



项目批准号	50122283
申请代码	E0807
归口管理部门	
收件日期	

# 国家自然科学基金 资助项目结题报告

资助类别： 联合资助基金项目

亚类说明： 面上项目

附注说明： GM 联合基金

项目名称： 道路线形—驾驶行为—交通安全互动关系研究

负责人： 任福田 电话： 67391532

电子邮件： ftren@bjut.edu.cn

依托单位： 北京工业大学

联系人： 卞慰萱 电话： (010)67391479

资助金额： 25(万元) 累计拨款： 25.0000 (万元)

执行年限： 2002.01-2004.12

填表日期：2004年12月28日

国家自然科学基金委员会制(2004年11月)



## 关于填报《国家自然科学基金资助项目结题报告》的说明

一. 国家自然科学基金资助项目结束后,项目负责人须按要求认真填报《国家自然科学基金资助项目结题报告》(简称《结题报告》),以此作为资助项目研究工作的重要档案,并作为项目验收和评估的主要依据。

二. 项目负责人及其合作者应认真阅读自然科学基金资助项目和财务管理的有关规定、办法(查阅 <http://www.nsf.gov.cn>),在项目研究工作的基础上,实事求是地撰写《结题报告》并提供必要的附件材料,保证填报内容真实、数据准确。

三. 项目依托单位按规定要求认真审查,确保材料齐全,在次年申请项目时将电子文档和一份纸质文档统一报送国家自然科学基金委员会。

四. 国家自然科学基金委员会负责跟踪和管理结题项目的成果,根据情况在2-3年后对项目执行情况进行评估。请项目负责人在结题后三年内继续提供项目研究后期正式发表或公布的成果,一并存档并作为项目管理和评估的依据。

五. 《结题报告》由报告正文、研究成果目录表、统计数据表、审核意见表、经费决算表和附件等部分组成,有关格式和撰写说明详见“《结题报告》报告正文撰写提纲”。

六. 研究结束后,项目(课题)负责人应会同依托单位财务部门清理账目,根据批准的预算经费,如实编报资助项目(课题)经费决算,逐项列出单项固定资产超过5万元的名称及使用情况说明,争取其他渠道经费情况等。须对项目经费的收、支、余情况作出总体的文字说明,当经费支出与经费预算相差较大时,需要着重说明;拨入经费与预算经费不相等时,需要特别说明。合作经费要按照合作单位经费实际开支内容并入《经费决算表》的各类开支科目。

经费决算表(重大项目除外)的书面材料由依托单位科研管理部门、财务部门审核签署意见后存档备查。

重大项目按照《国家自然科学基金项目资助经费管理办法》第二十一条编报决算,向自然科学基金会同时报送书面材料与电子文档。

国家自然科学基金强调科学道德和良好的学风,反对弄虚作假和浮躁作风,要求认真工作、填报材料实事求是。基础研究允许探索和失败,特别是面上项目,关键看工作状况和发展态势。如有这种情况,也请在报告中实事求是地反映出来。



## 国家自然科学基金资助项目《结题报告》撰写提纲与说明

基金资助项目《结题报告》总体结构上分为：1) 报告正文、2) 成果目录表、3) 成果数据统计表、4) 项目负责人签字及部门审核意见表、5) 附件材料，请项目负责人参照以下提纲及其说明认真撰写，并可根据需要自行增设栏目或补充必要的图表。

《结题报告》要求全面地反映资助项目的工作情况和研究进展，如实地体现资助项目的研究计划要点、执行情况、主要进展与成果、人才培养、合作交流、经费使用以及研究计划调整等情况，重点描述研究进展与重要的研究成果。请精心撰写并认真核对，确保“内容真实、数据准确”。

在撰写风格上请注意“重点突出，语言精练、准确”，做到“结构合理，层次分明，标题突出，条目清晰”，必要的地方可图表、图文并茂。

《结题报告》撰写完毕后，请删除不再需要保留的说明，如填表说明等，使最终的版面更加简洁、美观、大方。

一、报告正文。参照提纲格式自由撰写，并可以根据需要分解或增设栏目。要求层次分明、条目清晰、内容准确。主要栏目为：

- 1、摘要，关键词，abstract，keywords。以深入浅出的语言简明扼要地概括出项目的精华，如背景、方向、主要内容、重要结果、关键数据及其科学意义等。关键词和 keywords 各不超过 5 个，并用分号隔开。
- 2、研究计划要点及执行情况概述。是否按计划进行，哪些内容作了必要的调整和变动，哪些研究内容未按计划进行，原因何在。
- 3、研究工作主要进展和所取得的成果。本部分内容是《结题报告》的核心部分，也是基金资助项目中最有学术价值和可供其它研究者进一步研究的基础，要求项目负责人和承担者实事求是地认真撰写，包括代表性成果介绍，说明其水平和影响，并简要阐述其科学意义或应用前景等。视情提供必要的国内外动态和研究成果的比较，必要的参考文献出处等。

对重要的研究进展或成果，请尽可能“一事一议”，分段撰写，以便今后成果展示或管理汇报时可以整段地剪贴引用。

对在后面成果目录表及统计数据表中的一些内容，如国际学术奖、数据库、软件等，应在本部分中具体地描述。

最后，根据个人的实际贡献等，概述本项目研究人员的合作与分工，列出项目执行期间主要研究人员和中途调离、退出的研究人员的名单，并简要说明原因。

- 4、国内外学术合作交流与人才培养情况（如无，可以不写）。

组织国内外学术活动的情况，包括会议主题、内容、规模、时间、地点、效果等。

国际会议大会特邀报告及参加组委会情况等，请提供邀请信等必要的复印件。



研究生培养情况, 列出研究生姓名、研究方向、论文题目、导师姓名、已答辩或预计答辩的年月。

促进研究成果的传播、应用情况, 包括科普等。

5、存在的问题、建议及其他需要说明的情况。包括项目研究工作中的难点和经验, 本项目研究是否达到预期目标, 如未达到, 请分析原因和可能的解决途径。今后进一步研究的建议和设想。

