

武汉理工大学
硕士学位论文
城市车辆行驶工况的研究
姓名：张富兴
申请学位级别：硕士
专业：车辆工程
指导教师：乔维高;李孟良
20050301

## 摘 要

随着汽车环保节能技术的深入研究,新能源汽车不断出现。为了满足新型车辆开发或认证以及检查维护制度的需要,迫切要求具有能体现本地区车辆行驶特征的代表性工况。本文以科技部 863 课题“典型城市车辆实际行驶工况的研究”为依托,阐述城市车辆行驶工况的开发方法及相关研究。

行驶工况的研究历时两年的时间,对我国北京、上海和广州三个典型城市的乘用车和公交车分年度各进行了两轮共六次车辆实际行驶状况的调查,获得了大量的城市车辆行驶数据,依据统计学相关理论专门编写了解析程序进行数据的处理和分析并构建出所需代表性工况。同时对研究成果与国际上常用工况进行对比分析。

试验线路的确定是行驶工况调查的关键环节。乘用车城市工况调查是以城市道路级别划分、交通流量调查为主要依据确定试验路段;公交车是根据城市公交调查资料,运用交通研究领域的“路段频度和覆盖率”的概念规划试验线路。车辆行驶状况路上调查采用分时段交错法进行,并使用具有高精度的可跟踪滤波的非接触式速度传感器等先进设备采集数据。

数据分析处理以主成分分析、聚类分析等多元统计分析理论为工具,先将试验数据划分为一系列运动学片段,并求取各片段的 36 个特征值(如行程、速度、加速度、速度标准偏差、加速度标准偏差等),形成片段数据库;然后据此进行主成分分析从众多特征值中提取关键因素,按照主成分聚类;城市代表性工况按相应类的比例提取运动学片段,按设定条件组建行驶工况,并以图形的形式显示。以上过程由基于 MATLAB 自主开发的专用工况解析软件 *VDCAP* 来完成。

不同城市的数据解析结果表明:不同城市车辆行驶状况存在一定的差异,其平均速度、怠速比例等均有所不同,但差异不大;不同季节车辆行驶也存在差异。总体趋势来看,具备形成我国统一的城市行驶工况的基础。

行驶工况的研究结果表现为速度—时间曲线,鉴于目前存在的模态和瞬态两种型式各有优缺点,本文结果采用局部模态化的处理方法,使工况曲线即符合实际情形又便于试验操作。对曲线特征分析表明我国城市车辆行驶具有自己的特征,其特征参数居于国际常用工况(如 FTP75、ECE+EUDC 和 Japan10.15 以及国外大城市公交车行驶工况)之间。

关键词:行驶工况,乘用车,公交车,试验线路,数据分析处理

## Abstract

Along with the advanced study of environment protection and saving energy technology, vehicles with nontraditional energy come up. We need deeply representative driving cycles which can describe regional vehicle driving character, in order to develop or certificate new automobile or take inspection/maintenance. The paper describes development method and relative research of vehicle driving cycle, according to 863 project—study of vehicle real driving cycles of typical city.

Driving cycles research took two years to investigate passenger car and bus driving data of three typical city: Beijing, Shanghai and Guangzhou. As a result, we took investigation six times and obtained enough driving data. Representative driving cycles are formed after data processing, according to correlative statistical theory and using special program. At the same time, our research result is compared with international driving cycles.

Confirming test routes is crucial step of driving investigation. Routes of city passenger car are confirmed by city street grade and traffic flow; which of bus are decided by bus investigating information, beside with "route frequency and covering rate" that from traffic area. Vehicle real driving investigation comes up with time section cross method, and uses advanced instruments such as non-contacted speed sensor with tracking filter etc.

Data analyses processing takes the multivariate statistical analysis tools such as principal composition analysis and clustering analysis etc. Firstly the processing partitions driving data into kinetic sequences, and calculates 36 eigenvalue of every sequence (such as driving distance, average speed, acceleration, speed standard deviation, acceleration standard deviation etc. ), and comes into being sequence database. Secondly several principal composition are drawn out from much eigenvalue, in this way, clustering analysis comes out according to several principal composition. Finally city driving cycles are formed by special sequences which are drawn out by cluster rate and in accord with expected condition, at the same time, the cycles figure show. The special program VDCAP carry above function out that program with MATLAB.

Result from different city show that vehicle driving condition belong to different city is diverse, and average speed and idle rate are not uniform, but their difference is small; and that every seasonal driving condition has their character. Generally speaking, we can establish uniform test cycles for our country.

Speed—time curve is the showing result of driving cycles result. Because present cycles have two type: transient and modular type, this paper adopts their

advantage and use local modular processing, in order that driving curve is true of real—world and operate expediently. Analyzing to our domestic curve shows that our driving cycles have private character, and that their eigenvalue are among international driving cycles(such as FTP75, ECE+EUDC and Japan10. 15 as well as abroad other major city bus driving cycles).

**Keywords:** Driving cycles, Passenger Car, Bus, Test line, Data Analyses Processing

## 第 1 章 绪论

### 1.1 背景介绍

汽车是当今社会的主要交通工具之一，汽车工业的发展给社会经济带来重大机遇和活力，同时也给人类社会带来了不小的负面影响，如汽车交通事故、能源浪费以及环境污染。据统计，我国各类汽车产量由 1991 年的 70.4 万辆增加到 2001 年的 233.44 万辆，平均年增长率为 15%，是同期世界汽车增长率的 10 倍。2002 年我国汽车产量为 320 万辆，2003 年为 444.37 万辆，2004 年达到 507.05 万辆，预计 2010 年可达到 1000 万辆。目前汽车用燃料主要是汽油、柴油、煤油等石油产品，世界石油资源的很大一部分都消耗在汽车上，而汽车尾气的排放则是增长最快的空气污染源之一。在发达国家城市区域，汽车是 CO、NO<sub>x</sub> 和 HC 等空气污染的主要来源。减少汽车排放、提高其燃油经济性和开发新的代用燃料将对改善环境污染，缓解能源危机做出重大贡献。目前汽车安全、节能与环保已成为国际性的研究热点和方向，是汽车工业可持续发展战略研究的重要组成部分。

近几十年来，国内外在努力降低作为汽车主流动力的汽油机和柴油机的燃油消耗和排气污染的同时，也在不懈地探索和研制开发更理想的动力系统和排放污染更低的燃料，对于甲醇、乙醇、天然气和液化石油气，在汽车上已有了很多实际应用。电动汽车（EV, Electric Vehicle）的出现为环保和节能提供了新的途经，它具有高效、节能、低噪声、零排放或低排放等优点。目前世界各国都在致力于电动汽车的研究开发，它必然发展成一种在本世纪具有重大作用的交通工具。鉴于电动汽车实用化方面的困难，综合考虑汽车环保和节能的需要，混合动力汽车（HEV, Hybrid Electric Vehicle）也是一种现实的选择。

传统车辆以及新能源车辆的开发应用都离不开车辆行驶工况(Driving Cycles)的研究，符合实际的车辆行驶工况为车辆参数的匹配以及控制策略的制定提供基础数据。

### 1.2 车辆行驶工况研究开发的意义

车辆行驶工况又称为汽车运转循环，是针对某一类型车辆（如乘用车、公交车、重型车辆等）指定用来代表特定环境（如城区，快速等）的车辆行驶速度—时间历程。行驶工况是对车辆的实际行驶状况进行调查，并对试验

数据进行分析,运用统计学方法建立起来的。

开发车辆行驶工况的意义在于:为考察某类车辆在某一地区的排放水平或能量消耗量提供检测依据;为车辆设计的动力匹配提供参考;满足汽车检查/维护(Inspection/Maintenance)制度的需要。

目前我国实施了电动汽车重大专项研究,研制符合环保法规的电动车辆。在环保车辆设计开发过程中,对车辆行驶工况的分析是电动车辆以及混合动力车辆设计的基础,决定着控制策略的优劣,经过充分的工况分析才能对部件提出合理的参数要求,设计出适合使用条件的电动车辆。

由于不同的城市车辆保有量、道路交通特征以及交通流分布各不相同,其实际车辆行驶工况存在一定的差异,与国际标准工况也很难一致。我国所采用的 ECE(Economic Commission for Europe)工况是根据欧洲国家的交通状况、城市结构等解析出的,其制订的目的是为欧洲国家提供满足其实际行驶状况的车辆行驶工况。近年来的研究初步表明,我国交通状况、城市结构甚至交通规则等与欧洲国家均有很大差异,因此 ECE15 工况并不能完全反映我国车辆的实际行驶状况。研究开发基于我国交通特征的车辆行驶工况,制定适合我国特色的车辆设计、试验评价方法在我国汽车工业发展中具有重要意义。

## 1.3 国内外车辆行驶工况现状

### 1.3.1 国外车辆行驶工况的研究

当前世界的车辆行驶工况被分成三组:美国行驶工况、欧洲行驶工况和日本行驶工况,并且以美国 FTP(Federal Test Program)为代表的瞬态工况(Transient Driving Cycle)和以 ECE(Economic Commission for Europe)为代表的模态工况(Modal Driving Cycle)广为采用<sup>[1]</sup>。世界各国采用的行驶工况主要来自汽车工业发达国家,同时这些国家仍不断地对车辆行驶工况修正和补充<sup>[2-5]</sup>。

#### 1.3.1.1 欧洲工况

欧洲各国之间经济、交通等联系密切,欧洲国家排放控制法规始于 1970 年,1972 年开始实行欧洲统一的工况试验法,1974 年出现了欧洲的综合法规,即联合国欧洲经济委员会的 ECER15,至 1984 年修订为 ECER15-04<sup>[6]</sup>。我国的排放测试规程中引用了欧洲工况<sup>[7]</sup>。

目前欧洲使用的是 ECE+EUDC 工况(如图 1-1 所示)。ECE+EUDC (Extra Urban Driving Cycle) 工况可以分为两部分。第一部分为传统的城市



道路行驶工况，是城市行驶过程的一个简化代表。该部分由 15 种行驶方式组成，通常称为“十五工况法”，共进行 4 个十五工况循环，测试时间持续 780s，总行驶里程为 4.052km，平均车速 18.7km/h。第二部分为一个附加的市郊行驶工况(EUDC)，代表市郊车辆运行过程，测试时间为 400s，行驶里程 6.955km，平均车速 62.6 km/h，该部分最高速度为 120km/h。

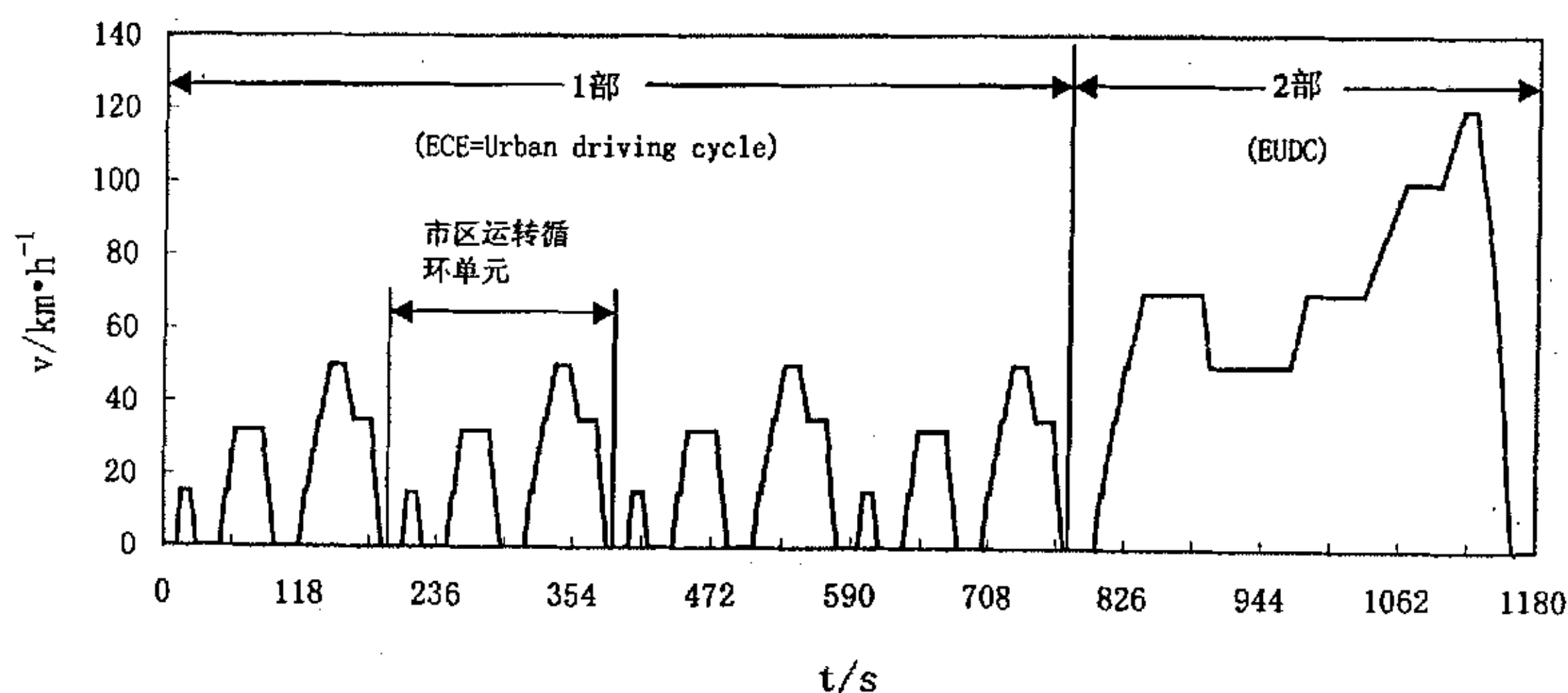


图 1 — 1 欧洲 ECE+EUDC 工况

欧洲由于开发新型动力车辆的需要，也开展了许多工况的研究，最著名的成果之一就是 Modem-hyzem 行驶工况，如图 1-2 所示。

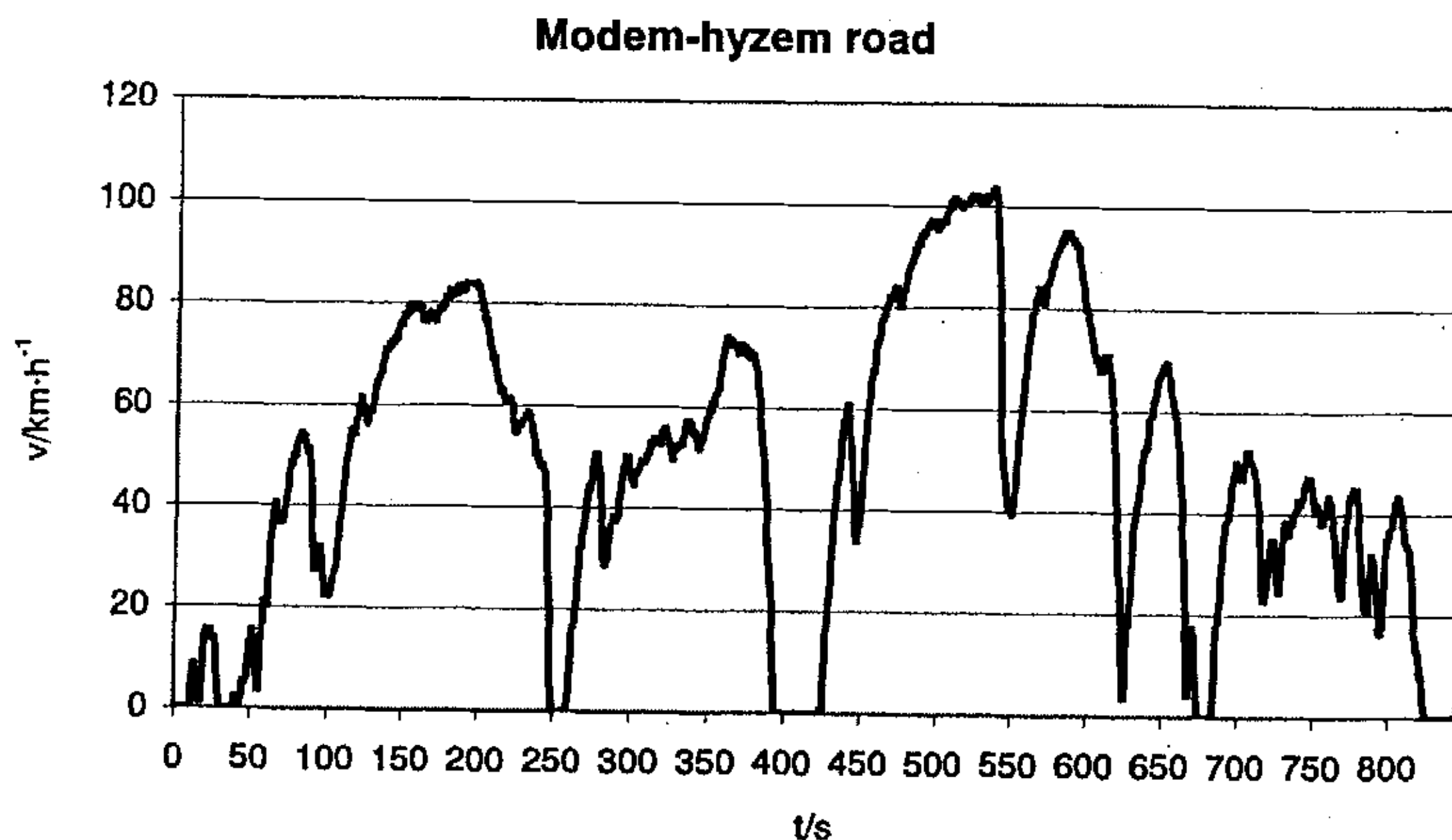


图 1 — 2 Modem-hyzem 工况

### 1.3.1.2 美国工况

20 世纪 60 年代, 研究人员发现美国加州洛杉矶市的空气质量很差, 这主要是人们上下班所用汽车废气排放造成的。经过调查, 构造了一条具有代表性的上下班路线 (简称 LA4), 这条道路上车辆的速度—时间的解析结果, 在 1972 年被美国环保局用作认证车辆排放的测试程序 (简称 FTP72) 即 LA-4C 工况。按照 LA-4C 工况来控制车辆排放削减, 可以认为考虑了最严格的情形。1975 年在 FTP72 基础上加上 600s 热浸后和热态过渡工况 (重复冷态过渡工况) 三个阶段构成即 FTP75 工况 (如图 1-3 所示), 该工况持续 2475s, 最高速度 91.2km/h, 平均速度 31.4km/h。<sup>[8]</sup>

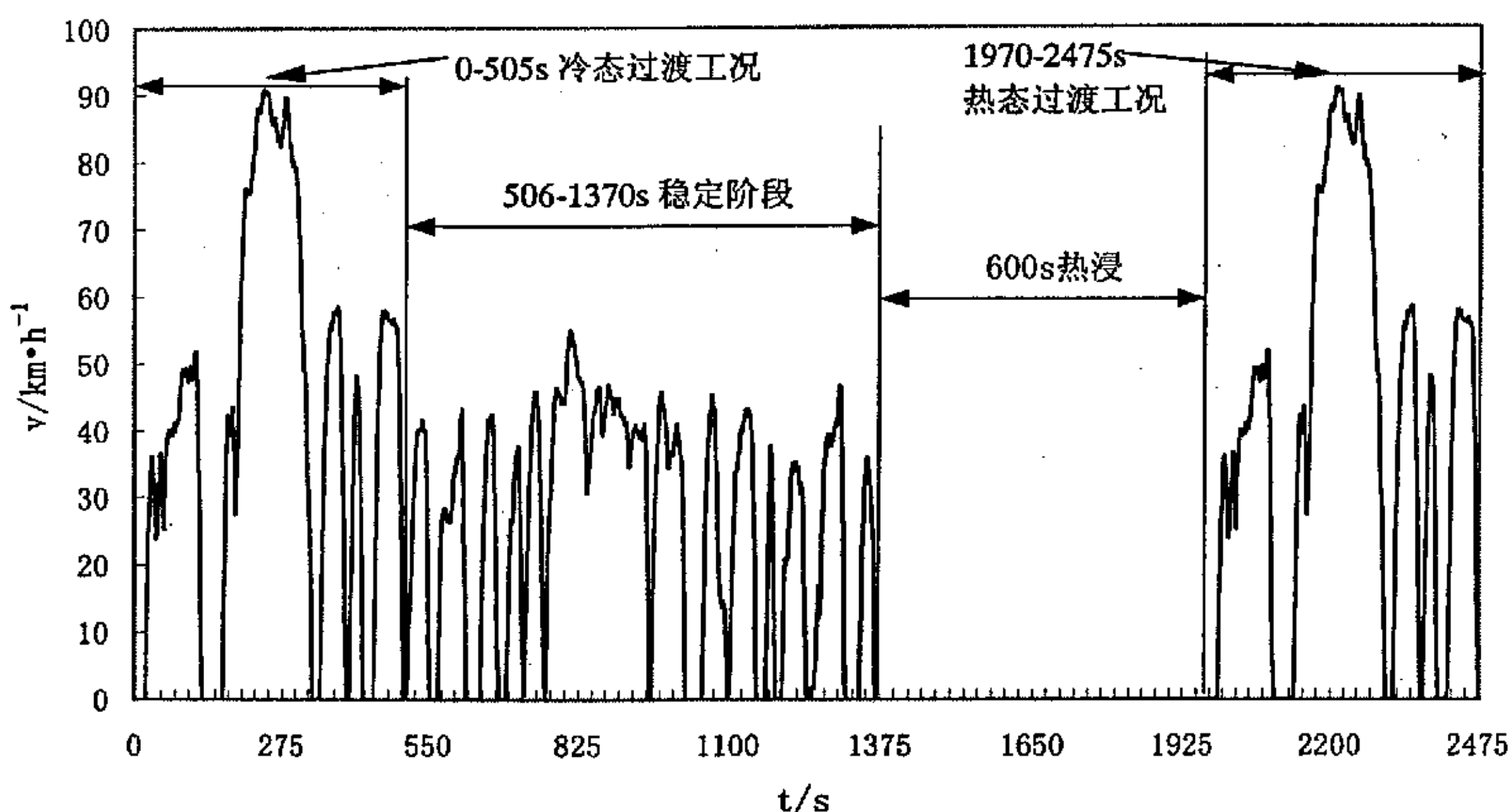


图 1 - 3 美国 FTP75 工况

由于交通网络的发展, 道路出现许多主干线和高速公路。基于 FTP 修订事项, 洛杉矶地区研究者们开发了许多更加反映真实交通状况的循环, 而且一些主要成果作为补充的 FTP (即 Supplementary FTP) 应用于 2001 年度后生产车型的排放测试。高速工况 (Highway Cycle) 主要用于高速公路上行驶的车辆。SFTP US06 工况就反映了主干线和高速公路真实的行驶工况, 因而被 FTP 追加为一个附加的工况。为了考核车辆开空调满负荷运行的车辆排放情况, 还开发了 SFTP SC03 工况 (Start control 03)。<sup>[9]</sup>

另外美国还有车辆维护检查的排放试验循环 IM240, 纽约城市工况以及 OBD 工况。



### 1.3.1.3 日本工况

日本 1991 年前使用的车辆行驶工况是 Japan10 工况。Japan10 工况相当于车辆在城市中心的行驶状况，车辆在进行 Japan10 工况试验之前，需要进行热车，即车辆以不低于 40km/h 的速度最少行驶 15min。日本 Japan11 工况用于模拟车辆由郊外驶入城区或在郊外的行驶状况。由于 Japan11 工况是一个在冷起动状态下使用的行驶工况，故车辆在实际测试之前，需要在 20~30℃ 的环境下至少放置 6 小时<sup>[10]</sup>。

上个世纪 70 年代，由于城市结构、交通流量等的变化，日本开始对 Japan10 工况加以修改，目前日本使用的就是经 Japan10 改进后的 Janpan10·15 工况。Japan10·15 工况运行时间是 660s，最高速度为 70km/h，平均速度为 22.7km/h，由三个 10 工况循环和一个 15 工况循环构成（如图 1-4 所示）。近年来，由于交通状况的改变，日本正在开发新的工况（CD3）；同时，开发方法和最终的表现形式均有变化，预计在 2008 年得到应用。

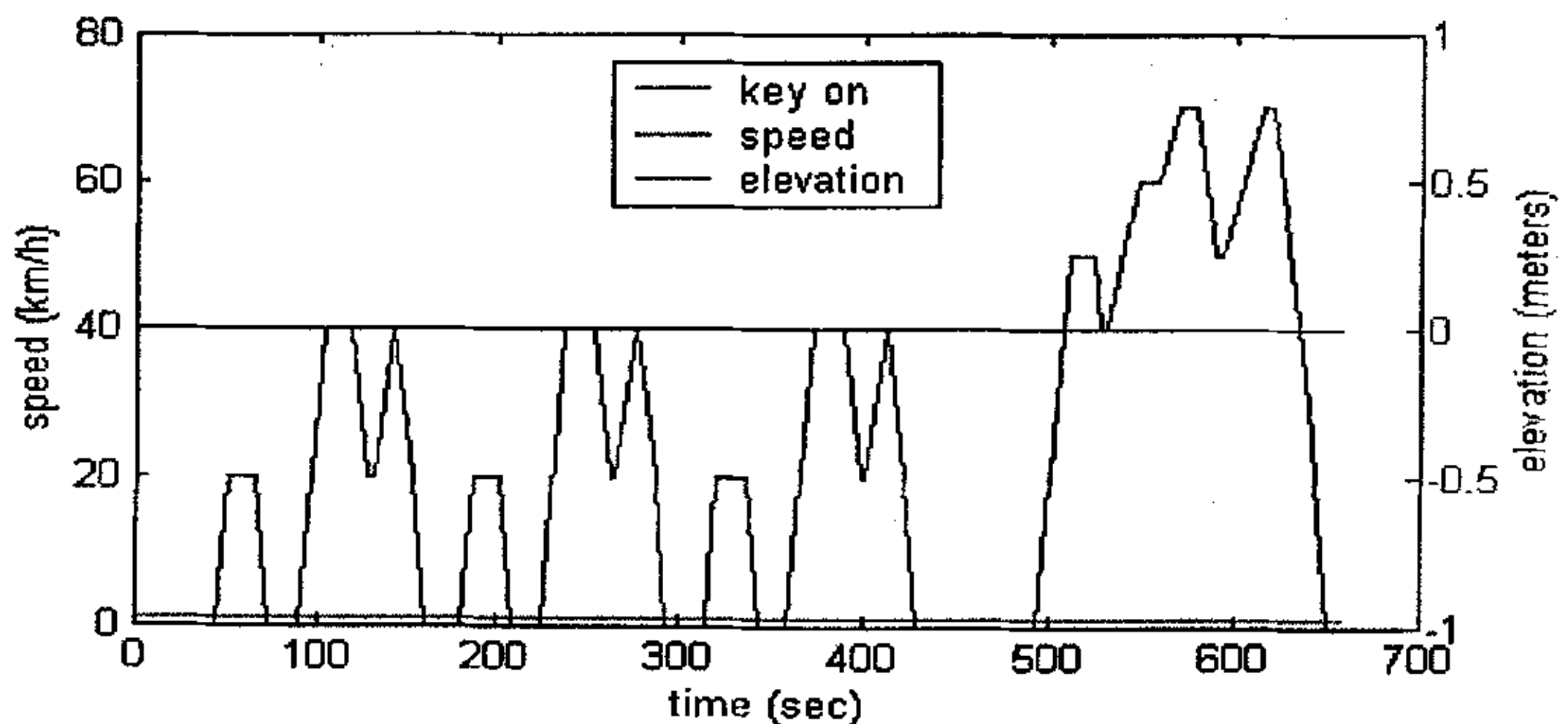


图 1 - 4 日本 10·15 工况

### 1.3.1.4 其他形式工况

由于各城市有着不同的道路特征、交通流量分布等，其实际行驶工况和标准行驶工况有所差异，而且实际行驶工况对车辆的影响要比认证工况在排放、燃油消耗等方面严厉一些<sup>[11]</sup>，因此除了上述三种为世界先进国家广为采用的车辆行驶工况外，尚有许多地方型或城市型的代表性车辆行驶工况的研究和应用。这类行驶工况称为实际工况，实际工况为瞬态工况。如 1978 年开发的澳洲雪梨行驶工况，1982 年开发的墨尔本行驶工况，1989 年开发的法国行驶工况，日本的大城市（东京都、大阪市等）通过以对象干线道为中心调查后制作的各自独有的行驶工况、纽约城市工况、纽约公交车工况（如图 1

—5 所示) 等。依据我们统计, 用于各种不同用途的工况大约有 70 种, 这些工况的存在极大地促进和丰富了车辆的设计与开发。

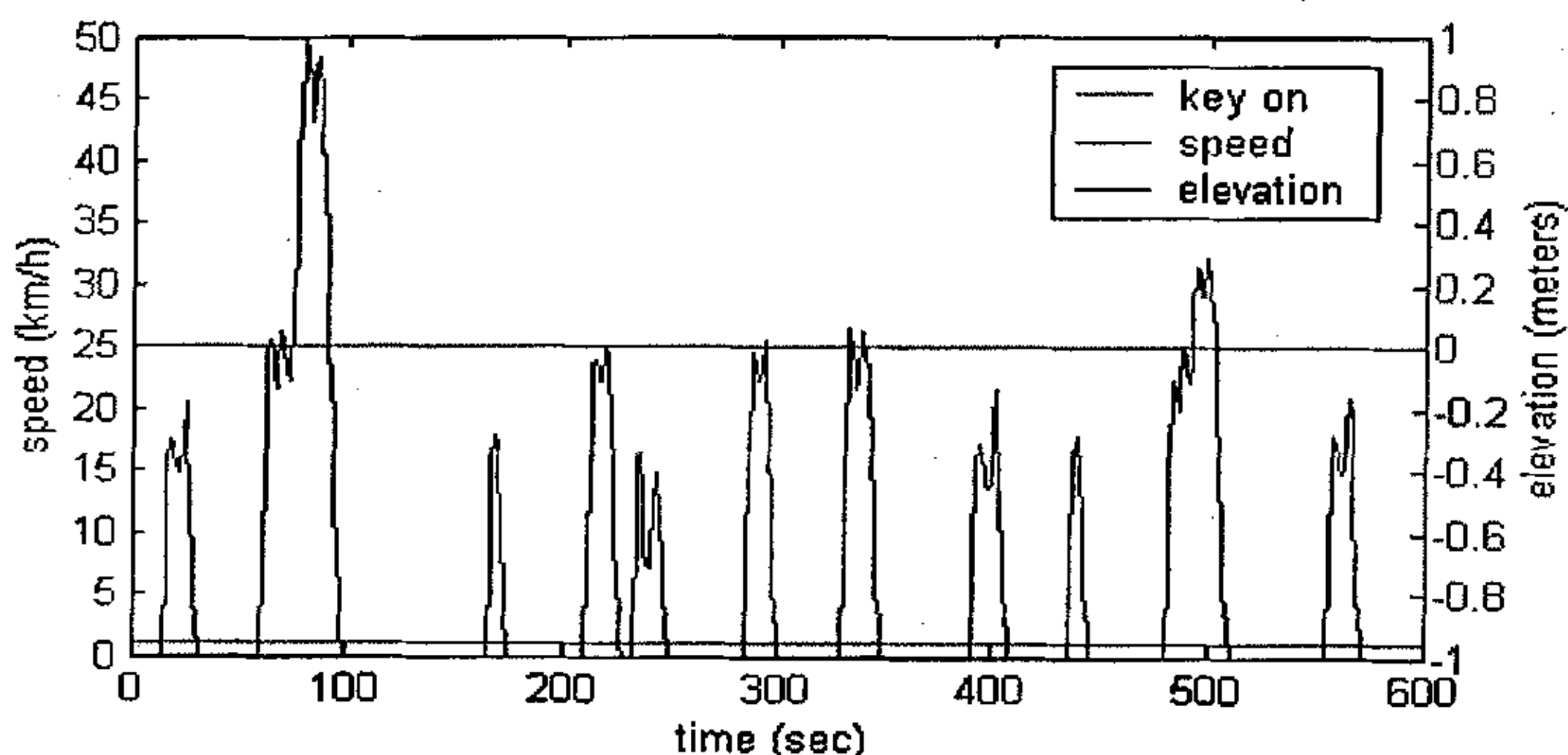


图 1 — 5 纽约公交车工况

### 1.3.2 国内车辆行驶工况的研究

在法规采用的行驶工况中, 我国现行的国标 GB 18352.2-2001《轻型汽车排放污染物测试方法》和 GB/T 18368—2001《电动汽车—能量消耗率和续驶里程—试验方法》都是基于 ECE15 工况的。GB/T 12545—2001《乘用车燃料消耗量试验方法》中模拟城市工况循环燃料消耗量试验也使用 ECE15 工况。

在开发和研究方面上海市环境保护科学研究院在 1994 年曾建立了一个简单的上海典型工况。在 1996 年~1998 年, 中国环境科学研究院用两年多的时间进行过中国城市汽车行驶工况和污染物排放系数测定的研究。近几年来, 中国环境科学研究院、中国汽车技术研究中心、深圳环保研究所、重庆汽车研究所等科研单位以及清华大学、天津大学、北京理工大学等高校等在一些经济发达、环保要求高的城市如北京、天津、大连、广州、深圳、香港等城市进行了这方面的研究工作, 形成了各自的实际行驶工况, 取得了一定的成果, 为在这方面的后继研究积累了一定的经验。<sup>[10, 12, 13]</sup>

## 1.4 本文的主要内容

本文依托于国家高技术研究发展计划(863 计划)课题“典型城市车辆实际行驶工况的研究”选题, 该项目为满足电动汽车开发研究的迫切需要,

结合未来电动汽车的主要运行区域，选择北京、上海、广州等几个典型城市，调查研究典型城市的车辆实际行驶工况。项目的目标是制订我国典型城市乘用车、公交车的实际行驶工况。其成果为我国电动汽车续驶里程、排放、能耗试验方法及定型试验规程的“工况”提供来源。

本文主要借鉴国内外同类研究的方法成果，结合我国具体实际探讨车辆实际行驶工况的开发方法，并将自行开发的工况与国际标准工况进行对比研究，通过试验室和道路环境的具体应用修正代表性工况，使其适合于车辆的设计和检测。

## **1.5 本章小结**

本部分主要论述以下几点：

- (1) 我国车辆保有量的增长对节能、环保提出的要求以及开发行驶工况的意义。
- (2) 当前作为国际标准的欧洲、美国以及日本车辆行驶工况介绍。
- (3) 国内车辆行驶工况的研究现状。
- (4) 本文的主要工作。

## 第 2 章 车辆行驶工况的型式和特征

### 2.1 简介

车辆行驶的动力来源于内燃机化学能向机械能的转化,其转化效率较低并会产生有害的排放污染物。车辆的大量使用而产生的大量废气加剧了对人们健康的危害,上世纪 70 年代,美国加州率先通过建立排放法规推进汽车工业开发更高燃烧效率和更低排放的发动机,该法规需要一个能够比较不同发动机之间性能差异的测试程序,这种测试程序被称为行驶工况(也称运转循环,Driving Cycle—简称工况)。美国开创并推动了世界各国的工况研究和开发,到现在,由于评价目标和研究对象的不同,形成了种类繁多、用途各异的工况。这些工况满足了从轻型车到重型车、从汽油车到柴油车以及燃气车等各种系列的车辆的性能测试。随着工况研究的深入和完善,行驶工况具有典型的道路实际行驶特征,能够反映车辆真实的操作工况,广泛应用于车辆的研究、认证和检查/维护(Inspection/Maintenance,简称 I/M)。本部分依据有效文献和数据,分析和研究了世界上现有的、主要的行驶工况以及 I/M 行驶工况的型式和特征。

### 2.2 行驶工况的种类和型式

世界范围内车辆排放测试用行驶工况可分成三组:美国行驶工况(USDC)、欧洲行驶工况(EDC)和日本行驶工况(JDC);其中又以美国 FTP(联邦认证程序)为代表的瞬态工况(FTP72)和以 ECE 为代表的模态工况(NEDC)为世界各国所采用。从使用上来分,又可以分为研究、认证和在用车的行驶工况。

#### 2.2.1 美国行驶工况

美国行驶工况种类繁多,用途各异,大致包括认证用(FTP 系)、研究用(WVU 系)和短工况(I/M 系)三大体系,广为熟知的有联邦测试程序(FTP75)、洛杉矶(LA92)和负荷模拟工况(IM240)等行驶工况。

##### 2.2.1.1 乘用车和轻型载货汽车行驶工况

20 世纪 60 年代,汽车排放的废气使美国加州洛杉矶出现了烟雾空气。为改善这种状况需要削减汽车废气排放量。经过研究,从一条具有代表性的

汽车上下班路线上解析出车辆的速度—时间曲线, 1972 年被美国环保局(简称 EPA) 用作认证车辆排放的测试程序(简称 FTP72, 又称 UDDS)。按照这种程序来控制车辆排放削减, 被认为考虑了最严格的情形。FTP72 由冷态过渡工况(0~505s)、稳态工况(506~1370s) 构成。1975 年在 FTP72 基础上加上 600s 热浸车和热态过渡工况(1970s~2475s, 重复冷态过渡工况) 四个阶段构成了 FTP75, 持续时间 2475s; 同时可用于车辆热启动排放的检查。

