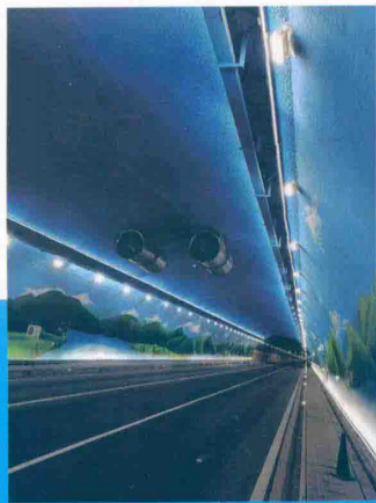


云南省交通运输厅科技计划项目（云交科教便〔2019〕6号）  
陕西省交通运输科技项目〔2015-11K〕

# 长大公路隧道视觉疲劳缓解带 设计与评价



严涛 陈树汪 刘大刚 著  
秦鹏程 何佳银 陈湛文



西南交通大学出版社

-----  
图书在版编目 ( C I P ) 数据

长大公路隧道视觉疲劳缓解带设计与评价 / 严涛等  
著. —成都: 西南交通大学出版社, 2021.5  
ISBN 978-7-5643-7851-6

I. ①长… II. ①严… III. ①长大隧道—公路隧道—  
视觉—疲劳(生理)—调节(生理)—研究 IV. ①U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 245798 号  
-----

Changda Gonglu Suidao Shijue Pilao Huanjiedai Sheji yu Pingjia  
长大公路隧道视觉疲劳缓解带设计与评价

严涛 陈树汪 刘大刚  
秦鹏程 何佳银 陈湛文 著

责任编辑 张宝华  
封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社  
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号  
西南交通大学创新大厦 21 楼)  
发行部电话 028-87600564 028-87600533  
邮政编码 610031  
网 址 <http://www.xnjdcbs.com>  
印 刷 四川煤田地质制图印刷厂  
成品尺寸 170 mm × 230 mm  
印 张 7.25  
字 数 101 千  
版 次 2021 年 5 月第 1 版  
印 次 2021 年 5 月第 1 次  
书 号 ISBN 978-7-5643-7851-6  
定 价 48.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

随着我国公路运输行业的快速发展，长大公路隧道数量日益增多，越来越多的 10 km 级甚至 20 km 级的公路隧道开始修建和运营。随着公路隧道长度及数量的不断增多，驾驶员在隧道内的驾驶时间越来越长，隧道内的驾驶疲劳问题开始显现。由于隧道结构相对封闭，救援工作较难开展，由驾驶疲劳而引发的追尾、碰撞等事故往往产生严重的后果，造成大量的人员伤亡和财产损失。

针对特长公路隧道的驾驶疲劳问题，在隧道内设置疲劳缓解带是目前广泛采取的方式之一。然而，现有隧道内疲劳缓解带的设计多是基于经验，缺乏理论支撑；对于疲劳缓解带设置后的疲劳缓解效果也缺乏合理的评价。针对这一问题，作者依托“高地震烈度区大跨度特长隧道建设与运营关键技术研究”项目，开展了大交通流特长高风险隧道疲劳缓解带设计与评价方法研究。通过研究，探明了特长公路隧道驾驶疲劳致因和驾驶疲劳规律，提出了特长公路隧道疲劳缓解带设计及评价方法，并基于依托工程检验了疲劳缓解带的缓解效果和安全性。本书就是在总结该项研究成果，并全面吸收国内外相关研究成果基础上完成的。

本书共分为 5 章。第 1 章概述，第 2 章隧道内实体环境

对驾驶员疲劳影响特征，第 3 章特长隧道疲劳缓解灯光带设计标准及方法，第 4 章特长隧道疲劳缓解灯光带评价方法，第 5 章结论。

本书由严涛、陈树汪、刘大刚、秦鹏程、何佳银、陈湛文著，云南省交通规划设计研究院有限公司提供了相关资料并对现场测试给予了帮助。同时书中还引用了国内外已有的专著、文章、规范、研究报告等成果，在此对相关编者和作者一并表示感谢。虽然我们尽了很大的努力，但由于学识水平有限，不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2020 年 12 月