注: 基础研究具有一定的探索性, 研究过程中的结果、不成功的试验以及不理想的结果都可能具有参考价值, 即使失败的经验也是有价值的。如有此类情况, 请具体描述研究过程, 列出试验条件、现象等要点, 其目的是总结经验, 使其他研究者少走弯路。

## 二、研究成果目录和数据统计表。

为了规范管理, 获得准确的统计数据, 如实反映自然科学基金资助项目的研究成果, 要求数据必须准确并保证几个表的数据相对应、一致。

成果类型分为“获奖、专利、专著、期刊论文、会议论文、其他”六大类, 请归类集中填写, 逐类单独编号; 未标注“国家自然科学基金资助及批准号”的论文排在相应类别的后面, 无正式录用证明的论文暂不列入, 表格不够可自行增加; 成果名称栏目填写论文题目或专利或奖励名称; 主要完成人根据作者或获奖人实际情况按顺序填写, 并在论文通讯作者后加\*标注; 成果说明栏目分别按以下格式填写:

- 1) 期刊论文按“全部作者, 论文题目, 刊物名称·卷(期)·起-止页码, 年月(SCI, EI, ISTP, ISR 收录, 如是该类杂志)”格式填写说明;
- 2) 会议论文按“国际/国内, 特邀报告/口头报告/墙报展示, 全部作者, 论文题目, 会议名称, 时间, 地点”格式填写说明;
- 3) 专著按“全部作者, 书名、出版社, 出版时间, 字数, 发行量”格式填写说明;
- 4) 专利按“获准专利国别, 类别, 专利号, 获专利时间”格式填写说明;
- 5) 获奖按“授奖单位, 授奖时间, 奖励名称, 等级”格式填写说明。
- 6) 其他, 根据实际情况填写并做必要的说明。

是否标注“国家自然科学基金资助及项目编号”的情况, 请根据实际情况在标注栏中说明; 选项为①标注资助号, ②未标资助号, ③空白(表示什么也没标)。被SCI 或 EI、ISTP、ISR 收录的, 除注明是否标注国家自然科学基金资助外, 尚需加填SCI 或 EI 等缩写词;

## 三、附件材料, 随纸制结题报告, 提供所要求和其他必要的材料。

1. 提供不超过 6 篇代表性论著的原件或复印件, 其余论著提供首页和有标注国家自然科学基金项目资助页的复印件, 研究生学位论文提供封面复印件。装订顺序须与研究论著目录中的排序一致;
2. 已录用的稿件除首页和标注页之外, 须附编辑部录用证明的复印件;
3. 大会特邀报告须提供邀请函以及会议文集有关目录的复印件;
4. 研究成果附件(科学技术鉴定证明书、奖励证书、专利证书的复印件), 装订顺序须与研究成果目录中的排序一致。



## 项目摘要

中文摘要(500字以内):

利用心理生理学、汽车动力学等理论,为探索高速公路事故黑点的根源,针对高速公路中车速运行特征,采用卫星全球定位和模拟技术,在多种实际的或模拟的道路线形条件下,大量采集无干扰的车辆运行状态数据,寻找驾驶员行车时道路平、纵线形及其组合与其心理变化的各种关系和模型,并讨论适合驾驶员心生理需求的各种道路线形。建立车辆运行状态与道路线形之间概率统计模型。在剖析交通安全与车辆运行状态的基础上,提出路线设计安全评价方法,构建相应的评价指标体系。运用判别分析,分析和建立的行车心理生理反应与道路线形、车速的各种关系和模型,定量确定了建立在行车人安全舒适的心理生理需求上的高速公路线形的一些主要安全指标的临界值。针对建立的动态车辆行驶速度--道路线形关系模型和道路线形交通安全评价模型,利用实测和统计数据验证模型,确定道路线形----驾驶行为----交通安全的关系。进一步推广到双车道公路、一级公路等公路。为修订路线设计规范提供理论依据。

关键词(不超过5个,用分号分开):道路线形,驾驶行为,交通安全

Abstract(limited to 500 words):

This paper based on physiological and psychological theories and automobile dynamic theory to probe the reason of the accident black spots of freeway. The GPS and simulation technology were adopted to collect driving vehicle data without any disturbing on various actual and simulating road alignment sections. The aim was to research the relation and model of physiological and psychological reaction and road alignment, to discuss the suitable road alignment design for driver's physiological and psychological demand and to set up the statistical model between vehicle operating condition and road alignment. On the basis of analyzing traffic safety and vehicle operation this paper put forward the safety assessment of alignment design method and the corresponding criteria system for evaluation. Using discriminant analysis, this study seted up the models between driver's psychological and physiological reaction and various kinds of road alignment. Some crucial road safety indexes value were put forward quantificationally according to driver's physiologicla and psychological demanf on the freeway. Fianly, this paper validated the models and safety evaluation system by the field data. This result can be popularize to the highways, such as the two-lane highway, Class I highway, etc. The conclusion of this paper can also offer the theoretical foundation for revising the design specification.

Keywords(limited to 5 keywords, seperated by;):Road geometry,Driver behavior,Traffic safety



## 报告正文

### 一、计划要点和执行情况

本课题组按计划圆满完成了项目的主要研究内容，超额完成了预期指标。

本研究的工作要点：充分试验数据的基础上，建立了车辆行驶速度与各种道路线形间的关系模型，并且建立了以心电、皮电、呼吸等为度量指标的驾驶员行车时心理紧张与道路线形和车速间的关系模型。并且从驾驶员的心电、皮电、呼吸等心理指标出发，结合道路交通事故资料，确定了部分道路安全水平阈值。在04年度举行了一次课题研讨会，本次讨论会邀请到美国 University of Louisiana 的交通安全专家孙小端教授和本课题组成员进行交流座谈。