由于交通网络的发展, 道路出现许多主干线和高速道路, 车辆高速运行时间在出行的时间比例越来越大, 发动机三种主要污染物的排放特征发生改变, EPA 发布了 FTP 修订。研究者们开发了许多更加反映真实交通状况的循环, 如考虑了道路变化的 US06、车辆开空调满负荷运行的 SC03 等, 作为 FTP 的补充工况, 形成 SFTP(Supplement FTP), 并应用于 2001 年度后生产车型的排放测试。

而被 EPA 用于乘用车高速公路燃油经济性测试的循环(HWFET), 由于道路坡度对于车辆油耗的影响, 还开发了可变坡度的循环 HWFET-MTN。

除了上述工况外, 尚有以下几个研究成果:

具有更高的最大速度和平均速度、较少的怠速运行时间和停车次数/mile、以及更高的最大加速度的 LA92(洛杉矶 92)。

ARB02: 由 CARB(加州环保署) 开发的基于跟踪车辆的工况研究, 目的是测试车辆的实际操作——研究结果是处在 FTP72 边缘之外。它包括了冷启动和行程结束部分的研究。

HL07: EPA 协同汽车制造商开发的发动机循环, 目的是测试车辆在超出一定速度范围情况下的一系列加速能力; 这种加速情形下大多数车辆必须全开油门。其用于在各种速度层级开发和修正美国现有工况循环。

针对未被 FTP 循环描述和覆盖的车辆运行工况区域, 开发了一些工况循环。如代表驾驶工况的 REP05(Rep FTP 之外); 根据启动状况研究的 REM01(Remainder) 循环。它们以速度和加速度为目标, 注重研究更加细致的瞬态变化效果。

#### 2.2.1.2 重型车用行驶工况

重型车辆的研究近年来有侧重于瞬态工况的趋势。其中 BAC 被推荐作为测试重型车燃油经济性的操作规程(SAE J1376)。CBD14 是商业中心区域车辆测试循环, 它也是 BAC 复合测试循环的一部分, 运用 14 个相同的循环模拟公交车停车-运行的驾驶模式。CBD14 近似于 CBDBUS 循环, 但是时间步长可变。其它还有用于卡车的 CBDTRUCK 循环、城郊通勤往返测试循环的 COMMUTER 循环。



比较著名的还有市内测功机测试循环 (UDDSHDV): 模拟重型汽油机市内区域的操作, 运行长度为 1060s, 33% 为怠速、平均速度 30.4km/h, 并用于燃油蒸发排放测试。纽约城市循环 (NYCC) 则更是代表了市内区域道路大型车辆的运行工况。它们作为 FTP 标准工况被广泛应用。

为了评价公交车的排放效果, 通过覆盖几条不同的、公认的繁忙运行路线, 美国西弗吉尼亚大学 (WVU) 对纽约城市曼哈顿地区混合电力和常规动力的公交车的操作和状态进行调查, 开发了一组含 10 个短行程的循环, 短行程之间怠速时段 19 秒; 为满足足够的能源消耗测试, 将短行程数目增加至 20 个, 作为常规动力在用运输车 (卡车和运输巴士) NewYorkBus 工况。他们还研究了代表重型车道路测试数据复合行驶工况 CSHVR; 各种微型行程组成的典型城市复合行驶工况——市区 (WVUCITY)、郊区 (WVUSUB) 和洲际 (WVUINTER)。以及 NYCCOMP、NYCTRUCK 等工况。

除了用于底盘测功机的工况外, 对于重型车辆, 还有使用在发动机台架上的代表性工况, 它用发动机转速和扭矩计算的车辆特性 (最大功率比率、最大扭矩) 来描述。测试工况循环包括一套稳定的按照发动机转速和扭矩 (欧洲和日本规则) 定义的操作事项, 或者是同时以瞬时发动机速度-扭矩指示 (美国规则) 的“瞬态”循环。

## 2.2.2 欧洲行驶工况

在欧洲, 为研究适合欧洲的交通状况的循环, 研究人员系统地比较各种已有的用于测量和控制排放程序 (欧洲、日本和美国) 和技术 (采样和分析装备等), 通过各种不同的车辆, 研究车辆行使工况。依据道路拥挤程度或流量大小, 分类定义成不同道路区域如市区、郊区和高速以及平均速度、加速度的多种层级归类, 人为地开发和层叠成稳定的速度和加速度段。

用于在底盘测功机上认证轻型车排放的 EDC, 在欧洲又称为 MVEG-A, 现发展成为新 EDC (NEDC)。在该循环里局部循环速度是恒定的, 是一种稳态工况。包括市内 (ECE15)、市郊 (EUDC) 或市郊低功率车 (EUDCL)。ECE15 是一个包括 4 个代表市区驾驶状况的运转循环 (Urban DC), 具有低速、低负荷和低排气温度的特性。由于车辆城郊运行比例增加, 1992 年开发了代表高速行驶工况的 EUDC 或 EUDC\_LOW 片段, 在 ECE15 基础上增加 1 个 EUDC 或 EUDC\_LOW, 就构成现在大家熟悉的 ECE+EUDC。在 2000 年之前 (即欧洲 II 排放法规) 实际应用时, 工况不计量 0~40S 的运转。而欧洲 III/IV 排放法规则由于更加严格控制车辆排放 (考核发动机冷启动排放), 排放采样和运转循环同步, 采用完整的运转循环, 并称之为新欧洲运转循环 (简称 NEDC)。其持



续时间为 1220s, 平均速度为 32.12km/h, 最大加速度为  $1.06\text{m/s}^2$ 。

模态循环用于能源消耗(或排放)方面由于变速策略的不同可能造成测试结果有一些细微差异。欧洲 ECER15.04 所采用的运转循环, 针对手动和自动档车辆就考虑了这种差异: 工况的行驶距离和平均速度分别为 4.06 km 和 18.7 km/h 以及 3.98 km 和 18.4 km/h。

从速度——时间曲线中我们分析发现, 欧洲循环稳定速度的比例太高; 各种驾驶状况的分布不均, 如平均驾驶工况的持续时间短而中心市区驾驶工况的持续时间长等, 而且平均加速度值也比真实的要低一些; ECE 循环仅接近过去时代的城市中心状况。总之, 这种循环存在着相当的局限性。

当欧洲循环被认为不充分时, 研究人员确认 FTP72 循环能相对较好地阐明满足欧洲城市的平均交通状况。主要原因是由于 NEDC 属于模态循环, 并不能代表真实的驾驶状况。由于开发新型动力车辆的需要, 欧洲基于 BRITE-EURAM HYZEM 项目开发了一组称之为 HYZEM 循环的实际行驶工况, 它属于瞬时循环。HYZEM 包含了市内循环、市郊循环和高速循环。该工况基于贯穿欧洲城市道路、89 部车辆真实驾驶模式记录数据库, 因而它比标准的欧洲循环更能代表驾驶条件。相对于模态循环, 其稳定速度部分要少很多。平均速度 40.4km/h, 停车次数 0.69 次/km, 平均加速度 0.71, 最大加速度  $1.3\text{m/s}^2$ 。可能由于它是在 1997 年后的研究成果, 尚未为官方所采用, 但已被各种研究广泛使用。

### 2.2.3 日本行驶工况

与欧洲行驶工况相似, 日本工况也属于模态工况。日本的试验循环有 10-15 模式循环(Mode Cycle)、11 模式循环和 13 模式循环三种<sup>[9]</sup>。在 1976 年之前, 日本一直采用 10 工况(10 mode)来模拟市内行驶工况, 重复 6 次; 对后 5 次取样, 即所谓热启动。1976 年度以后生产的车型, 采用 11 工况, 从冷启动开始, 重复 4 次循环, 对全过程采样, 行驶距离和平均速度分别为 4.08/30.6。1991 年 11 月, 采用 10.15 工况, 由四个 10 工况和一个 15 工况构成。虽然 J10.15 工况并未成为国际工况, 但行驶工况的研究在日本仍得到持续和深入。日本坚持自己的工况(世界其他国家, 或采用欧洲或采用美国), 主要是该工况与欧洲、美国的认证行驶工况具有良好的相关性。

## 2.3 行驶工况的特征

车辆在道路上的行驶状况可用一些参数(如加速、减速、匀速和怠速等)来反映其运动特征; 通过对这种运动特征的调查和解析, 开发成能够代表运

动的行驶工况。无论以模态/瞬态 (modal/transient) 表达, 行驶工况最终都表达为速度—时间曲线, 时间的步长通常为 1 秒。

通过对应时间点的加速度、速度, 运用公式就可以确定车辆运动需要的机械能量。无论车辆采用何种动力, 当测试车辆在底盘测功机上复现这种行驶工况, 使用一种共同的环境如温度、风速、滚动系数等可以控制的条件下, 采用定容取样系统 (CVS) 和数据分析系统, 可以对车辆的动力性、经济性以及车辆排放性能等指标进行比较判断。由于实际道路条件和试验目的的多样性, 各种行驶工况具有不同的特征, 四种工况 (怠速、匀速、加速和减速) 的比例分布不同, 加速度分布也不同; 如果他们之间的速度、加速度分布相同, 测试结果也可能相同。通过运用某种模拟软件也能通过相同的车辆评价不同的行驶工况间的差异。不同的行驶工况测试结果不同, 通过采用不同的工况也能够评估车辆的适应性能。

### 2.3.1 特征值研究

对前述的一些主要的工况特征做了对比分析, 结果列于在表 2-1 中。其中列入了国内一些地区的工况研究成果 (北京市车辆行驶工况)。表 2-1 除平均速度  $V_m$  (km/h)、最大加速度  $a_{\max}$  ( $m/s^2$ )、时间 (s) 和距离 (km) 外, 特别地引入了特定功率  $K$  ( $m^2/s^3$ ), 其定义为  $2*v*a$ , 并取最大特定功率 ( $K_{\max}$ ) 作为特征值。

对研究结果进行分析, 可以看到: 当  $K$  值较低而平均车速较高时, 也就是以较低的功率维持较高的速度运行时, 车辆运行处于一种比较理想的状态, 工况比较理想。一般来说, 在畅通的道路如高速或市郊等道路上车辆的运行状况就是如此, 如 COMMUTER、HWEFT 或 WVUINTER;  $V$ 、 $a$  和  $K$  值均较低时, 工况是最适度的, 如 FTP72、NEDC 等。 $a$  和  $K$  值都较高, 车辆就需要做出较大功率才能维持该种工况下运行, 相比来说是一个更有力度的工况, 如 LA-92 和 SC03 等。其中当平均速度处于 20km/h 以下时, 最能代表市内驾驶, 如 NYCC、WVUCITY 等。从表中还可以看出, US06 是最有力度的循环, 其各项参数几乎都是 FTP 值的 2.5 倍。从单纯的特定功率来看, 美国的行驶工况由于引入了过渡工况, 包括了加速度和负荷的多种瞬态变化, 其要比比欧洲和日本工况 (模态工况) 要大很多, 应该是瞬态的长处, 其在识别车辆的性能优劣方面应更有效果。我们在开发和识别工况时, 可以通过研究这些特征值来选择适合各种不同需要的工况。

表 2-1 世界工况特征值一览表

工 况	时间(s)	距离 (km)	Vm(km/h)	$a_{\max}(\text{m/s}^2)$	$K_{\max}(\text{m}^2/\text{s}^3)$	工 况	时间(s)	距离 (km)	Vm(km/h)	$a_{\max}(\text{m/s}^2)$	$K_{\max}(\text{m}^2/\text{s}^3)$
FTP75	2475	17.69	25.82	1.48	40.15	NEDC	1180	10.87	32.12	1.06	18.51
LA92	1436	15.71	39.62	3.08	57.08	ECE	195	0.99	18.35	1.06	14.65
UDDS	1370	11.99	31.53	1.48	40.15	EUDE	400	6.95	62.58	0.83	18.51
IM240	240	3.13	47.27	1.48	40.15	NewYorkBus	600	0.98	5.94	2.77	39.70
SC03	601	5.73	34.56	2.28	47.06	NYCC	599	1.89	11.43	2.68	38.76
HWFET	766	16.41	77.66	1.43	31.29	NYCCOMP	1030	4.01	14.11	4.11	56.10
ARB02	1640	31.78	70.07	3.53	96.06	NYCTRUCK	1017	3.41	12.17	1.96	45.10
HL07	422	9.99	85.92	3.58	84.81	CBDTRUCK	850	3.51	14.88	0.36	4.77
US06	601	12.81	77.31	3.75	97.69	CSHVR	1760	12.77	21.87	1.16	21.02
REP05	1401	32.07	82.92	3.79	97.23	CBDBUS	575	3.21	20.24	1.03	14.02
WVUCITY	1408	5.29	13.60	1.14	20.65	UDDSHDV	1061	8.88	30.34	1.96	45.08
WVUSUB	1665	24.81	25.88	1.30	25.24	BEIJING 堵塞	1261	3.07	3.038	1.78	20.81
WVUINTER	1665	11.9	54.77	1.42	23.33	BEIJING 正常	1070	9.46	18.48	2.06	52.76
J10.15	673	4.3	22.71	0.79	8.81	BEIJING 畅通	1106	10.68	31.84	1.65	78.49
COMMUTER	330	6.4	70.48	1.03	14.34	BEIJING 综合	1180	7.69	20.39	1.92	49.34

注: BEIJING 堵塞等是课题组对北京市交通最新研究所得到的初期结果, 列于此表以便于比较。

在表 2-1 基本特征参数的基础上,进一步研究各个工况速度区间(以 0~10km/h 为间距划分)的概率分布(%)特征,通过那些结果,我们还能够从统计学上分析各种工况之间的差异。我们发现,认证工况的速度区间概率分布面比较宽;而研究工况则侧重于表现车辆两个极端的运行状况:低速区间(中心城区)和高速区间(市郊或高速公路)概率分布权重均较大的运行。工况速度区间的概率分布结果和表 2-1 的结论有相似之处:有力度的工况(如美国的一些附加工况)和适度工况(常规的认证工况)与概率分布相一致。

从近年来的研究来看(如北京工况,按表 2-1 命名),其特征和实际情况是比较吻合的。市区(堵塞)与纽约中心相当;综合与欧美认证工况相当;畅通和正常的工况车辆运行还是比较有力。

### 2.3.2 几种主要行驶工况差异性模拟对比

运用美国国家再生能源实验室开发的先进车辆模拟器(ADVISOR 3.2),以欧洲某一中型车辆为研究对象,以燃油消耗为对比目标,研究八种行驶工况的差异,见图 2-1。从结果看,各工况之间的差异性明显的。J10.15 下的油耗较高,经分析认为:作为认证工况,它为了同时满足欧、美排放标准,其工况要严厉一些;HWFET 为高速公路工况,发动机主要运行在经济区域,所以能耗最小;而新的欧洲瞬态工况(包括 MODEM)也反应了各自运行状况,如 HYZEM-U,典型地反映了市区情况,能耗最高。从模拟能耗水平来看,工况型式(瞬态或稳态)并不是决定因素;关键是工况所反映的目标的真实车辆运行状况。

总的来说,由于工况使用的目的不同,工况的型式和特征不同,测试结果会迥异;当速度分布和加速度特性相似时,一些工况之间的测试结果会有一些的相关性。工况的开发和发展与车辆技术及道路的状况是相互联系的。

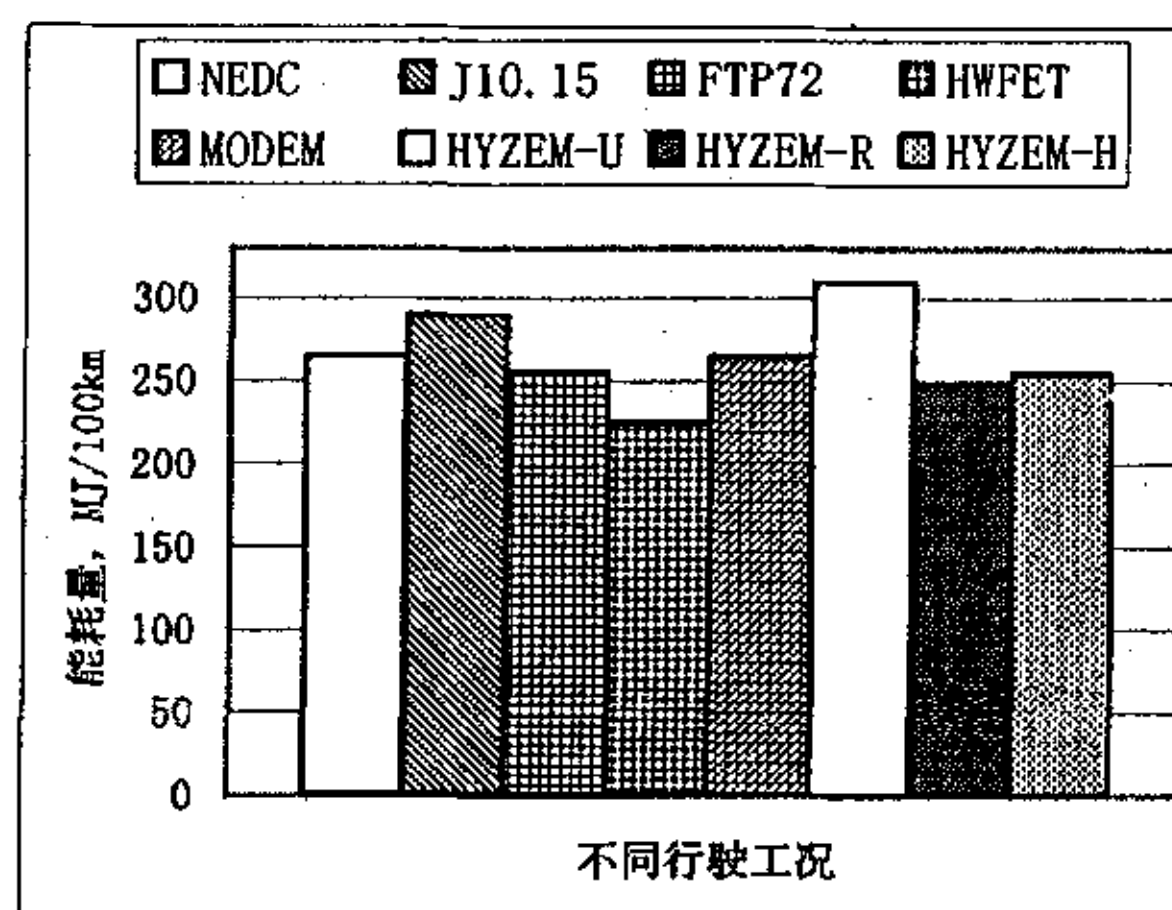


图 2-1 常规车辆不同工况下能耗对比



## 2.4 I/M 用行驶工况

I/M 完全用于车辆的排放测试,其经历了无负荷测试、稳态负荷测试和瞬态负荷测试三个过程,是随着车辆技术的发展和污染物控制要求而发展的。这些工况考虑了维修级别的应用和操作性,操作时间短,一般不超过 10min。I/M 早期采用无负荷测试,包括双怠速、双怠速+ $\lambda$  和自由加速等;通过测量车辆 CO 和 HC 排放,对化油器式车辆故障判断率较高,但对电喷发动机的车辆(甚至有车载 OBD)识别能力很不理想,且不能测试 NO<sub>x</sub>。更合适的车辆短工况不断被开发适应 I/M 的需要,美国开发成果最为广泛。

### 2.4.1 稳态负荷测试

美国 EPA 开发了多种 I/M 短测试行驶工况,与 FTP 的相关性见图 2-2。一些工况虽然与 FTP 的相关系数在 0.63~0.85 之间,但由于设备成本高和重复性较差,一直未被正式采用。而加速模拟工况(ASM)由于在 NO<sub>x</sub> 方面其与 FTP 具有

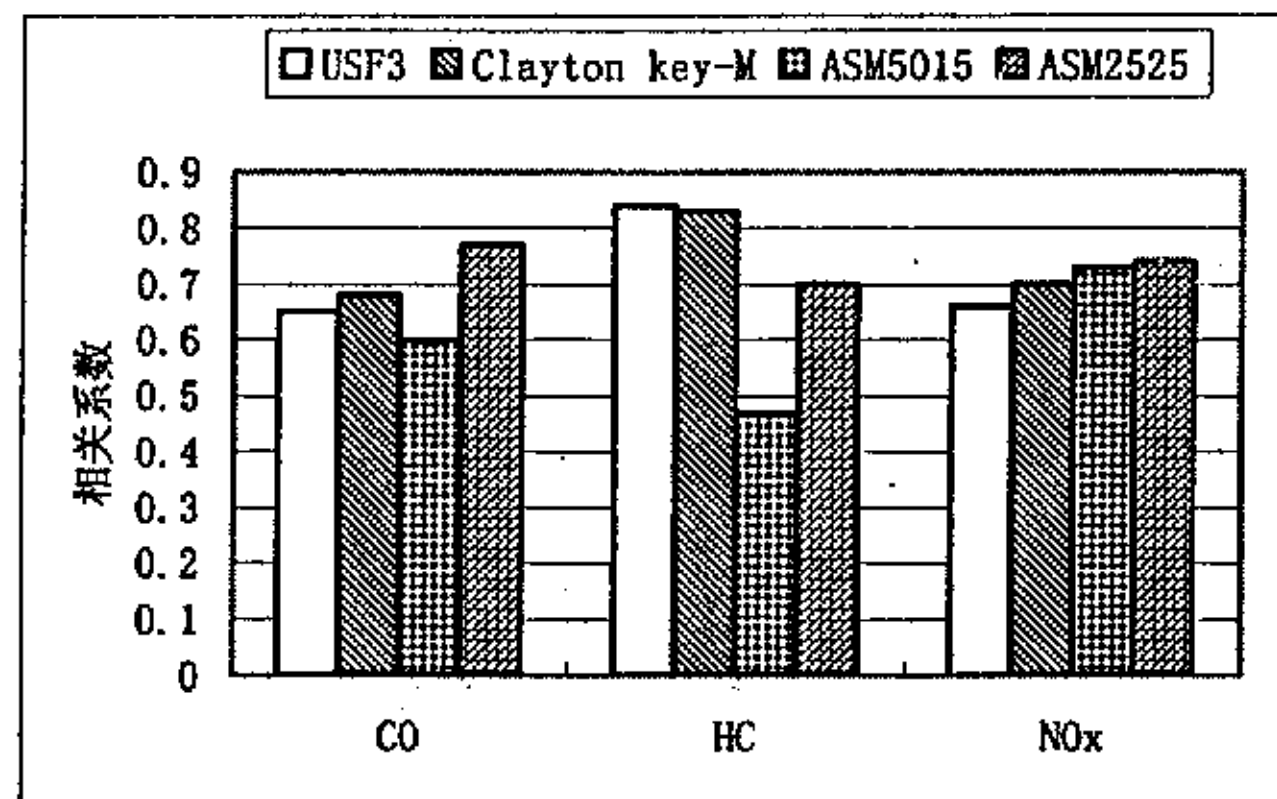


图 2-2 稳态负荷工况与 FTP 相关性

更好的相关性,曾被 EPA、CARB (加州大气管理局)和 BAR(加州

州车辆维修局)采用。具有代表性的是 ASM 5015(最大加速度时 50%负荷、15mph)和 ASM2525,最近又在 ASM5015 和 ASM2525 基础上开发出 ASM2 测试工况。

德国技术检查联盟协会(VdTUV)的稳态行驶工况(速度 50km/h、加载 7kw,然后怠速),在加载和怠速的过程中测试。它将稳态负荷和怠速合成,对于催化器车辆的检查效果要比简单的怠速/双怠速恰当很多。他们还开发了用于柴油机轿车的,包含最大负荷和 45%负荷(名义速度)两个工况段,各测量两次。这种柴油轿车的负荷测试比较适当,但由于欧洲采用自由加速方法,尚未为德国官方采用。

### 2.4.2 瞬态负荷测试

稳态测试可能较好地检查 (I) 出高排放的车辆, 但是在维修方面 (M) 存在缺陷; 瞬态工况法就能够判断故障是否得到维修。这种测试所用工况采用法规认证用行驶工况, 测试设备要求高, 如 CVS、多点测功机和实验室级分析仪等, 差异在于其测试的持续时间短。众多瞬态负荷短行驶工况经过了与

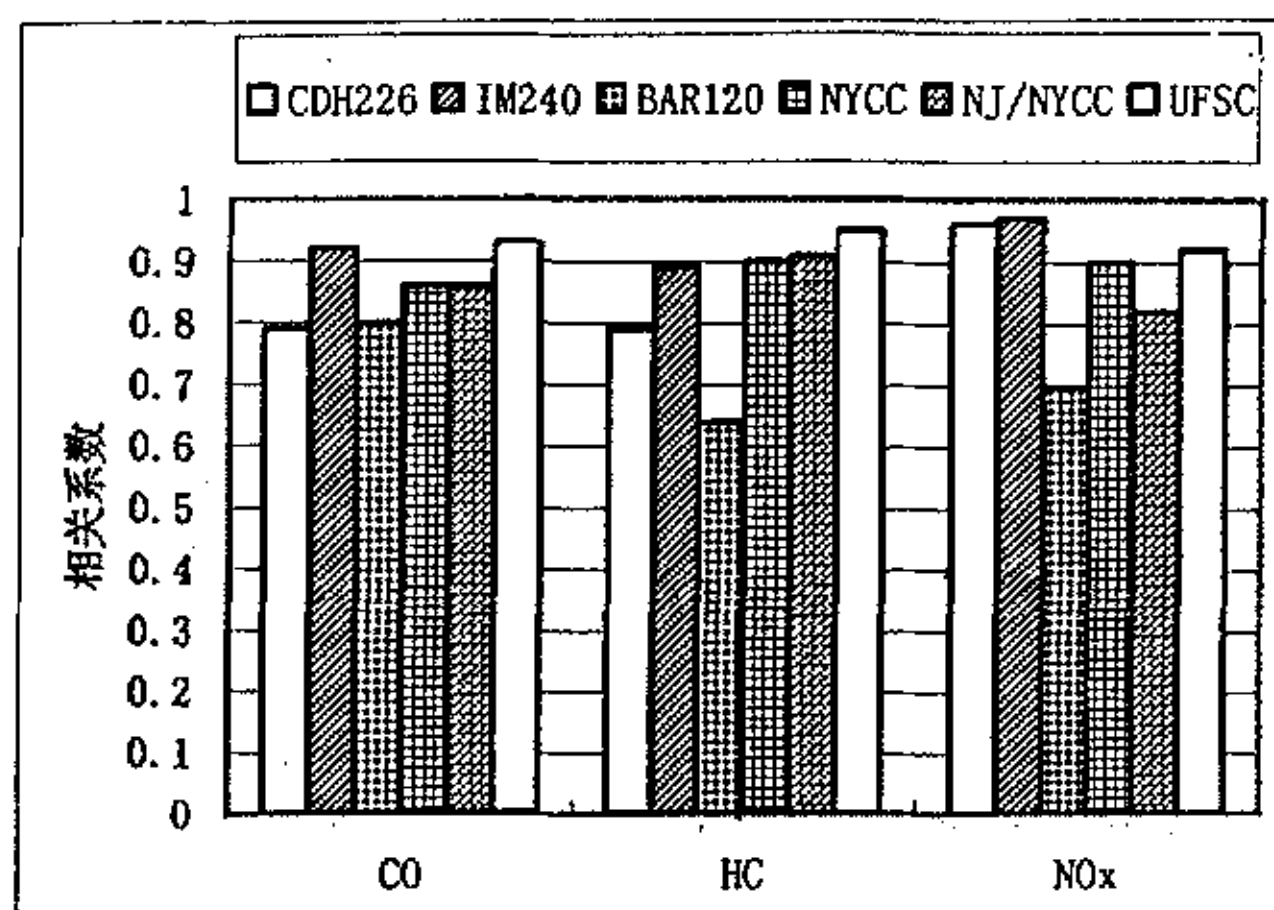


图 2-3 瞬态负荷与 FTP 相关性

FTP 相关性测试, 如加州 7 工况 (型式认证) 和新泽西 ACID、联邦短工况 (UFSC)、新泽西/纽约复合工况以及型式认证用的纽约工况 (NYCC)。

EPA 希望开发更多供选择的瞬态工况, 并能够更好地模拟 FTP 工况, 适应更先进的车辆技术, 推出了 IM240。IM240 就是 FTP 前 240 秒, 在热工况下的相关性达到 0.89~0.97, 全 FTP 达到 0.54~0.82; EPA 建议采用它来执行“增强 I/M 计划”。一些州针对装备 TWC 的车辆也开发了较好的短工况, 如科罗拉多州的 CDH226, 三种污染物相关系数达到 0.79~0.96, 辨别率达 90%; 加州车辆维修局 (BAR) 开发的 BAR120, 则近似于 IM240。不同工况相关性如图 2-3 所示。

## 2.5 本章小结

由于各国、各城市的道路特征和交通流量分布不同, 行驶工况种类多, 特征分布差异很大。但从工况的型式和特征来看, 仍可以得到以下的结论:

(1) 由于在固定的地域, 工况的特征具有一定的稳定性和相似性, 根据不同的用途和目的研究各自的实际行驶工况具有重大意义。

(2) 认证工况和研究工况之间可以有所不同。在速度区间分布上, 前者范围宽后者分布窄; 后者应该考虑各种极端的情形。由于车辆技术的提高和在用车排放控制重要性, 用于 I/M 的短工况与认证工况 (如 FTP) 之间的相关性要求越来越高, 短工况的开发越来越重要。

(3) 从模拟的能耗水平结果看, 模态和瞬态并没有太大的差异; 但从特定功率看, 瞬态型式工况因为加速度变化来自真实的操作, 可能更好一些; 而在控制策略方面, 瞬态循环工况也更合适。



## 第3章 车辆行驶工况开发方法

为了在试验台架上或道路上再现车辆的实际行驶状况,需要针对不同的情形(如城市、车型等)开发不同车辆行驶工况。其最终目的可能是多方面的:确定污染物排放量和燃油消耗量;对新车型进行验证和校准,评估各种技术,甚至测定在交通控制方面的风险等。

一个工况主要基于确定地区和时间内的车辆典型行驶状况,它包括四种行驶方式:加速、减速、怠速以及匀速(巡航)。最终的工况应该能够反映车辆在道路运行中所有的运动学水平以及这些水平所占的比例,最终的表现型式是车速—时间曲线。针对不同的原始数据的采集方式,制订不同的数据解析方法。国内外进行了许多相关研究,开发车辆行驶工况的具体方法、手段形式各异<sup>[14-23]</sup>。在广泛分析相关文献并进行相关研究基础上,发现可以将其归纳成相对稳定的技术过程,图3-1。本文将深入细致地阐述这个开发方法。

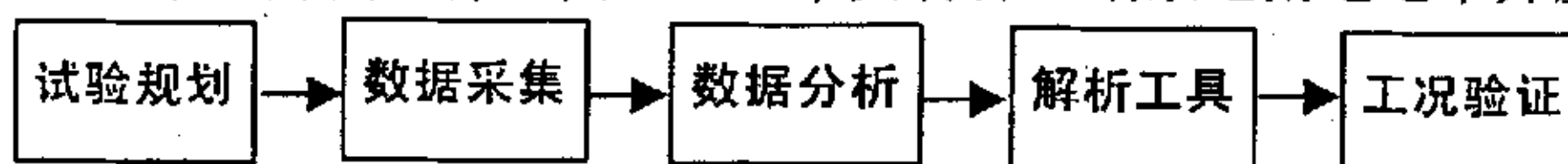


图 3-1 开发车辆行驶工况的基本过程

### 3.1 试验规划

#### 3.1.1 试验方法的确定

试验方法的主要内容是要确定利用仪器设备如何获得试验数据。目前常用的有三类获取数据的方法。

(1) 平均车流统计法。该统计方法又称为代表工况法,其选择驾驶员驾驶试验用车,在选定的时间段以及选定的试验道路上随平均车流行驶。平均车流统计法操作方便,具备一定的主动性,但需要规划试验路线和时间,常受先入之见的“驾驶指示”影响,实际上不能称之为标准的驾驶行为。

(2) 车辆追踪法,即测量被跟踪的目标车辆的方法。该方法一般划定某一测试地理范围,随意追踪前方目标车辆;当目标车辆超出测试范围后,改换另一目标车辆。车辆追踪法具备一点的随意性,但不一定能全面顾及不同的道路类型,且对驾驶员技术要求较高。

(3) 自主行驶法,即由车主按各自正常目的驾驶私人车辆的方法。该方法在时间和道路方面没有规定,随意性强。其主要优点是车辆在正常使用状态下行驶,具备足够数据采集仪器的情况下易获取不同车型大量的数据。

但它不能针对确定的道路类型，也不能提供关于位置、交通流等信息，试验周期长。

鉴于试验的实际情况，本次课题研究中乘用车采用了平均车流统计法；公交车采用选定的公交线路上实车搭载测试仪器和车辆追踪相结合的方法。

### 3.1.2 规划试验道路

如果采用第 3 种方式获取数据，则不需考虑道路怎样确定的问题。

如果采用第 1 种数据获取方式，那么道路的确定方法将至关重要，这需要线路的调查和资料的积累和利用<sup>[24]</sup>。道路调查是开发车辆行驶工况的最基础的阶段，其目的是从许多条道路中筛选出代表性的试验路线，这种路线反映了车辆在道路上的空间和时间规律，其结果能够以少量试验获得能够代表全局特征的统计结果。

研究表明，城市内不同的道路等级对应着不同的交通流量、平均车速，在不同的道路等级上，车辆的行驶工况有不同的特点；在每一道路等级中，不同的交通强度必然对应着不同的行驶工况。

当然我们可以设计同时有 10 辆车（甚至更多）在某区域内不重复的道路上同时运行，采集足够的样本，统计出车辆运动学水平以及各自的份额；但是实现这种准确的方法需要大量的人力和物力。那么，我们变化一个角度，基于著名的交通流理论（ $V=K*Q$ ，其中  $V$ ：车速； $Q$ ：车辆流量； $K$  车辆间距）<sup>[25]</sup>，通过交通流调查获得交通流水平和份额所对应的路线；这样在忽略时间差异前提下，可以用少量的车辆在这些路线上运行调查来获取车辆运动学数据。这是一种既科学合理又易于操作的方法。

车辆行驶工况主要受道路等级（快速道、主干车、次干道及支路以及车道数、机非混合等）、交通强度（车辆流量、周转量或饱和度等）以及交叉口密度（路段内交叉型式和数量）以及时间等四大因素的影响。通过调查、收集城市区域内一个周期内交通流的相关数据，进行统计分析（计算路段运动学得分）、将不同得分分类成几种不同层次的类别，再根据研究者的条件进行不同数量的概率抽样，确定试验路线和试验时间。

如果采用车辆追踪法，只需划定测试范围，不需要设计专门的试验道路。公交车试验线路的提取方法参见文献<sup>[26]</sup>。

### 3.1.3 试验车辆和驾驶员的确定

试验车辆需要确定三个方面内容：车辆类型、数量以及驾驶员的确定。采用自主行驶法，可以选择使用的车辆较多，车辆类型的确定可以基于

该地区的普及车型(用市场占有率来衡量)。而采用平均车流统计法获取数据,当车辆在道路上自由驾驶时(不刻意超车和慢行),车辆运行将主要受到变速策略的影响,无论使用何种水平的驾驶员,其固有的驾驶行为影响必须被排除。随着自动档技术成熟和该类车型的增多,应该考虑首选该种车辆。公交车一般选择专业驾驶员<sup>[27]</sup>。本研究中乘用车试验驾驶员选用当地专业驾驶员,公交车试验是公交公司专业驾驶员。

## 3.2 数据采集

### 3.2.1 数据的设置

很多研究通常设置大量的参数:车速、发动机转速、行驶时间、行驶里程、道路坡度、节气门位置、燃油消耗量,甚至包括发动机油温和水温以及对手动阻风门、照明灯、雨刮器、后窗加热器和发动机风扇的使用或操作、环境温度、电气系统的能耗以及制动装置的使用情况等。但对开发一个具体的车辆行驶工况而言,以上这些参数并不是每个都是必需。过分追求细节,在以统计特征为原则的行驶工况开发过程中并无具体意义。

从工况的开发过程和表现结果来看,必须记录车速、发动机转速、燃油消耗量以及与燃油消耗相关的记录等参数。随着城市交通的立体化,行驶工况还应该附加一个坡度,使得行驶工况下能够反映城市的特征;燃油消耗量用于坡度的确定。