## 1

## 第 1 章 概 述

- 1.1 研究背景 ..... 001
- 1.2 研究现状 ..... 003
- 1.3 研究内容 ..... 017

## 2

## 第 2 章 隧道内实体环境对驾驶员疲劳影响特征

- 2.1 特长公路隧道特征及驾驶疲劳致因 ..... 018
- 2.2 特长公路隧道驾驶疲劳规律现场测试 ..... 029
- 2.3 特长公路隧道驾驶员心电与眼动特征 ..... 038
- 2.4 特长公路隧道驾驶员疲劳规律 ..... 050
- 2.5 小 结 ..... 052

## 3

## 第 3 章 特长隧道疲劳缓解灯光带设计标准及方法

- 3.1 疲劳缓解灯光带的位置和间距 ..... 055

3.2	疲劳缓解灯光带的长度 .....	057
3.3	疲劳缓解灯光带的亮度和形式 .....	058
3.4	杨林特长隧道疲劳缓解灯光带设计 .....	066
3.5	小 结 .....	067

# 4

## 第 4 章 特长隧道疲劳缓解灯光带评价方法

4.1	特长公路隧道疲劳缓解灯光带效果 评价现场测试 .....	069
4.2	驾驶员穿越特长隧道疲劳缓解灯光 带心电与眼动特征 .....	073
4.3	疲劳缓解灯光带缓解效果检验 .....	079
4.4	疲劳缓解灯光带安全性评价 .....	088
4.5	小 结 .....	099

# 5

## 第 5 章 结 论

## 参考文献

# 第 1 章 概 述

## 1.1 研究背景

改革开放 40 余年来,随着我国经济水平的不断提高,以及城市群的发展、西部大开发战略等国家发展计划的实施,交通运输成为促进我国经济发展的重要基石,交通运输行业也因此取得了飞速发展。我国地形条件复杂,尤其是西部地区多山岭丘陵,地形崎岖,交通联络不便,使得公路隧道成为公路网的重要组成部分,我国的公路隧道建设也因此得到了快速发展。根据中华人民共和国交通运输部 2018 年交通运输行业发展统计公报,2018 年年末全国公路总里程 484.65 万 km,比上年增加 7.31 万 km;公路隧道 17 738 处、1 723.61 万 m,增加 1 509 处、195.10 万 m,其中特长隧道 1 058 处、470.66 万 m。在坚持可持续发展,切实保护生态环境和有限土地资源的战略方针指导下,长大隧道技术要求越来越高,建设任务也越来越重。图 1-1 为 2013—2018 年,我国特长公路隧道累计数量和长度的发展情况,由此可看出,我国特长公路隧道累计数量和长度呈现出逐年增加的态势。

根据《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018),长度超过 3 km 的公路隧道称为特长隧道。随着公路隧道建设的不断推进,许多公路隧道长度已经远远超出 3 km,如图 1-2 所示。