### 二、研究工作主要进展和成果

#### 1 开展的研究工作

第一年度在通过调研、文献阅读和资料收集的基础上，本研究选定了试验仪器，并完成了实验前的资料收集整理分析和试验设备的调试工作。第二年度的主要研究工作集中在：课题组在选择样本高速公路、确定实验设备的基础上开展了基于驾驶员心理生理反应的高速公路线形研究。第三年度的主要研究作为研究安全水平的阈值，研究道路线形交通安全评价模型，进行了模型的验证；在总结成果的基础上对双车道公路开展了推广研究。

#### 2 数据采集与处理分析

##### 2.1 初步试验

初步试验中，不光证实了心率、皮电、呼吸这些反应心理紧张的生理指标与行车速度、道路线形之间有较好的相关性，而且也获得了实验具体操作的经验及这类仪器在使用中的各项规律。如在初步试验中，确定了心电仪、皮电仪的电极如何联结到驾驶员的身体上最恰当，即既不影响仪器正常的信号检测，又不使驾驶员感到身体不适、操作不便从而影响行车的正常性。再如在初步试验中发现：在行车中，用心电仪记录到的心跳间隔的累积时间与 GPS 的时间相比每 10 分钟要慢 3 秒左右。后来咨询厂家证实，因医疗上测试病人心电信息时在时间上不要求很精确，所以所有品牌的心电仪在时间显示上都存在或大或小的误差。所幸，通过对初步试验数据细致的分析，发现这种误差是恒定误差，即每 10 分钟总是慢 3 秒左右，这种规律使得心率、车速和道路位置在时间上的一致性得以实现。

##### 2.2 正式试验

调查试验是科学研究的基础，试验中根据研究需要对试验条件的控制，以及设计正确的试验步骤，是研究结果正确与否及最终能否实现的保证。所以建立在初步试验的基础上，对正规试验的各项条件、各项步骤进行了认真细致的设计。

###### 2.2.1 试验仪器和设备



动态GPS是用导航卫星进行适时和测距,以对地面移动和固定物体进行定位的一种设备系统。它能以较高的精度为用户提供动态的三维位置、三维速度及精确的时间信息。

#### (1) 动态心电图

ECGLAB型动态心电图能连续检测人体24小时的心电变化信息,它小巧方便,便于携带,适用于驾驶员处于动态的行车条件。因驾驶员行车时身体各部位相对静止性,所以用动态心电图记录到的心电信息变化基本上只与驾驶员驾车时的心智活动状况相关,而不太受驾驶员身体活动的影响,所以在行车试验中仪器及其检测的数据都较稳定。

#### (2) 皮肤电、呼吸检测试验

本试验中使用的皮肤电、呼吸检测仪系由北京同方神火联合科技发展有限公司生产的SPS400测慌仪改造而成,该仪器由一只主机、两个传感器及与主机相连的笔记本电脑,外加一套处理数据的软件构成。在野外行车试验中使用起来不太方便也不太稳定。而且,因时间紧,从测慌仪到检测驾驶员行车时心理活动功能的转化中,在软件调试上还存在问题。本次研究中只把检测到驾驶员行车时的皮电、呼吸信息作为辅助数据在研究中使用。

#### (3) 试验车

高速公路上使用桑塔纳2000车型。因该车型在性能和使用上都代表了目前高速公路上行驶的小车型。在试验中要求所有的样本驾驶员都驾驶同一辆桑塔纳2000的小车,这样保证了在试验中驾驶车辆这一条件的一致性。

#### (4) 其他试验设备

其他试验设备包括摄像机、秒表等,用摄像机摄制行车试验的全过程,以便为室内分析数据时提供现场的交通流状况及试验车在某一时刻处在道路上某一点的信息。

### 2.2.2 试验路段

按照试验实施的总体构想要求,本次试验路段选择了一段设计车速为80km/h、长度为80公里以及中等运营交通量的高速公路路段。该路段所有的车道宽度都为3.75m,所有的路肩宽度都为2.8m,路面坚实平整,两侧边坡无过险的陡坡,且两侧路肩之外都设置了连续的波型梁护栏。全路段行车的平面和纵面视距除个别平曲线或竖曲线上在车辆超速行驶时受到限制外,其它部分都通视良好。在纵断面上,最大纵坡为5%,全路段纵坡大于3%以上的路段只占16.31%,半径小于等于1000m的平曲线长占全段长的30.08%,平曲线半径大于2000m的路段长(包括直线段)占全段的56.1%。

### 2.2.3 试验驾驶员

根据“试验实施构想”的思路,同时考虑样本量需要及经费、时间等综合因素,本次行车试验中共选择了13名驾驶员做试验对象。

驾驶员年龄都在25-45岁之间,即属于正常的驾驶年龄。从驾车技术和对研究路熟悉的程度来看,各位驾驶员都是三年驾龄以上技术正常,且都有或多或少次在研究路段上驾车的经历。这些条件保证了同一点上试验数据的“整齐性”,即有利于减少同一点上试验数据的离差。

### 2.2.4 试验中其他事项



(1) 选择比较晴朗的天气进行试验。

(2) 试验时间。为了不至使驾驶员在行车试验中产生疲劳，每位驾驶员只在80km的试验路段上驾车行驶一个来回，即大约驾车试验一个半小时左右。

(3) 为了保证各仪器在试验起点上时间的一致性，试验开始前应准确核对或记录各仪器的时间。

(4) 根据人在静止时和在驾车时平均心率会有不同的特点，为了便于以后综合分析各个驾驶员的行车试验数据，需在行车试验前或试验后测每位驾驶员在静止状态下的心率、皮电、呼吸等指标。

