

按不同的比赛类别,确定其典型骑行轨迹线。因为不同的比赛其典型骑行轨迹线可能不同;同一种比赛、相同的赛道段落,其典型骑行轨迹线可能也会不同。因此需要对自行车运动员各种比赛的骑行轨迹进行跟踪摄像,并做好现场记录。分析骑行轨迹、车速和成绩之间的关系,结合国际自行车赛道设计新理论,提出适合运动员骑行特性的超高起点位置、终点位置和超高过渡方式模型。

(2) 现有赛道超高方式的分析

对我们目前国内外典型的自行车赛道的超高模型进行统计,分析其各自的特点。这些赛道包括老山赛道等三个,被我们命名为:赛道一、赛道二、赛道三。对不同的超高模型采用统一的典型骑行轨迹线,并在力学模型的基础上,分析比较在不同超高模型下,相同条件的运动员骑行典型轨迹线所用时间、竖向曲率及竖向加速度大小,从而比选出现有的最佳超



高模型。

(3) 超高模型的优化

在总结上述分析结果的基础上,提出改进的超高模型,与已有超高模型进行对比分析,从而得到最值得推荐采用的优化超高模型。

1.3.2 技术路线

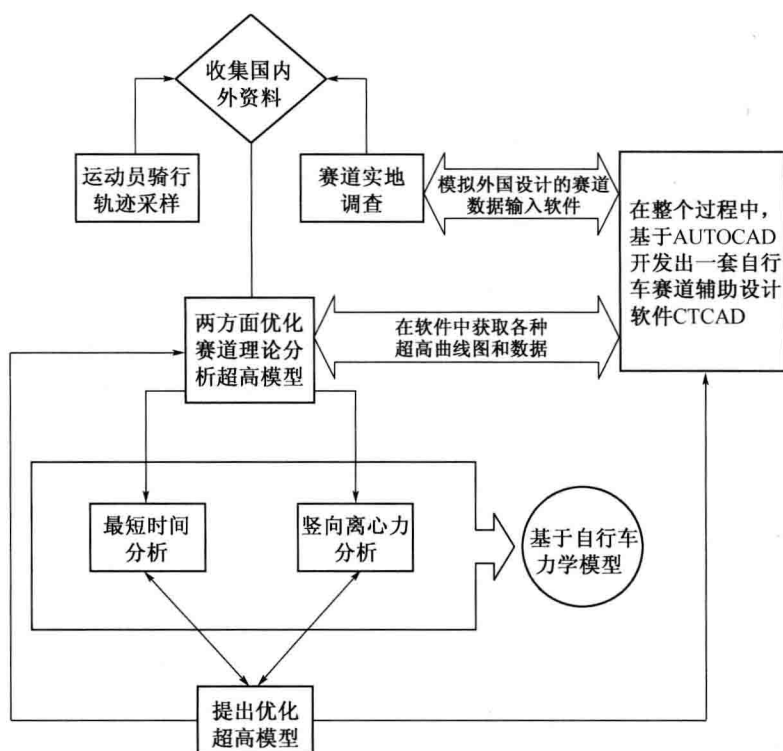


图 1-1 自行车赛道超高模型研究技术路线

注:因本项研究主要基于国内外自行车比赛场馆已有资料进行,而这些场馆均为 250 m 赛道,故相关分析均选用赛道长 250 m。

第2章 自行车赛道力学分析

2.1 骑行轨迹线的确定

同一赛车选手在同一赛道上,不论进行何种比赛,若采用不同的骑行路线行驶,不仅其骑行的适顺性和安全性不同,而且其所能达到的最大速度、骑行时间等也都会有巨大差异。在确定典型轨迹线时,可采用收集到的各类比赛录像,利用慢速播放软件进行统计分析,并结合自行车教练经验,在大家认可的典型骑行轨迹线分布范围内选定。

国际自行车比赛种类繁多,共有计时赛、追逐赛、争先赛、团体竞速赛、记分赛、凯琳赛、麦迪逊赛、捕捉赛等八种不同的比赛形式,同时有些比赛形式还可分为个人和团体两种。因此,在自行车比赛中,运动员的骑行轨迹将会根据比赛形式的变化而变化。在对已有自行车比赛录像进行分析后,可将其分为三类:

(1) 个人追逐赛、团体竞速赛、1 km/500 m 计时赛

通过对比个人追逐赛、团体竞速赛、1 km/500 m 计时赛比赛录像,可发现运动员主要沿测量线骑行,仅在进弯道与出弯道处稍有偏出。

(2) 争先资格赛

争先资格赛是为夺得参加争先赛资格的自行车比赛项目之一,即行进间出发 200 m 计时赛。参赛运动员在争先资格赛中单独出发,无运动员之间的相互影响。每位运动员将主要在 250 m 的场地上沿外边缘骑行两圈多完成预跑,其成绩以最后规定起点、终点的 200 m 的骑行时间计算。为了能够在这 200 m 中以最快的速度骑行,运动员必须在前面两圈



多的预跑中采用合理的轨迹线。正因为这种比赛的骑行轨迹决定了超高模型对骑行时间,即比赛成绩有颇为明显的影响,所以我们选取了争先资格赛作为比选超高模型优劣的计算赛种。

(3) 其他比赛

这里所指的其他比赛形式即除个人追逐赛、团体竞速赛、1 km/500 m 计时赛和争先资格赛之外的其他比赛形式。在(1)、(2)所提到的比赛形式中,选手在骑行时受到的干扰较小,因而可以确定较为典型的骑行轨迹。而其他的比赛形式,则主要依赖选手的个人能力以及比赛中的策略战术,将会根据比赛时的具体情况选择不同的骑行轨迹。

综合以上对自行车比赛的分析,典型骑行轨迹可分为两类:

(1) 沿测量线的典型骑行轨迹

沿测量线骑行的比赛中,虽然不同的比赛骑行圈数不同,但每圈的骑行特点相同,这时的典型骑行轨迹应该就是赛道测量线(见图 2-1)。

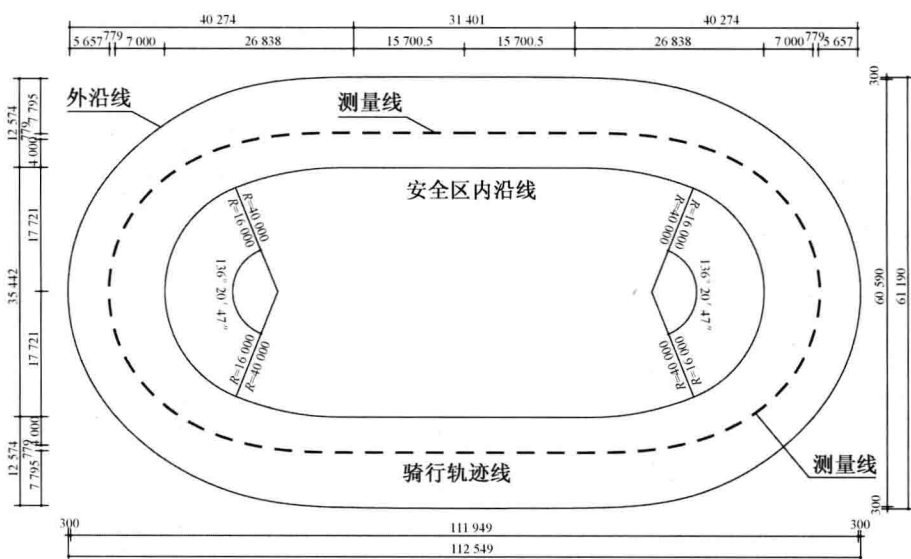


图 2-1 沿测量线的典型骑行轨迹

(2) 争先资格赛的典型骑行轨迹

为能以最快的速度进入 200 m 计时段,运动员必须在预跑圈中完成速度的提升,而对其速度影响最重要的因素就是从赛道外沿线向赛道内

沿线过渡的降坡阶段,经过对众多赛车手行驶轨迹的观察与分析研究,我们选取了如图2-2所示从赛道外沿线逐渐降坡进入赛道内沿线的轨迹作为争先资格赛的典型骑行轨迹。

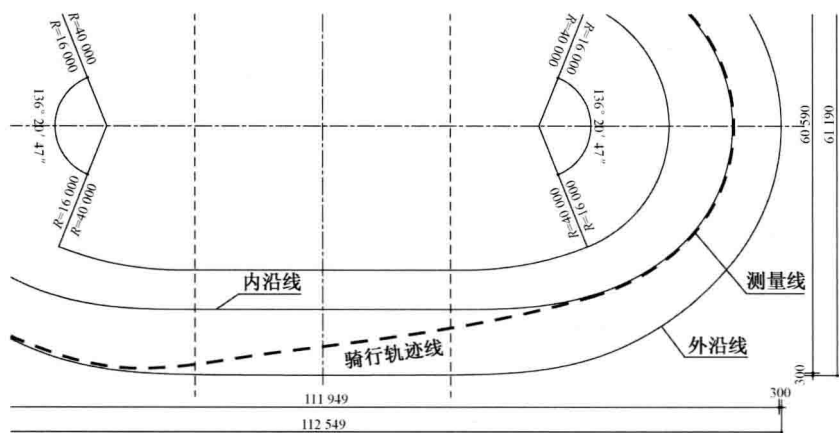


图2-2 争先资格赛的典型骑行轨迹

2.2 行驶阻力类型分析

在赛车行驶过程中,驱动力和行驶阻力共同决定赛车的动力性能。驱动力由运动员提供,行驶阻力包括空气阻力、滚动阻力、坡度阻力和加速阻力。通过建立自行车动力学模型可以得到驱动力矩方程为:

$$T_t = (F_f + F_w + F_\theta + F_a) \times r$$

式中: T_t ——驱动力矩,单位 $\text{N} \cdot \text{m}$;

F_f ——滚动阻力,单位 N ;

F_w ——空气阻力,单位 N ;

F_θ ——坡度阻力,单位 N ;

F_a ——加速阻力,单位 N ;

r ——车轮半径,单位 m 。



2.2.1 空气阻力

空气阻力是自行车在空气中运动时产生的阻力,查阅有关资料其经验公式为:

$$F_w = 0.5 \times c \times \rho \times A \times v^2$$

式中: F_w ——空气阻力,单位 N;

c ——空气阻力系数,与物体几何形状有关,取 $c=0.45$;

ρ ——空气密度,取海拔 200 m 高度, $\rho=1.202 \text{ kg/m}^3$;

A ——行驶方向的投影面积,取 0.58 m^2 ;

v ——相对速度,单位 m/s。

在赛车行驶过程中,空气阻力主要作用在运动员和车轮的迎风面积上,一般力学分析中将其简化为作用于车身质心处的力。

2.2.2 滚动阻力

车轮是赛车的主要运动部件,车轮滚动时轮胎与道面的接触区域产生法向、切向的相互作用力以及相应的轮胎与接触道面的变形。赛车在木制道面上滚动时,轮胎变形是主要的,此时轮胎内部产生弹性迟滞损失,表现为阻碍车轮滚动的阻力偶。

设道面对轮胎的法向反作用力为 F_n ,法向反作用力 F_n 的作用距离为 b ,车轮半径为 r ,滚动阻力偶为 T_f ,则滚动阻力:

$$F_f = \frac{T_f}{r} = \frac{F_n b}{r} = F_n f$$

式中: f ——滚动阻力系数,该系数由实验确定,与道面种类、行驶车速以及轮胎的构造、材料、气压有关。

车轮受力图见图 2-3。

自行车低速(小于 50 km/h)时滚动阻力系数随车速变化不大,高速时则急剧增大,在我们对木制赛道的研究工作中,取稍小于良好的沥青或水泥混凝土路面的滚动阻力系数值 $f=0.01$ 。

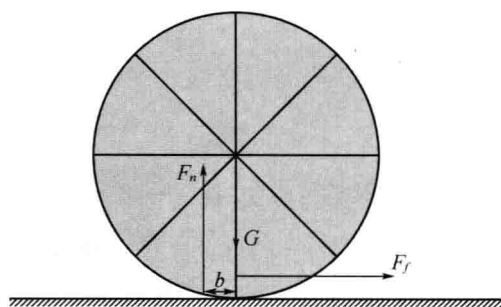


图 2-3 车轮受力图

2.2.3 坡度阻力

坡度阻力是自行车爬坡或降坡时迫使自行车后退或前冲的作用力，其计算式为：

$$F_{\theta} = mg \sin \theta$$

式中： F_{θ} ——坡度阻力，单位 N；

θ ——坡道角度，爬坡为+，降坡为一；

m ——自行车和人的质量，单位 kg；

g ——重力加速度，一般取 9.8 m/s^2 。

2.2.4 加速阻力

赛车加速行驶时，不仅平移的质量产生惯性力，旋转的车轮部件还会产生惯性力偶矩，一般将旋转部件的惯性力偶矩转化为平移质量的惯性力，表达式为：

$$F_a = m \frac{dv}{dt} + \frac{I}{r} \frac{d\omega}{dt} = \left(m + \frac{I}{r^2} \right) \frac{dv}{dt}$$

式中： F_a ——加速度阻力，单位 N；

m ——人和车的质量，单位 kg；

I ——两个车轮的转动惯量，单位 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；

r ——车轮半径，单位 m；

ω ——车轮角速度，单位 rad/s ；

v ——运动员瞬间初速度，单位 m/s ；