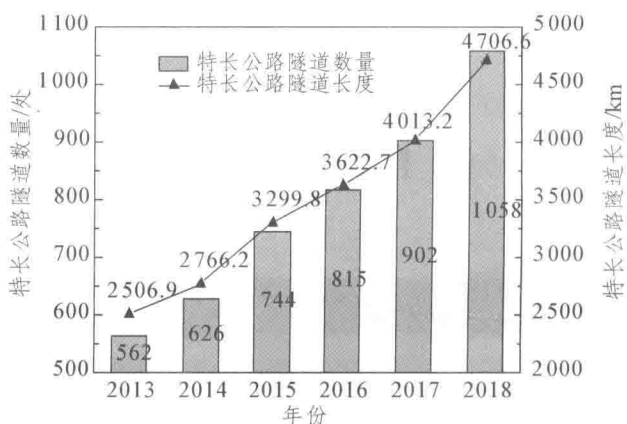


图 1-1 2013—2018 年我国特长公路隧道累计数量和长度

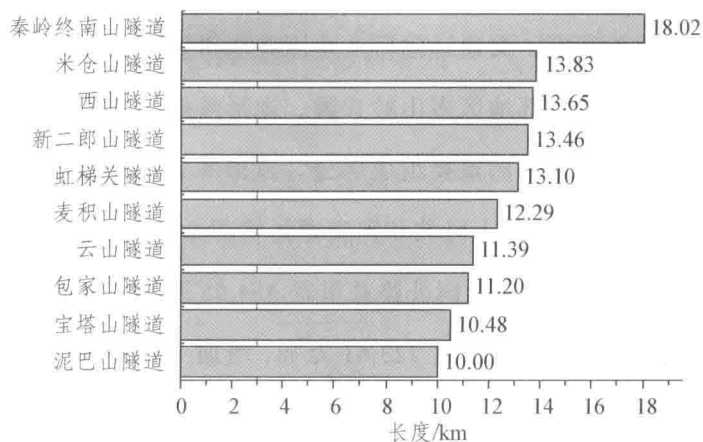


图 1-2 截至 2019 年 8 月我国已运营部分 10 km 以上公路隧道

目前，随着公路隧道修建长度日趋增长，修建与运营技术亦日趋复杂，在组合式通风技术、围岩动态量测反馈分析技术、围岩稳定技术、支护及衬砌结构技术、运营交通简易监控技术、新型防水、排水、堵水技术等方面有众多成功案例，部分成果已处于国际领先水平，真正实现了截弯取直、节省运费、改善运输环境以及保护生态环境等功能，极大地促进了交通运输业的发展。然而，隧道作为公路的瓶颈路段，也暴露出其由于环境特殊性而易引发交通事故的道路安全问题。近年来，在公

路隧道通车里程不断增长的同时也发生了多起重、特大交通事故。例如，2009年9月17日凌晨，京珠北高速公路南行乌坑坝隧道发生一宗4车连环追尾重大交通事故，一辆双层大客车内有15人被困，1人当场死亡，4人伤势严重；2010年1月1日，渝湘高速公路界石往南川方向的太平隧道内，2分钟内发生6起车祸，造成23辆车相撞。

随着隧道数量和长度的增加，交通事故成为影响隧道运营安全发展的瓶颈，而其中驾驶疲劳肇事是造成隧道交通事故尤其是高速公路隧道交通事故的重要原因之一。隧道狭长而相对封闭的特性决定了隧道交通安全的复杂性。特长隧道内驾驶员需要穿越的时间更长，驾驶员极易因单调昏暗环境而产生驾驶疲劳现象，一旦在隧道内发生交通事故，将会产生重大影响，加上疏散和救援都相对困难，影响公路通行。

## 1.2 研究现状

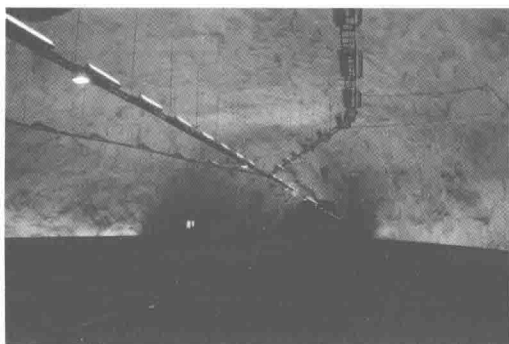
### 1.2.1 公路隧道疲劳缓解灯光带设计及应用现状

通过规范调研发现，我国《公路隧道设计规范》(JTG D70 2—2014)和《公路隧道照明设计细则》(JTGT D70 2-01—2014)中并没有对隧道内特殊灯光带的设计方法做出相应的规定，只是部分省份在地方隧道照明指导意见中对疲劳缓解带的设置进行了一定说明，给出了相应的推荐值。例如，山西省《公路隧道照明设计规范》(DB14/T722—2012)规定：在地质条件允许时，7 km及以上特长隧道洞内宜设置特殊灯光带，特殊灯光带内宜设置与主洞照明有不同视觉场景和效果的景观照明设施；特殊灯光带可在洞内按3.5~5 km等间距布设，每处特殊灯光带可采用净高和净宽渐变式的轮廓断面尺寸，每处灯光带设计长度宜在200~250 m，道路照