(5) 为了减少不必要的因素对行车时驾驶员心理生理指标的影响，行车试验一旦开始后，应要求驾驶员和车内其他人员保持安静。

### 2.2.5 调查的样本量

由于公路的路线受车速、心率、线形等参数都是随即变量，为保证这些参数能够有足够的精度，必须保证一定的实测样本量。如果以实测速度作为必须保证的精度参数，理想条件下的最小观测样本量可以由下式计算。

$$N \geq \left( \frac{SK}{E} \right)^2$$

其中，N---样本量；

S---样本标准差，假设速度标准差5km/h~10km/h；

K---常数，当置信度=95%时，K=1.96；

E---容许误差，假设速度容许误差=2-5km/h；

本课题选择了一段80公里长的高速公路路段。沿线跨越了平原、重丘、山岭各个地形区，分布着丰富的道路几何线形，包括有各种线形元素的组合，高速公路路段上的交通流在部分时间段上存在着自由流状态，满足本课题研究的实验条件。

本课题针对驾驶员驾驶行为研究的目标，确定以驾驶员生理、心理检测结果为检测对象，通过国内外研究动态的对比分析，最后决定选择动态心电仪作为测试驾驶员驾车时心理、生理变化的主要仪器，皮电、呼吸检测仪作为辅助仪器。同时使用动态GPS收集行驶车辆在道路上各点的动态车速，并在车上安装摄像机监察沿途的交通流状况。

按使用要求分别对心电数据、GPS数据进行归类处理。据概率统计理论和一般常识排除一些异常数据，利用概率论，随机过程理论计算样本量内的状态变量、特征值和动态函数的特征性，以进一步确定样本数据的特征，并继续查出一些超出某个界值的数据。

依据随机过程理论，应用信号分析技术中的波谱分析方法，对行车时采集的心率数据做相关分析和功率谱分析，以此定量分析驾驶员行车时心率与道路线形之间的相关关系。为下一步的回归分析提供基本依据。

### 2.3 回归模型的建立与验证

在心率的波谱分析基础上，利用各变量间对应的样本数据，根据回归分析理论和方法，建立





心率、车速、平曲线半径及其他主要道路线形指标（如纵坡等）间的回归模型。

按计划，利用本课题的研究结果可以检查出高速公路上的不安全路段，把用研究模型检查出的这些不安全路段，与按事故资料统计确定出的高速公路事故多发点相对照，以便检验模型的合理性与适用性。

### 3 阶段性成果

本研究经过第一阶段实验数据采集，在全面整理分析的基础上，以行车试验为基础，通过应用道路交通流理论、心理生理学理论以及各种数学手段和方法对大量行车试验数据从不同角度不同层次的分析 and 归纳，最终获得下列研究结论。

#### 3.1、建立了顺直路段车辆稳定运行速度模型

在分析对车辆运行速度的诸多影响因素的基础上，针对顺直路段相邻路段几何线形组成，分别将直线段进行如下分组建立车辆稳定运行速度模型：

##### 3.1.1 曲线半径R大于2000米

通过对两条高速公路满足上述条件的直线段的筛选，共选取了55个直线段断面。根据GPS检测的车辆运行速度数据，运用SPSS统计分析软件，得到车辆稳定运行速度 $V_{\text{稳定}}$ 模型如下：

$$V_{\text{稳定}} = 120 - \frac{1}{e^{L \cdot (r_1 + r_2)}}; \quad \text{式 (3-1)}$$

$$R^2 = 0.934$$

式中：L——直线段长度（公里）；

$r_1$ ——与直线段相邻，直线段前端的曲线半径（公里）

$r_2$ ——与直线段相邻，直线段尾端的曲线半径（公里）

##### 3.1.2 曲线半径R大于600米，小于2000米

对于曲线半径介于600米与2000米之间的直线段，车辆运行速度不仅受直线前后曲线半径大小的影响，受前后曲线半径之差的影响尤为显著。共筛选了满足此条件的18个直线段断面，运用SPSS统计软件分析车辆稳定运行速度与几何线形之间的关系，得到以下数学模型：

$$V_{\text{稳定}} = 120 - e^{L \cdot dr}; \quad \text{式 (3-2)}$$

$$R^2 = 0.86;$$

式中： $dr$ ——与直线段相邻的前、后端的曲线半径之差，（公里）

其余符号同上。

##### 3.1.3 曲线半径R小于600米

曲线半径小于600米时，曲线上车辆的行驶速度受到限制，车辆驶出曲线段后有加速的行驶的过程。但由于前后曲线半径小，车辆在直线段稳定运行速度受直线段长度和前后曲线半径之比的影响较大。运用SPSS软件对满足此条件的20个直线段车辆稳定运行速度进行分析，得到如下模型：



$$V_{\text{稳定}} = 120 - \frac{1}{e^{L(\frac{r}{r_2})}}; \quad \text{式 (3-3)}$$

$R^2 = 0.898$ ;