### 3.2.2 采样间隔的设定

为获得更加接近实际的数据,研究者希望利用车辆自身的传感器,现代的车辆也提供了这种可能;同时常用的外部高精度的速度传感器如微波型和光电型,受雨、雪天影响也不能正常使用。速度信号脉冲数一般分别有为 6、24 和 48 个/车轮每转一周,甚至更高(如用于 ABS、EPC)。由于脉冲数的差异的影响,较少的数目会导致加速度平滑性差、匀速的运动比例少、而加减速过程中加速度分布比例高;同时,会低估低速的比例。脉冲数在 24 个/车轮每转一周以上时,这些影响就较小<sup>[28]</sup>。这种差异对传统车辆的设计和评价不会造成实际的影响,但是会影响到混合动力车辆控制策略的设计和评价。从工况构成参数比例分布一致性出发,建议采用尽可能多的脉冲数(48 个/每周以上)来获取实际行驶工况数据。

车载数据记录设备的采样频率(一般有 5Hz、2Hz 和 1Hz)也是很重要的因素。时间间隔越长,数据波动越小;但是,使用过大的采样间隔将会平滑

掉较大的正加速度值，也将低估低速比例。由于较大的加速度值对车辆设计和评价有较大的影响，需要避免出现这种误差。根据车辆传感器配置（车轮每转一周脉冲数的多少）情况，建议采用 2Hz（0.5 秒）的采样频率。

### 3.2.3 数据量的确定

国内工况调查的相关研究不少，但结果之间差异较大，原因何在？一方面交通流调查不够科学，规划的试验路线不具备代表性，路线存在差异；另一方面，采集的原始数量差异。采集的数据量与最终导出的结果的准确性

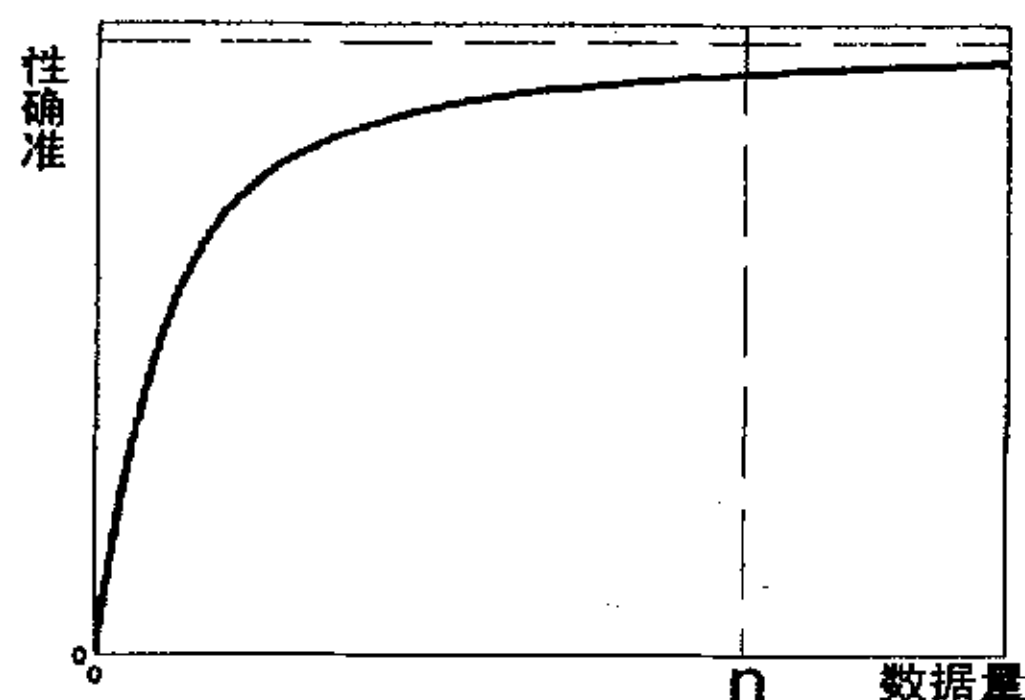


图 3-2 结果的准确性与数据量之间

有如图 3-2 所示的关系。从理论上讲，采集的数据越多，结果会

越准确。但是当采集的数据量达到一定值  $n$  后，即使增加数据量，准确性的提高也不会继续获得很大提高，国外类似试验数据量参加文献<sup>[20, 29]</sup>。同时，由于客观条件的限制，采集的数据量也是一定的。在条件许可的情况下，应尽量多采集数据。当获得海量数据时，又需要采用高级的统计方法和手段。

## 3.3 工况构建方法

### 3.3.1 工况形成过程

车辆行驶工况的开发过程并不是固定不变的，而是随车辆技术的发展逐步完善，本论文论述的方法是基于运动学片段的组合构建方法。

构建工况的基础数据是车辆实际行驶特征数据，是基于完善的试验道路设计而获得的速度时间数据。将车辆行驶速度数据划分为独立的运动学片段，即从一个怠速开始到下一个怠速开始作为一个运动学片段，然后计算这些片段的特征值，形成具有特征值的片段数据库；根据各片段的特征值，利用主成分分析方法降维处理这些片段，根据聚类分析理论把运动学片段分类；根据不同类片段的数量和特征，在满足目标工况的要求下提取运动学片段，组成具有一定时间或行程长度的目标工况；对于形成的目标工况根据相关准则进行验证，得到最终的代表性行驶工况。



### 3.3.2 专用软件的开发

由于采集的数据量庞大，运动学描述参数众多，解析结果应该多样化，统计分析非常复杂，应该采用高级统计技术比如主成分分析和聚类技术，它们都涉及到成千上万多维矩阵计算，对数据的分析处理以及工况的构建都应该利用计算机来完成的。

专用软件的编写语言很多，例如采用 Visual C++、Visual Basic、MATLAB 等来编写解析程序。车辆行驶工况解析软件 (Vehicle Driving Cycles Analysis Program, 简称 VDCAP) 是我们基于 MATLAB 运行环境<sup>[30]</sup>、独立开发出的一套行驶工况数据处理软件，它实现了上述技术能力，快速地处理海量数据，人机界面友好，可以完成从原始数据的处理到工况的构建的工况解析过程<sup>[21]</sup>。系统的开发不仅是体现计算机技术，还需要掌握大量和艰深的统计理论、数据分析知识。软件开发流程如图 3-3 所示。

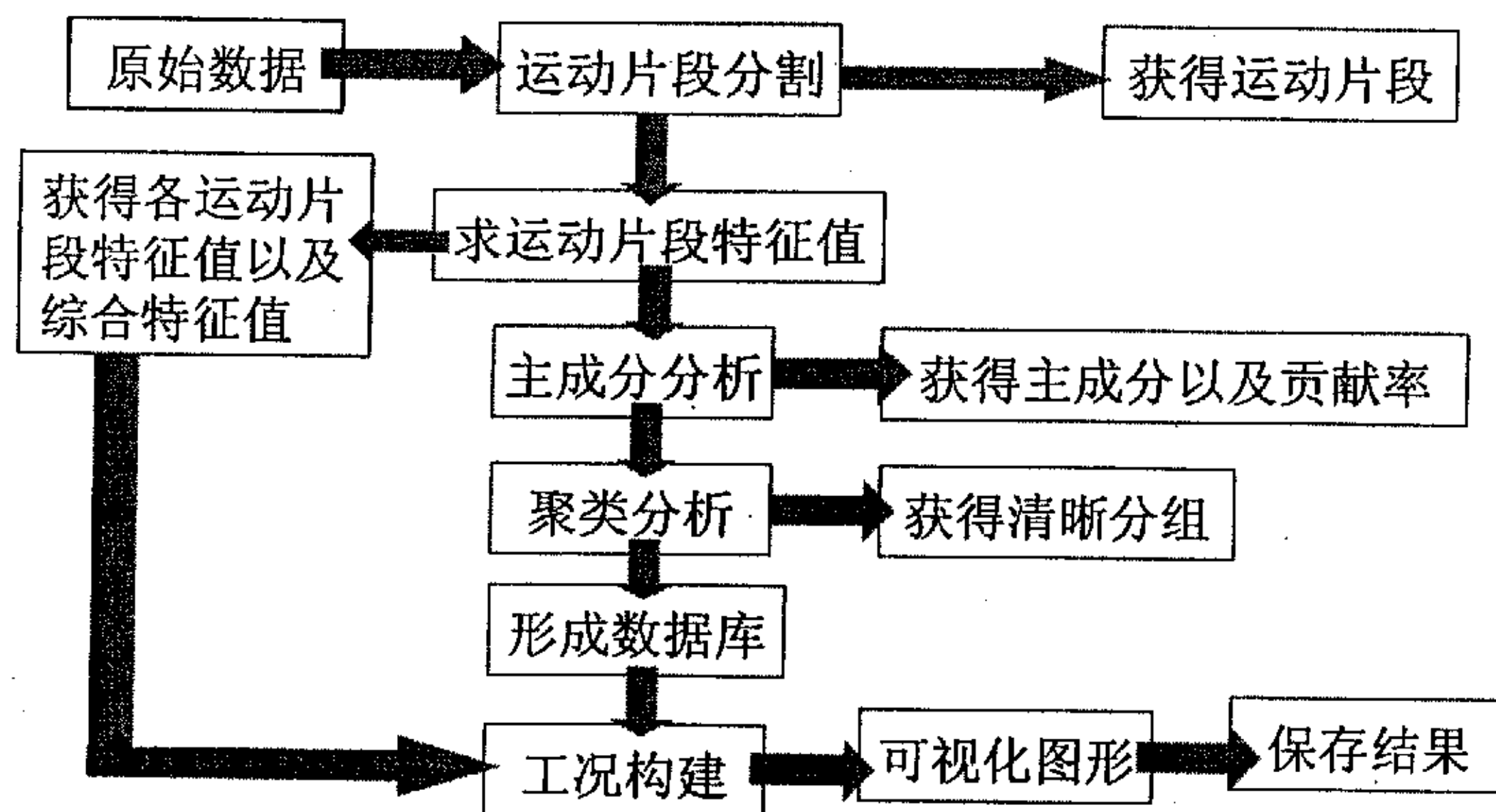


图 3-3 VDCAP 的流程图

开发的工具包括：

- 用于统计、比较运动学特征的工具；
- 随机再现速度和加速度联合分布、工况连续性等观测分析工具；
- 主成分计算工具；
- 聚类工具，分析交通状况类型；
- 确认工具，概率分布评估等。在最终循环的数据和基本数据之间实现参数和分布的比较；
- 剪裁工况工具，如果需要修正和加权，能够可视化处理；

- 车辆运行工况趋势评估工具；结合大量的、不同时期的数据对车辆工况做出预测。

### 3.4 数据分析与处理

#### 3.4.1 运动学片段的提出

在数据分析与处理上，主要存在两种方法：一种是把全行驶状态作为连续事实和现象用统计的方法来解析，在构建行驶工况之前根据试验区域人为地划分工况等级，并人为地合成。另外一种则是从道路交通状况入手，通过对构成全行驶的各个运动学片段的研究、归类，然后构建工况<sup>[2]</sup>。后者也是国外使用的最新研究方法。

车辆从起步出发至目的地停车，受道路交通状况影响，其间会经过多次起步、停车操作。将车辆从一个怠速开始到下一个怠速开始的运动定义为运动学片段（以下简称片段），图3-4，行程就可以视为各种各样的片段组合。其中某些片段反

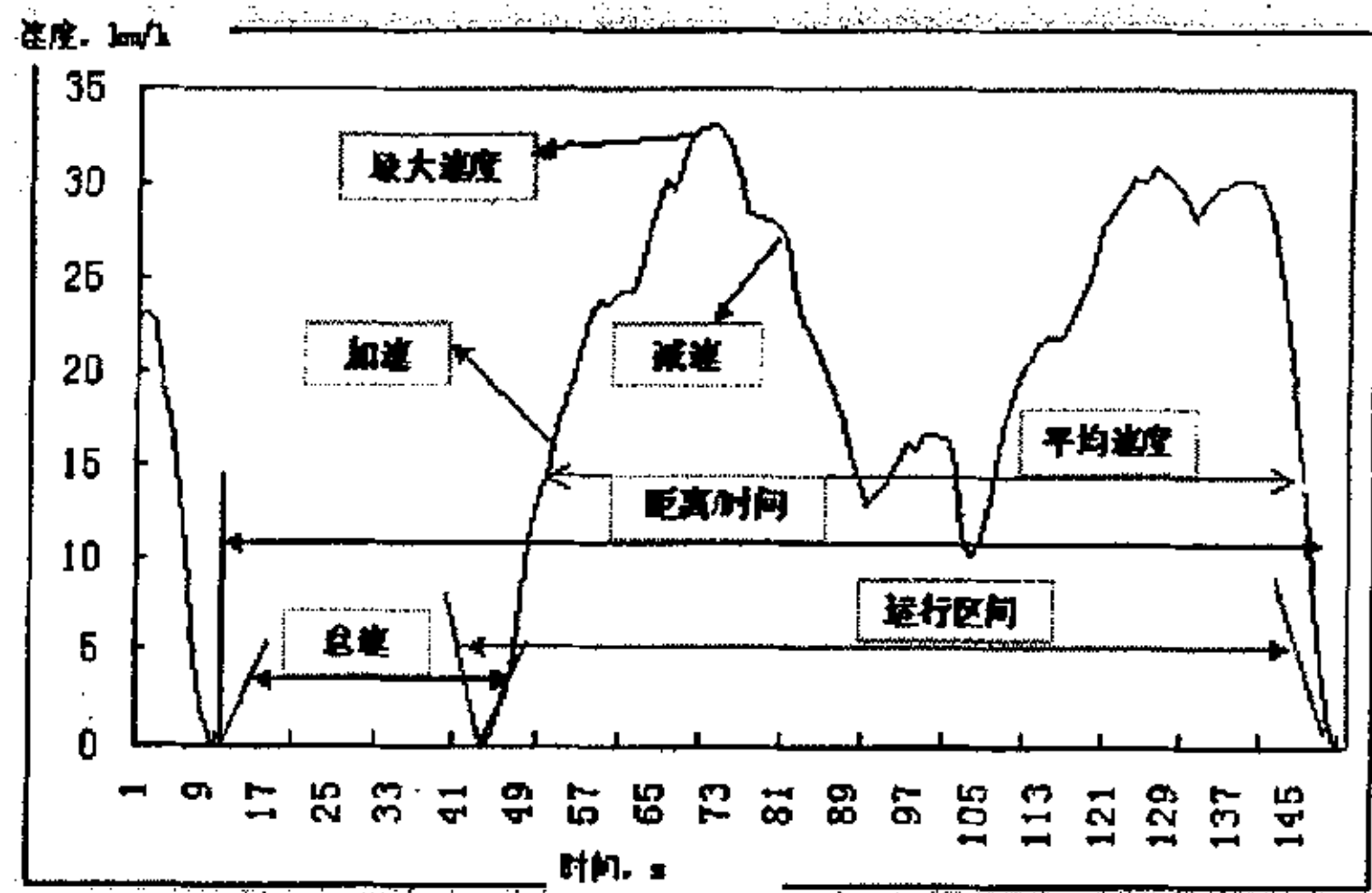


图 3-4 运动学片段定义

映的交通状况可能是一致的。不同的时间、不同的地理位置和公路类型会出现相同的片段，有时候繁忙的高速公路上的片段特征可能和拥挤的城市中的片段完全一致。将这些片段类型和交通状况联系起来，针对性地分析符合低速、中速和高速运动形态，并在此基础上构建工况，这种新的方法是完全合理的。

把车速曲线当作时间的函数来分析，这一曲线的特征参数即可作为交通状况的函数。从原始数据中连续地分割运动学片段，并对这些片段的特征参数如持续时间、片段长度、和速度等进行主成份得分分析；在此基础上采用聚类技术再对片段进行分类，获得与交通状况相对应的类集合；最后利用概率构造出适合应用的、时间序列较短的代表工况。



### 3.4.2 运动学片段的特征值

#### 3.4.2.1 特征值的定义

对运动学片段特征的分析主要从以下几方面考虑：行程长度、怠速时间、行程持续时间、平均速度、运行速度（不包括怠速时间的平均速度）、最大速度以及描述瞬时速度和加速度的标准偏差等。由此形成了片段的众多特征值，本文定义了 36 个反映片段特征的参数（本文称它们为片段特征值）作为评价准则数<sup>[21]</sup>。表 3-1 和表 3-2 是这 36 个参数（片段特征值）以及它们的意义。表 3-1 所列的 15 个特征值是描述片段特征，可用于主成分分析和聚类分析；表 3-2 所列的 21 个特征值是描述片段的统计分布，可用于从所分的类中挑选满足条件的片段（或有效性判定）。

表 3-1 描述分类的片段特征值

序号	特征值	意 义	单 位
1	T	运行时间	s
2	T <sub>a</sub>	加速时间	s
3	T <sub>d</sub>	减速时间	s
4	T <sub>c</sub>	匀速时间	s
5	T <sub>i</sub>	怠速时间	s
6	S	运行距离	s
7	V <sub>max</sub>	最大速度	km/h
8	V <sub>m</sub>	平均速度	km/h
9	V <sub>mr</sub>	运行速度（除取怠速的平均速度）	km/h
10	V <sub>sd</sub>	速度标准偏差	km/h
11	a <sub>max</sub>	最大加速度	m/s <sup>2</sup>
12	aa	加速段的平均加速度	m/s <sup>2</sup>
13	a <sub>min</sub>	最小加速度，即最大减速度	m/s <sup>2</sup>
14	ad	减速段的平均减速度	m/s <sup>2</sup>
15	asd	加速度标准偏差	m/s <sup>2</sup>

在数据处理过程中，对加速、减速、匀速（巡航）和怠速这四个片段特征值按下面的原则处理：

加速：汽车加速度大于等于  $0.15\text{m/s}^2$  的连续过程；

减速：汽车加速度小于等于  $-0.15\text{m/s}^2$  的连续过程；

匀速：汽车加速度绝对值小于  $0.15\text{m/s}^2$ ，且车速不为 0 的连续过程；

怠速：发动机工作，但车速为 0 的连续过程。

表 3-2 片段的统计分布特征值

序 号	特征值	意 义	单 位
1	$P_{0\_10}$	0~10km/h 速度段的比例	%
2	$P_{10\_20}$	10~20km/h 速度段的比例	%
3	$P_{20\_30}$	20~30km/h 速度段的比例	%
4	$P_{30\_40}$	30~40km/h 速度段的比例	%
5	$P_{40\_50}$	40~50km/h 速度段的比例	%
6	$P_{50\_60}$	50~60km/h 速度段的比例	%
7	$P_{60\_70}$	60~70km/h 速度段的比例	%
8	$P_{70}$	70km/h 以上速度段的比例	%
9	$A_{-3.5}$	-3.5m/s <sup>2</sup> 以下加速度段比例	%
10	$A_{-3.5\_ -2.5}$	-3.5~-2.5m/s <sup>2</sup> 加速度段比例	%
11	$A_{-2.5\_ -1.5}$	-2.5~-1.5m/s <sup>2</sup> 加速度段比例	%
12	$A_{-1.5\_ -0.5}$	-1.5~-0.5m/s <sup>2</sup> 加速度段比例	%
13	$A_{-0.5\_ 0.5}$	-0.5~0.5m/s <sup>2</sup> 加速度段比例	%
14	$A_{0.5\_ 1.5}$	0.5~1.5m/s <sup>2</sup> 加速度段比例	%
15	$A_{1.5\_ 2.5}$	1.5~2.5m/s <sup>2</sup> 加速度段比例	%
16	$A_{2.5\_ 3.5}$	2.5~3.5m/s <sup>2</sup> 加速度段比例	%
17	$A_{3.5}$	3.5m/s <sup>2</sup> 以上加速度段比例	%
18	$P_a$	加速时间比例	%
19	$P_d$	减速时间比例	%
20	$P_c$	匀速时间比例	%
21	$P_i$	总速时间比例	%

## 3.4.2.2 计算片段的特征值

在 36 个片段特征值中有很多与加速度有关,而试验中加速度信号又没有直接采集,因此必须求出各点的加速度。计算公式为<sup>[3, 31, 32]</sup>

$$a_{i,i-1} = \frac{V_i - V_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \times \frac{1000}{3600} = \frac{V_i - V_{i-1}}{3.6}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (3-1)$$

式中:

$a_{i,i}$ ——第*i*和第*i-1*秒的加速度,  $m/s^2$ ;

$V_i, V_{i-1}$ ——第*i*和第*i-1*秒的速度,  $km/h$ ;

$t_i, t_{i-1}$ ——第*i*和第*i-1*秒时刻,  $s$ ;

$k$ ——该片段的总点数。

1) 特征值  $T$ 、 $T_a$ 、 $T_d$ 、 $T_i$ 、 $T_c$

$$T = \text{数据文件中对应片段的总点数} \quad (3-2)$$

$$T_a = \text{加速度大于 } 0.15 \text{ m/s}^2 \text{ 的总点数} \quad (3-3)$$

$$T_d = \text{加速度小于 } -0.15 \text{ m/s}^2 \text{ 的总点数} \quad (3-4)$$

$$T_i = \text{速度为 } 0 \text{ 且转速不为 } 0 \text{ 的总点数} \quad (3-5)$$

$$T_c = T - T_a - T_d - T_i \quad (3-6)$$

2) 特征值  $S$

由于采样频率为 1Hz, 所以运行距离就是该片段的速度序列之和

$$S = \sum_{i=1}^k V_i, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (3-7)$$

3) 特征值  $V_{\max}$ 、 $V_m$ 、 $V_{mr}$ 、 $V_{sd}$

$$V_{\max} = \max\{V_i, i = 1, 2, \dots, k\} \quad (3-8)$$

$$V_m = S/T \quad (3-9)$$

$$V_{mr} = S/(T - T_i) \quad (3-10)$$

$$V_{sd} = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (V_i - V_m)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (3-11)$$

4) 特征值  $a_{\max}$ 、 $a_a$ 、 $a_d$ 、 $a_{\min}$ 、 $a_{sd}$

$$a_{\max} = \max\{a_i, i = 1, 2, \dots, k\} \quad (3-12)$$

$$a_{\min} = \min\{a_i, i = 1, 2, \dots, k\} \quad (3-13)$$

$$a_a = \frac{\text{sum}\{a_i \mid a_i \geq 0.15, i = 1, 2, \dots, k\}}{T_a} \quad (3-14)$$

$$a_d = \frac{\text{sum}\{a_i \mid a_i \leq -0.15, i = 1, 2, \dots, k\}}{T_d} \quad (3-15)$$

因为片段以速度为 0 开始又以速度为 0 结束, 所以平均加速度为 0, 因此

$$a_{sd} = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k a_i^2}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (5-16)$$

5) 特征值  $P_{0\_10}$ 、 $P_{10\_20}$ 、 $P_{20\_30}$ 、 $P_{30\_40}$ 、 $P_{40\_50}$ 、 $P_{50\_60}$ 、 $P_{60\_70}$ 、 $P_{70}$

$$P_{0\_10} = \frac{\text{速度大于 } 0 \text{ 且小于等于 } 10 \text{ km/h 的点数}}{T} \quad (3-17)$$

$$P_{10\_20} = \frac{\text{速度小于等于 } 10 \text{ km/h 的点数}}{T} - P_{0\_10} \quad (3-18)$$

...

$$P_{60-70} = \frac{\text{速度小于等于70km/h的点数}}{T} - P_{0-10} - P_{10-20} - \dots - P_{50-60} \quad (3-19)$$

$$P_{70} = 1 - P_{0-10} - P_{10-20} - \dots - P_{60-70} \quad (3-20)$$

6) 特征值  $A_{-3.5}$ 、 $A_{-3.5-2.5}$ 、 $A_{-2.5-1.5}$ 、 $A_{-1.5-0.5}$ 、 $A_{-0.5-0.5}$ 、 $A_{0.5-1.5}$ 、 $A_{1.5-2.5}$ 、 $A_{2.5-3.5}$ 、 $A_{3.5}$

$$A_{-3.5} = \frac{\text{加速度小于等于}-3.5\text{m/s}^2\text{的点数}}{T} \quad (3-21)$$

$$A_{-3.5-2.5} = \frac{\text{加速度小于等于}-2.5\text{m/s}^2\text{的点数}}{T} - A_{-3.5} \quad (3-22)$$

...

$$A_{2.5-3.5} = \frac{\text{加速度小于等于}3.5\text{m/s}^2\text{的点数}}{T} - A_{-3.5} - \dots - A_{2.5-3.5} \quad (3-23)$$

$$A_{3.5} = 1 - A_{-3.5} - A_{-3.5-2.5} - \dots - A_{2.5-3.5} \quad (3-24)$$

7) 特征值  $P_a$ 、 $P_d$ 、 $P_c$ 、 $P_i$

$$P_a = \frac{\text{加速度大于等于}0.15\text{m/s}^2\text{的点数}}{T} \quad (3-25)$$

$$P_d = \frac{\text{加速度小于等于}-0.15\text{m/s}^2\text{的点数}}{T} \quad (3-26)$$

$$P_i = \frac{\text{速度为0且发动机转速不为0的点数}}{T} \quad (3-27)$$

$$P_c = 1 - P_a - P_d - P_i \quad (3-28)$$

利用上述公式(3-1到3-28)对短行程总体样本求特征值,得到了特征值总体样本B。

#### 3.4.2.3 计算片段综合特征值

片段综合特征值是具有相同交通特征的片段(即一种类型的片段)的平均统计量,全面综合地反映了该类片段所具有的交通特征。

1) 综合特征值  $T$ 、 $T_a$ 、 $T_d$ 、 $T_i$ 、 $T_c$ 、 $S$

这5个综合特征值的取值都是所有片段的对应项目之和再除以片段个数。下面以  $T$  为例说明它们的计算方法

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n T^{(i)}}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3-29)$$

式中:

$n$ ——片段总数

2) 综合特征值  $V_{\max}$ 、 $a_{\max}$ 、 $a_{\min}$

这 3 个综合特征值的取值等于所有短行程对应项目中的最大值。下面以  $V_{\max}$  为例说明它们的计算方法

$$V_{\max} = \max\{V_{\max}^{(i)}, i = 1, 2, \dots, n\} \quad (3-30)$$

#### 3.4.2.4 其余综合特征值

其余综合特征值的取值均为加权求和，单个片段的运行时间与所有片段的总运行时间的比值为相应短行程中对应项目的权重。下面以  $P_{0-10}$  为例说明它们的计算方法

$$P_{0-10} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{0-10}^{(i)} \cdot T^{(i)})}{\sum_{i=1}^n T^{(i)}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3-31)$$

求运动学片段的特征值包括两部分，即求各个运动学片段的特征值和求某一城市的某一期（或一城市、三城市）的综合特征值。解析软件<sup>[21]</sup>中函数  $[data1, data2] = Phase1(DataCell\_ok, f, n)$  用于求各运动学片段的特征值，输出矩阵变量  $data1$  用于存放各运动学片段的描述特征值（例如：最高速度、平均速度、运行时间等）， $data2$  用于存放各运动学片段的分布特征值（例如：加速度百分比、匀速百分比等），其中  $n$  为运动学片段个数。函数  $[data7, data8] = SynEigenvalue(data1, data2)$  用来求运动学片段的综合特征值，变量  $data7$  用于存放描述综合特征值， $data8$  用于存放分布综合特征值。

### 3.4.3 数据分析理论

#### 3.4.3.1 主成分分析（Principal Component Analysis）

评估车辆运动学规律和水平，如果用一、两个片段特征值来进行聚类分析，则可能会丢失一些信息，而如果完全用更多如 15 个片段特征值来对非常多（几千个）片段分类，一则变量太多增加了计算的复杂性，而且也给合理分析和解释问题带来了困难，再则，虽然每个变量都提供了一定的信息，但有些变量有一定的相关性，也就是变量之间并不是相互独立的，从而使得这些变量所提供的信息在一定程度上有所从叠。例如，加速、减速、匀速和怠速这四个特征值一定是此消彼涨的，再例如，运行时间、运行距离和平均速度这三个特征值一定是强烈相关的。

多元分析中的主成分分析被用来来解决这一问题。主成分分析即构造原变量的一系列线性组合,使各线性组合在彼此不相关的前提下,尽可能多地反映原变量的信息,即使其方差最大。在使用时根据不同的需要取反映 80% 或 90% 以上原变量信息的线性组合即可。

主成分分析的数学原理参加文献<sup>[33,34]</sup>。

### 3.4.3.2 聚类分析 (Cluster Analysis)

聚类分析是一类名目繁多的将数据对应的研究对象(客体)进行分类的统计方法<sup>[35]</sup>。其基本思想是在样品之间定义距离,在变量之间定义相似系数,距离和相似系数代表样品和变量之间的相似程度。按相似程度的大小,将样品(或变量)逐一归类,关系密切的类聚集到一个小的分类单位,然后逐步扩大,使得关系疏远的聚合到一个大的分类单位,直到所有的样品(或变量)都聚集完毕。

本节将对上节主成分分析中获得的新片段总体样本用聚类分析法进行分类,其目的是将交通特征相同的片段归为一类,进而对不同类型道路上的片段进行分析,进而解析出相应类型道路上的行驶工况。

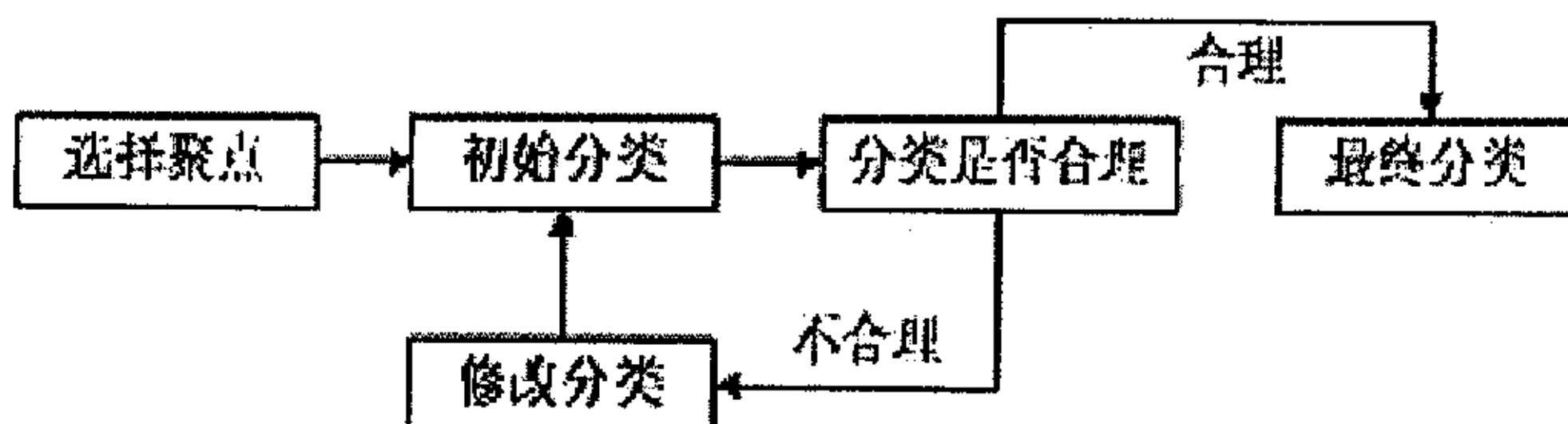


图 3-5 快速聚类过程

有系统聚类法、快速聚类法、分裂法、最优分割法、模糊聚类法、图论聚类法等多种聚类分析的方法。本文中用到的是快速聚类法。

快速聚类法又称为动态聚类法,快速聚类法先将样品粗略地分一下类,然后按照某种原则进行修正,直至分类比较合理为止。快速聚类的过程大致可由图 3-5 表示。理论研究及计算实践表明,快速聚类法是快速有效的聚类方法。

选择的聚点:聚点(种子)是一批有代表性的样品,它的选择决定了初始分类,对最终分类有较大影响。

在进行快速聚类法前,要根据研究问题的要求及了解程度先定下分类数  $k$ ,这样就可以在每一类中选择一个有代表性的样品作为聚点(初始聚点)。

聚类分析的具体数学原理参加文献<sup>[33,34]</sup>。



### 3.4.4 形成数据库

假定将交通状况分为 2 类。通过聚类分析所得到的变量 class2 中存放的只是不同交通状况的运动学片段在 DataCell\_ok 中的序号。为了使 VDCAP 结构更加清晰以及便于后继的工况解析工作, 将不同的交通状况的片段特征值分别存放在了不同的文件中, 形成几个不同的数据库 (如图 3-6 所示)。这样做的另一优点是各数据库相对独立, 在必要的情况下可根据不同的需要单独分析。

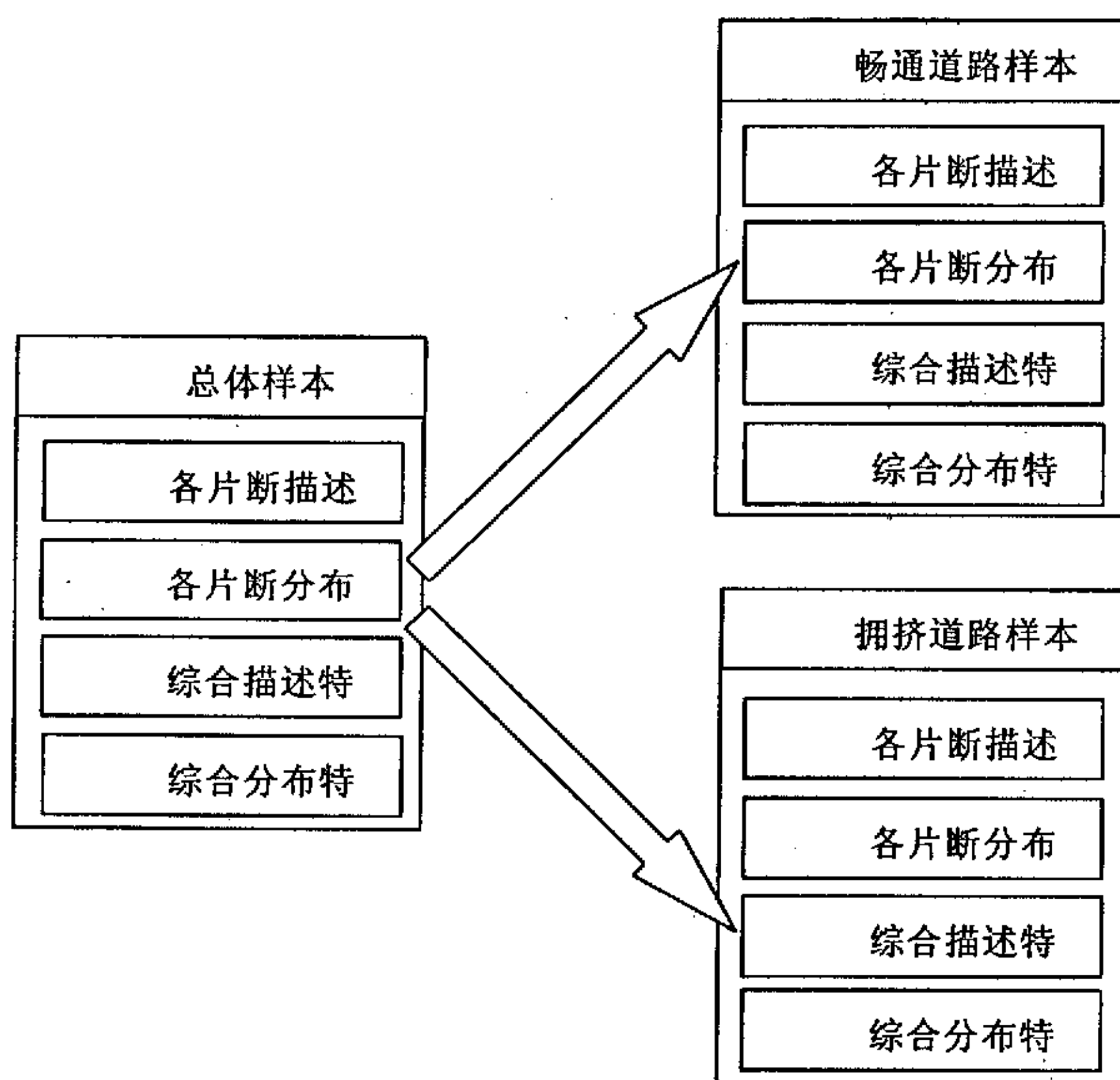


图 3-6 形成的数据库

### 3.4.5 工况构建

#### ● 构建工况的基本思想

基于聚类结果, 当需要构建该类工况时, 选定该类片段, 在这一类片段中按行程出现频率的比例随机挑选  $n$  个片段 (结合行程的分布特征中概率分布) 组成一个工况, 按照选定的主要特征参数 (共计 17 个) 控制误差来进行计算, 平均值误差在 10% 以内; 系统不断地循环计算。当计算出合适的结果时, 用图形显示构建工况的速度和加速度频度与该类片段的速度和加速度频

度；这时，如果不满意，可以重新选择，继续计算，再判断，直到满足上述条件为止<sup>[36, 37, 38]</sup>。工况构建中片段个数  $n$  的确定方法：用 1200 除以这一类片段的平均运行时间，然后取整。片段个数  $n$  也可以用设定的工况行程 ( $m$ ) 除以这一类片段的平均运行距离。

工况解析几乎每进行一步都要将相应的中间结果进行比较分析，以确定下一步的具体方案，而图形显示无疑是最直观的。因此，在开发 *VDCAP* 的过程中，遵循了这样的原则，即如果结果能用图象显示就尽量将其显示出来(例如速度分布、加速度分布、特征值直方图等)。