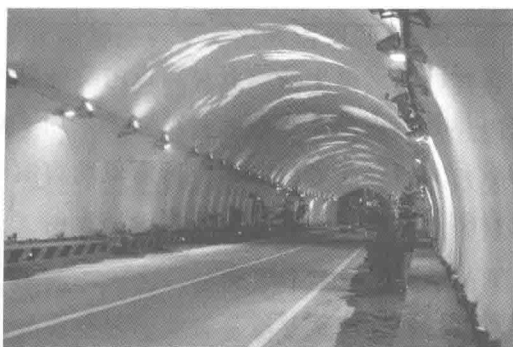
明亮度值宜取中间段照明亮度值的 2.5 ~ 3 倍；特殊灯光带景观照明应不影响中间段的道路功能性照明；特殊灯光带照明应采用独立回路供电，宜选用多类型的灯具搭配，以使特殊灯光带可根据早晨、白天、傍晚等时序做相应的控制，进而形成与驾驶员在时间感上一致的照明效果。

特长公路隧道内的驾驶疲劳问题往往造成较为严重的后果，因此，这一问题得到了国内外许多隧道设计者的关注，他们逐渐开始在特长隧道内部设置疲劳缓解灯光带。关于超特长公路隧道内驾驶疲劳缓解设计的研究始于挪威。于 2001 年通车的挪威洛达尔隧道（Lærdal tunnel）是目前世界上最长的公路隧道，隧道全长达 24.51 km。为了缓解驾驶员在隧道内驾驶的疲劳，保障行车安全，设计者在考虑隧道内环境和灯光系统的设计后，用三个大洞穴以大约 6 km 的间隔将隧道分成四部分，并在每个洞穴中设置了特殊的灯光带。洞穴和特殊灯光带的设计将长隧道分割成几个连续的短隧道，使驾驶员感觉到他是在一系列较短的隧道中穿行，有效地缓解了隧道内长距离驾驶带来的疲劳，如图 1-3（a）所示。

我国隧道设计者为缓解隧道内因长距离行驶带来的疲劳问题同样进行了一些有益的尝试。秦岭终南山特长公路隧道位于包茂高速公路陕西省境内西安-柞水段，横穿秦岭，全长 18.02 km，按 60 km/h 的车速计算，需要近 20 min 的时间才能通过。因此，在设计此隧道时，设计者考虑到驾驶员在隧道内的驾驶疲劳问题，为避免由此带来的安全隐患，在此隧道内采用特殊灯光带来缓解疲劳方案。这是我国公路史上的首创。洞内每隔 4 km 左右设置一处长度为 150 m 的特殊灯光带，共设置三处，相当于将隧道分为四段较短的隧道，灯光带的具体位置见表 1-1。拱顶采用“蓝天白云”灯光设计方案，并在两旁布设人工仿真植物，如图 1-3（b）所示。特殊灯光带的使用具有很强的美学功效，但更重要的是增强了驾驶员在隧道内的安全感、舒适感，缓解了单调感，在一定程度上避免了驾驶疲劳的产生。



(a) 挪威洛达尔隧道特殊灯光带



(b) 中国秦岭终南山公路隧道特殊灯光带

图 1-3 隧道内特殊灯光带

表 1-1 秦岭终南山隧道西安方向特殊灯光带设计参数

灯光带编号	长度/m	距隧道入口位置/m	间隔/m
1	150	5 205	—
2	150	9 216	3 861
3	150	12 891	3 525

继秦岭终南山特长公路隧道之后，我国陆续兴建的一些其他公路隧道也采用了疲劳缓解灯光带设计，如麦积山隧道、云山隧道、六盘山隧道等，其部分设计参数如表 1-2 所示。

表 1-2 我国部分隧道特殊灯光带设计参数

隧道名称	省(市、自治区)	隧道长度/km	设计速度/km/h	灯光带数量	间距或距入口位置/m	灯光带长度/m
西山隧道	山西	13.6	80	1	6.8	200
麦积山隧道	甘肃	12.3	80	2	4	100
云山隧道	山西	11.4	80	1	5.7	200
宝塔山隧道	陕西	10.5	80	2	3.5	200
六盘山隧道	宁夏	9.5	80	1	5	200
葡萄山隧道	重庆	6.3	80	1	3	20
华岩隧道	重庆	5.1	60	4	1	100

综上所述,现行国家规范中还没有对隧道内特殊灯光带的设计方法做出相应的规定。尽管国内外不少特长公路隧道采用了疲劳缓解灯光带设计,但现有的设计大多基于经验判断,所形成的方案最终也不完全相同,更没有系统科学的方法,缺乏理论依据。