式中符号同上。

### 3.2 界定了顺直路段上平曲线临界半径值

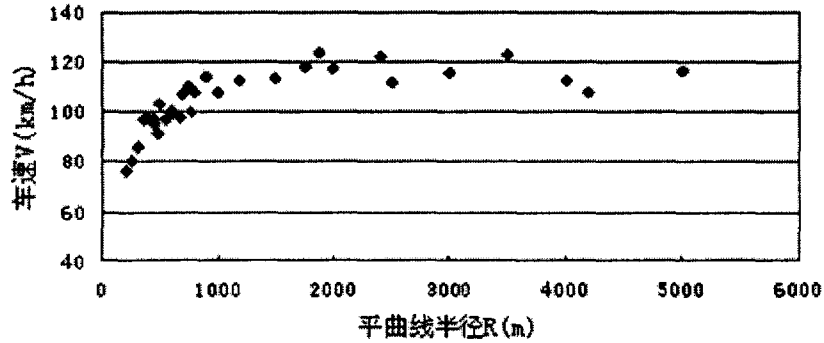


图3-1 在平曲线上半径与平均车速间散点图

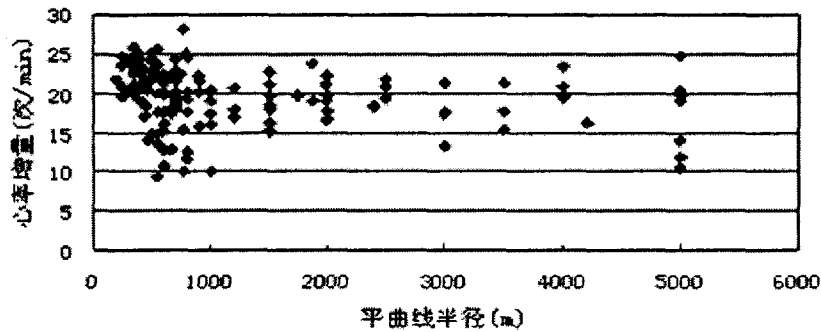


图3-2 自由流下平曲线半径与心率增量的散点图

通过上述对平曲线半径与车速、心率增量之间关系的试验数据分析，可以认为：从行车速度和行车心理生理反应两方面来考虑，把半径大于2000m以上的平曲线的路段叫做顺直路段是恰当的。也就是说，在较平坦(如纵坡小于3%时)的高速公路路线上行车，当驾驶员驾车通过半径大于2000m的平曲线路段时，其曲率已经不会对驾驶员的行车速度和心理紧张造成影响，即认为这样的路段在平面线形上是顺直的，在行车速度与行车心理生理反应这两个指标上与直线路段是相当的。

### 3.3、建立了心率增量N、平曲线半径R、车速V三参数模型

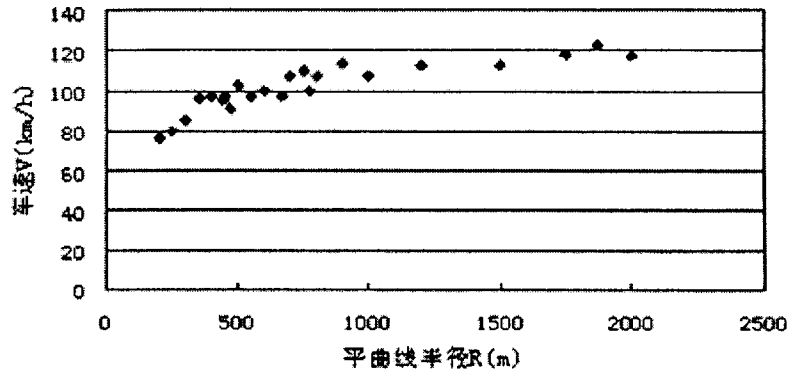


图3-3 平曲线半径与车速散点图

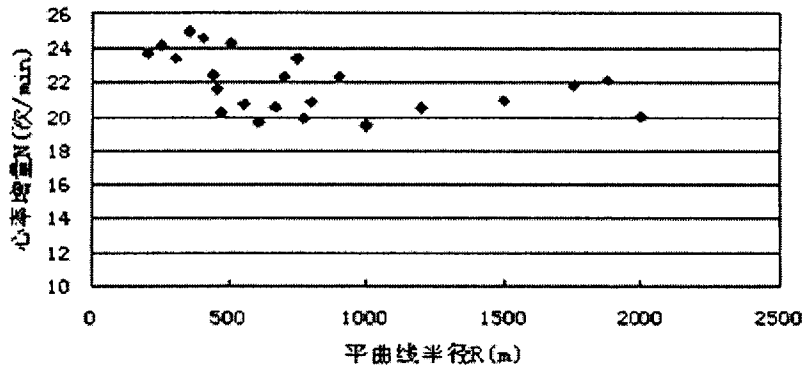


图3-4 平曲线半径与心率增量散点图

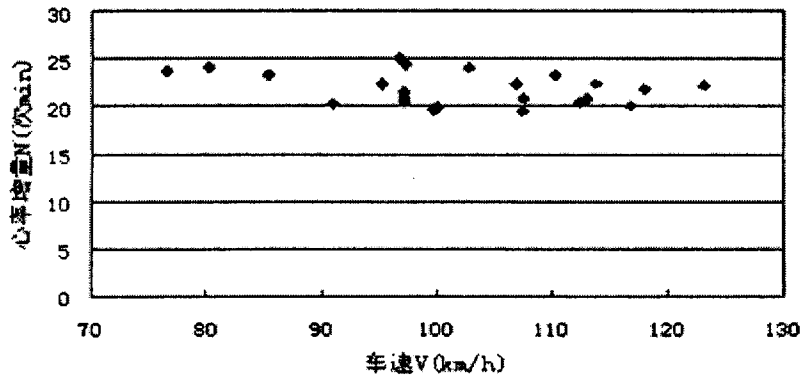


图3-5 车速与心率增量散点图

从上图可以看出，R-N之间是成负幂函数关系变化，而V-N间成近似线性的正幂函数关系变化。综合这些分析，可得到R、V、N三者间的关系模型是二元非线性的。考虑到易于转化成线性回归分析并尽量符合客观实际，在此假设三参数之间的关系模型为：



$$N = b_0 \cdot \frac{V^{b_1}}{R^{b_2}}$$

按最小二乘法可求得回归系数的值分别为  $b_0 = 2.483$  ,  $b_1 = 0.756$  ,  $b_2 = 0.203$  。把它们分别代入上述各式, 则最后可得三参数的回归模型为:

$$N = 2.483 \cdot \frac{V^{0.756}}{R^{0.203}} \quad \text{式 (3-4)}$$

式中: N——心率增量(次/min), 即驾驶员行车时平均心率与其静止时平均心率之差;

V——行车速度(km/h);

R——平曲线半径(m);

### 3.4 确定与长顺直路段衔接的符合行车心生理需求的平曲线半径值

表3-1进入平曲线前减速点至曲线起点的距离及其相关数据

平曲线半径(m)	200	350	400	450	470	500	550	600	665	700	750	800
减速点车速(km/h)	109	123.5	111.5	113.3	113.3	123.3	117	123	120.5	126.7	124.9	118.7
减速点至平曲线起点距离(m)	197	251	170	170	167	210	168	186	165	185	169	123