在开发 *VDCAP* 时，不仅仅对最终结果（例如所得工况的速度和时间关系等）进行了保存，而且还保存了在解析过程中获得的大量的中间结果（例如各个有效运动学片段的速度和时间关系等）。此外，为了使程序更加清晰，在整个程序的不同地方出现的相同的变量名均表示相同的意义，并且以与变量名相同的文件名保存为 mat 文件。例如变量 data9 不管在程序的什么地方都表示畅通道路各运动学片段的描述特征值，并且以的文件名 data9.mat 保存在相应的文件夹中。

### 3.5 工况验证及其表现型式

检验解析出的车辆行驶工况与采集的原始数据的收敛约束程度，是否能够以小量的工况段集合代表采集的道路行驶数据特征。验证过程分为三个方面：工况的有效性、识别性和可操作性。这些验证基于以下原因：

- 有效性的验证：在选定了工况之后，需要通过重新计算速度—加速度的联合分布变化情况并需要在台架上试验进行验证；
- 识别性的验证：与工况的目的有关。用于车辆污染物排放测试时，需要检验该类工况对主要污染物的识别能力。
- 操行性验证。由于在原始数据采样过程噪声的影响，速度—时间曲线不够平滑；一些曲线也可能不易于被跟踪复现，必须对原始数据经过光滑平顺处理。这些数据如何处理以及处理结果如何，需要实践验证。

经过计算和实践验证之后，研究者将要在工况的两种表现型式之间作出选择—瞬态工况和模态工况。从现有存在的型式看，工况还将根据需要，分成认证工况和研究工况；二者之间可以有所不同，在速度区间分布上，前者范围可以而宽后者分布可以窄；后者应该考虑各种极端的情形。美国如此，在欧洲和日本，瞬态工况的开发和研究也越来越多。至于模态和瞬态之间有多大的差异，正如第二章所阐述的，需要我们在本项目中开展实证研究。

### 3.6 本章小结

本章概述车辆行驶工况的开发方法，主要内容：

- (1) 如何获取正确的道路试验数据，包括试验道路的规划、车辆以及驾驶员的选择。
- (2) 主成分分析以及聚类分析等数据分析理论在车辆行驶工况研究中的应用
- (3) 利用 Matlab 语言在编制专门的车辆行驶工况解析软件 VDCAP 进行数据分析处理并最终获得代表性车辆实际行驶工况的过程。

## 第4章 试验仪器设备

数据采集是车辆行驶工况课题研究的基础工作，为课题后续研究提供客观数据。进行数据采集需要试验车辆在不同城市不同道路上行驶，以测定车辆的运行状况、环境状况等。汽车道路试验要比同类试验室试验复杂而不易操作，要求所使用地测试仪器性能稳定、抗震耐热、准确可靠，同时不能影响车辆的正常行驶。

行驶工况研究需要测定试验车辆的运行速度及其变化，车辆运行时的温度、湿度、大气压力、天气状况、风力风向等环境状况，考虑试验数据的完整性，同时需要测定车辆的燃油消耗、发动机转速参数。本项目在开发工况过程中，非常注重试验验证，这也是国内从前的一些研究所未涉及的。为了完成课题研究所需试验任务，我们在购买的一些设备基础上，进行二次开发，课题组专门开发装备了几种车辆行驶工况车载测试系统，不仅可以满足试验数据采集的需要，而且还可以实现行驶状态的事后复现。

### 4.1 车辆行驶工况车载测试系统

#### 4.1.1 系统的组成

车辆行驶工况车载测试系统主要由车辆综合性能记录仪、非接触光电速度传感器、燃油消耗流量计组成；为了数据的精确可靠，中间还接入了速度跟踪滤波器、流量讯号转换器；其他配套试验仪器还有电子温湿度计、空盒气压计；工况复现显示部分由笔记本电脑完成。为实现数据复查，使用了数码摄像机、录音笔等作为辅助试验设备。系统组成框图如图4-1所示。

工况复现部分主要用于同一行驶状态不同环境条件下的比较研究，进行车辆行驶工况道路调查时并不使用。

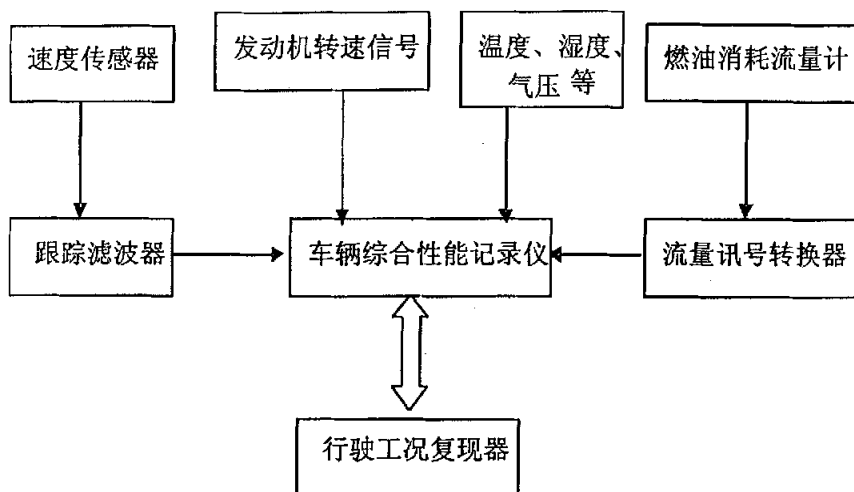


图 4-1 行驶工况车载测试系统

### 4.1.2 数据的产生

非接触光电速度传感器测定试验车辆的行驶速度，速度信号经速度跟踪滤波器滤波后进入车辆综合性能记录仪，根据记录仪所设定的不同的采集频率可以计算出车辆行驶时的加速度。燃油消耗流量计测定试验车辆的燃油消耗，其本身即可实现油耗的显示和打印，但无法显示瞬态油耗状况；将油耗信号引出，接入流量讯号转换器再连接到车辆综合性能记录仪，即可根据记录仪设定的频率得到瞬态油耗数据。发动机的转速信号由实验车仪表板引出，直接接入车辆综合性能记录仪即可。

环境状况、道路信息等由随车试验人员记录，同时完成录音、录像和异常情况记录工作。

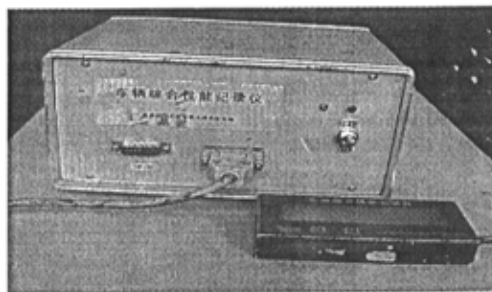


图 4-2 车辆综合性能记录仪

## 4.2 车辆综合性能记录仪



车辆综合性能记录仪由总参装甲兵装备技术研究所研制, 包括记录仪本体、电源线、信号线、通讯线、显示盒等几部分。其外形如图 4-2 所示, 仪器插头分布如图 4-3 所示。供电试验 12V 直流电源, 方便车载使用。

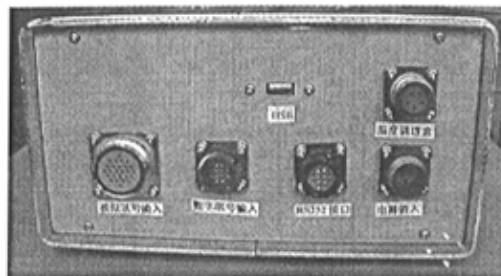


图 4-3 车辆综合性能记录仪插头分布

#### 4.2.1 车辆综合性能记录仪的技术指标

记录仪的主要技术指标如下:

- 模拟输入通道: 16 路 12 位 A/D 输入 ( $0 \sim +5V$ )
- 数字输入通道: 5 路, 16 位计数器, 1 路正弦波输入, 4 路 TTL/CMOS 输入
- 温度通道: 8 路 (T、J、K 热电偶)
- 供电电源: 直流  $10 \sim 15V$ ,  $<12W$   
扫描范围:  $0.01 \sim 600$  秒

#### 4.2.2 车辆综合性能记录仪的功能组成

车辆综合性能记录仪的功能由主控制单元以及与主控制单元连接的模数转换单元 A/D、频率调理单元、存储器单元、通讯数据接口、温度调理单元、和流量接口转换单元组成; 其中主控制单元用于调度、协调任务的完成, 对测试数据的存储、处理和分析, 数据通信接口用于数据采集过程的远程监视, 同时作为数据导出的接口。如图 4-4 所示。

车辆综合性能记录仪的各单元功能如下: 主控制单元: 中央处理器控制各部件工作; AD 转换单元: 16 路 12 位模拟量数字化, 将模拟输入信号转换为数字信号供计算机; 频率调理单元: 五路频率周期单元, 测试频率讯号如转速, 车速, 流量等; 存储器单元: 记录数据和程序单元, 为 Flash 盘; 数据接口: 并口供传送数据和设置采集参数, 485 口供温度调理器使用, RS232 口供数据输出等使用; 电源单元: 将输入电源转变为内部使用电源; 温度调理单元: 将热电偶传感器输出信号调理为数字信号供计算机处理; 流量接口转换单元: 与进口流量仪输出接口连接转换为标准频率信号。

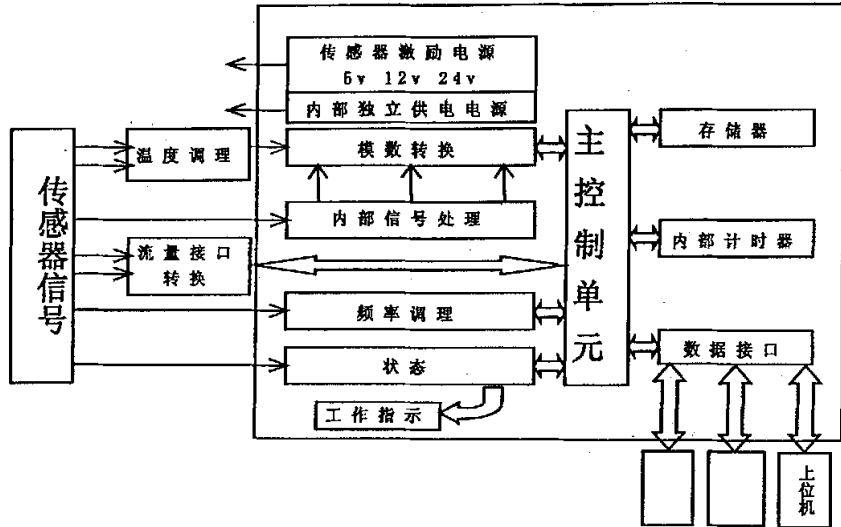


图 4-4 车辆综合性能记录仪功能组成图

#### 4.2.3 车辆综合性能记录仪的使用

车辆综合性能记录仪是专门开发的用于车辆的信号采集记录仪器，它可以与微机（便携机或笔记本）联网，用专用通讯线将微机（便携机或笔记本）并行口与记录仪通讯口连接，实现数据传输。与跟踪软件相结合，即可以使记录仪工作在速度跟踪状态。

数据采集频率和各通道的系数设置可通过编辑记录仪中 FK.DAT 文件实现。仪器工作中每小时会产生一个 TMD 数据文件，保存在记录仪中，试验结束后可以方便的导入微机（便携机或笔记本）。

行驶工况复现用于车行状态的显示及行驶跟踪，由笔记本电脑承载显示部分。试验车辆运行的同时，各路信号送入车辆综合性能记录仪，这些信号再经 RS232 传输线送入笔记

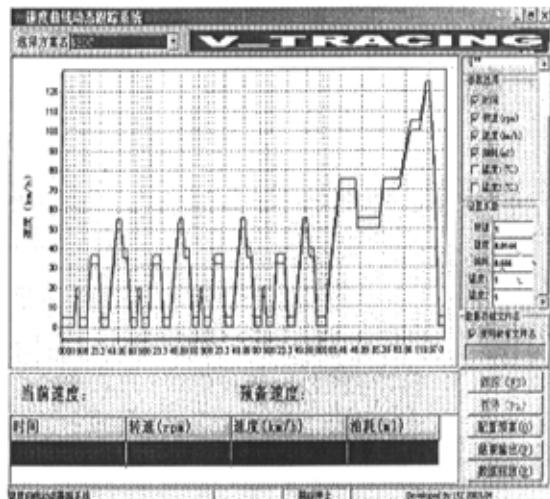


图 4-5 跟踪软件运行界面

本实时显示。电脑中用的跟踪软件是为此种试验专门开发的，界面如图 4-5 所示。

### 4.3 非接触速度传感器和速度跟踪滤波器

非接触速度传感器是测量车辆行驶速度的精密仪器，特别适用于道路现场高精度测量汽车速度。传感器使用附带的真空吸盘支架试验车辆的合适位置，经常放于车辆的前部、侧面或后部。速度信号需要跟踪滤波器进行滤波，以消除汽车上下颠簸的影响。仪器输出的信号经过计数和微机处理后就可实时显示车行速度、路程、加速度和经过时间，并可将数据存储和打印。

#### 4.3.1 非接触速度传感器

速度传感器采用的 OES—II 型非接触光电传感器，如图 4-6 所示。其采用特殊的大面积硅光电器件作探测器。使用时将仪器安装在汽车外侧，镜头对准用灯光照亮的地面。汽车行驶时，地面杂乱花纹经光学系统成像并扫描过硅光电器件，经光电转换和空间滤波后，传感器仅输出随机窄带正弦波信号，信号的频率随车行速度成正比。将传感器输出的信号经 TRF 型带通跟踪滤波器滤波和整形后，转换为标准 TTL 脉冲输出，每一脉冲严格对应的面走过的一段距离。

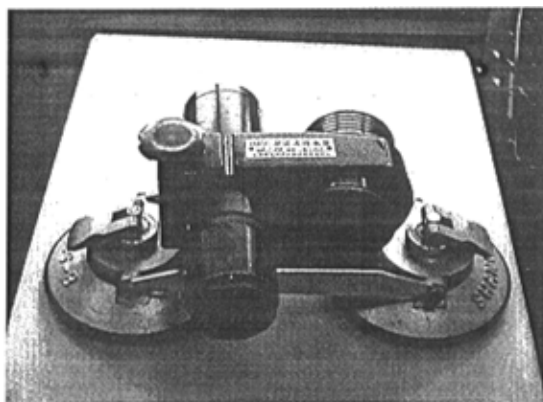


图 4-6 OES-II 非接触光电速度传感器

使用时传感器的光学镜头要垂直地面，前后倾角允差为 $\pm 3^\circ$ 。左右倾角允差为 $\pm 5^\circ$ 。镜头前端与地面距离约 500mm，这样汽车开行时，在 $\pm 100\text{mm}$  范围内上下颠簸不影响测量精度。测量前将镜筒上的标志白线对准汽车前进方向，偏差角要求小于 $3^\circ$ 。

OES—II 传感器技术指标如下：输出波形：正弦波；输出信号电压： $>0.1\text{V}_{\text{p-p}}$ ；侧速范围：0.5~250 公里/小时；对应频率：35Hz~17.5KHz；周期当量：4mm/1 周期；照明灯功率：DC12V、55W；光学系统视场：50mm×60mm；工作距离：照明灯距地面约 600mm，探测头前端距地面约 500mm；高差影响：工作距离在 $500\pm 100\text{mm}$  内，测量误差 $<0.2\%$ ；其它功能：有白线信号输出；

尺寸重量: 86mm×94mm×260mm, 重 2.5 公斤。

### 4.3.2 速度跟踪滤波器

跟踪滤波器采用 TRF 型带通跟踪滤波器为独立铁盒装置, 置于机箱外, 可后接数据采集器、电脑或其它二次仪表使用。将传感器输出的信号经 TRF 型带通跟踪滤波器滤波和整形后, 转换为标准 TTL 脉冲输出, 每一脉冲严格对应汽车相对地面走过的一段距离。由此产生的速度信号在测量精度上比五轮仪高一个数量级, 在灵敏度、测量范围等性能上超过国外同类产品。

TRF—II 型跟踪滤波器主要技术指标: 跟踪带宽: 25HZ~20KHZ; 跟踪速度: >1.0G; 信号输出 1: 4mm/1 脉冲, 与 TTL 兼容; 信号输出 2: 10mm/1 脉冲, 与 TTL 兼容; 白线输出: 正脉冲, 与 TTL 兼容; 电源电压: VDD+5V, IDD0.3A; 尺寸: 134mm×66mm×27mm。

## 4.4 燃油消耗流量计和流量讯号转换器

燃油消耗流量计用于测量车辆行驶时的燃油消耗, 其产生的信号经流量讯号转换器优化后送入车辆综合性能记录仪, 实现对燃油消耗的瞬态测量和记录。

### 4.4.1 燃油消耗流量计

燃油消耗流量计由实现测量功能的 FLOWTRONIC 4705 和显示功能的

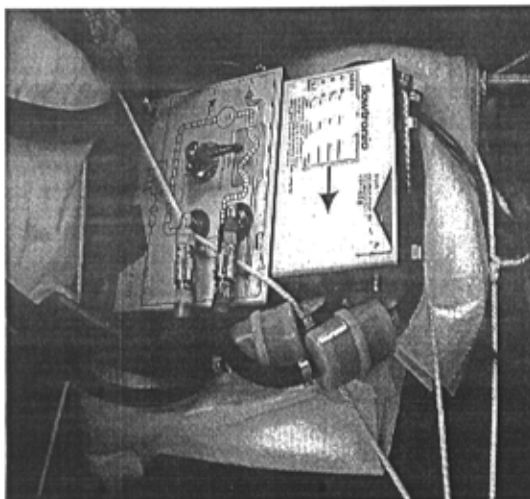


图 4-7 FLOWTRONIC 4705

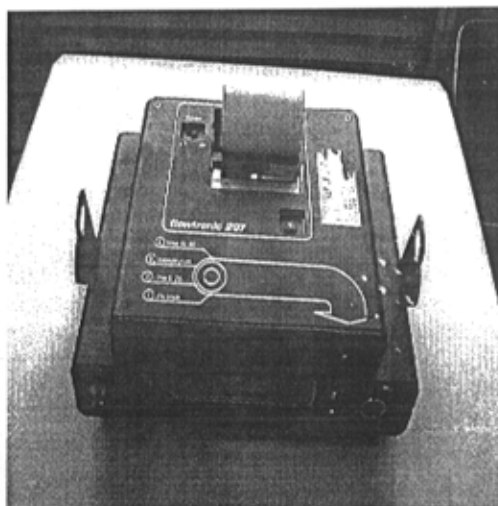


图 4-8 FLOWTRONIC 206--207

FLOWTRONIC 206—207 组成。分别如图 4—7、4—8 所示。FLOWTRONIC 4705 是由 QUICKLYAG 生产的一种高精度、高可靠性的流量计，它具有体积小、重量轻、使用范围广和连接方便等优点，适用于化油器式发动机、电喷式发动机以及柴油发动机的油耗测试。

FLOWTRONIC 4705 把喷射活栓热交换单元与流量计组装在一起，使得内燃机油耗测量更加方便和快捷。整个装置正好可以放在驾驶员脚旁边，通过聚酰胺软管与发动机连接在一起。这样就可以由该装置的可变压力调整器和热交换单元测量车进入发动机的燃油量。

FLOWTRONIC 206—207 是瑞士 QUICKLY AG 生产的一种自动道路测试仪器，具有灵活的外形和强大的功能。其拥有 8 套程序，在适合中国汽车测试标准的情况下，以满足常规的试验任务，如汽车加速性能试验、行驶速度试验、制动试验以及燃油消耗试验等。

FLOWTRONIC 4705 和 FLOWTRONIC 206—207 完全实现被测试车辆的燃油消耗试验。为了得到瞬时油耗值，专门开发了油耗流量瞬态计，按照记录仪的频率设定瞬态测量车辆燃油消耗。

#### 4.4.2 流量讯号转换器

流量讯号转换器是为实现油耗瞬态测量而专门开发的信号处理仪器，其功能实现框图如图 4—9 所示。1、2 是两个信号输入端。

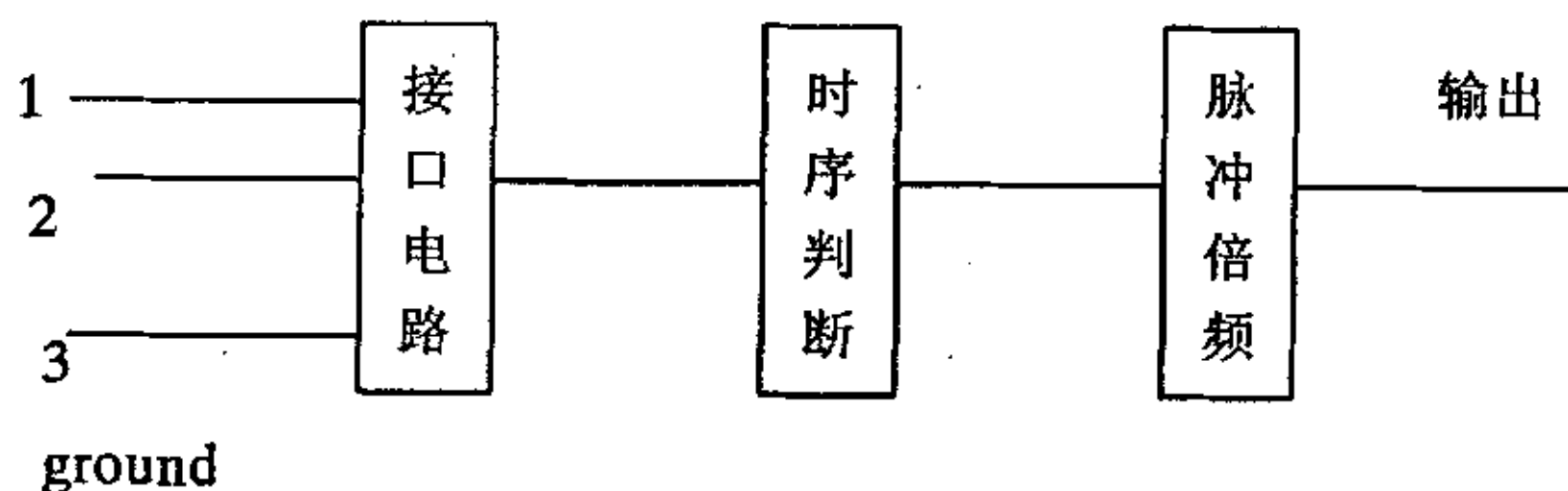


图 4 - 9 流量讯号转换器功能框图

### 4.5 其他试验设备

行驶工况试验是复杂的道路试验，全面记录车行数据还要有试验环境参数，试验仪器的配套工具等。



### 4.5.1 笔记本电脑

行驶工况复现系统用于车行状态的显示及行驶跟踪，由笔记本电脑承载显示功能。试验车辆运行的同时，各路信号送入车辆综合性能记录仪，这些信号再经 RS232 传输线送入笔记本实时显示。电脑中用的跟踪软件是为此种试验专门开发的，由此实现同一车辆行驶状态不同环境下的比较研究。

根据笔记本电脑上显示的速度曲线实现速度跟踪。将常用的几种标准行驶工况数据导入跟踪软件，就可以得到两条红色范围线。图 4-5 中显示的是准备跟踪欧洲 ECE15-NEDC 行驶工况时的界面。车辆行驶时，实时速度点会形成蓝色点线，由驾驶员参照该曲线，使其尽量落入红色范围线内，即实现了类似底盘测功机上跟踪工况曲线情形。

试验结束后，在车辆综合性能记录仪及跟踪软件中都存储有试验过程数据，经过对这些数据的分析处理。

### 4.5.2 电子温湿度计和空盒气压计

温度、湿度和大气压力是试验所必须的环境参数。

课题组试验中使用的是北京市亚光仪器有限责任公司生产的 JWS 型电子式温湿度表，示值量程：温度  $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ ，湿度  $10\% \text{RH} \sim 90\% \text{RH}$ 。根据该表电子显示可以方便读取并记录试验车辆所在环境的温度和湿度。

大气压力是由空盒气压表测定的，长春气象仪表厂生产。

天气情况、风力风向、试验车上大功率用电设备的使用以及交通流的异常情况由随车试验人员随时记录。

### 4.5.3 辅助试验设备

试验进行中还使用了数码摄像机、录音笔等。必要的音像资料有助于分析异常数据，修正疏漏的情况记录。

## 4.6 本章小结

完善和性能优良的试验设备是顺利完成试验的必要条件，也为获得正确可靠的数据提供了保障。本研究所用的试验设备都是精确可靠，部分是为本试验专门开发的。车辆综合性能记录仪还可以记录更多的行驶参数，其与燃油消耗流量计、速度传感器、即时显示仪（此处是笔记本）组合为车载测试系统的同时，还具备广泛的使用范围扩展性。

经试验验证，设备是准确的和可靠的。

## 第5章 试验数据的解析

依托于“典型城市车辆行驶工况的研究”课题,对我国典型城市北京、上海和广州三个城市分年度进行了两轮共六次车辆实际行驶工况的调查试验,获得了大量的试验数据。本章以广州市为例阐述数据解析过程。

车辆的运动特征并不完全地取决于地理或道路的类型,也取决于交通状况。同一路段因时段、天气、承载的车辆数等的变化,可能会呈现不同的交通特征。

由于一个路段包含多种不同的交通特征,同时又由于运动学片段具有相同的交通特征,因此本研究将路段上测得的行驶记录分割成运动学片段(见第三章),这样就可以将具有相同交通特征的运动学片段归为一类,根据需要原始数据就会被划分为反映不同交通特征的几个类(由运动学片段组成),而每一类代表某一种类型道路的交通特征,进而可以按照道路类型解析出相应的车辆行驶工况。这种分析一方面可以细致分析车辆的运动学特征;另一方面,不同运动学水平层次的工况可以满足不同的车辆设计和评估要求,不仅可以提供正常的行驶工况,还可以提供极限工况,比如堵塞运动工况、高速运动工况等。

还需要要阐明的是,车辆行驶工况不仅仅取决于速度,完整的描述需要更多的参数(第三章已经表明),我们需要分析清楚哪几个是关键参数。

本章基于自主开发的车辆行驶工况解析软件 *VDCAP*,运用主成分分析、动态聚类分析等统计学方面的知识和方法,对在广州市采集到的乘用车和公交车车速数据进行处理和分析。

### 5.1 广州市乘用车工况数据解析

#### 5.1.1 数据处理一般过程

数据处理的过程如图 5-1 所示。整个解析过程由 *VDCAP* 软件<sup>[21]</sup>完成。

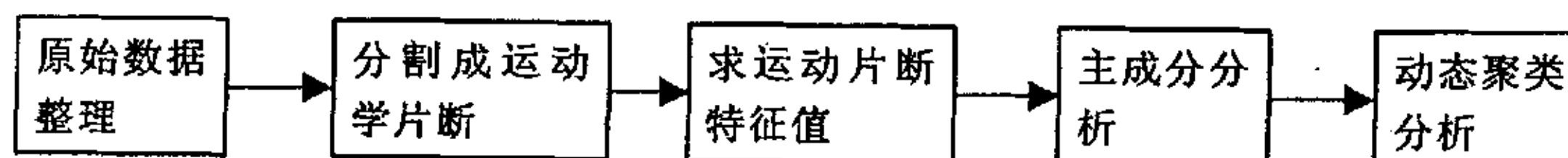


图 5-1 数据处理过程

## 5.1.2 数据处理结果

### 5.1.2.1 第一轮数据总体统计特征

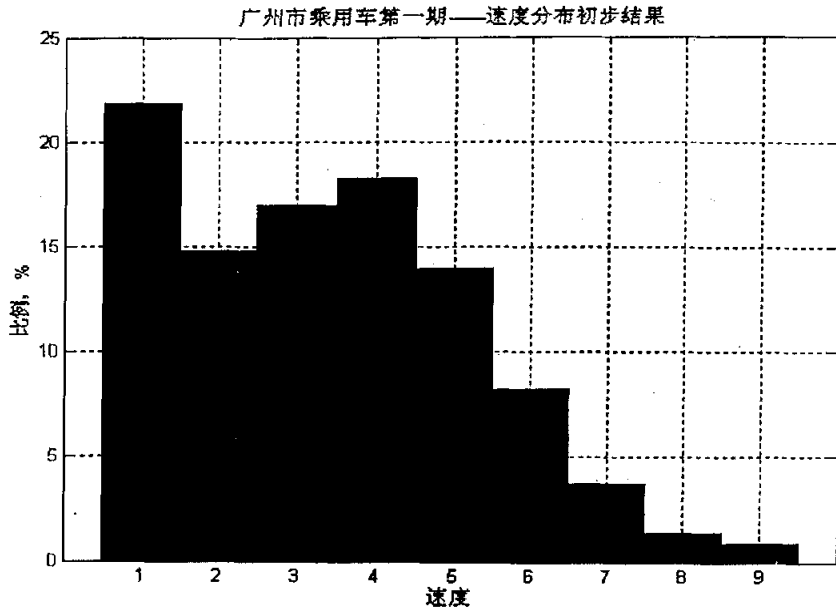
通过对原始数据的整理和运动学片段分割,将在广州市采集到的第一轮乘用车数据分割成了 886 个运动学片段。求取运动学片段特征值后,获得了各个运动学片段以及总体样本的综合特征值。总体样本的 15 个综合描述特征值如表 5-1 所示。分析可知,第一轮数据表明广州市乘用车最高速度可达 110km/h 以上,其平均速度在 23km/h 左右。

表 5-1 运动学片段的综合描述特征值和分布特征值

描述特征值	单位	意 义	综合一	分布特征值(%)	综合一
T	s	运行时间	193.36	$P_{0\_10}$	13.82
Ta	s	加速时间	57.56	$P_{10\_20}$	14.97
Td	s	减速时间	59.63	$P_{20\_30}$	16.26
Tc	s	匀速时间	33.98	$P_{30\_40}$	13.95
Ti	s	怠速时间	42.19	$P_{40\_50}$	9.19
S	km	运行距离	1.08	$P_{50\_60}$	5.73
Vmax	km/h	最大速度	115.08	$P_{60\_70}$	2.36
Vm	km/h	平均速度	23.05	$P_{70}$	1.89
Vmr	km/h	运行速度	27.40	$A_{-3.5}$	0.00
Vsd	km/h	速度标准偏差	3.62	$A_{-3.5\_ -2.5}$	0.01
$a_{\max}$	$m/s^2$	最大加速度	2.87	$A_{-2.5\_ -1.5}$	0.42
aa	$m/s^2$	加速段的平均加速度	0.51	$A_{-1.5\_ -0.5}$	11.46
$a_{\min}$	$m/s^2$	最小加速度,即最大减速度	-3.78	$A_{0.5\_ 0.5}$	75.33
ad	$m/s^2$	减速段的平均减速度	-0.50	$A_{0.5\_ 1.5}$	12.59
asd	$m/s^2$	加速度标准偏差	0.45	$A_{1.5\_ 2.5}$	0.19
N	个	运动学片段数	886	$A_{2.5\_ 3.5}$	0.00

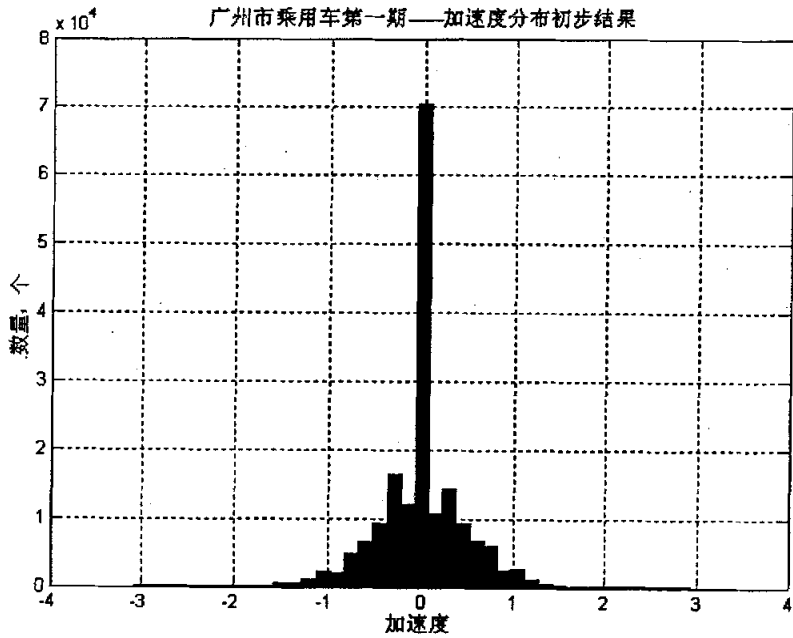
注:分布特征值含义见第三章。以下同。

图 5-2 为速度总体分布情况,从图上可看出速度呈明显的偏峰分布。总体数据的加速度总体分布、速度—加速度联合分布以及速度—加速度联合频度分布分别如图 5-3、5-4 和 5-5 所示。



横坐标: 1 表示总速, 2 表示  $P_{0.10}$ , 依此类推

图 5-2 速度总体分布



横坐标: 1 表示  $A_{3.5}$ , 2 表示  $A_{3.5-2.5}$ , 依此类推

图 5-3 加速度总体分布

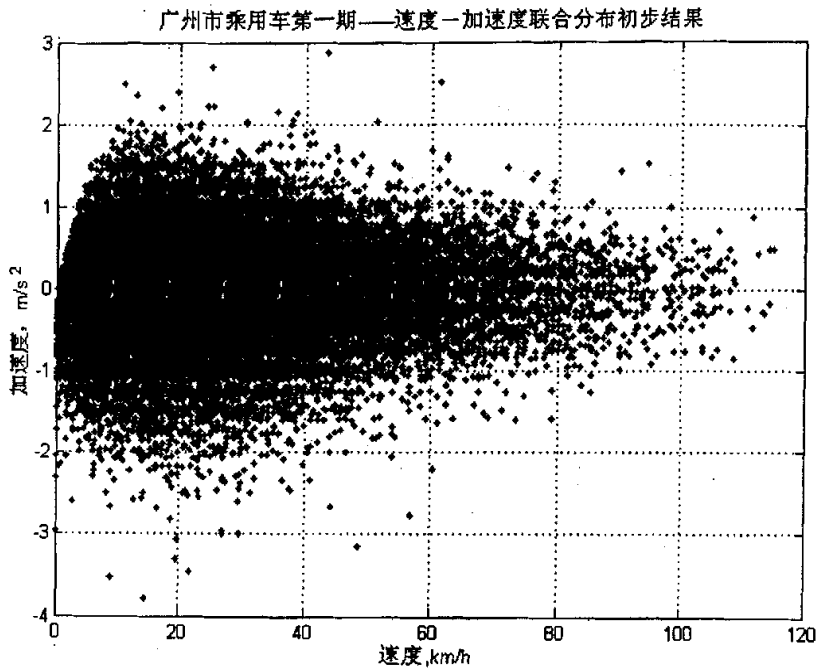


图 5 - 4 速度—加速度联合分布

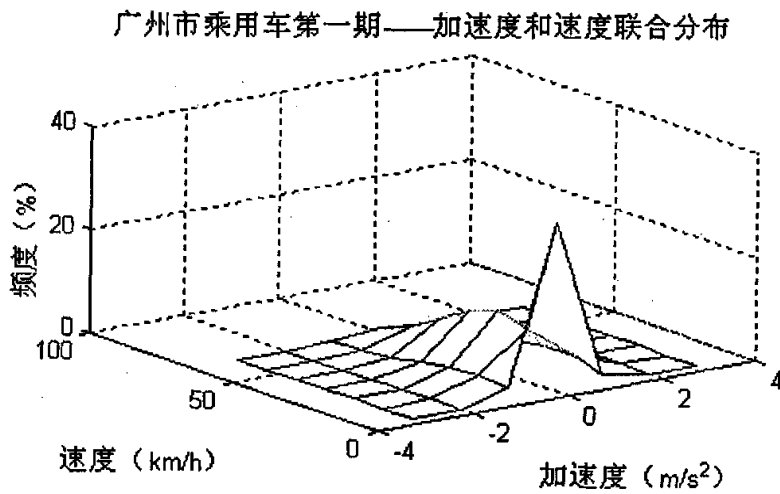


图 5 - 5 速度和加速度联合频度分布

#### 5.1.2.2 第二轮的数据处理结果

通过对原始数据的整理和运动学片段分割后，将广州市采集到的第二轮



乘用车数据分割成了 1122 个运动学片段。求取运动学片段特征值后, 获得了各个运动学片段以及总体样本的综合特征值。总体样本的 15 个综合描述特征值如表 5-2 所示。分析可知, 第二轮数据表明广州市乘用车最高速度可达 110km/h 以上, 其平均速度在 23km/h 左右。