### 1.2.2 驾驶疲劳的分类

疲劳可根据各种原因分为不同的类型。Brown 首先区分了身体疲劳 (physical fatigue) 和精神疲劳 (mental fatigue)。Desmond 和 Hancock 将与认知超负荷相关的疲劳定义为主动疲劳 (active fatigue), 将与负重和单调相关的疲劳定义为被动疲劳 (passive fatigue)。在一项任务中,由于任务要求持续和长时间的知觉活动协调参与而引发的疲劳称为主动疲劳;由于任务要求很少的知觉活动参与及长时间的单调环境所造成的疲劳称为被动疲劳。主动疲劳主要是由长时间的主观努力所导致的,例如,在繁忙的市区道路驾驶车辆,需要频繁的操作方向盘、油门并制动踏板,与较高的认知负荷相关。被动疲劳则是由于任务环境单调乏味、缺乏刺激或激励而引起的,因而需要很少的控制行为,与较低认知负荷相关。在此基础上,May 和 Baldwin 又进一步将驾驶疲劳细分为三类,

即与睡眠相关的驾驶疲劳 (sleep-related driver fatigue), 与任务相关的主动驾驶疲劳 (active task-related driver fatigue) 和与任务相关的被动驾驶疲劳 (passive task-related driver fatigue)。与睡眠相关的驾驶疲劳是由睡眠障碍或睡眠被剥夺引起的; 与任务相关的主动驾驶疲劳主要是由任务负荷增加 (如交通流量过大和能见度较低等因素) 引起的; 而与任务相关的被动驾驶疲劳通常是由任务负荷不足引起的 (如单调的驾驶环境)。

根据驾驶疲劳的类型和定义可以看出, 驾驶疲劳的结构是多维的。与睡眠相关的驾驶疲劳主要由驾驶员自身的睡眠因素引起, 而与任务相关的主动驾驶疲劳和与任务相关的被动驾驶疲劳则由驾驶任务本身引起。除去由睡眠不足而引发的与睡眠相关的驾驶疲劳外, 与任务相关的主动驾驶疲劳和与任务相关的被动驾驶疲劳在疲劳致因方面存在根本的差异, 在疲劳后驾驶员的心理及生理变化和驾驶绩效等方面的表现也不完全相同。因此, 区分主动疲劳和被动疲劳, 对驾驶疲劳的研究具有十分重要的意义。上述不同的驾驶疲劳分类, 主要是站在驾驶疲劳致因的角度进行的。驾驶疲劳致因有许多划分方法, 但从根本上来说可以划分为内部因素和外部因素。内部因素主要是站在驾驶员的角度考虑驾驶疲劳的影响因素, 主要包括驾驶员的睡眠状况、生理周期和个体差异等。外部因素主要包括驾驶环境、道路环境、驾驶时间、驾驶任务等。

因此, 与我们通常认为驾驶员疲劳是由过多驾驶负荷或连续长时间的驾驶引起的不同, 在记忆和信息处理的任务需求相对较低, 缺乏适当而有效刺激的环境下同样也会导致驾驶员疲劳。也就是说, 驾驶时间并不是引发驾驶疲劳的唯一因素, 单调的驾驶环境和驾驶任务同样会引起驾驶疲劳。特长公路隧道段是一种相对封闭且昏暗的路段, 其行驶环境不同于开放式道路。驾驶员在特长公路隧道内驾驶面临着驾驶时间较长、景观丰富度不足、驾驶环境单调和有效刺激不足等问题。在这种环境下, 驾驶员容易失去警觉性并很快进入疲劳状态, 产生与任务相关的被动驾驶疲劳, 导致驾驶性能的快速下降, 严重危害驾驶安全。

### 1.2.3 公路隧道驾驶疲劳检测方法与指标研究现状

疲劳导致某种可以被测量现象的出现,然而人体的黑箱决定了驾驶疲劳是不能被直接测量的,能测量到的只是疲劳的各种生理的、心理的、行为的和绩效的表现。由于疲劳的机制不明,高效、便捷的驾驶疲劳测量指标还有待研发。测量方法和指标是分析驾驶员在特长隧道内疲劳规律的关键。其中,测量方法指从哪个方面进行测量,测量指标指某种测量方法使用的特定的数据类型。例如,驾驶绩效是测量方法,而横向位移标准差则为测量指标。迄今为止,国内外的不同学者提出了诸多驾驶疲劳的测量方法和测量指标。目前,根据测量技术的不同,适用于隧道等单调环境下的、广泛被学界认可和采纳的驾驶疲劳检测方法主要归纳为生理特征测量、驾驶行为测量、驾驶绩效测量、眼动特征测量和主观感受评定等五类。