由表3-1数据, 建立模型如下:

$$L_j = 5.4V_j - 0.21R_j - 348 \quad \text{式 (3-5)}$$

式中:  $L_j$ ——进入平曲线前减速点至曲线起点的距离 (m);

$R_j$ ——即将进入的平曲线的半径 (m);

$V_j$ ——减速点的车速 (km/h);

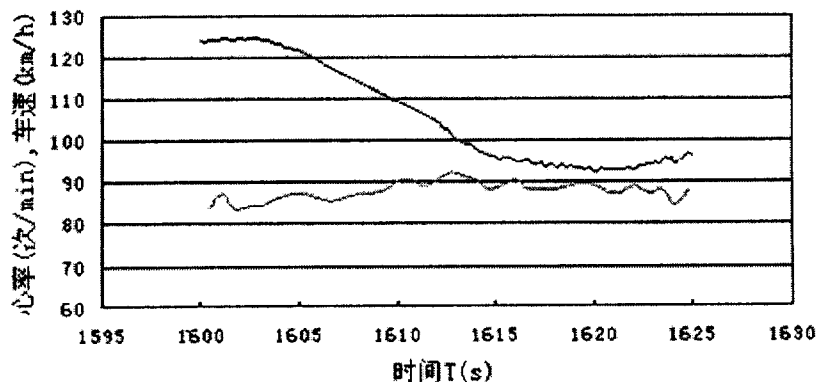


图3-6 平曲线入口端缓和曲线段上行车时较大的减速引起心率升高

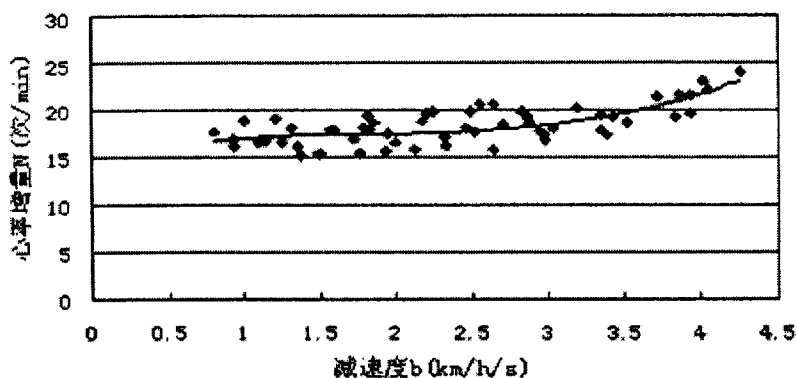


图3-7 曲线入口缓和曲线段上平均减速度与平均心率增量关系

图3-7曲线的回归模型为：

$$N = 0.334b^3 - 1.848b^2 + 3.811b + 14.643 \quad R^2 = 0.74; \quad \text{式 (3-6)}$$

式中 b——减速度 (km/h/s)。

N——心率增量(次/min)，即驾驶员行车时平均心率与其静止时平均心率之差；

从式 (3-6) 中，如已知安全舒适的行车心率，则可求得符合行车心理需求的的减速度b。

设整个平曲范围内的车速都为 $V_q$ ，且  $V_q^2 = V_j^2 - 7.2b \cdot L_j$ ，其中 $L_j$ 为从顺直路段的减速点至平曲线起点的距离，式中其它符号同上。

将求得的减速度b代入为得 $V_q$ 。从而据式 (3-5) 可得到与长顺直路段衔接的符合安全舒适行车心理需求的平曲线半径值。

### 3.5确定横向力系数值

表3-2由车速和平曲线半径得出的横向力系数与心率增量的对应数据

平曲线半径 R(m)	200	250	300	350	400	440	450	470	500	550	600	665
车速 V(km/h)	76.43	80.076	85.329	96.761	97.199	95.12	97.029	90.938	102.78	97.01	99.61	97.135
横向力系数 u	0.1158	0.1064	0.1086	0.1377	0.1204	0.1012	0.1051	0.0809	0.1115	0.084	0.083	0.0681
心率增量 N(次/min)	23.645	24.13	23.383	24.975	24.472	22.45	21.592	20.197	24.162	20.74	19.68	20.5
平曲线半径 R(m)	700	750	770	800	900	1000	1200	1500	1750	1872	2000	--
车速 V(km/h)	106.86	110.24	100.05	107.59	113.65	107.38	112.32	112.98	118.08	123.1	116.8	--
横向力系数 u	0.0866	0.0879	0.0635	0.0763	0.0787	0.0593	0.0556	0.0442	0.0426	0.045	0.036	--
心率增量 N(次/min)	22.287	23.35	19.866	20.798	22.274	19.442	20.459	20.894	21.72	22.09	20	--

然后求半径与超高值间的回归曲线。如图所示。

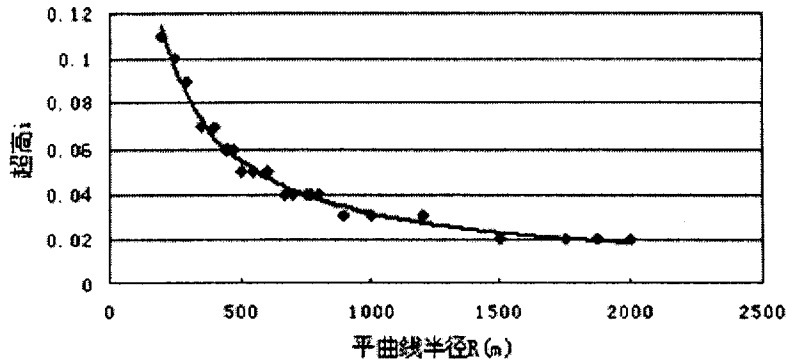


图3-8半径与超高值的回归曲线

图中曲线的回归模型为：

$$i = 7.936R^{-0.8005} \quad \text{式 (3-7)}$$

该模型只适用于设计车速为80km/h、曲线半径在 $200\text{m} \leq R \leq 2000\text{m}$ 范围内。

模型的相关系数为： $r=0.99$

把计算横向力系数的公式可改为：

$$\mu = \frac{V^2}{127R} - 7.936R^{-0.8005} \quad \text{式 (3-8)}$$

对表中的横向力系数和对应的心率增量绘制相关曲线，得图

图中回归曲线的模型为：

$$N = 701.9\mu^2 - 70.751\mu + 22.41 \quad \text{(式 3-9)}$$

模型适用范围为： $200\text{m} \leq R \leq 2000\text{m}$ ；

模型的相关系数为： $r=0.82$ 。

对式 (3-9) 中的N求一阶导数并令其为零，则能求得图3-9曲线在极点时所对应的 $\mu$ 值，即 $\mu=0.05$ 。当 $\mu > 0.05$ 时，随 $\mu$ 增加心率增量不断升高。