表 5-2 各类运动学片段的 15 个综合描述特征值

特征值	综合二	特征值	综合二	分布特征值	综合二	分布特征值	综合二
T	175.54	Vmr	28.73	P <sub>0_10</sub>	12.50	A <sub>-3.5</sub>	0.01
Ta	53.81	Vsd	4.41	P <sub>10_20</sub>	14.17	A <sub>-3.5_-2.5</sub>	0.07
Td	54.86	a <sub>max</sub>	3.08	P <sub>20_30</sub>	15.73	A <sub>-2.5_-1.5</sub>	1.26
Tc	27.71	aa	0.60	P <sub>30_40</sub>	13.78	A <sub>-1.5_-0.5</sub>	12.53
Ti	39.15	a <sub>min</sub>	-4.00	P <sub>40_50</sub>	9.65	A <sub>-0.5_0.5</sub>	70.08
S	1.13	ad	-0.59	P <sub>50_60</sub>	6.13	A <sub>0.5_1.5</sub>	15.52
Vmax	115.67	asd	0.54	P <sub>60_70</sub>	3.47	A <sub>1.5_2.5</sub>	0.53
Vm	23.20	N	1122	P <sub>70</sub>	2.26	A <sub>2.5_3.5</sub>	0.01

总体数据的速度总体分布加速度总体分布、速度—加速度联合分布以及速度—加速度联合频度分布分别如图 5-6、5-7、5-8 和 5-9 所示。

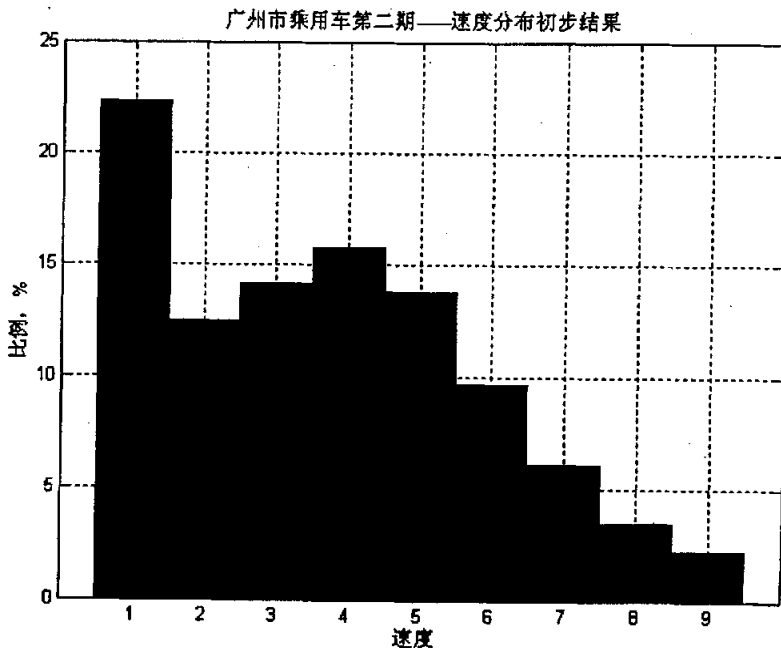


图 5-6 速度频度分布

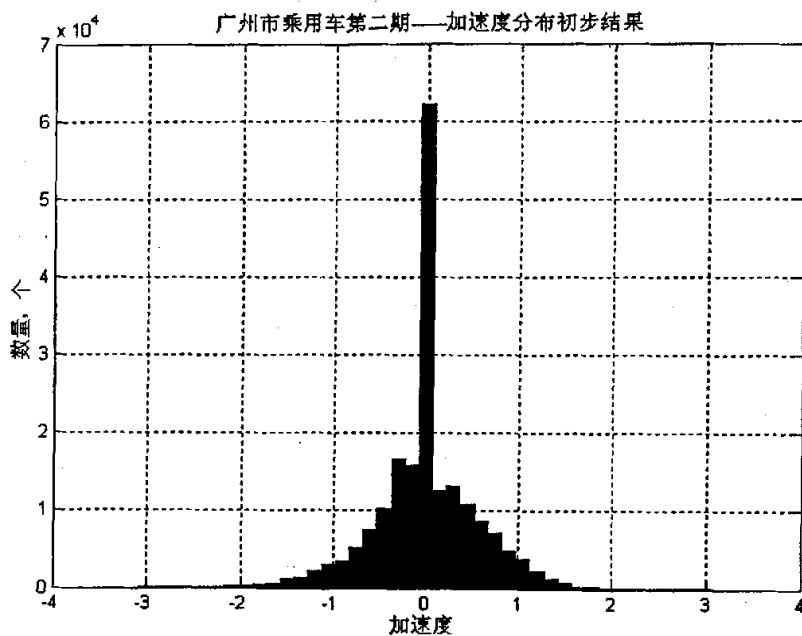


图 5-7 加速度分布

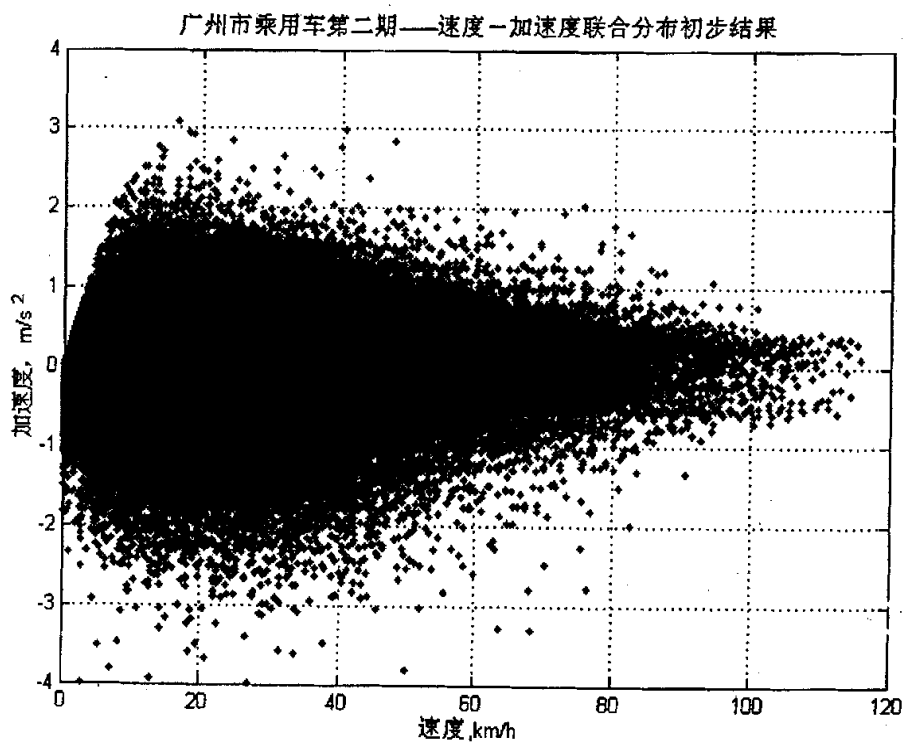


图 5-8 速度和加速度联合分布

## 广州市乘用车第二期——加速度和速度联合分布

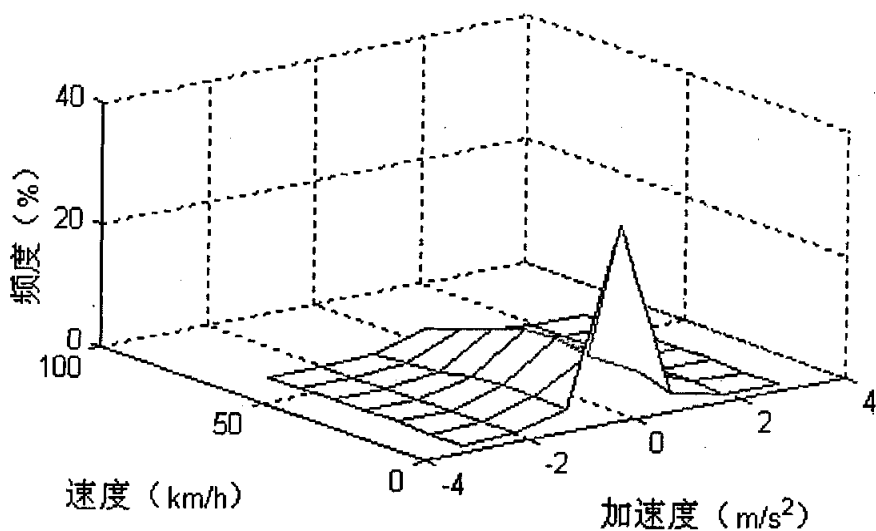


图 5-9 速度和加速度联合频度分布

## 5.1.2.3 两轮车辆运行状况主要特征参数对比分析

从对应的各种特征参数的概率分布统计来看，两轮试验下来，车辆运动学的结果和规律是非常相近的。

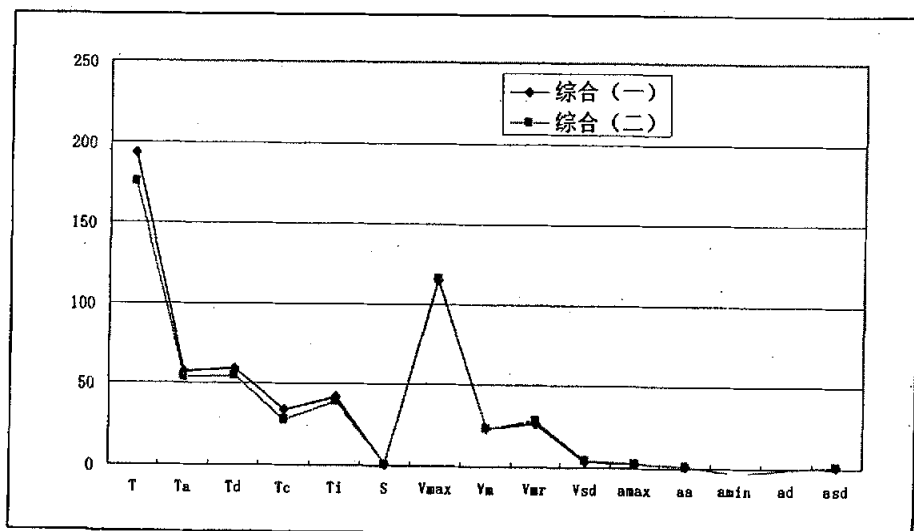


图 5-10 运动学描述特征值趋势图

分别对应比较表 5-1 和表 5-2，可以清楚地看到，对于两轮的描述特征参数和分布特征参数，从统计角度看还是存在一定的相似；但也存在差异。见图 5-10 和 5-11。回顾试验时的季节，第一轮是在夏季（9 月左右），第

二论在春季（5 月左右），这种差异也是可以理解的。

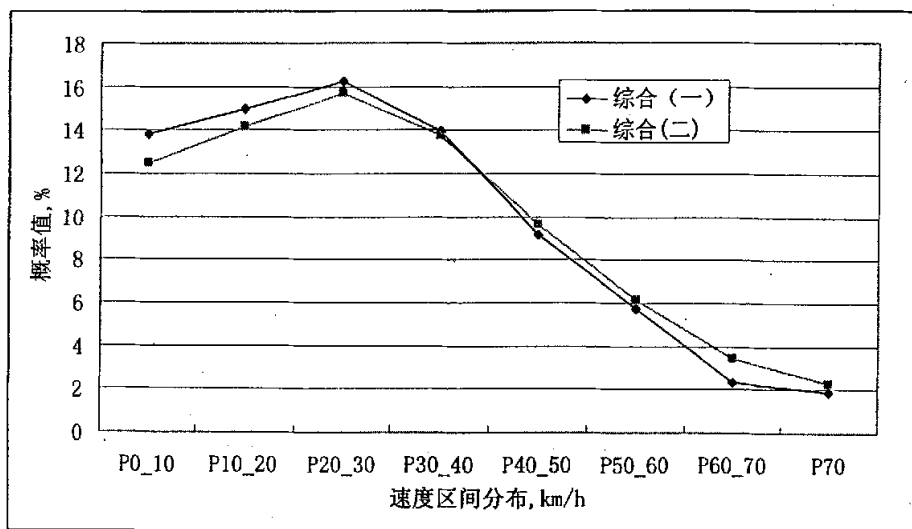


图 5 - 11 速度区间分布特征值趋势图

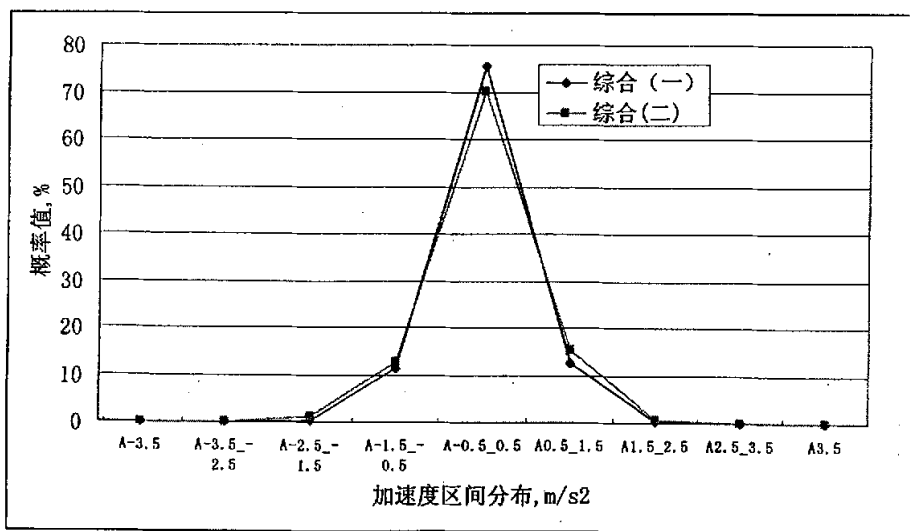


图 5 - 12 加速度区间分布特征值趋势图

#### 5.1.2.4 广州乘用车车辆实际行驶工况数据库

实际上，上述现象可以说明了两个问题：第一，不同时期内调查的差异是存在的；第二，在这种差异下我们应该而且可以将两轮试验数据合并成一个数据库，数据库结构为  $2012 \times 15$  矩阵 A。

在 15 个描述性综合特征值中，相差最大的是运行时间（约相差 18s），

但当分解成加速时间、减速时间、怠速时间和匀速时间后相差不到 5s。图 5-12 加速度区间分布特征值趋势图也反映了车辆具有相似加减速速度；图 5-13 是两轮数据的加速、减速、匀速和怠速比例对比图，从图上可看出，两轮数据的 4 种运行状况比例基本相当。我们认为两轮数据在统计上还是比较合理，确实反映了广州市乘用车的真实行驶状况。

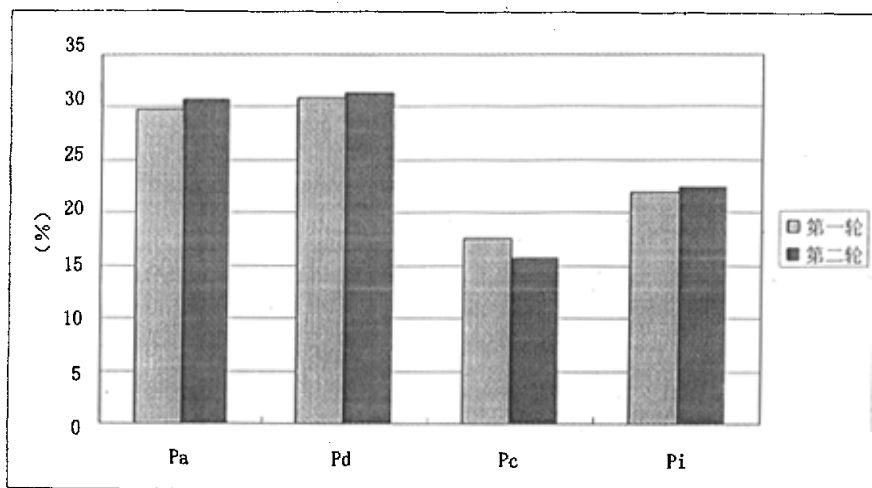


图 5-13 四种运行模式的对比

最后，经过合并两轮数据，我们获得了一个包含  $2008 \times 15$  的运动学片段的数据库矩阵（以下通称矩阵 A）。

### 5.1.3 车辆运动学水平的评估

正如第三章对车辆运动学的描述和研究，这里我们将对车辆运动学水平的多少进行评估，首先需要解决特征值中信息重叠问题。

#### 5.1.3.1 主成分确定

表 5-3 是对矩阵 A 进行主成分分析后获得的 15 个主成分方差、贡献率和累积贡献率；在分析之前，对数据进行了无量纲化处理。由主成分方差可知，前几个主成分包含了 15 个特征值的绝大部分信息，其中前三个主成分的贡献率累积为 83.29%，前四个主成分的累积贡献率达 90.41%。对于主成分分析，无论是利用前三个主成分还是前四个主成分，都较好地代表了车辆的原始运动学特性。为了更加精确，本文取前四个主成分用于聚类分析。图 5-14 是主成分贡献率分析图。



表 5-3 主成分贡献率

主成分序号	主成分方差	贡献率(%)	累积贡献率(%)
1	7.86	52.37	52.37
2	3.54	23.58	75.95
3	1.10	7.34	83.29
4	1.07	7.12	90.41
5	0.59	3.92	94.33
6	0.32	2.12	96.45
7	0.22	1.46	97.91
8	0.12	0.79	98.71
9	0.08	0.50	99.21
10	0.05	0.32	99.53
11	0.03	0.23	99.76
12	0.02	0.16	99.92
13	0.01	0.04	99.96
14	0.01	0.04	100.00
15	0.00	0.00	100.00

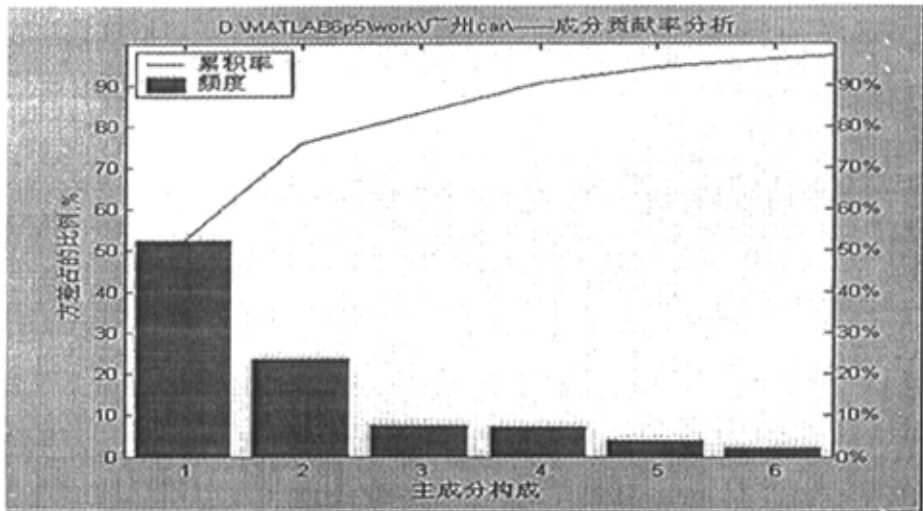


图 5-14 主成分贡献率分析

### 5.1.3.2 相关系数

这些主成分主要反映和代表了哪些车辆原始运动学特征呢？我们用相关系数来分析。十五个主成分与 15 个描述性运动学片段特征值都有不同程度

的相关性,从计算结果看,只有前四个主成分的相关系数可以保留,因为其余的相关系数很小;事实上,正如主成分贡献率,只有前2~3个相关性较好,第四个主成分仅仅是因为代表了某一个原始特征而已,如表5-4,分析会得到表5-5所给的结果,即第一主成分主要反映的运动学片段特征值是速度及其相关的特征,第二主成分主要反映的是加速度特征;第三主成分与特征值都有一定相关;第三主成分主要反映的是怠速时间。大家知道,这些主成分之间是无关的,所以我们可以说,车辆运动学规律需要反映几何尺寸的特征参数(如速度、运行时间)、加速度和怠速等三个参数。

表 5-4 前四个主成分与特征值的相关系数

特征值	第一主成分相关系数	第二主成分相关系数	第三主成分相关系数	第四主成分相关系数
T	-0.80	-0.54	0.22	0.11
T <sub>a</sub>	-0.83	-0.51	0.19	-0.07
T <sub>d</sub>	-0.81	-0.52	0.22	-0.08
T <sub>c</sub>	-0.72	-0.62	0.19	-0.09
T <sub>i</sub>	-0.18	-0.07	0.10	0.97
S	-0.83	-0.47	0.04	-0.07
V <sub>max</sub>	-0.91	0.22	-0.29	0.06
V <sub>m</sub>	-0.90	0.04	-0.39	-0.14
V <sub>mr</sub>	-0.87	0.23	-0.40	0.07
V <sub>sd</sub>	-0.81	0.38	-0.39	0.13
a <sub>max</sub>	-0.49	0.71	0.17	0.03
a <sub>a</sub>	-0.24	0.73	0.43	0.00
a <sub>min</sub>	0.33	-0.78	-0.21	0.00
a <sub>d</sub>	0.27	-0.75	-0.29	-0.01
a <sub>sd</sub>	-0.66	0.66	0.18	-0.20

表 5-5 前四个主成分所代表的主要特征值

主成分	特 征 值
第一主成分	持续时间、加速时间、减速时间、巡航时间、行驶距离、最大速度、平均速度、运行速度、速度标准偏差
第二主成分	平均加速度、平均减速度、最大加速度、最大减速度、加速度标准偏差
第三主成分	一般相关
第四主成分	怠速时间

### 5.1.3.3 乘用车车辆运动学水平的评估

通过主成分分析并取前四个主成分将运动片段特征值总体样本矩阵 A 压缩成了一个能代表 90% 以上（从理论上讲，80% 以上就可以）的总体样本信息的新总体样本主成分得分矩阵 B（如表 5-6 所示），每一个运动学片段都从四个主成分角度进行了得分计算。图 5-16 是车辆运动学得分分布图，主要集中于右侧。这个新的总体样本矩阵将用于聚类分析以及对运动学片段总体样本进行分类。

表 5-6 前四个主成分得分

运动学片段编号	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分
1	-0.39439	-2.0605	-0.385	-0.02906
2	-5.611	-4.155	-1.4403	-0.2957
3	-1.0548	-1.2685	-1.041	-0.35935
4	-9.5859	-7.5683	2.5825	-1.4536
5	-1.3606	0.086895	-1.2612	-0.59339
6	-3.5198	-3.0117	0.63574	0.23391
7	3.8129	-1.7939	0.063513	0.86374
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2005	-2.8111	1.0994	-0.067058	0.5447
2006	3.7529	-1.3406	0.085721	-0.060248
2007	4.0126	-1.8805	-0.58564	-0.26255
2008	3.0545	0.6154	1.0978	-0.51559

### 5.1.4 乘用车车辆运动学水平的分析与研究

车辆的设计和开发不能简单地满足一种平均的工况，还需要针对不同交通状况的多种水平层次的工况来设计。依据城市区域特征可以人为地划分工况等级，而聚类技术却可以根据片段的运动学规律自动地将数据分成不同的类，那些类与类之间的车辆运动学水平差异明显、分割清晰，且自成体系。按照需要和经验，我们可以将片段分成多个类别。根据道路交通规律，一般来说可以确定 3 个类别，这几个类别分别与明显地不同的交通状况如低速（加减速频繁、片段短）状态、中速（加减速正常、片段适中）状态和高速状态等相对应。聚类技术采用动态聚类法，聚类的对象是样本的主成份得分。

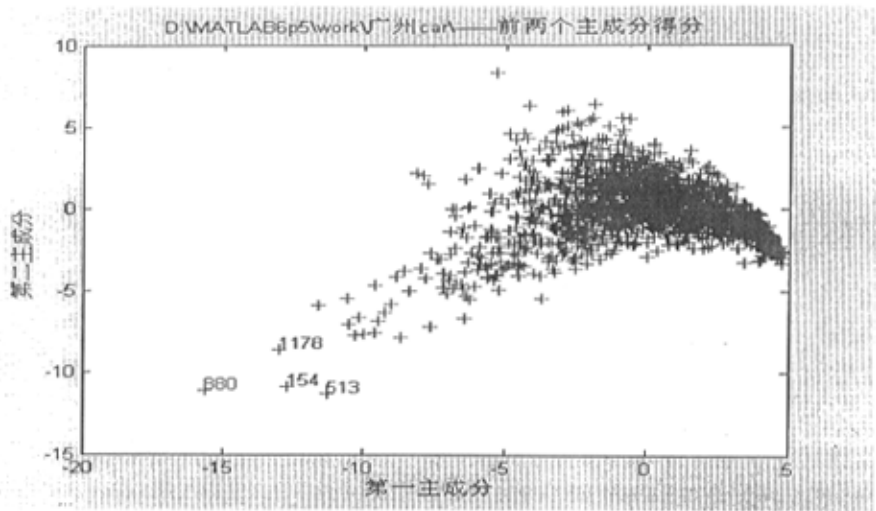


图 5-15 车辆运动学得分分布

5.1.4.1 运动学片段聚类结果

图 5-16 是聚类结果的前两个主成分表现，可看出分类相当清晰。分类主要体现的运动学片段得分的大小，反映的是道路的交通能力，通畅程度。这不仅取决于速度的大小，当不间断的运行时，即使速度处在一个中等的水平，仍然会得到一个较大的绝对得分值。分类可以扼要地说明依据的是速度、加速度和怠速时间，决定的是主成分的个数，因而在此将是一个四维加权。

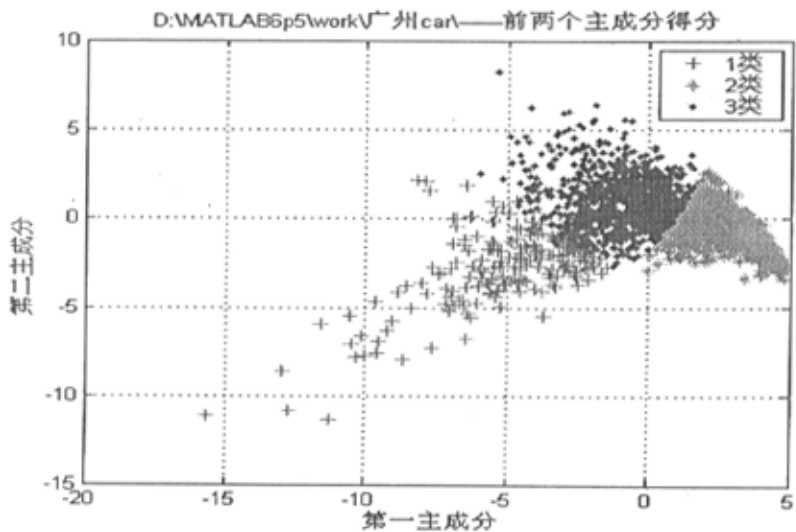


图 5-16 聚类后前两个主成分得分图

表 5-7 类与类之间距

分类	第一类	第二类	第三类
第一类	0	8.1459	5.6398
第二类	8.1459	0	4.1139
第三类	5.6398	4.1139	0

类与类之间的间距，如表 5-7 所示。各个类的最终聚点（重心）分别为：（-5.1157、-2.7055、0.41234、-0.0474）、（2.7894、-0.76563、0.093905、-0.054128）、（-0.91184、1.0123、-0.13909、0.044891）。

各类中各个点到相应聚点的最大距离分别为：16.637、4.6646、8.7518。

#### 5.1.4.2 各类运动学特征分析

表 5-8 所示为三类运动片段的 15 个综合描述特征值。分析可知，第 2 类怠速时间所占的比例很大，平均速度只有 6.7km/h，反映的是走走停停的堵塞交通状态。第 3 类运动学片段反映的是乘用车在广州市交通比较正常的道路上的行驶特性，包含了相对较短的片段（平均为 174.84 米），平均速度正常（22.114km/h）最大速度在 66 km/h 左右。此时车流仍被交通流所限制；第 1 类表示的更符合自由交通流，可以自由的加速，必要时减速，加减速比例都较高，而怠速比例较低，运行时间也较长。

表 5-8 聚类后三个类参数特征

特征值	综合	第 1 类	第 2 类	第 3 类
T, s	183.40	592.31	81.01	175.88
Ta, s	55.47	205.23	16.87	53.44
Td, s	56.97	209.22	18.21	54.58
Tc, s	30.48	123.93	11.93	25.52
Ti, s	40.49	53.93	34.00	42.34
S, km	1.17	5.12	0.15	1.09
Vmax, km/h	115.67	115.67	45.21	98.77
Vm, km/h	23.14	31.09	6.70	22.51
Vmr, km/h	28.12	34.13	10.83	26.96
Vsd	4.05	4.65	1.86	4.34
a <sub>max</sub> , m/s <sup>2</sup>	3.08	2.98	1.95	3.08
aa, m/s <sup>2</sup>	0.56	0.52	0.50	0.60
a <sub>min</sub> , m/s <sup>2</sup>	-4.00	-3.82	-2.13	-4.00
ad, m/s <sup>2</sup>	-0.54	-0.51	-0.47	-0.59
Asd, m/s <sup>2</sup>	0.50	0.50	0.36	0.54
N, 个	2008	201	723	1084

下列堆积图更直观地反映了各类片段的运动学特性。图 5-17 是运动学片段的速度频度堆积分布图；图 5-18 是持续时间堆积分布图；图 5-19 是运行距离堆积分布图；图 5-20 是最大速度堆积分布图；图 5-21 是最大加速度的堆积分布图。可以看出，一般来说，每一类不同的特征域具有比较宽广的范围，展现了复杂道路车辆运动学特性。

分析可知，第 2 类运动学片段具有在低速度等级部分较高的频度，运行时间和运行距离短、平均速度低等特性，这充分体现了车辆在拥挤道路上行驶时走走停停的行驶特征；而第 1 类运动学片段恰恰相反，它具有在高速度等级部分较高的频度，运行时间和运行距离长、平均速度比第一类高得多等特性，这充分反映了车辆在畅通道路上行驶时所具有的行驶特征。另外，综合类和第 3 类运动学片段特征值分布差别不大。

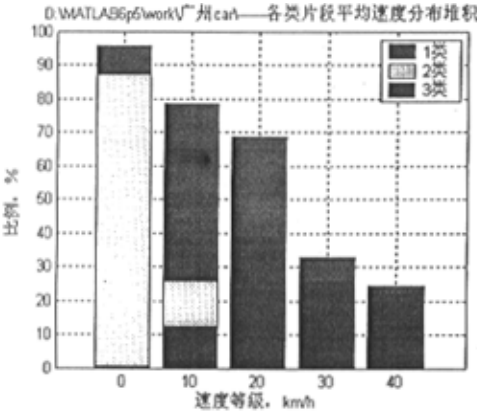


图 5-17 速度频度分布

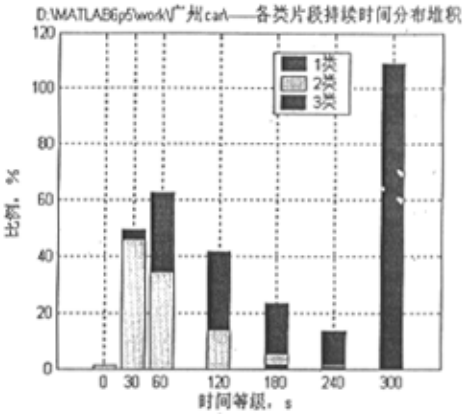


图 5-18 持续运行时间分布

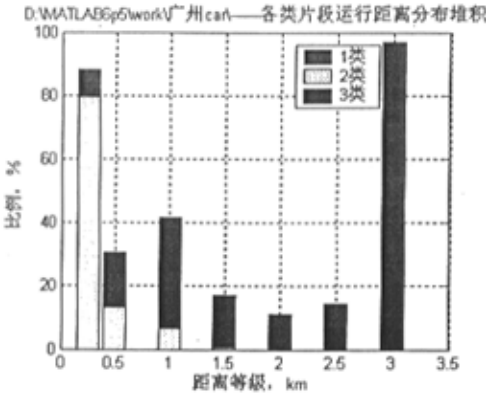


图 5-19 运行距离分布堆积

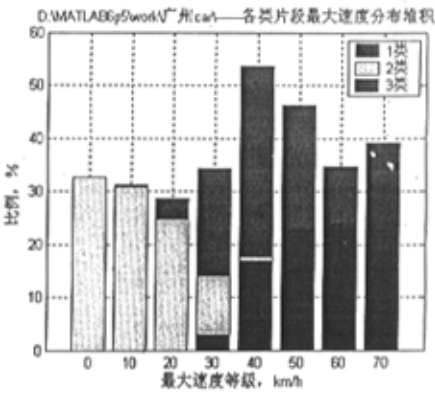


图 5-20 最大加速度分布



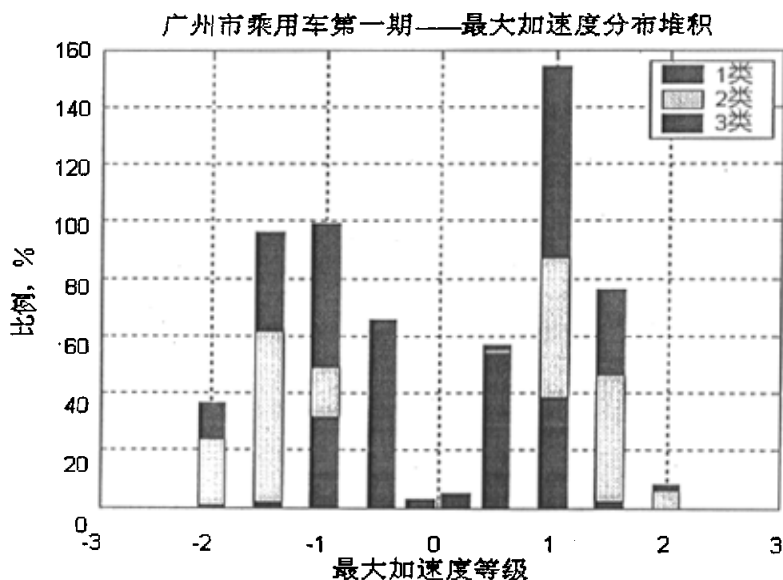


图 5-21 最大加速度（正/负）分布

#### 5.1.4.3 乘用车运动学水平层次的分析

我们通过上面的研究发现，由于车辆的道路运动的复杂性，每一类的车辆运动学水平覆盖范围较广。而我们在道路规划时知道，由于城市快速路的存在，车辆运动存在着局部的高速，车辆设计也必须考虑这种情形。我们可以继续按照上面的方法进行更多数量类的聚类，将这种

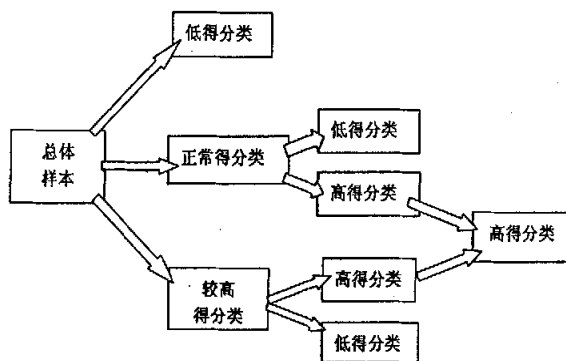


图 5-22 乘用车车辆运动学聚类流程

运动特征分离出来。但是又会产生太多的类，影响最终工况的开发使用。当然这种情形仅是针对乘用车而言的。

图 5-22 是车辆运动学聚类流程，仍然是四维聚类。在前面聚三类的基础上，然后再分别将较畅通类和畅通类用动态聚类法分为两类，在这两类中均必有一类为高得分类而另一类则为低得分类。最后将两组高得分类再组合为一类，即可形成最高的得分类，反映车辆在非常畅通的道路上的行驶状况。在获取该类时，前三类片段的运动学特性将由于各自所包含的高得分片段被

抽走发生一些改变,但是由于较少,变化微小。

## 5.2 广州市公交车工况数据解析

公交车的运动学特征解析方法和过程,基本上与乘用车一致。由于其活动区间和车辆本身的性能,对于公交车只需要聚类到三类即可。

### 5.2.1 数据处理结果

#### 5.2.1.1 第一轮数据总体统计特征

通过对原始数据的整理和运动学片段分割后,将在广州市采集到的第一轮公交车车速数据分割成了 780 个运动学片段。在求取运动学片段特征之后,获得了各个运动学片段以及总体样本的综合特征值。分析表 5-9 可知,第一轮数据表明广州市公交车最高速度可达 60km/h 以上,其平均速度在 14km/h 左右。大部分特征分布基本与乘用车相同,除了正加速度小而负加速度大,加速能力差异也明显。图 5-23 为速度总体分布,可看到速度呈明显的偏锋分布,但是分布特性与乘用车不同。速度—加速度联合分布见图 5-24。