#### 1. 基于驾驶员生理特征的驾驶疲劳测量

在疲劳状态下,驾驶员心电、肌电、皮电和脑电等生理特征指标会偏离正常值,呈现出上升或下降的趋势,因此,可以通过对生理指标的测量来分析驾驶员的疲劳状况。基于驾驶员生理特征的驾驶疲劳测量主要存在以下方法和指标。

##### 1) 脑电法

脑电信号(electroencephalogram, EEG)是大脑神经网络中锥体细胞神经元放电的结果,是大脑的一种自发电活动,可以通过采集头皮上的电位差获得。它已经较多地运用在驾驶员驾驶疲劳的检测当中。脑电信号由各种节律不同的脑电波共同作用组成,与驾驶员的精神活动有着密切的关系。依频率的不同可将脑电波分为 $\alpha$ 波、 $\beta$ 波、 $\theta$ 波、 $\delta$ 波和 $\gamma$ 波。人的脑力活动处于不同状态时,不同频段的波形会占主导地位。脑电信号主要包括时域、频域以及空间分布信息三类指标。

Macchi 对有经验的驾驶员所做的研究发现, EEG 中  $\alpha$  波与反应呈负相关。Lal 和 Craig 的研究发现, 驾驶疲劳时,  $\alpha$  波和  $\beta$  波的变化较小, 而  $\delta$  波和  $\theta$  波则大幅增加。Papadelis 等选取 20 名驾驶员为被测试者, 提取了他们在疲劳状态时的 EEG 信号, 发现  $\theta$  波增加而  $\gamma$  波减少, 这给将 EEG 作为驾驶疲劳的评价标准提供了可靠证据。新加坡大学的 Yeo 利用 EEG 信号中  $\beta$  波和  $\alpha$  波在清醒和疲劳时活跃度的不同特征, 使得用 EEG 识别驾驶疲劳的准确率高达 99.3%。Simon 联合德国戴姆勒-克莱斯勒公司的工程师证明了 EEG 信号对预测真实交通条件下的驾驶疲劳是有效的。赵晓华等采用驾驶模拟器对 30 名被测试者进行动态驾驶模拟试验, 分析 EEG 信号随驾驶时间的变化规律, 验证了将 EEG 作为驾驶疲劳评价指标的有效性, 发现脑电颞叶区的四个基本指标  $\delta$ 、 $\beta$ 、 $\theta$ 、 $\alpha$  波中只有  $\delta$  波显著增加, 比率指标随驾驶时间的增加呈明显的上升趋势。Simon 在 EEG 指标的  $\alpha$  波基础上, 验证了其具有更高的敏感性和特异性。Gharagozlou 等对 12 名男性汽车驾驶员进行了隧道等单调道路上的模拟驾驶研究, 获得了连续的脑电信号并对其做快速傅里叶变换, 发现  $\alpha$  波功率的变化是评定驾驶员精神疲劳状况的良好指标。

EEG 是驾驶疲劳测量的有效标准, 可以用来预测长时间的任务要求所导致的绩效下降, 尤其在多种生理和心理状态下, EEG 中的  $\theta$  波均有活动。因此, 当检测到连续存在的  $\theta$  波时, 可以推断被测试者出现了驾驶疲劳。目前, 除了  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\theta$ 、 $\delta$ 、 $\gamma$  等传统的 EEG 指标, 研究发现,  $\delta/\alpha$  值也是比较敏感的指标。

但是, EEG 测量的缺点也很明显。首先, 人类对脑电的认识目前并不充分、完全, 以往进行的不同脑电研究得到的结论之间存在着一些差别, 而被测试者的性格以及试验之前的状态和心情与试验结果之间也存在着内在的联系, 而这种联系至今仍不清楚。其次, 测试仪器的经济性、便携性差, 对环境的要求高, 佩戴复杂, 对驾驶员的侵入性强等均干扰驾驶员的驾驶活动。最后, 脑电信号容易受到外界因素