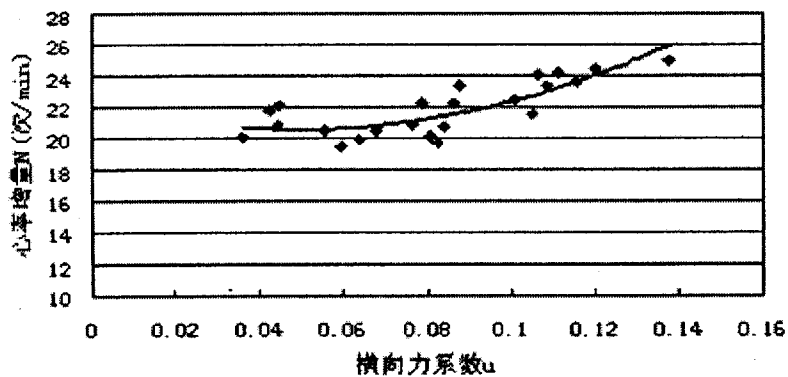


图3-9 横向力系数和心率增量之间的回归曲线



### 3.6 确定纵坡的坡度值

#### 3.6.1 下坡路段

在顺直路段上选择自由流条件下的下坡路段，在行车试验数据中求与每一纵坡值相对应的平均车速和平均心率。如表3-3所示。

表3-3 各位驾驶员在下坡路行车时纵坡与心率增量和车速的对应样本数据

纵坡(1/1000)	3	8	12	13	16	20	22	24	27	30	32	36	40	50
车速(km/h)	141	128	146.7	137	133	142.5	134.7	133.7	138.3	138	136.3	132.3	131	115
心率增量(次/min)	21.15	21.7	21.59	22.1	19.15	24.65	20.91	22.29	21.72	19.99	20.13	19.25	14.7	14.9

根据表3-3，可得图3-10、图3-11。如下图所示。

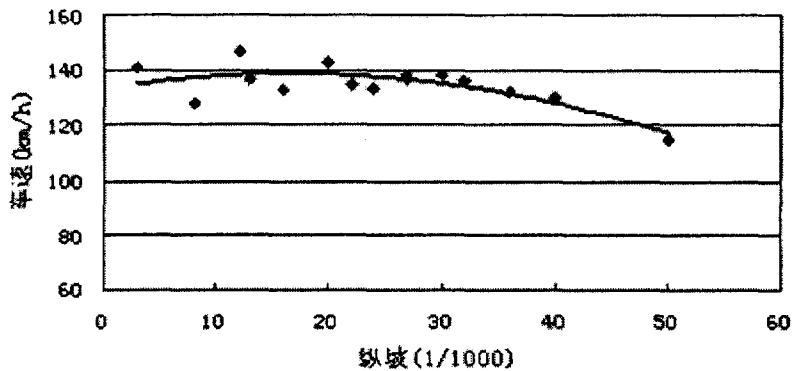


图3-10 下坡段纵坡与车速间的回归曲线

图3-10中曲线的回归模型为：

$$V = -0.0194i_x^2 + 0.6465i_x + 133.41 \quad \text{式 (3-10)}$$

模型的适用范围为： $0 < i_x < 5\%$

模型的相关系数为： $r=0.78$ 。

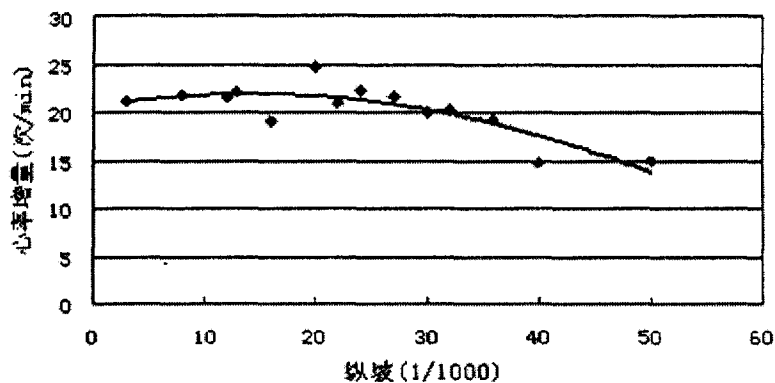


图3-11下坡纵坡与心率增量间的回归曲线

图3-11中曲线的回归模型为：



$$N = -0.0064i_x^2 + 0.1822i_x + 20.601 \quad \text{式 (3-11)}$$

模型的适用范围为： $0 < i_x < 5\%$

模型的相关系数为： $r=0.83$ 。

可见纵坡在2%之下重力分量产生的加速度很小，图3-10在 $i_x < 2\%$ 范围内车速随 $i_x$ 增大而缓缓上升的解释。

但是 $i_x > 2\%$ 以后，驾驶员迫于安全考虑驾驶员会随纵坡的增大做不同强度的刹车操作。于是出现了图3-10所示的 $i_x > 2\%$ 区域的曲线。

在下坡段，车速在纵坡为2%处发生转折。在 $i < 2\%$ 时，V随i增大而增大；在 $i > 2\%$ 时V随i增大而减少。i-N曲线则随i-V曲线而变化，影响这种规律的主要是车速这个变量的作用。