表 5-9 各类运动学片段的 15 个综合描述特征值

描述特征值	综合一	分布特征值	综合一
T	125.2	$P_{0-10}$	27.832
Ta	33.117	$P_{10-20}$	18.958
Td	25.622	$P_{20-30}$	20.004
Tc	33.131	$P_{30-40}$	18.519
Ti	33.331	$P_{40-50}$	10.768
S	0.469	$P_{50-60}$	3.0498
Vmax	66.06	$P_{60-70}$	0.72458
Vm	14.026	$P_{70}$	0.14492
Vmr	18.502	$A_{-3.5}$	0
Vsd	2.8959	$A_{-3.5-2.5}$	0.0091389
$a_{max}$	3.4506	$A_{-2.5-1.5}$	0.075722
aa	0.46558	$A_{-1.5-0.5}$	0.6593
$a_{min}$	-3.8803	$A_{0.5-0.5}$	8.4482
ad	-0.55825	$A_{0.5-1.5}$	81.885
asd	0.4146	$A_{1.5-2.5}$	8.5605
N	780	$A_{2.5-3.5}$	0.30419

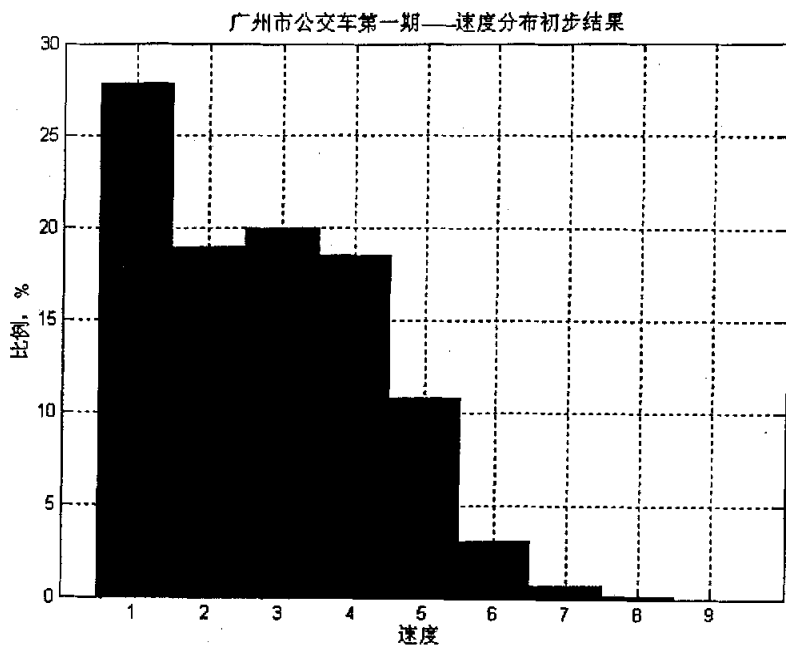


图 5 - 23 速度总体分布

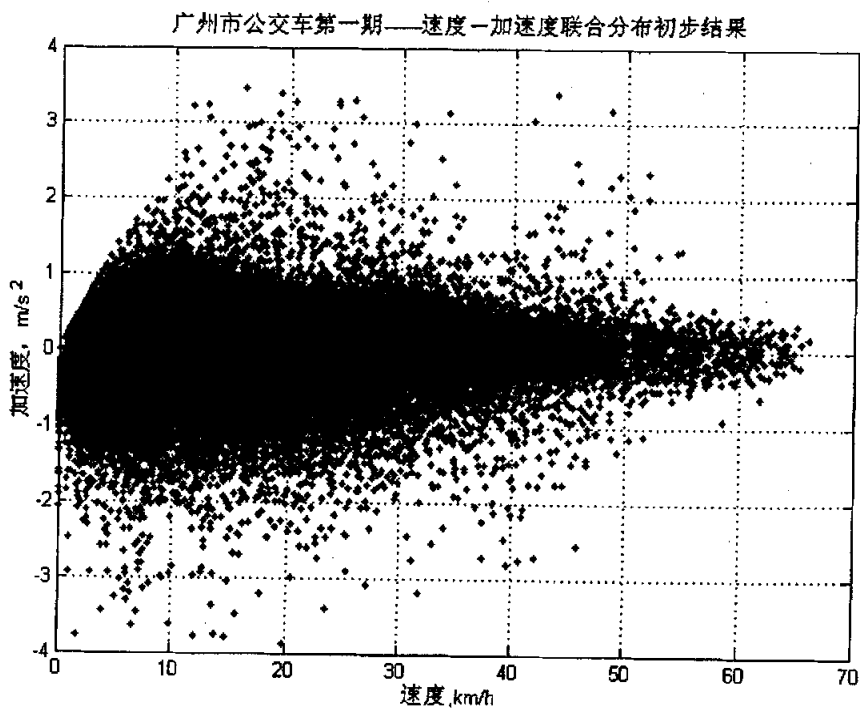


图 5 - 24 速度—加速度联合分布

### 5.2.1.2 第二轮数据总体统计特征

通过对原始数据的整理和运动学片段分割后,将在广州市采集到的第二轮公交车数据分割成了 1781 个运动学片段。在求取运动学片段特征之后,获得了各个运动学片段以及总体样本的综合特征值。总体样本的 15 个综合描述特征值如表 5-10 所示。分析表 5-10 可知,第二轮数据表明广州市公交车最高速度可达 65km/h 以上,其平均速度在 15km/h 左右。车辆总体运动学特征表现与第一轮相似,各特征参数的总体分布也相当。速度分布以及速度—加速度联合分布也相似。

表 5-10 各类运动学片段的 15 个综合描述特征值

描述特征值	综合二	分布特征值	综合二
T	131.23	$P_{0\_10}$	27.75
Ta	34.499	$P_{10\_20}$	16.468
Td	26.104	$P_{20\_30}$	18.635
Tc	34.212	$P_{30\_40}$	19.128
Ti	36.418	$P_{40\_50}$	13.038
S	0.54901	$P_{50\_60}$	4.2058
Vmax	67.478	$P_{60\_70}$	0.69269
Vm	15.06	$P_{70}$	0.083003
Vmr	20.114	$A_{-3.5}$	0
Vsd	3.2783	$A_{-3.5\_2.5}$	0
amax	1.56	$A_{-2.5\_1.5}$	0.00042785
aa	0.40917	$A_{-1.5\_0.5}$	0.34955
amin	-2.5039	$A_{-0.5\_0.5}$	7.765
ad	-0.53636	$A_{0.5\_1.5}$	85.157
asd	0.35818	$A_{1.5\_2.5}$	6.7262
N	1781	$A_{2.5\_3.5}$	0.0021392

### 5.2.1.3 两轮车辆运行状况主要特征参数对比分析

从对应的各种特征参数的概率分布统计来看,两轮试验下来,广州市公交车运动学的结果和规律是比较接近的。

分别对应比较表 5-9 和表 5-10,我们可以清楚地看到,对于两轮的描述特征参数和分布特征参数,从统计角度看还是存在一定的差异;也同样存在差异。见图 5-25、5-26 和 5-27。回顾试验时的季节,第一轮是在夏季

(9月左右), 第二论在春季(5月左右), 这种差异也是可以理解的。

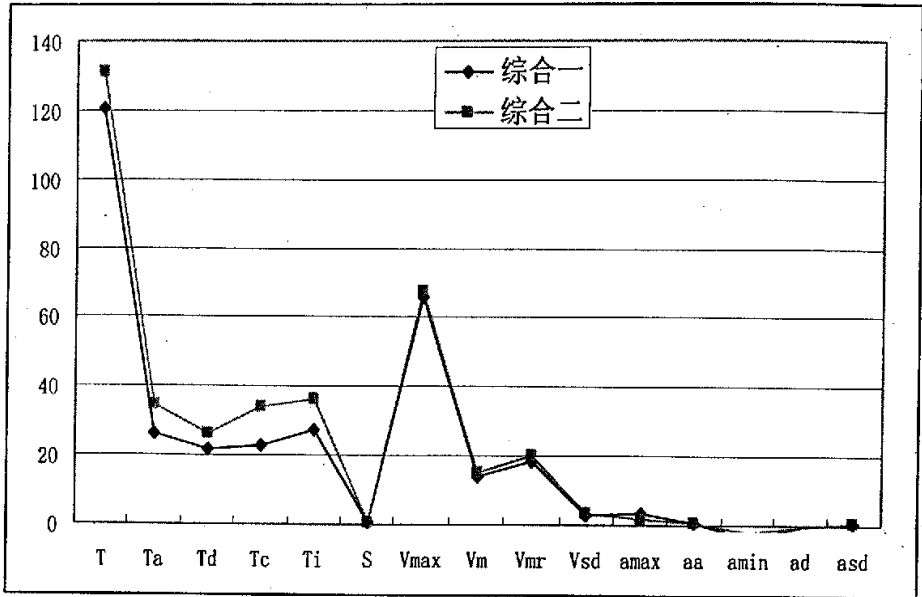


图 5 - 25 运动学描述特征值趋势图

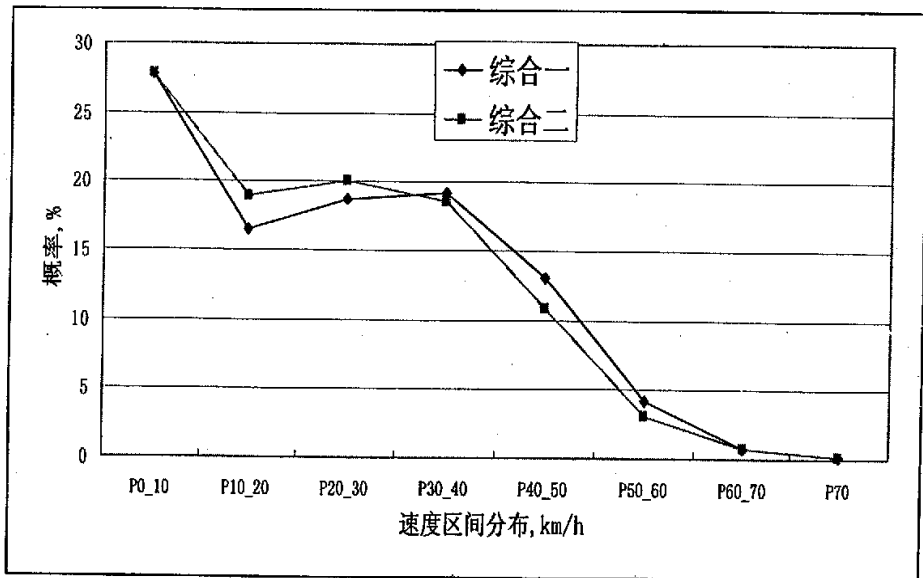


图 5 - 26 速度区间分布特征值趋势图

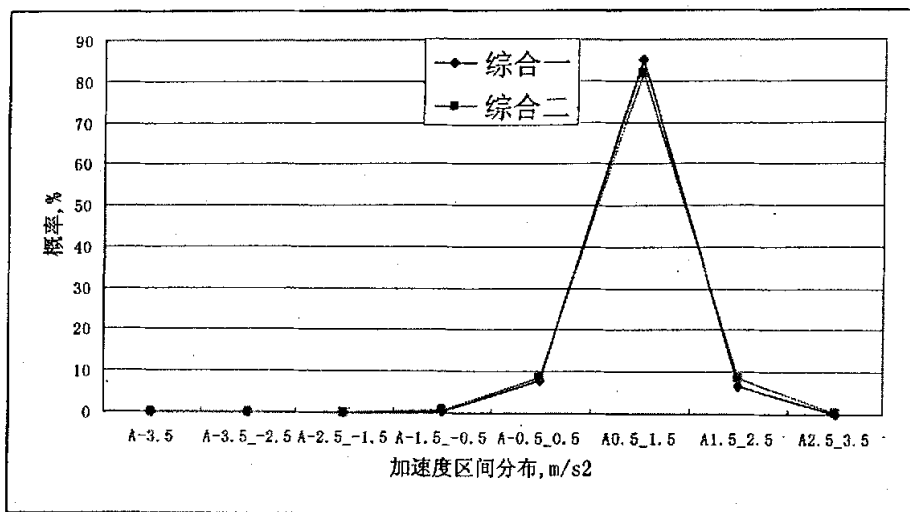


图 5-27 加速度区间分布特征值趋势图

#### 5.2.1.4 广州公交车车辆实际行驶工况数据库

在 15 个描述性综合特征值中，相差都不大；两轮数据分解成的加速、减速、匀速和怠速比例对比见图 5-28，从图上可看出，两轮数据的 4 种运行状况中，加速比例和减速比例相差约 2 个百分点，其余两个比例基本相当。两轮数据的最高速度、平均速度等主要参数非常接近。图 5-27 的加速度区间分布特征值趋势图也反映了车辆具有相似加减速速度；我们认为两轮数据在统计上还是比较合理，确实反映了广州市乘用车的真实行驶状况。

同样地，上述现象可以说明了两个问题。第一，不同时期内调查的差异是存在的；第二，在这种差异下我们应该而且可以将两轮试验数据合并成一个数据库，数据库结构为 2561\*15 矩阵 A。最后，经过合并两轮数据，我们获得了一个包含 2008\*15 的运动学片段的数据矩阵（以下通称矩阵 A）。

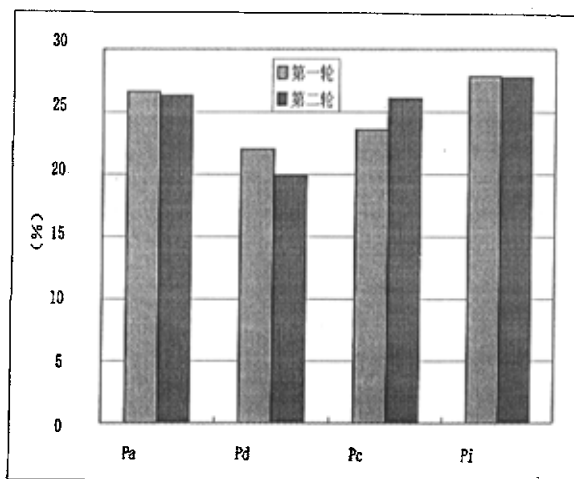


图 5-28 四种运行模式对比



## 5.2.2 公交车车辆的运动学的评估

### 5.2.2.1 主成分的确定

表 5-11 是对矩阵 A 进行主成分分析后获得的 15 个主成分的贡献率。由表 5-11 可知, 前几个主成分包含了 15 个特征值的绝大部分信息, 其中前三个主成分的贡献率累积为 83.685%, 前四个主成分的累积贡献率达 91.21%。图 5-29 图示了主成分的贡献率。

表 5-11 主成分贡献率

主成分序号	主成分方差	贡献率(%)	累积贡献率(%)
1	6.8564	45.71	45.71
2	3.3987	22.66	68.37
3	1.8366	12.24	80.61
4	1.1085	7.39	88.00
5	0.76965	5.13	93.13
6	0.32461	2.16	95.30
7	0.25439	1.70	96.99
8	0.18962	1.26	98.26
9	0.09727	0.65	98.90
10	0.072432	0.48	99.39
11	0.035708	0.24	99.63
12	0.025499	0.17	99.80
13	0.021358	0.14	99.94
14	0.0092543	0.06	100
15	5.18E-31	0	100

### 5.2.2.2 相关系数

前四个主成分与 15 个描述性运动学片段特征值的相关系数如表 5-12。对表 5-12 进行分析会得到表 5-13 所给的结果, 第一主成分主要反映的运动学片段特征值是持续时间、加速时间、减速时间、巡航时间、行驶距离、最大速度、平均速度、运行速度和速度标准偏差; 第二主成分主要反映的是平均加速度、平均减速度、最大加速度、最大减速度、加速度标准偏差; 第三主成分主对特征值反映的不明显, 但其贡献率比较大, 为 10.964%; 第四主成分反映的是怠速时间。基于前四个主成分将 15 个运动学片段特征值的每

一个都很好代表了,因此,本文取前四个主成分作后继的分析(主要是聚类分析)。

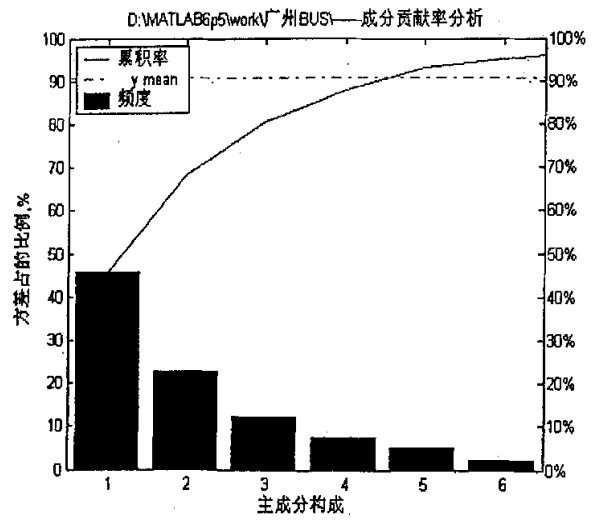


图 5 - 29 主成分贡献率分析

表 5 - 12 前四个主成分与特征值的相关系数

特征值	第一主成分相关系数	第二主成分相关系数	第三主成分相关系数	第四主成分相关系数
T	0.81036	0.40186	0.3726	-0.19393
T <sub>a</sub>	0.89209	0.22931	0.26485	0.08372
T <sub>d</sub>	0.80609	0.30595	0.40257	0.16666
T <sub>c</sub>	0.75719	0.44139	0.25743	0.15216
T <sub>i</sub>	0.14902	0.25424	0.26916	-0.89651
S	0.91306	0.2366	0.15281	0.1325
V <sub>max</sub>	0.88472	-0.27112	-0.2799	-0.077413
V <sub>m</sub>	0.87428	-0.19308	-0.33227	0.19188
V <sub>mr</sub>	0.83666	-0.26986	-0.39575	-0.068393
V <sub>sd</sub>	0.77466	-0.35183	-0.42903	-0.13135
a <sub>max</sub>	0.10056	-0.61003	0.38974	0.06906
a <sub>a</sub>	-0.43146	-0.48486	0.36454	0.10621
a <sub>min</sub>	-0.46658	0.6805	-0.21509	0.11638
a <sub>d</sub>	-0.11047	0.77564	0.057973	0.28324
a <sub>sd</sub>	0.22709	-0.89234	0.24064	0.13079

表 5-13 前四个主成分所代表的主要特征值

	特征值
第一主成分	持续时间、加速时间、减速时间、巡航时间、行驶距离、最大速度、平均速度、运行速度、速度标准偏差
第二主成分	平均加速度、平均减速度、加速度标准偏差、最大加速度、最大减速度
第三主成分	一般相关
第四主成分	怠速时间

### 5.2.2.3 乘用车车辆运动学水平的评估

通过主成分分析并取前四个主成分将运动片段特征值总体样本矩阵 A 压缩成了一个能代表 88% 以上的总体样本信息的新总体样本主成分得分矩阵 B (如表 5-14 所示)。这个新的总体样本矩阵将用于聚类分析以对运动学片段总体样本进行分类。最后, 从调查的数据和公交车的常识我们知道, 我们没有必要去抽取第四类高速工况。

表 5-14 前三个主成分得分

运动学片段编号	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分
1	-4.0315	3.6967	-1.4754	0.62799
2	-3.8456	4.2117	-1.0745	0.81558
3	-2.9629	4.521	0.35135	-2.3104
4	2.8011	-0.11429	1.1795	-3.0762
5	0.83729	-0.95208	-1.8435	-0.2925
6	5.9152	3.6001	3.36	-0.087882
7	-0.078553	-1.6757	-1.3438	0.46127
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2557	-4.2293	1.699	-0.12962	0.19201
2558	1.2927	0.54357	-1.7424	-0.16528
2559	-3.1406	0.54136	-0.67564	-0.20862
2560	1.29	0.43404	-0.98487	-1.7817
2561	2.4062	-0.13608	-2.2646	-0.67538

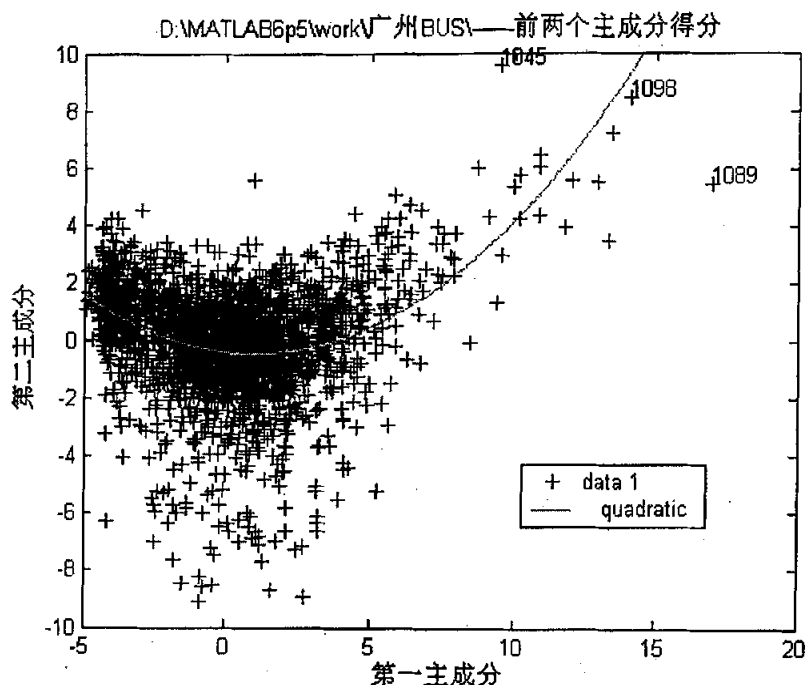


图 5 - 30 客车车辆运动学得分分布

### 5.2.3 公交车车辆运动学水平的分析与研究

参照乘用车运动学水平分析的原理，进行本节的研究。

#### 5.2.3.1 运动学片段聚类结果

##### ● 聚类图

图 5—31 是前两个主成分的得分聚类图，从图上可看出得到了清晰的分类。

##### ● 类间距

类与类之间的距离及类重心，如表 5—15、表 5—16 所示

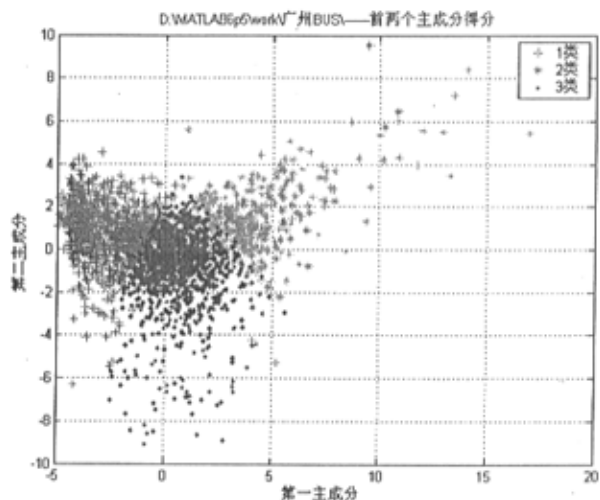


图 5 - 31 前两个主成分得分聚类图

表 5 - 15 类与类之间距

	第一类	第二类	第三类
第一类	0	7.2429	3.8244
第二类	7.2429	0	4.7652
第三类	3.8244	4.7652	0

表 5 - 16 各类重心

	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分
第一类	-2.6937	0.79519	0.38424	0.12789
第二类	4.4745	1.5909	0.96789	0.44804
第三类	0.66122	-0.8184	-0.43808	-0.17276

各类中各个点到相应聚点的最大距离分别为：9.8561、23.255、10.615。

5.2.3.2 各类运动学特征分析

表 5—17 所示为三类运动片段的 15 个综合描述特征值。分析可知，第 1 类怠速时间所占的比例很大，平均速度只有 5.5km/h，反映的是走走停停的堵塞交通状态。第 2 类运动学片段反映的是公交车在广州市交通比较正常的道路上的行驶特性，包含了相对较短的片段，平均速度正常（15.3km/h），最大速度在 66 km/h 左右。此时车流仍被交通流所限制；第 3 类表示的更符合自由交通流，可以自由的加速，必要时减速，加减速比例都较高，而怠速比例较低，运行时间也比较长，反映了包含较多的郊区、立交桥等行驶工况。

表 5 - 17 聚类后三个类的特征参数

特征值	第 1 类	第 2 类	第 3 类	综合
T, s	71.303	116.27	284.13	121.17
Ta, s	12.7	32.496	83.417	31.946
Td, s	12.434	23.451	65.311	24.739
Tc, s	14.85	26.879	94.222	30.837
Ti, s	31.318	33.44	41.179	33.65
S, km	0.10907	0.49407	1.6112	0.49832
Vmax, km/h	34.834	66.06	67.478	67.478
Vm, km/h	5.507	15.298	20.414	14.805
Vmr, km/h	9.5896	21.313	23.8	19.716
Vsd, km/h	1.6874	3.5482	3.542	3.1839
Amax, m/s <sup>2</sup>	3.4506	3.3997	2.6828	3.4506

aa, $\text{m/s}^2$	0.48138	0.429	0.37072	0.42309
amin, $\text{m/s}^2$	-2.9378	-3.8803	-3.7992	-3.8803
ad, $\text{m/s}^2$	-0.47221	-0.60314	-0.47345	-0.54177
asd, $\text{m/s}^2$	0.31255	0.40437	0.3524	0.37211
N, 个	848	302	1411	2561

下列堆积图更直观地反映了各类片段的运动学特性。图 5-32 是运动学片段的速度频度堆积分布图；图 5-33 是持续时间堆积分布图；图 5-34 是最大速度堆积分布图；图 5-35 是运行距离堆积分布图；图 5-36 是最大加速度的堆积分布图。同样地可以看出，一般来说，每一类不同的特征域具有比较宽广的范围，展现了复杂道路车辆运动学特性。

分析可知，第 1 类运动学片段具有在低速度等级部分较高的频度，运行时间和运行距离短、平均速度低等特性，这充分体现了车辆在拥挤道路上行驶时走走停停的行驶特征；而第 3 类运动学片段恰恰相反，它具有在高速度等级部分较高的频度，运行时间和运行距离长、平均速度比第一类高得多等特性，这充分反映了车辆在畅通道路上行驶时所具有的行驶特征。另外，综合类和第二类运动学片段特征值分布差别不大。

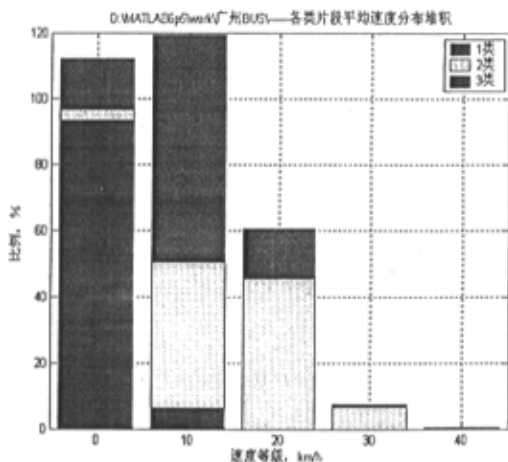


图 5-32 平均速度频度分布

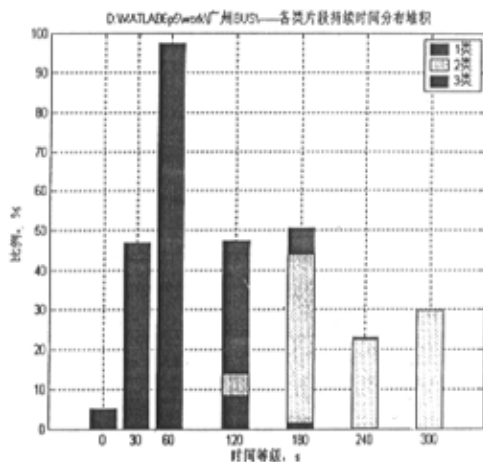


图 5-33 平均持续时间分布



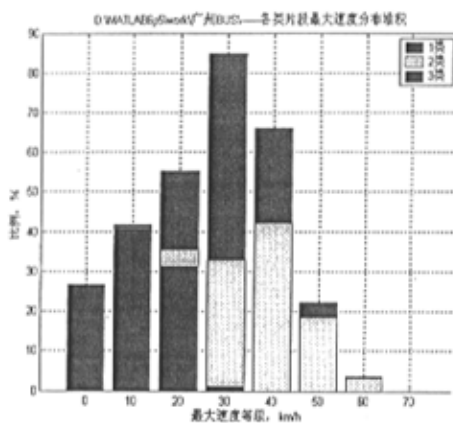


图 5-34 最大速度分布

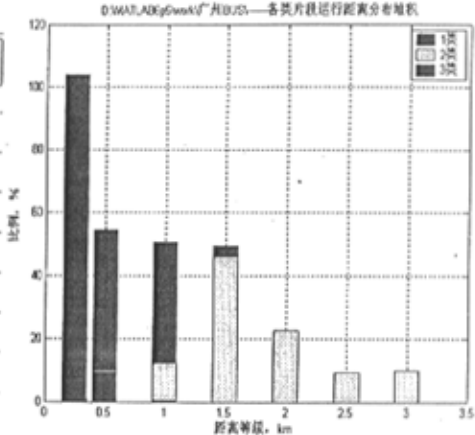


图 5-35 运行距离分布

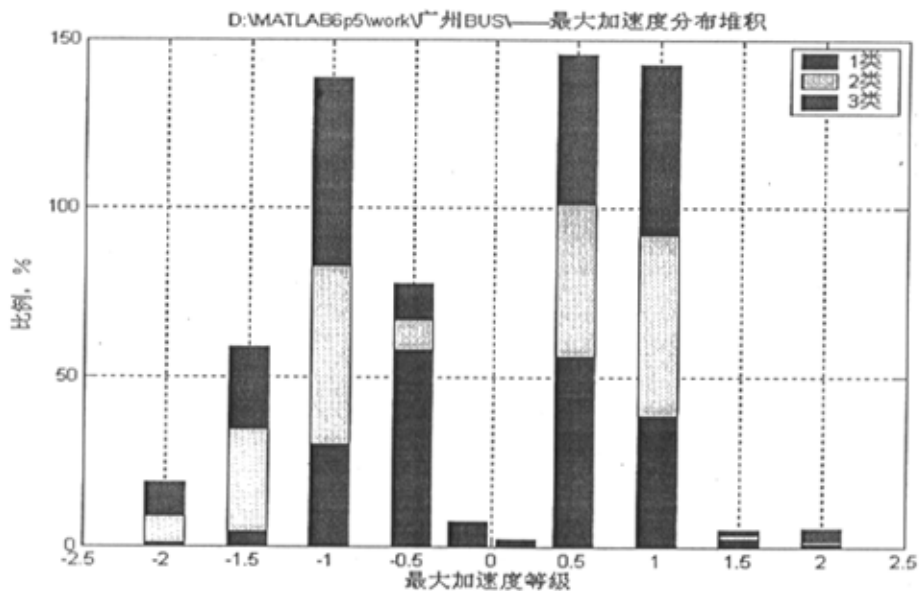


图 5-36 最大加速度（正/负）分布

### 5.3 乘用车和公交车的运动学特性比较

两种车辆虽然都运行在同一个区域内，由于各自特性不同，行驶工况描述就具有各自的特点。为了对比，均用三类来对比，分析对比分别见表 5-18（c 代表乘用车、b 代表公交车）、表 5-19、图 5-37、图 5-38 和图 5-39。

主要描述特征参数对比显示的数据证实了大家的常识：低速类具有相近的特性、区域扩大则特征差异明显，乘用车具有较低的低速和更高的高速。而从图 5-38 中，我们可以发现，公交车的运行比乘用车的运行要平稳的多。

表 5 - 18 主要描述特征参数对比

特征值	低速类 c	普通类 c	高速类 c	综合 c	综合 b	低速类 b	高速类 b	普通类 b
T	81.01	175.88	592.31	183.40	121.17	71.30	284.13	116.27
S	0.15	1.09	5.12	1.17	0.50	0.11	1.61	0.49
V <sub>max</sub>	45.21	98.77	115.67	115.67	67.48	34.83	67.48	66.06
V <sub>m</sub>	6.70	22.51	31.09	23.14	14.81	5.51	20.41	15.30
V <sub>mr</sub>	10.83	26.96	34.13	28.12	19.72	9.59	23.80	21.31
A <sub>max</sub>	1.95	3.08	2.98	3.08	3.45	3.45	2.68	3.40
a <sub>min</sub>	-2.13	-4.00	-3.82	-4.00	-3.88	-2.94	-3.80	-3.88

表 5 - 19 分布特征参数对比

分布特征值	乘用车	公交车	分布特征值	乘用车	公交车
P <sub>10_20</sub>	13.58	17.08	A <sub>3.5</sub>	1.63	0.00
P <sub>20_30</sub>	15.47	18.97	A <sub>3.5_2.5</sub>	0.00	0.00
P <sub>30_40</sub>	16.91	18.98	A <sub>2.5_1.5</sub>	0.04	0.02
P <sub>40_50</sub>	13.86	12.48	A <sub>1.5_0.5</sub>	0.87	0.43
P <sub>50_60</sub>	8.97	3.92	A <sub>0.5_0.5</sub>	12.03	7.93
P <sub>60_70</sub>	5.01	0.70	A <sub>0.5_1.5</sub>	72.52	84.35
P <sub>70</sub>	2.49	0.10	A <sub>1.5_2.5</sub>	14.16	7.18
P <sub>a</sub>	30.24	26.36	A <sub>2.5_3.5</sub>	0.37	0.08
P <sub>d</sub>	31.06	20.42	A <sub>3.5</sub>	0.01	0.01
P <sub>c</sub>	16.62	25.45			
P <sub>i</sub>	22.08	27.77			

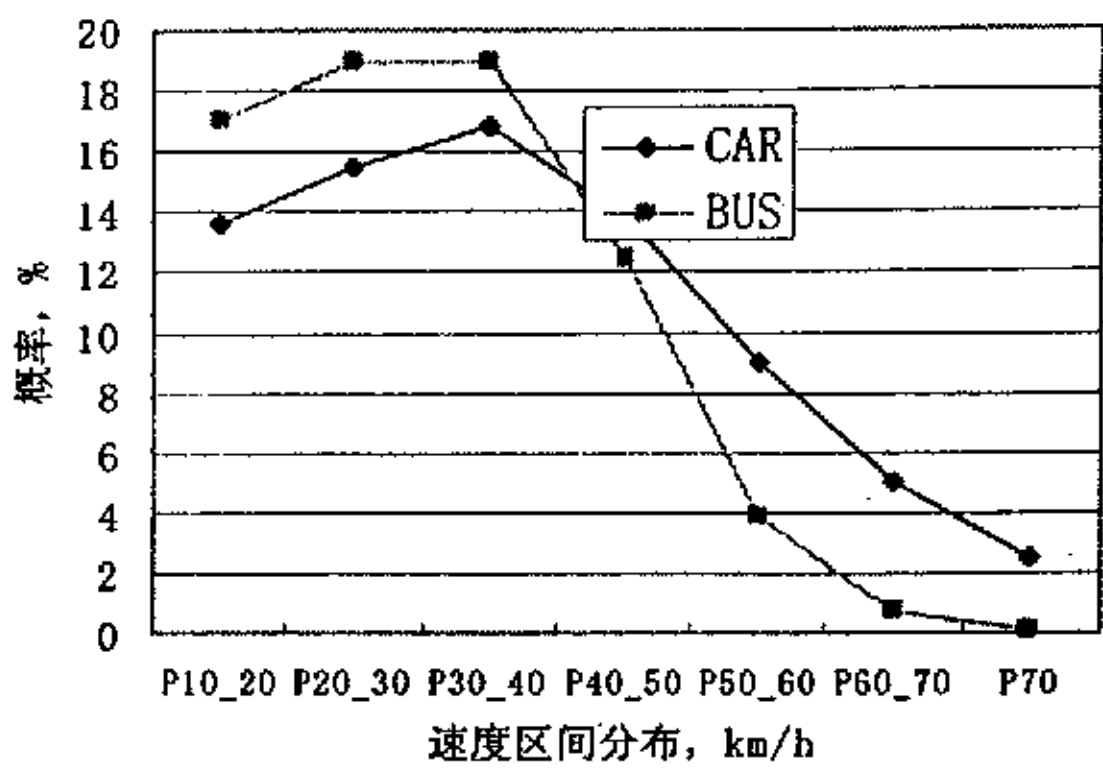


图 5 - 37 速度区间分布对比图

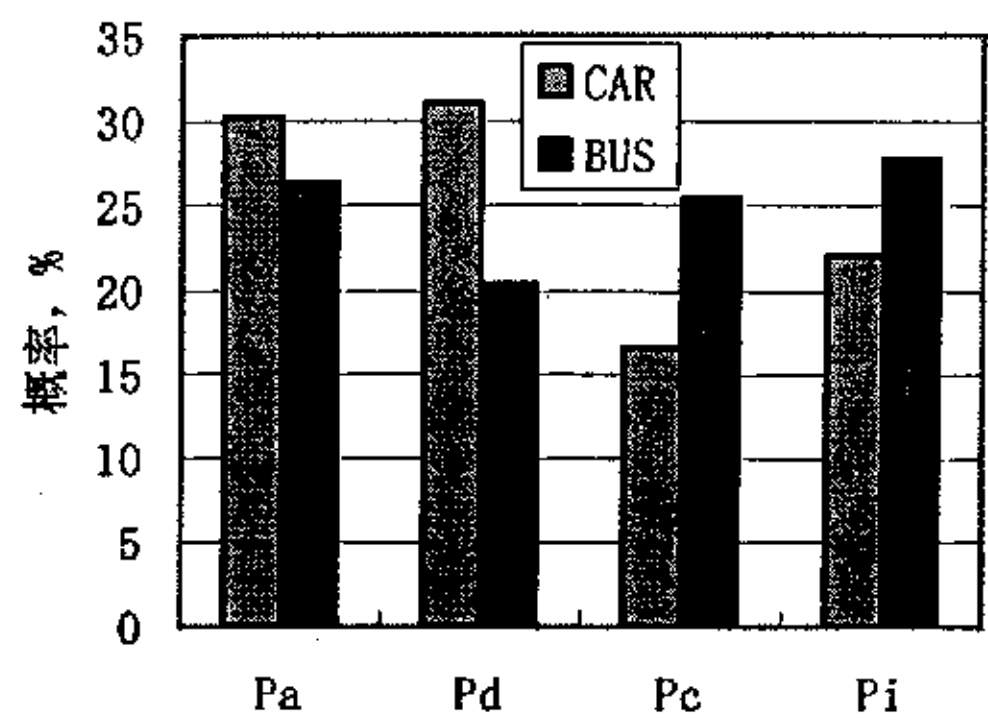


图 5 - 38 四种运行工况概率分布对比图

5.4 本章小结

- (1) 通过对两轮原始数据的分析整理，掌握了广州市乘用车和公交车的综合行驶特征。分析了车辆运动学水平和影响这种水平的因素。
- (2) 运用主成分分析和聚类分析将乘用车原始数据分为清晰的三类（甚至更多的类）。这种分类更加接近道路交通特征。
- (3) 分析对比乘用车和公交车的运动学特征。