的干扰，转动方向盘、转动头部以及踩踏油门和制动踏板等驾驶行为均会对 EEG 信号产生较大干扰。与模拟驾驶试验相比，在真实的驾驶情境中很难获得准确的数据，因此，EEG 并不是真实驾驶环境中最理想的驾驶疲劳评价方法。

## 2) 心电法

心电信号 (electrocardiogram, ECG) 来自心脏搏动在体表形成的电位变化。心脏受交感神经和副交感神经支配，在一定程度上可以反映驾驶员的疲劳状态。QRS 波群的剧烈变化是心电信号中最具典型特征的成分，因此，R 波成为许多研究者所热衷的研究对象。目前，学术界大部分的心电信号分析均以 R 波分析为基础。

心率 (heart rate, HR) 直接由自主神经系统调节，其变化受交感和副交感神经双重支配，是两者拮抗作用的结果。疲劳往往伴随着 HR 的变化呈显著变化。心率变异性 (heart rate variability, HRV) 是指连续正常心跳 R-R 间期的微小涨落，其影响因素主要包括脑的高级神经活动、中枢神经系统的自发性节律活动、呼吸活动以及由压力、化学感受器传入的心血管反射活动等。上述各种因素对交感神经和副交感神经的综合调节作用最终均会影响心率的波动，因此，HRV 反映了心脏交感神经和副交感神经活动的紧张性和均衡性。Lee 和 Park 在研究中指出，HR 的变化主要反映了生理疲劳，而 HRV 则能够综合反映生理疲劳和心理疲劳状况。1996 年，由欧洲心血管病学会以及北美心脏起搏和电生理学学会共同组成的包括数学、工程、生物和临床方面的知名专家在内的专题委员会明确指出，HRV 是评价自主神经性活动最好的定量指标。心电信号的研究主要包括时域分析、频域分析和非线性分析三种。

Knaflitz 等和 Li 等的研究均显示，人在驾驶疲劳时，其心率会减慢。对正常 R-R 间期（或差值）的直方图进行定量描述，可以获得时域分析的各项指标。HRV 的常用时域指标、单位和定义如表 1-3 所示。

表 1-3 HRV 常用时域指标、单位及定义

指标名称	单位	定义
SDNN	ms	正常窦性心搏间期的标准差
RMSSD	ms	连续相邻正常窦性心搏间期差值的均方根
pNN50	个	相邻正常心跳间期差值超过 50 ms 的个数

将基于时域的正常窦性心搏间期转化到频域，通过功率谱密度（power spectral density, PSD）来表示。频谱曲线中的成分有高频、低频和极低频三种，分别对应着 HRV 频域指标中的 HF（high frequency）、LF（low frequency）和极低频（very low frequency, VLF）。HRV 常用频域指标、单位、定义及频率范围如表 1-4 所示。

表 1-4 HRV 常用频域指标、单位、定义及频率范围

指标名称	单位	定义	频率范围/Hz
TP	ms <sup>2</sup>	某时限内总 NN 间期的变异	≤ 0.4
VLF	ms <sup>2</sup>	VLF 范围内的功率	< 0.04
LF	ms <sup>2</sup>	LF 范围内的功率	0.04 ~ 0.15
LFnorm	Nu*	LF 功率标化单位	—
HF	ms <sup>2</sup>	HF 范围内的功率	0.15 ~ 0.4
HFnorm	Nu*	HF 功率标化单位	—
LF/HF	—	LF 与 HF 之比	—

\*Nu 为标化单位

很多研究者已经证实了 HR 和 HRV 均可以直接测量驾驶疲劳。杨渝书等发现，HRV 的多项指标与疲劳程度显著相关。驾驶疲劳时，SDNN、LF 明显上升，HF 明显下降，说明交感神经活动增加、副交感神经活动减少，而平衡性指标 LF/HF 增大，因此，可以利用以上 HRV 指标对驾驶疲劳进行量化评估。Zhang 等的研究显示，时域指标中 SDNN 的变化最能反映疲劳的变化过程，而且 SDNN 值随疲劳程度的加深呈现增加的趋势；对于频域指标，除了 VLF（极低频功率）指标在疲劳前后无明显变化外，HF、LF、HFnorm、LF/HF 等指标均可以有效地反映驾驶疲劳