### 3.6.2 上坡路段

表3-4是各位驾驶员在上坡路行车时纵坡与心率增量和车速间的对应样本数据。

纵坡(1/1000)	3	8	12	13	16	22	24	27	30	36	40	50
车速(km/h)	117.3	130	136	129	127	132	123	126	132	128.5	120	106.3
心率增量(次/min)	19.29	19.1	22.62	20.2	19.66	20.04	24.31	19.04	17.99	18.17	22.83	18.62

据表3-4，则得如图3-12、图3-13所示的上坡路段上行车时纵坡与心率增量和车速之间的回归曲线。

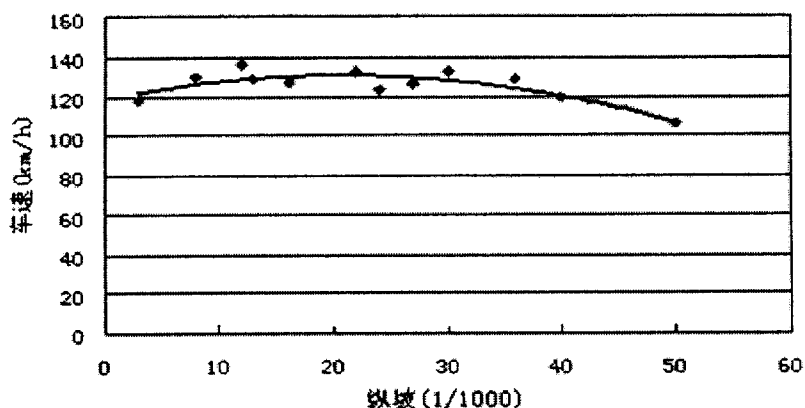


图3-12 上坡时纵坡与车速间的回归曲线

其回归模型为：

$$V = -0.027i_s^2 + 1.114i_s + 118.92 \quad \text{式 (3-12)}$$

模型的适用范围为： $0 < i_s < 5\%$

模型的相关系数为： $r=0.84$ 。



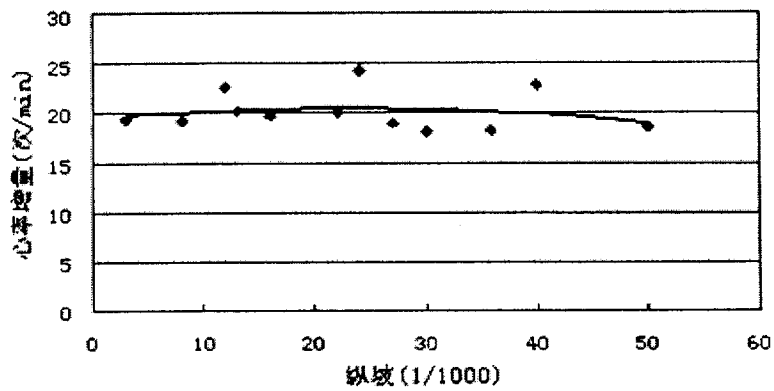


图3-13 上坡时纵坡与心率增量间的回归曲线

从图3-12可见，在上坡路段上  $i_s$ -V 的关系曲线在形状上与下坡路段的  $i_x$ -V 曲线完全相同。如果把两曲线放在一个坐标图上，则比较更清晰。如图3-14所示。

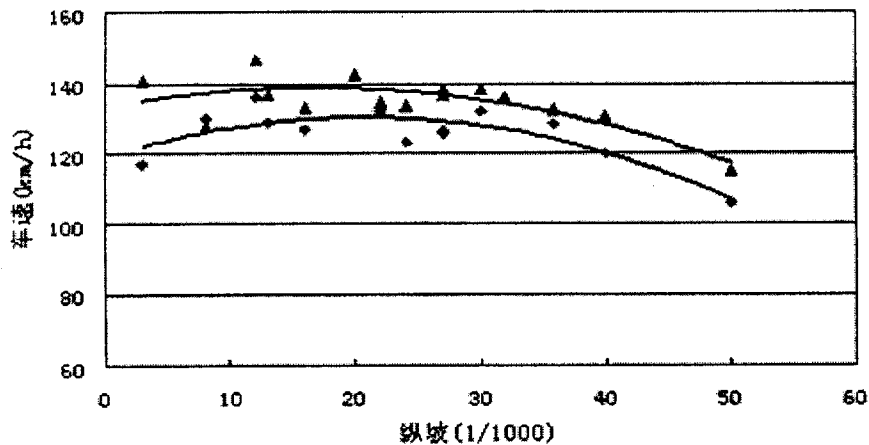


图3-14 车辆上下坡行驶时纵坡与车速间的回归曲线对比

从图中可见，下坡时的  $i_x$ -V 曲线似乎就是上坡时的  $i_s$ -V 曲线向上平移了一个距离一样。这个平移的距离大约8km/h。不过虽然上、下坡两曲线的形状相似。但曲线变化的本质原因却有区别。下坡曲线的变化原因前面已分析。在上坡的  $i_s$ -V 曲线中，之所以也在纵坡2%左右出现了车速的分水岭，是因为在  $i_s < 2\%$  的范围内，随  $i_s$  的增大，驾驶员已对上坡坡度有所感觉，而且此时产生加速的牵引力只被车辆的重力分力抵消了很小的一部分，容易给车辆进行加速，从而使车速随  $i_s$  的增大而增大。但在  $i_s > 2\%$  的范围内，一方面，随  $i_s$  增大重力分量也增大，使加速度的得来渐渐变难。另一方面，随  $i_s$  增大，纵向视距会越来越短，这样会迫使驾驶员放弃加速，这两方面原因，就造成了V随  $i_s$  增大而减少。

上坡时的  $i_s$ -N 曲线可不像下坡时的  $i_x$ -N 曲线那样随车速的变化而有较强的变化规律。而且上坡行驶时的  $i_s$ -N 相关性很低。如图3-13中上坡路段在  $i_s > 2\%$  以后，随  $i_s$  增大，之所以N不随V的