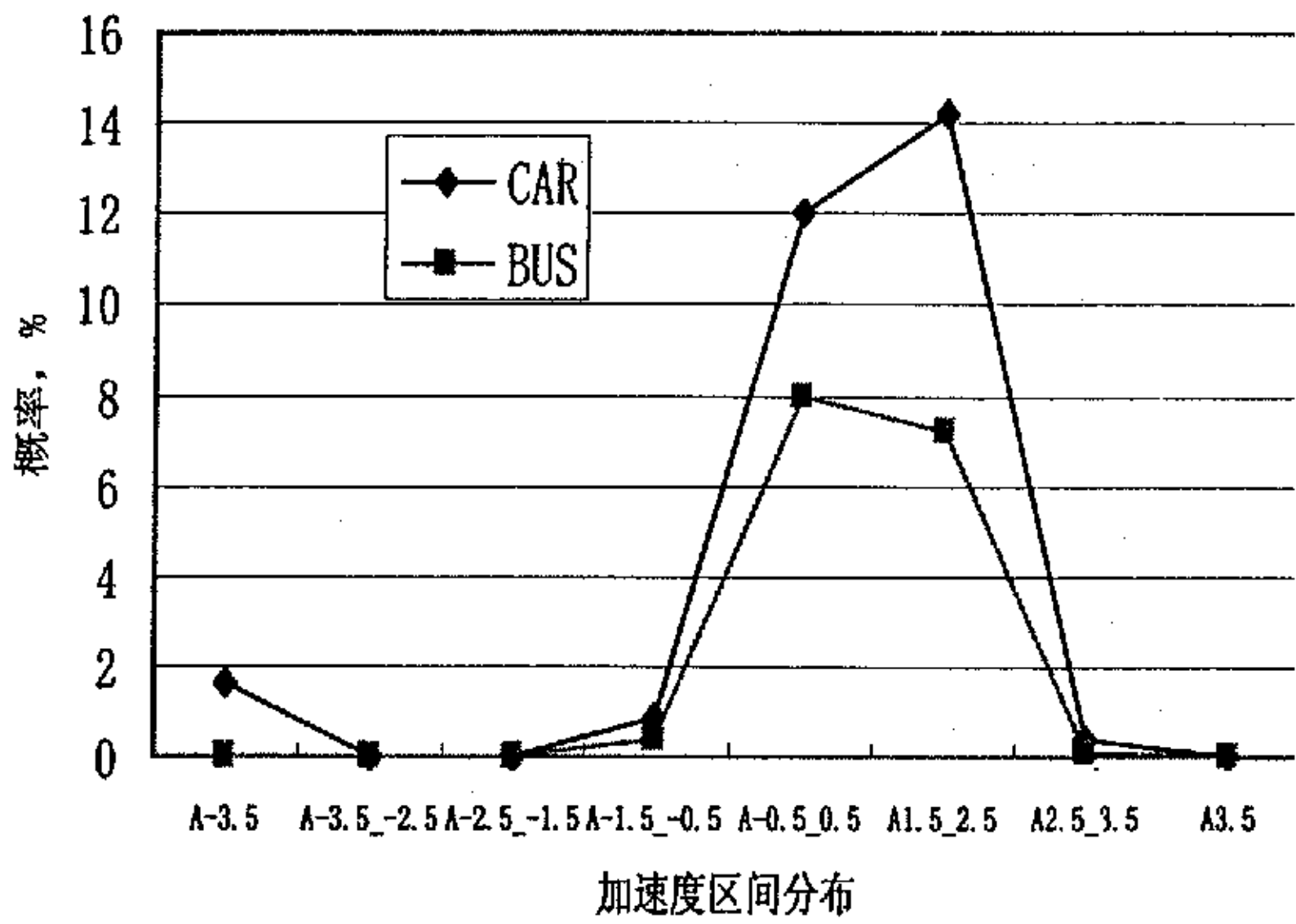


图 5 -39 加速度分布对比图

## 第 6 章 典型城市车辆行驶工况

经过对我国三个典型城市车辆实际行驶工况的调查,依据试验所获得的数据,可以分别构建出三个城市的行驶工况。三个城市的代表性无论在地域或是车辆保有量方面,都是具有足够的代表意义,可以作为构建一个公共行驶工况的基础。本部分将综合几个城市的数据,利用解析软件 VDCAP,构建我国城市车辆行驶工况。

### 6.1 城市乘用车行驶工况

#### 6.1.1 各次乘用车车辆行驶特征比较

综合乘用车的六次调查结果情况,其特征数据见表 6-1 和表 6-2。

表 6-1 六次乘用车速度区间分布数据

	北京市乘用车工况		上海市乘用车工况		广州市乘用车工况	
特征值	第 3 次	第 4 次	第 2 次	第 6 次	第 1 次	第 5 次
Pi	20.36	19.721	23.547	24.927	21.82	22.305
P0_10	15.278	14.898	13.001	11.363	14.822	12.5
P10_20	17.078	15.55	13.508	13.158	16.966	14.172
P20_30	17.165	16.762	14.345	14.619	18.258	15.728
P30_40	13.027	14.12	12.89	13.788	13.954	13.781
P40_50	9.022	9.0321	10.009	10.736	8.1894	9.6526
P50_60	5.3278	5.458	6.3639	6.3819	3.7328	6.1299
P60_70	1.9091	2.7426	3.8959	2.815	1.3641	3.4673
P70	0.83304	1.7158	2.4403	2.2113	0.89366	2.263
Pa	27.775	27.444	31.326	30.038	29.77	30.654
Pd	30.389	29.858	30.845	29.179	30.838	31.253
Pc	21.477	22.977	14.281	15.857	17.573	15.787

注:特征值的单位同前面章节,下同。

表 6-2 六次乘用车描述特征数据

	北京市乘用车工况		上海市乘用车工况		广州市乘用车工况	
特征值	第 3 次	第 4 次	第 2 次	第 6 次	第 1 次	第 5 次
T	142.16	143.98	145.96	136.28	193.36	175.54
Ta	39.928	40.062	45.725	40.936	57.563	53.809
Td	43.759	43.586	45.023	39.766	59.629	54.861
Tc	30.546	33.542	20.845	21.61	33.979	27.712
Ti	27.924	26.788	34.37	33.971	42.191	39.154
S	0.81352	0.90507	0.9373	0.86653	1.0771	1.1312
Vmax	120.923	127.31	121.44	120.71	115.08	115.67
Vm	22.602	22.63	23.117	22.89	23.053	23.199
Vmr	26.662	26.649	28.829	29.36	24.401	28.731
Vsd	3.7113	3.8852	4.1924	4.4398	3.6249	4.4138
a <sub>max</sub>	2.9506	3.2761	3.1	3.045	2.8697	3.0819
aa	0.51818	0.52218	0.58453	0.59174	0.5124	0.59818
a <sub>min</sub>	-3.99	-3.7483	-4	-3.7592	-3.7772	-3.9997
ad	-0.46727	-0.46846	-0.59185	-0.60364	-0.49603	-0.58692
asd	0.44383	0.443	0.54304	0.53713	0.45246	0.5437

表 6-3 三个城市均值数据对比

	北京	上海	广州	平均
Pi	23.93	25.25	21.43	23.537
P0_10	14.36	11.48	13.73	13.18767
P10_20	15.53	12.91	15.90	14.77917
P20_30	16.14	13.67	17.15	15.65617
P30_40	12.91	12.65	13.77	13.11083
P40_50	8.59	9.55	8.45	8.860133
P50_60	5.13	5.88	4.44	5.151633
P60_70	2.21	3.62	1.92	2.58245
P70	1.21	2.78	1.19	1.72386
平均车速	22.613	23.004	23.126	22.93
平均运行车速	26.672	29.093	27.536	27.658
Q, L/100km	9.7	10.92	10.2	10.27

表 6-3 是三个城市之间车辆行驶工况包含燃油消耗的比较。

图 6-1 和图 6-2 更直观地显示了那些差异。

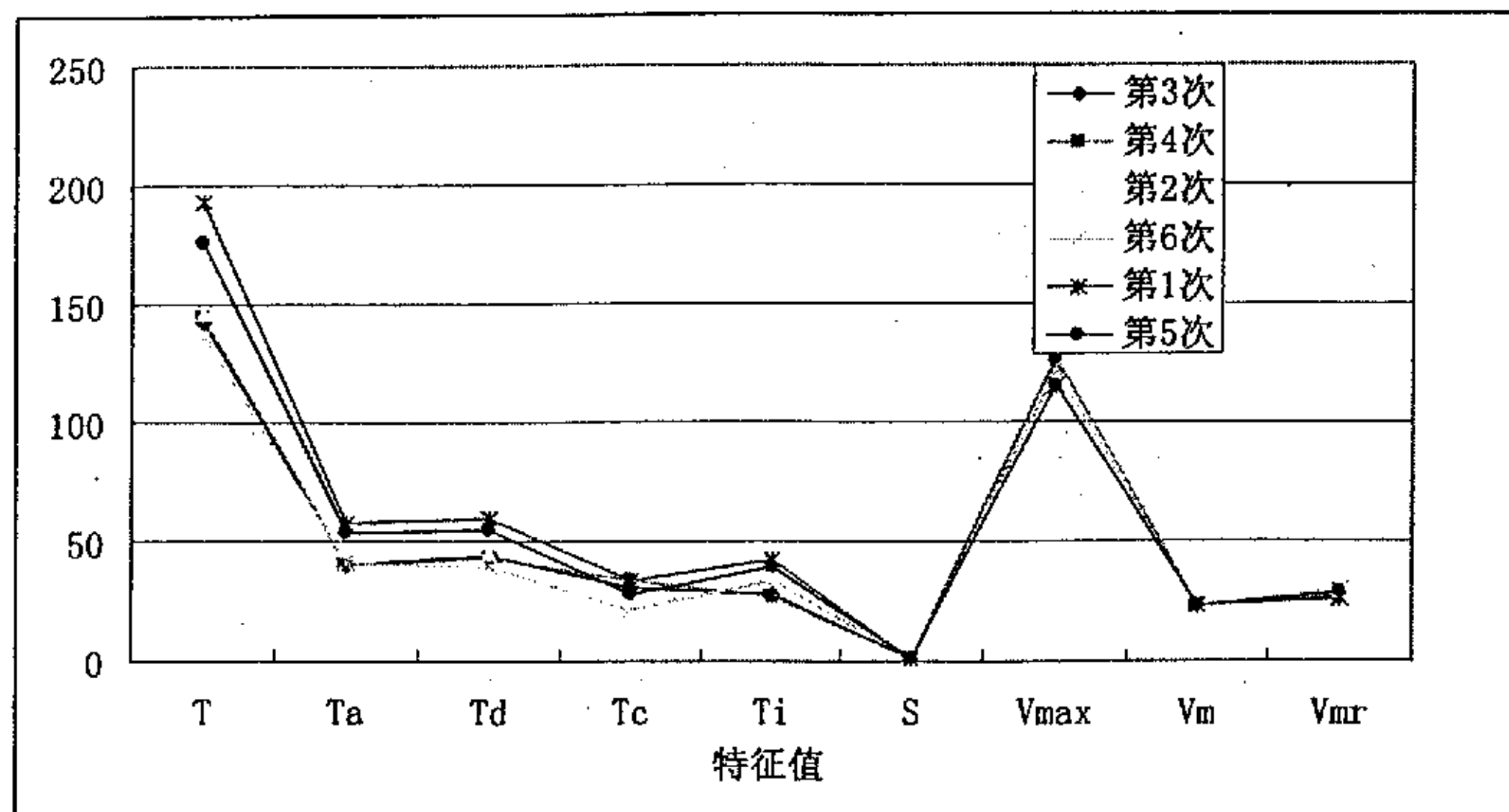


图 6-1 描述特征值对比图

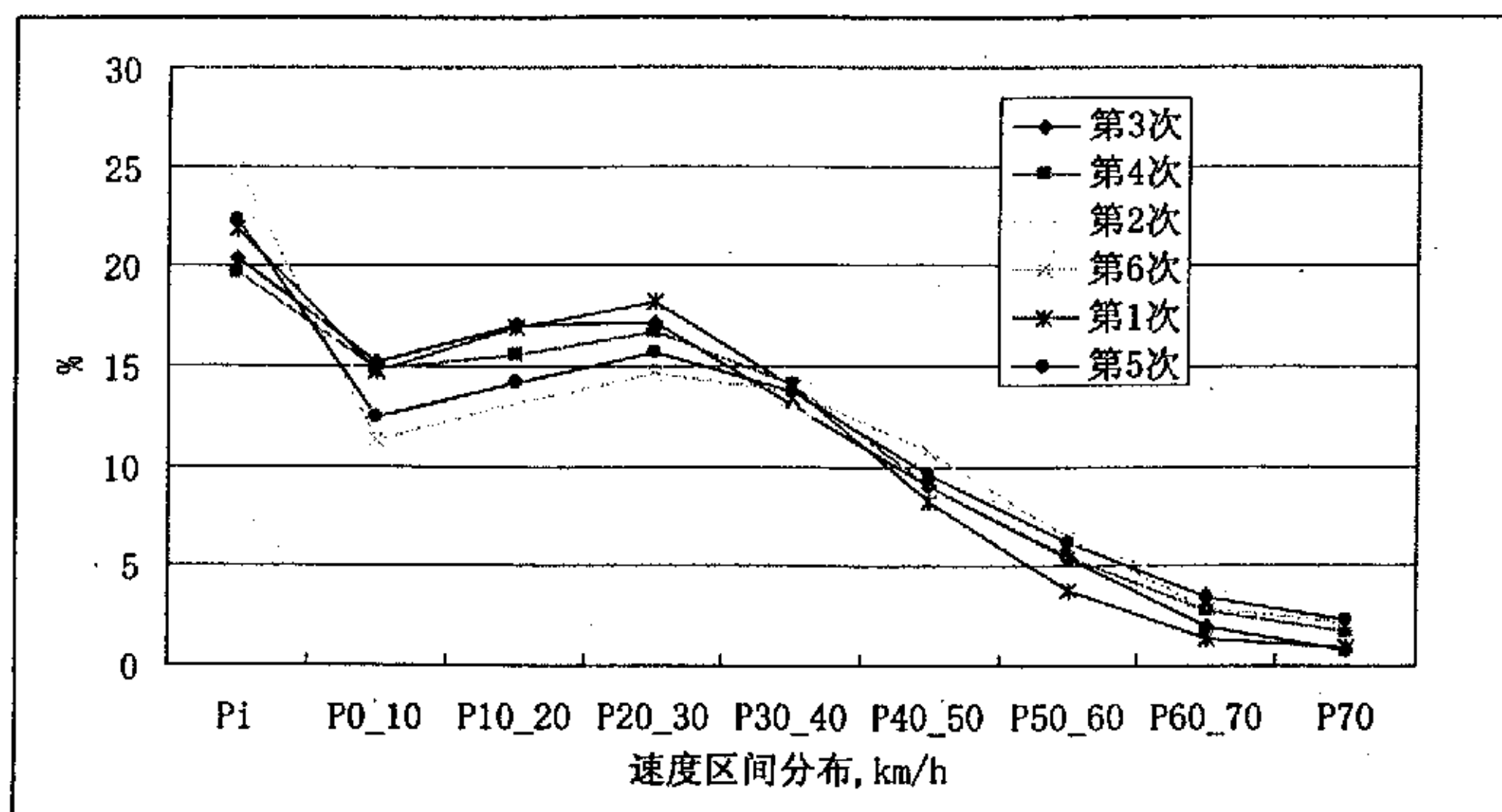


图 6-2 速度区间分布对比图

综合以上比较可见：

- 三个城市工况多参数分布形态差异是明显的，主要体现在车速在 30km/h 以下的分布。
- 调查和统计结果符合各个城市的交通流特征，如怠速比例：北京最低、上海最高，这是由于北京的立交桥多、上海的红绿灯多。
- 比较历年来各主要相关研究结果，发现有相似之处：平均速度相近。也证实了车辆运行状况并未得到根本改善。

考虑到三个城市广大区域和车辆情况的差异，以及工况关键因素如燃油



消耗、平均速度和平均运行速度以及速度区间分布等等，在三个城市之间以及三个城市与平均值之间具有较强的可比性。我们认为具备构建一个共有工况的基础。

### 6.1.2 典型工况的构成

应用 *VDCAP* 软件以总体数据库为基础，逐步解析车辆运动学数据，构建工况。循环曲线是由运动学片段库中的片段按照设定的循环时间和行程条件构成的，见图 6-3 和图 6-4。

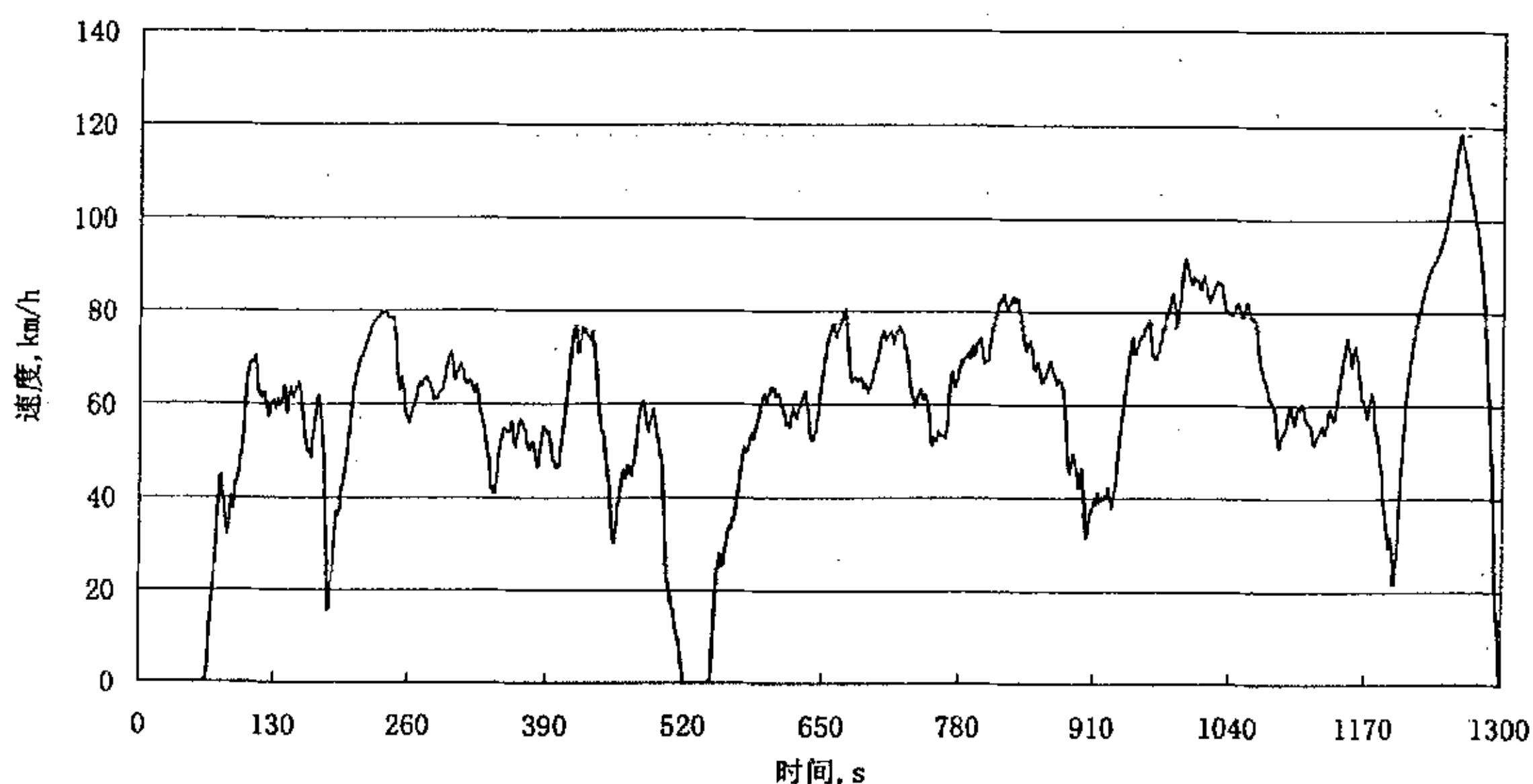


图 6-3 典型城市车辆快速路行驶工况

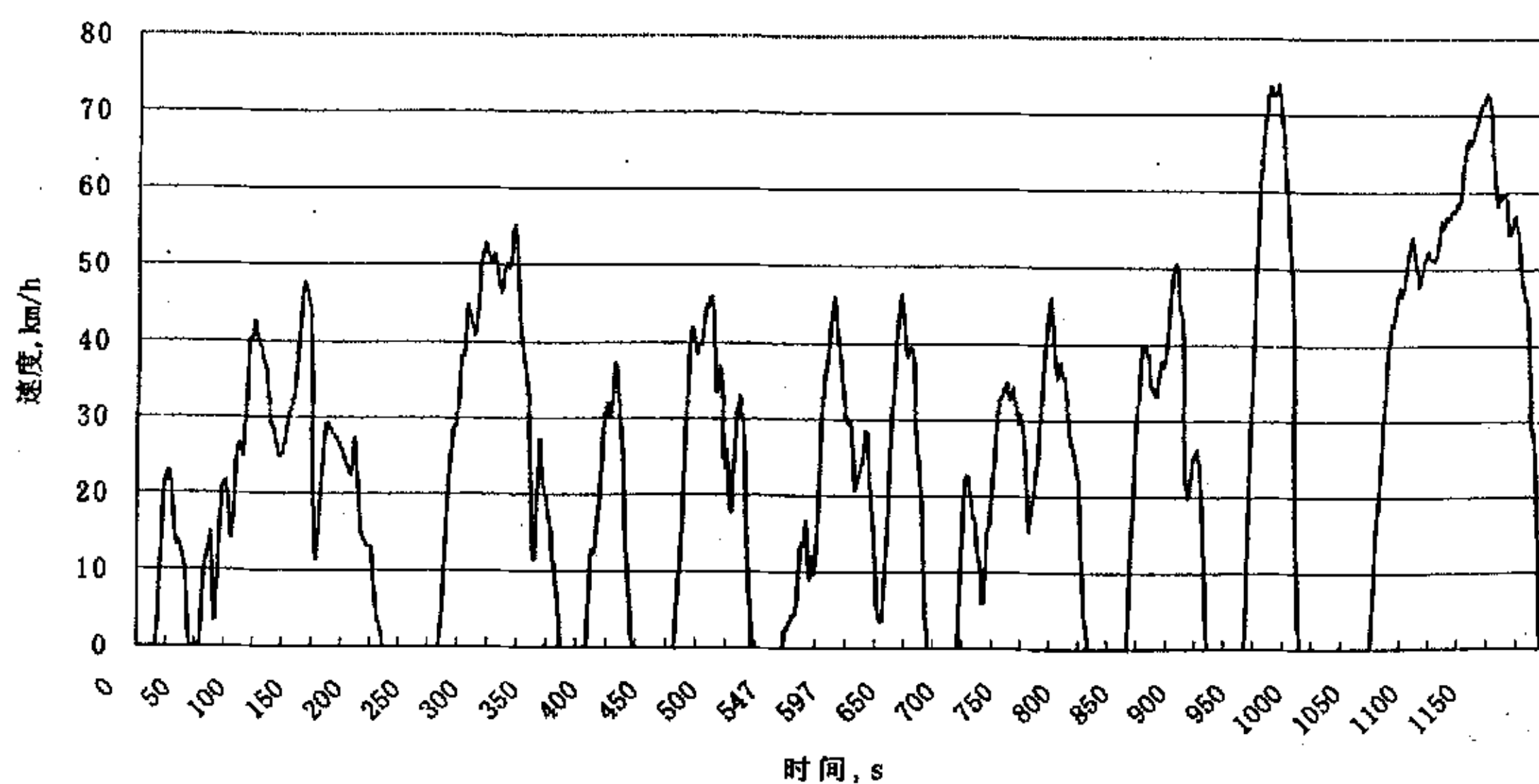


图 6-4 典型城市车辆行驶工况（城区）

对于上列行驶工况，我们认为典型城市车辆行驶工况（城区）包含了除

高速以外的运动学水平状态。车辆实际行驶时具有自由加减速特点，曲线局部速度变化剧烈，作为试验用曲线很难对其操作，必须对其进行修订处理 [41, 42]。

循环曲线最终以什么形式来表达？目前来说有瞬态循环曲线与模态循环曲线两种。瞬态循环曲线与模态循环曲线相比，更能够反映车辆的实际行驶状态，但操作上要求要高一些。

### 6.1.3 乘用车循环曲线及其分档简述

事实上，我们在具体试验中运行过瞬态和模态两种形式，差异不大。考虑到本工况主要在道路上使用，我们进行了许多试验验证。最终决定以局部模态化的瞬态运转循环曲线为表现形式，尽量反映车辆实际行驶状态，并使试验操作方便可行。

档位情况：档位的拆解参照 ECE15 工况的拆解方法。这种方法与合作单位同济大学的调查结果比较一致。

图 6-5 是在图 6-4 典型城市车辆行驶工况（城区）基础上修订的瞬态循环曲线，并且加入了档位变换，并进行匀加速和匀减速模态化结果。我们对该曲线进行了试验复现，从结果看，复现效果较好，具有较强的操作性。由于城区的车辆具有走走停停的特点，模态化后的曲线更容易操作一些。

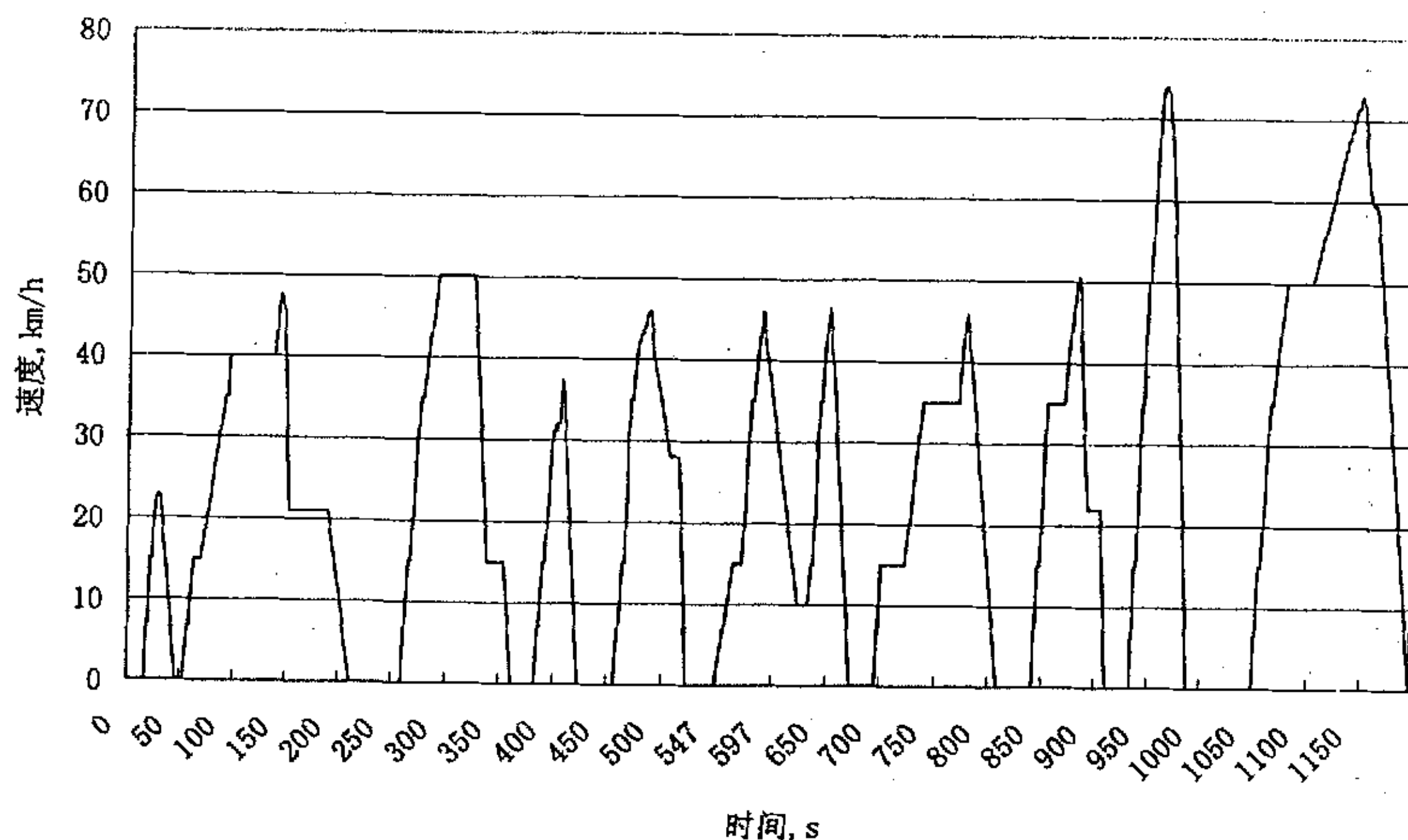


图 6-5 乘用车城市典型模态循环曲线

对于快速工况，由于很少有走走停停的情形，试验证明，使用瞬态或局部模态过的操作都比较方便。图 6-6 是经修订并加入换档后的城市快速模态

循环曲线。

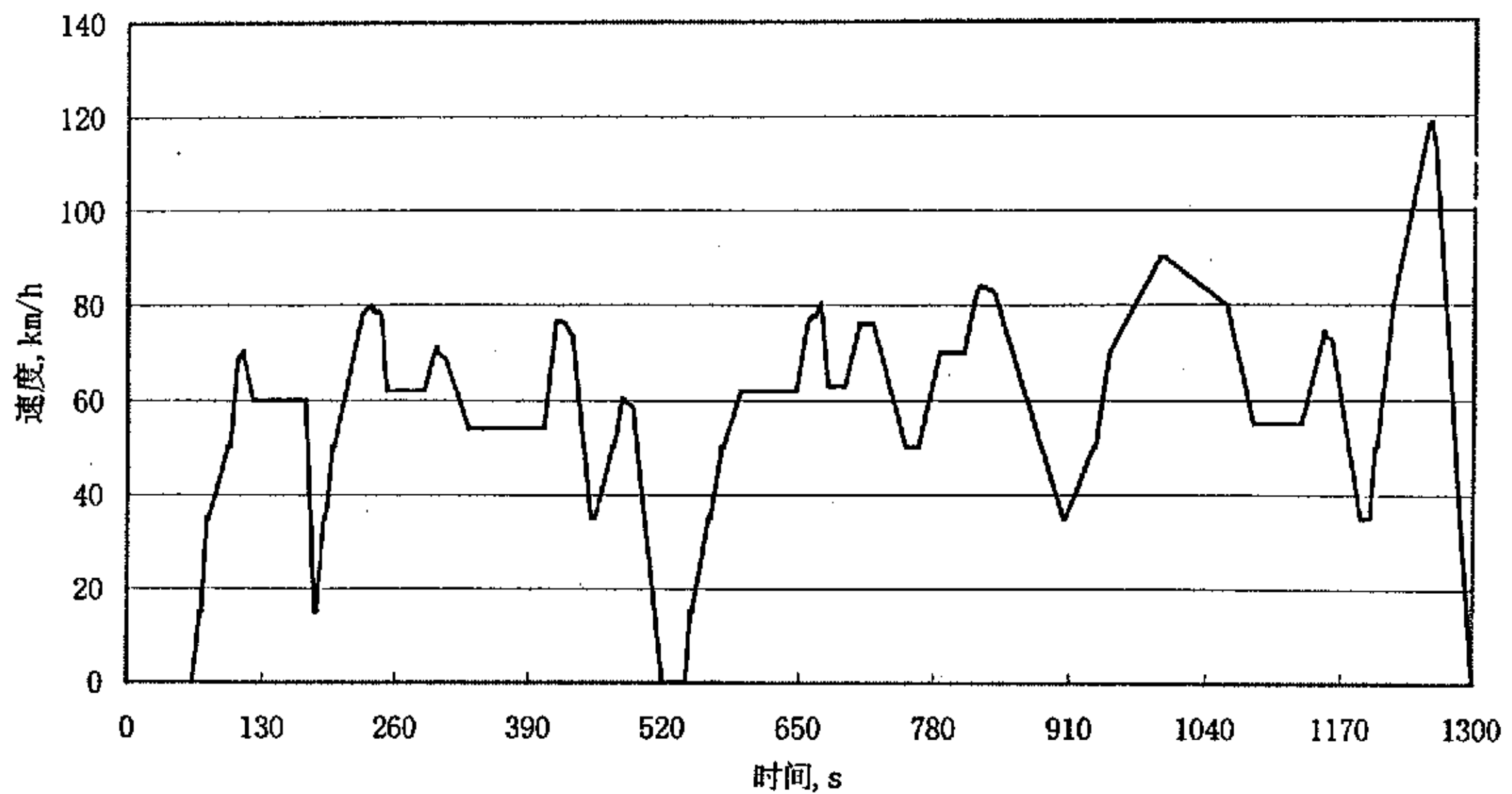


图 6-6 乘用车城市典型快速循环曲线

乘用车城市典型循环曲线参数如表 6-4 所示。模态化后的曲线其最大加速度和最小加速度绝对值均有明显下降。

表 6-4 乘用车城市循环曲线参数

特征项	单位	城区循环曲线	快速循环曲线
试验时间 T	s	1195	1300
行程 S	km	7.661	20.665
平均速度 $v_m$	km/h	23.079	57.225
最高速度 $v_{max}$	km/h	74.0	118.43
最大加速度 $a_{max}$	$m/s^2$	1.3889	1.1111
最小加速度 $a_{min}$	$m/s^2$	-1.3333	-1.3889
平均正加速度 $aa$	$m/s^2$	0.4736	0.3156
平均负加速度 $ad$	$m/s^2$	-0.5010	-0.3126
怠速比例 $P_i$	%	25.188	6.692

## 6.2 城市公交车行驶工况

### 6.2.1 各次公交车车辆行驶工况比较

综合公交车的六次调查结果情况，其特征数据见表 6-5 和表 6-6。

表 6-5 六次公交车速度区间分布数据

特征值	北京市公交车工况		上海市公交车工况		广州市公交车工况	
	第 3 次	第 4 次	第 2 次	第 6 次	第 1 次	第 5 次
Pi	26.97	27.06	28.80	28.45	27.83	27.75
P <sub>0_10</sub>	14.37	14.40	17.36	17.75	18.96	16.47
P <sub>10_20</sub>	15.35	15.36	18.50	20.75	20.00	18.64
P <sub>20_30</sub>	18.83	18.85	18.56	19.98	18.52	19.13
P <sub>30_40</sub>	15.32	15.30	11.08	9.90	10.77	13.04
P <sub>40_50</sub>	6.88	6.82	4.20	2.61	3.05	4.21
P <sub>50_60</sub>	1.93	1.90	1.28	0.53	0.72	0.69
P <sub>60_70</sub>	0.32	0.30	0.22	0.04	0.14	0.08
P <sub>70</sub>	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Pa	26.36	26.35	27.91	25.48	26.60	26.29
Pd	18.33	18.31	22.01	22.01	22.02	19.89
Pc	28.34	28.29	21.28	24.05	23.56	26.07

表 6-6 六次公交车运动描述特征值数据

特征值	第 3 次	第 4 次	第 2 次	第 6 次	第 1 次	第 5 次
T	139.82	139.34	97.36	109.05	98.20	131.23
Ta	36.85	36.71	27.18	27.79	26.12	34.50
Td	25.63	25.51	21.42	24.00	21.62	26.10
Tc	39.62	39.41	20.72	26.23	23.13	34.21
Ti	37.71	37.71	28.04	31.03	27.33	36.42
S	0.67	0.66	0.40	0.41	0.38	0.55
Vmax	86.84	75.75	70.26	64.34	66.06	67.48
Vm	17.23	17.16	14.66	13.64	14.03	15.06
Vmr	22.85	22.80	19.91	18.44	18.50	20.11
Vsd	3.64	3.64	3.29	3.04	2.90	3.28
amax	3.06	2.86	2.90	3.04	3.45	1.56
aa	0.38	0.38	0.48	0.48	0.47	0.41
amin	-3.85	-3.85	-3.50	-2.97	-3.88	-2.50
ad	-0.54	-0.54	-0.60	-0.54	-0.56	-0.54
asd	0.35	0.35	0.43	0.40	0.41	0.36

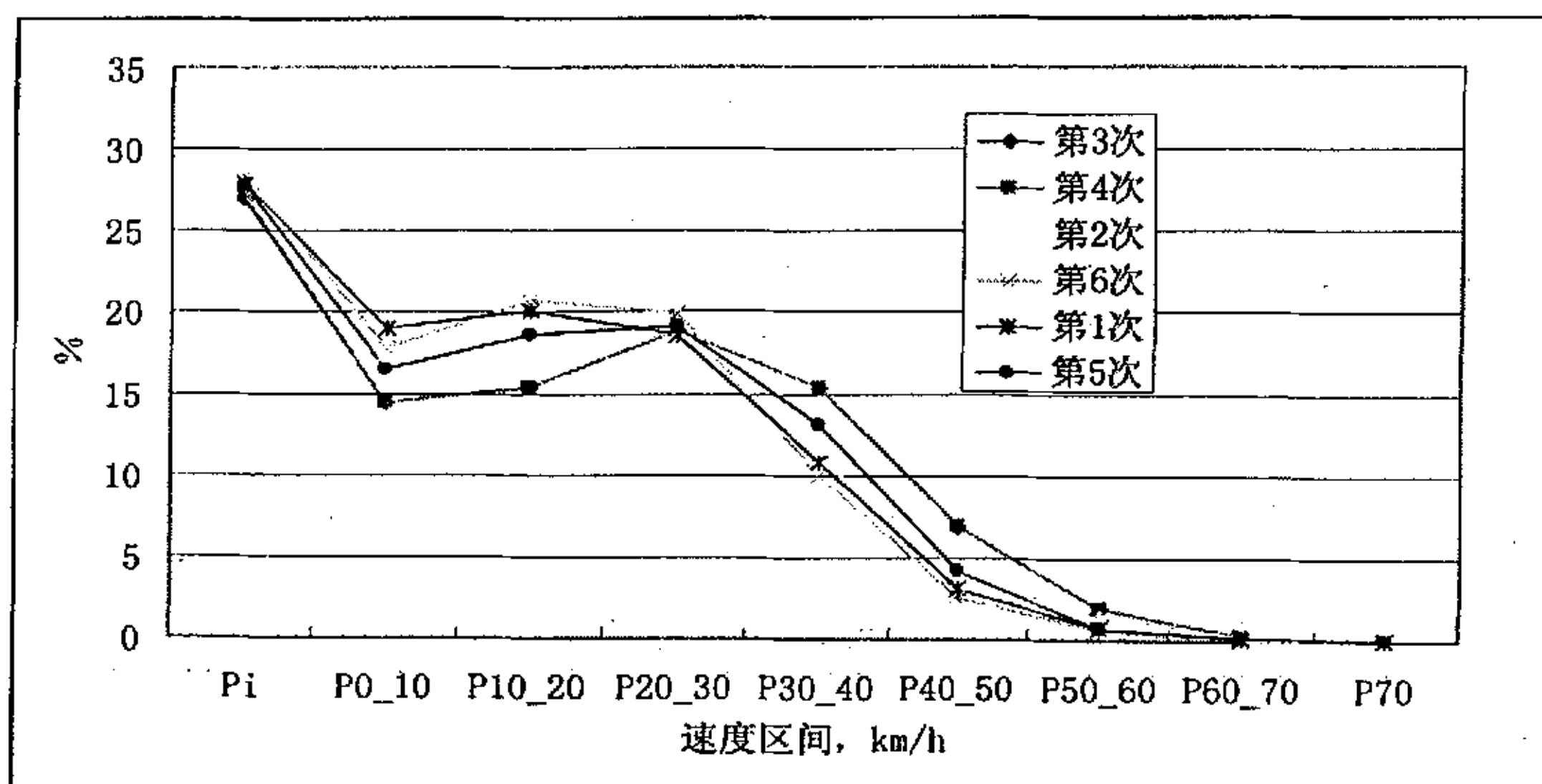


图 6-7 速度区间分布对比图

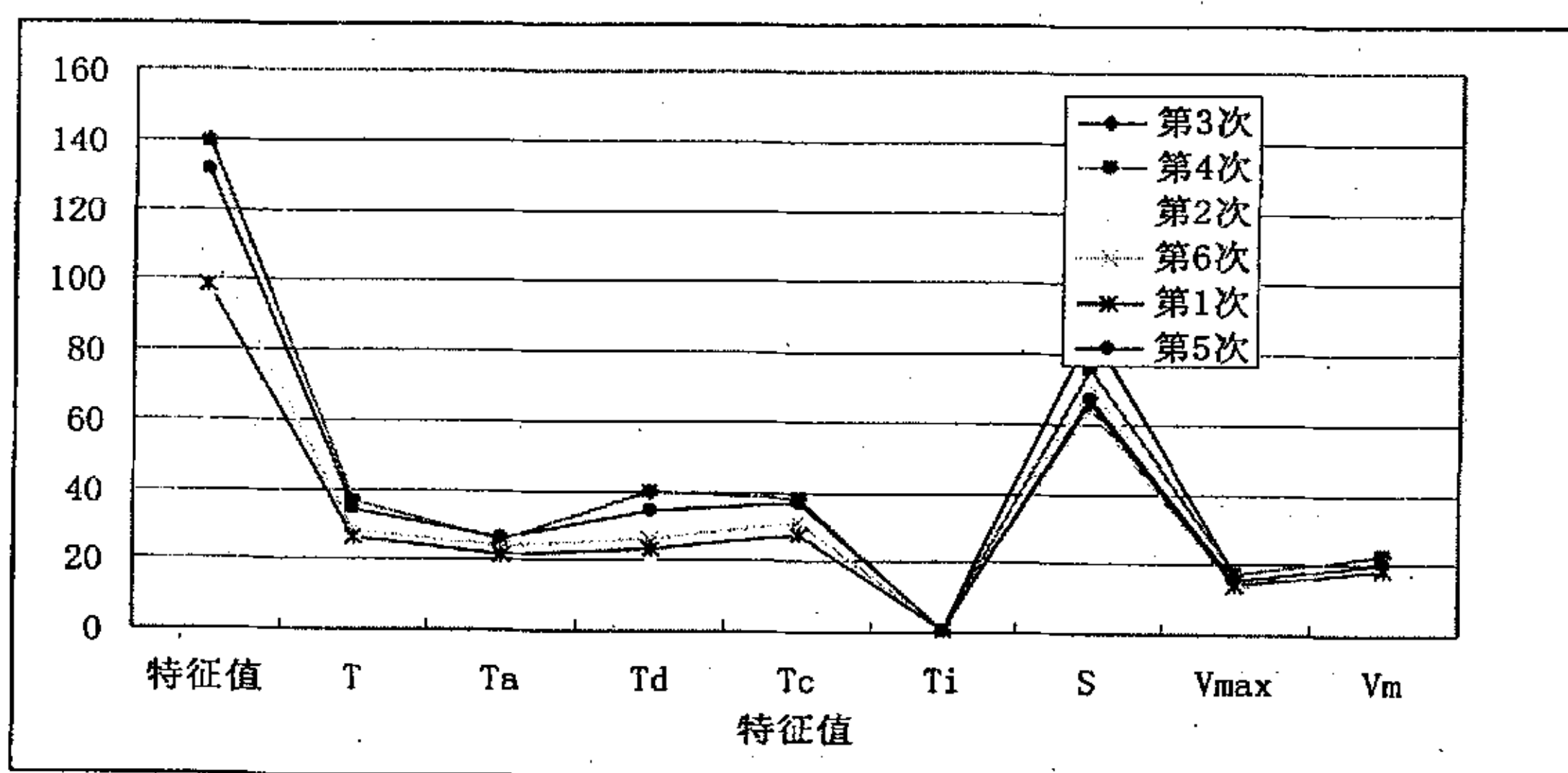
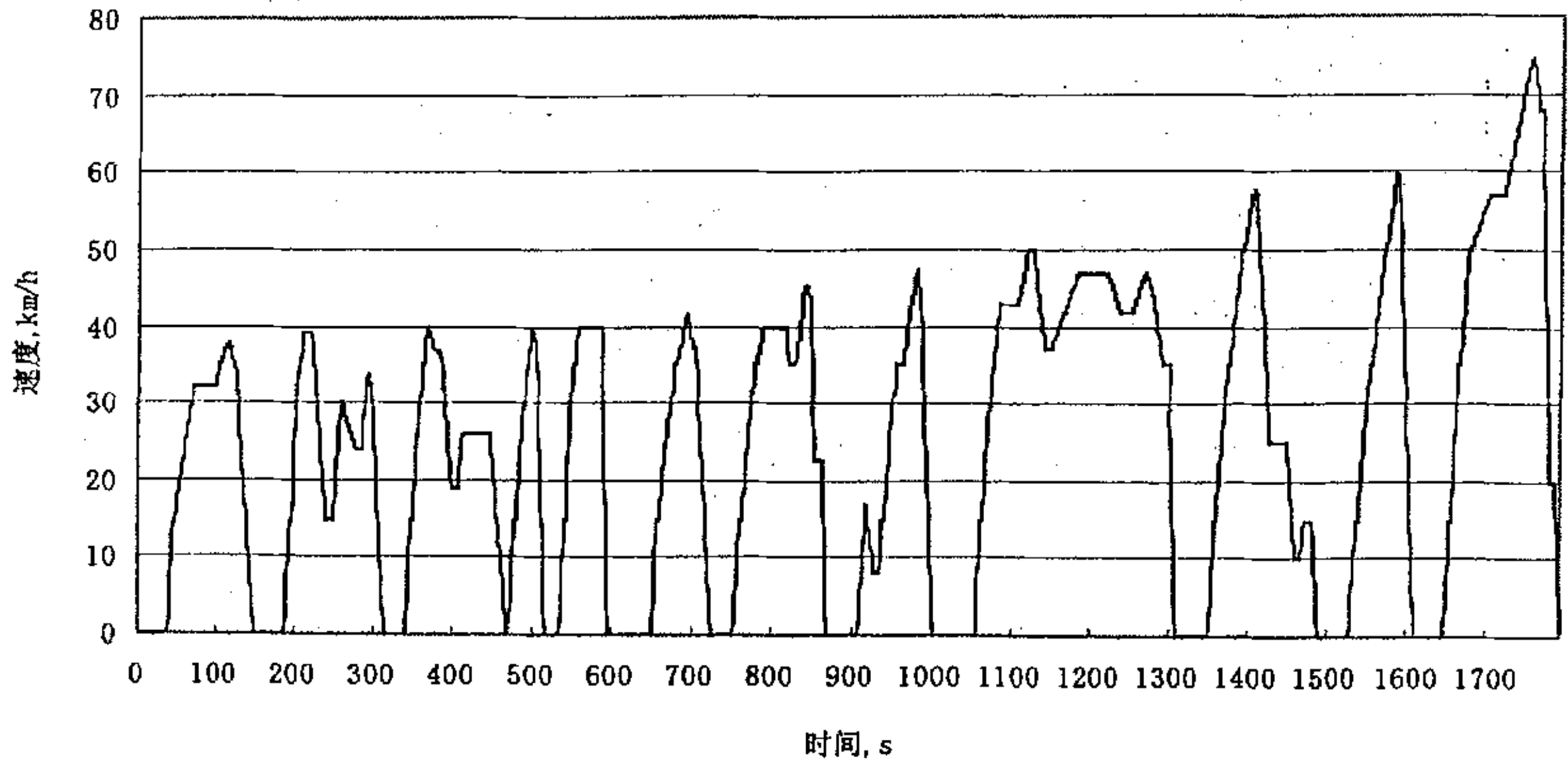


图 6-8 描述特征值对比图

图 6-7 和图 6-8 更直观地表现了显示了那些差异。具体表现在：

- 三个城市工况多参数分布形态差异不大。
- 调查和统计结果符合各个城市的公共交通流特征，怠速比例基本一致。
- 比较历年来各主要相关研究结果，发现有相似之处：平均速度相近。也证实了车辆运行并未得到根本改善。
- 各个城市不同季节公交车辆运行特征稍有不同，不同城市之间的差异不可避免。



6-9 典型城市公交车辆快速循环曲线

考虑到三个城市的地域分布和车辆构成情况的差异，以及关键因素如平均速度、平均运行速度以及速度区间分布等，在三个城市之间以及三个城市与平均之间的结果还是具有较强的可比性。我们认为具备构建一个共同车辆行驶工况的基础。

## 6.2.2 典型工况的构成

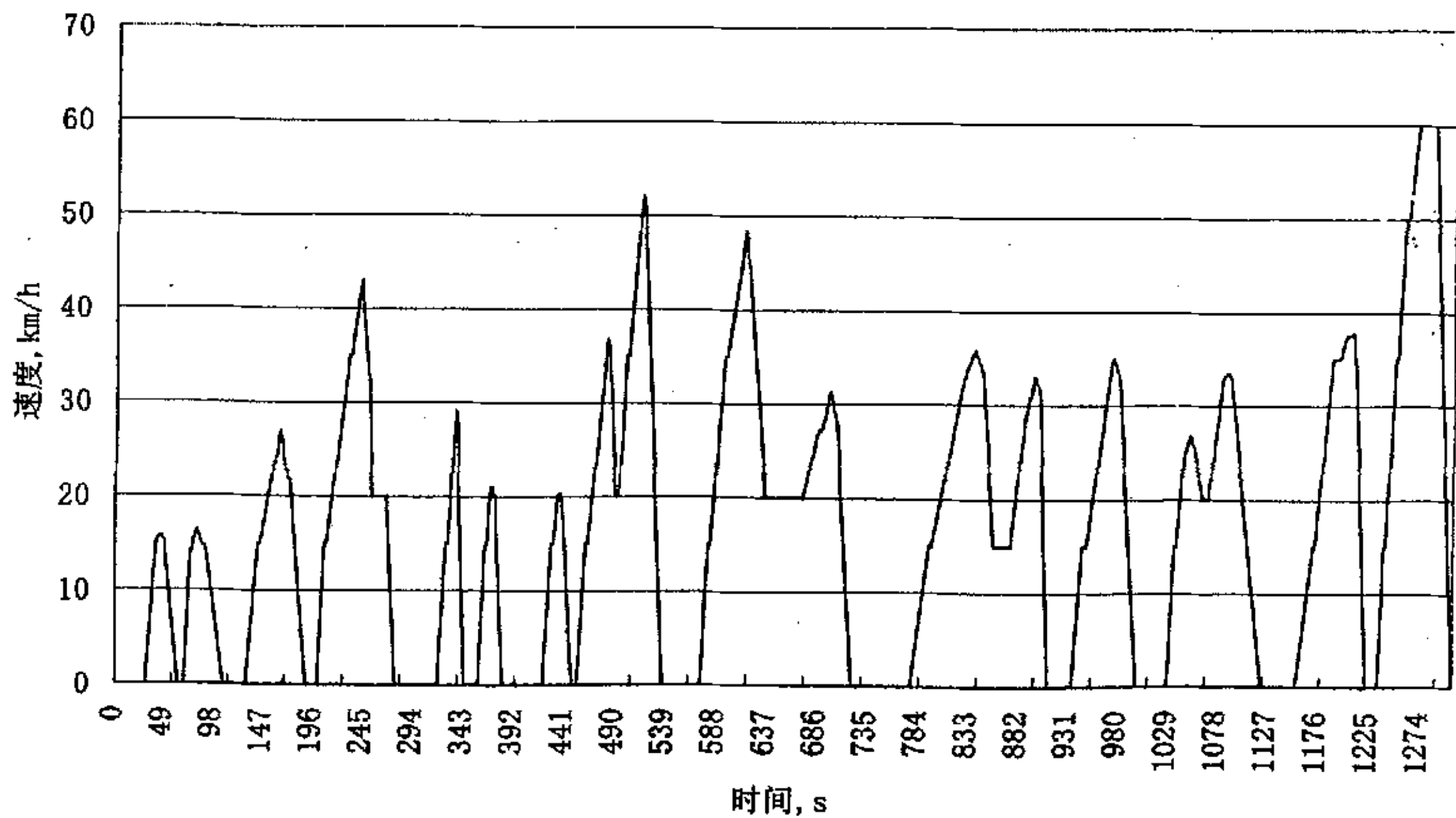


图 6-10 典型城市公交车辆模态循环曲线

应用 *VDCAP* 软件以总体数据库为基础，逐步解析车辆运动学数据，构

建由运动学片段按照指定条件组合出的循环曲线。处理过程与前述乘用车一致，在此将直接给出经过修订并加入换档的循环曲线，如图 6-9、图 6-10 所示（因为城区对公交限速，此处最大速度取为 60km/h）。

公交车城市典型循环曲线参数如表 6-7 所示，模态化后的曲线的最大加速度和最小加速度绝对值均有明显下降。

表 6-7 公交车城市循环曲线参数

特征项	单位	城区循环曲线	快速循环曲线
试验时间 T	s	1304	1791
行程 S	km	5.840	12.225
平均速度 $v_m$	km/h	16.123	24.574
最高速度 $v_{max}$	km/h	60.0	74.52
最大加速度 $a_{max}$	$m/s^2$	0.8333	0.8333
最小加速度 $a_{min}$	$m/s^2$	-1.2344	-1.2753
平均正加速度 $a_a$	$m/s^2$	0.3133	0.3133
平均负加速度 $a_d$	$m/s^2$	-0.4386	-0.4433
怠速比例 Pi	%	28.758	23.730

### 6.2.3 公交循环曲线及其分档简述

为了形成可以实际操作的公交行驶工况，基于实车调查获得的运动学片段构建出的工况曲线，进行了档位拆分和曲线修订。

#### 6.2.3.1 档位拆分依据

经过对大量运动学片段的分析，可以发现车辆行驶中换档的规律（当然也有不少行驶曲线看不出换档痕迹），从而确定合理的换档速度。实际车辆行驶过程中的某一运动片段如图 6-11 所示。根据车辆的实际操作状态，参照现行标准运转循环曲线的挡位操作，形成了可实际操作的运转循环曲线。

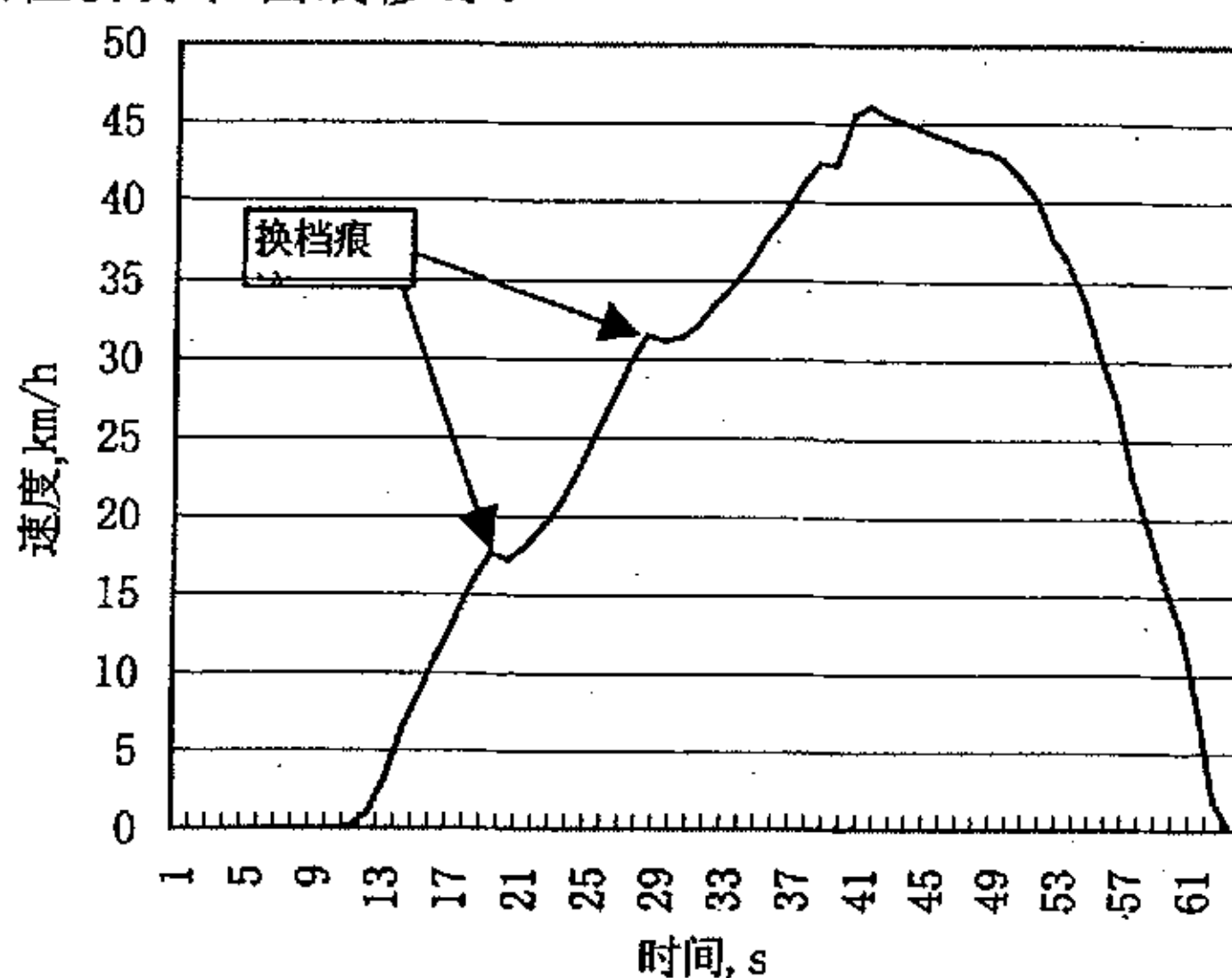


图 6-11 行驶片段中的换档痕迹



### 6.2.3.2 运转循环曲线修订

可操作运转循环曲线的某片段如图 6-12 所示。曲线修订既要满足操作性要求，又要尽量与构建工况时产生的曲线相一致，以便反映车辆实际运行中动态的加减速过程。考虑大车实际运行需要，以二档起步，换档速度依次定为 15km/h、35km/h、50km/h。在减速过程中的换档，虽然实际驾驶过程中一般都是空档滑行，为反映车辆性能，未做空档处理，减速中摘档时速度为 10km/h。图 6-12 中标记说明：

K—离合器脱开； $K_1$ 、 $K_2$ —离合器脱开，变速器在一档或二档。

PM：空挡；R：怠速。

2—二档；3—三档；4—四档；5—五档。

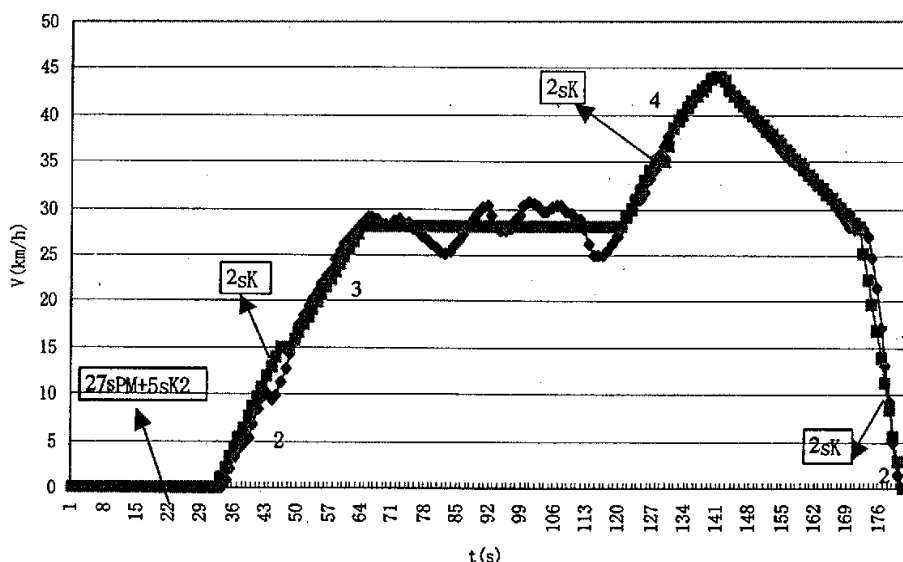


图 6-12 运转循环曲线中的某一片段

图 6-12 中黑色曲线为构建出的工况曲线，是车辆实际行驶过程中记录下的速度曲线。洋红色曲线是档位划分后的可操作运转循环曲线，应用于实际的试验过程中。

## 6.3 与国外行驶工况的比较

### 6.3.1 乘用车行驶工况对比分析

将我国自行开发的乘用车（轻型车）车辆行驶工况与国际上常用的三种认证工况比较，如表 6-8 所示，其中美国 FTP75 中有 600s 热浸怠速，在此之前即为 FTP72 部分单个循环持续 1372s。由表分析，我国城市车辆四种行驶

模式介于三种认证工况之间，加速度绝对值大于欧盟日本的模态型式而小于美国的瞬态型式，用欧洲的 ECE+EUDC 作为我国的测试规范是不合适的。本文结果特征数据与已往研究相近<sup>[43,44]</sup>。

### 6.3.2 城市公交车行驶工况对比分析

图 6-13 是我国城市公交车行驶工况与国外一些大城市公交车行驶工况的四种运行模式各自所占的比例<sup>[45]</sup>对比图。分析可知，我国公交车工况的怠速比例在 7 个城市中适中，城区部分为 28.76%，快速部分为 23.73%，怠速比例最大的城市是东京，达到了 44%；我国快速公交工况的匀速比例也较大，其匀速比例在这几个城市中是最大的，为 33.67%；加减速比例最大的是纽约，其次是莫斯科，其公交车加减速频繁。总体来说，我国城市公交车的四种运行模式介于其它六个城市之间。

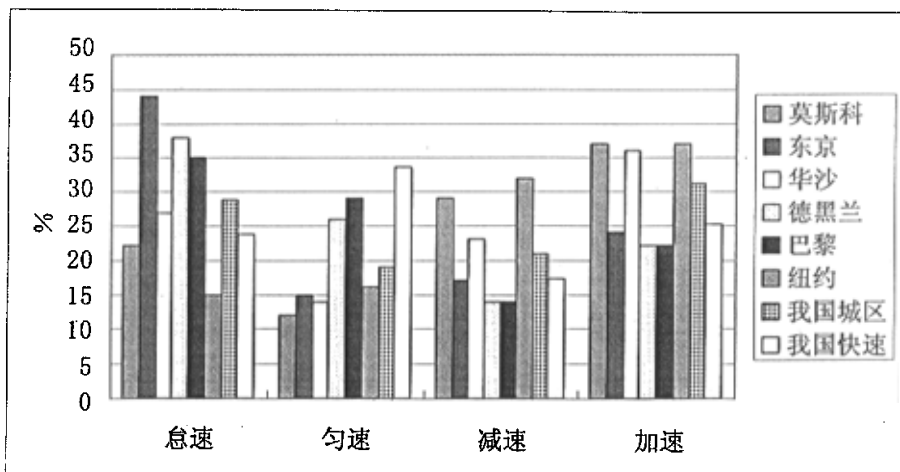


图 6-13 与其它城市公交车行驶模式的比较

## 6.4 本章小结

本章是车辆行驶工况研究的结果，主要论述：

- (1) 经过数据的分析与处理，比较了不同城市乘用车和公交车的两轮试验共六次行驶特征；
- (2) 给出行驶工况的研究结果，表达形式为速度时间曲线；
- (3) 作为试验用循环曲线，必须对行驶曲线进行实用处理和档位划分，以形成统一的具有较好重复性的试验技术；
- (4) 将我国自行开发的车辆行驶工况与国际上常用认证工况进行了对比分析。

表 6-8 乘用车（轻型车）工况技术统计比较表

技术统计		循环模式	欧洲循环	美国循环	日本循环	我国典型城区	我国城市快速
			ECE+EUDC	EPA	10-15	CCDC	CCEDC
循环组成简单描述			4个基本市区循环, 1个市郊循环	1个市区驱动程序, 1个高速公路驱动程序	3个10工况模型, 1个15工况模型	10个城区运动学片段	2个快速路运动学片段
理论总行程(km)/试验总时间(s)			11.007 / 1180	28.4 / 2137	4.165 / 636	7.661 / 1195	20.665 / 1300
市区循环行程(km)/市区循环时间(s)			4.052 / 780	12.0 / 1372	1.922 / 405	1195 / 7.661	—
市郊循环行程(km)/市郊循环时间(s)			6.955 / 400	16.4 / 765	2.173 / 231	—	20.665 / 1300
市区循环	总速(s)/百分比(%)		240 / 30.77	242 / 17.64	108 / 26.67	301 / 25.19	—
	加速(s)/百分比(%)		168 / 21.54	564 / 41.11	99 / 24.44	286 / 23.93	—
	匀速(s)/百分比(%)		236 / 30.26	76 / 5.54	96 / 23.70	325 / 27.20	—
	减速(s)/百分比(%)		136 / 17.44	490 / 35.71	102 / 25.19	283 / 23.68	—
	平均车速/最高车速(km/h)		18.77 / 50.0	31.49 / 91.2	17.71 / 40.0	23.097 / 74.0	—
	最大加速度/最大减速度(m/s <sup>2</sup> )		1.04 / -0.97	1.467 / -1.467	0.79 / -0.79	1.389 / -1.333	—
市郊循环	总速(s)/百分比(%)		40 / 10.00	4 / 0.52	75 / 32.47	—	87 / 6.69
	加速(s)/百分比(%)		109 / 27.25	318 / 41.57	67 / 29.00	—	343 / 26.38
	匀速(s)/百分比(%)		209 / 52.25	107 / 13.99	45 / 19.48	—	563 / 43.31
	减速(s)/百分比(%)		42 / 10.50	336 / 43.92	44 / 19.05	—	307 / 23.62
	平均车速/最高车速(km/h)		62.60 / 120.0	77.18 / 96.4	33.86 / 70	—	57.225 / 118.43
	最大加速度/最大减速度(m/s <sup>2</sup> )		0.69 / -1.39	1.467 / -1.467	0.77 / -0.83	—	1.111 / -1.389

## 第7章 总结与展望

车辆行驶工况要符合本国家或地区车辆行驶特征，要与所在国家或地区交通状况相协调。我国汽车行业多年以来尚没有符合自己国情的行驶工况，本文的目的就是开发我国车辆实际行驶工况。

### 7.1 本文总结

在 2003-2004 两个年度，经过对三个城市、两轮的车辆实际行驶工况调查研究、数据解析和对比研究工作，对车辆行驶工况的研究方法、理论和我国的实际城市行驶工况有了进一步的认识，积累了丰富的经验。全面完成三个城市、两轮的调查；获得了广州市、上海市、北京市乘用车、公交车行驶特征，并开发了中国典型城市车辆行驶工况；进行工况特征的研究、对比工作。

本文完成的主要工作：

查阅了大量国内外车辆行驶工况方面的技术文献资料，总结了目前存在的型式与特征，对国际上常用的三种认证工况做了细致的分析与研究。

在对我国典型城市（北京、上海和广州）主要道路进行交通流量调查分析的基础上，完成试验道路的优化选择，并实施了道路实际行驶工况的试验调查。

阐述了车辆行驶工况车载测试系统，基于现有 FLOWTRIC 油耗采集系统以及非接触速度传感器测试系统，专门开发速度跟踪系统，可以任意设定行驶工况，适用于行驶工况的评价。

完整提出并实施了车辆行驶工况的开发方法，基于车辆运动学片段分析，应用主成分分析、动态聚类分析等数据分析理论，获得了符合我国城市交通特征的车辆行驶工况。

基于实际道路上形成的车辆行驶工况，研究了工况的实用化（试验用运转循环），并与目前国外采用的认证行驶工况进行了对比分析。

### 7.2 存在的问题以及后续研究建议

此项研究工作的经历表明，无论是在交通流调查、试验路线的选择和试验实施，还是在数据的解析、工况开发及验证，均和国外先进水平相当，并取得了许多有价值的方法。但是仍然有不少问题需要深入研究：

### ● 持续改进

我国城市的发展在处在一个转型期，城市规划和建设都不太稳定。通过对工况的深入研究，我们发现行驶工况具有典型的道路交通流特征。研究表明，城市内不同的道路等级对应着不同的交通流量、平均车速，在不同的道路等级上，车辆的行驶状况各有特点；在每一道路等级中，不同的交通强度必然对应着不同的行驶工况。城市建设以及车辆保有量的增加改变着车辆的实际行驶工况，需要对真实的车辆行驶状况持续评估并加以修正。

### ● 如何应用

最终的工况反映的是车辆在道路运行中所有的运动学水平以及这些水平所占的比例，表达的型式是车速—时间曲线。其最终目的可能是多方面的：确定污染物排放量和燃油消耗量；对新车型进行验证和校准，评估各种技术，甚至测定在交通控制方面的风险等。除了计算机仿真外，都需要进行实用化处理，形成可实际操作的测试规范，这就需要深入开展实用化规范化研究，对档位、误差等进行科学界定。目前国内测试大客车关键性能的技术设备尚不完善，比较可行而有效的测试是在试验场地进行，这样如何使用工况以及进行测试评价就出现一系列的问题（如工况的复现、测试方法、测试数据的处理和结果的表现形式等）。

### ● 国际交流

国际上正在进行混合动力标准的修订，但是关于大客车尚没有统一的认定，正处于整合之中。随着汽车工业世界市场的发展，车辆的认证和检测都需要和国际接轨，作为车辆行驶工况同样也需要与国际标准衔接。

## 参考文献

- [1] Michel André. Driving Cycles Development: Characterization of the Methods. SAE961112
- [2] Andre,M., A.J.Hickman, D.Hassel, R.Joumard. Driving cycles for emissions measurements under European Conditions. SAE Technical Paper Series 950926
- [3] Beckley, Smith F.,Meyer, Jr. and W.A.p. (Gulf Research & Development Co.), Ayres, R.U.(international research & Technology Corp.).A statistical Approach to Describing Vehicular Driving Cycles.SAE690212
- [4] Bata,R.et.al. Heavy Duty Testing Cycles: Survey and Comparison, SAE986082
- [5] Watson,H.C. Vehicle driving patterns and measurement methods for energy and emissions assessment. Bureau of Transport Economics. Australian Government Publishing Service, Canberra, Australia.1978.
- [6] 詹兴泉. 车用催化转化器评价技术及耐久试验方法间相关性研究:[硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学汽车学院, 2002
- [7] 欧盟理事会汽车排放控制指令 70/220/EEC(98/69/EC). 大众汽车(中国)投资有限公司与中国汽车技术研究中心联合出版, 2001.7
- [8] 王建昕, 傅立新, 黎维彬编著. 汽车排气污染治理及催化转化器. 北京: 化学工业出版社, 2000.5, 42
- [9] 李兴虎编著. 汽车环境保护技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.2, 159
- [10] 中国环境科学研究院. 中国城市汽车行驶工况和污染物排放系数测定研究. 国家环保总局科技发展计划项目研究报告 96309, 1999.3
- [11] 杨延相, 蔡晓林等. 天津市道路汽车行驶工况的研究. 汽车工程, 2002, 2
- [12] 赵慧, 张镇顺, 熊永达. 香港城区汽车行驶工况的研究. 环境科学学报.2000.3
- [13] 何仁, 舒昌洪. 汽车行驶工况的统计分析, 江苏理工大学学报, 1998, 第6期: 1
- [14] 李孟良等, 基于催化转化器起燃温度特性的道路车辆排放性能研究. 汽车工程 2002, (3)
- [15] 李孟良, 李涓, 方茂东等. 道路车辆实际行驶工况解析方法研究. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 27(1)
- [16] 杜青, 杨廷相等. 机动车排放测试循环特性分析及适用性评价. 内燃机学报, 2002 (5)
- [17] 刘希玲, 丁焰. 我国城市汽车行驶工况调查研究. 环境科学研究 2000(3)
- [18] 马志雄, 张富兴, 李孟良等. 开发车辆行驶工况的方法研究. 中国汽车工程学会内燃机分会, 中国内燃机学会联合学术会议论文集, 2003
- [19] Kruse,Ronald E.,Huls,ThomasA. Development of the federal urban driving schedule. SAE730553
- [20] Andre, M. In Actual Use Car Testing: 70000 Kilometers and 10000 Trips by 55 French Cars under Real Conditions.SAE Technical Paper Series 910039

- [21] 马志雄. 典型城市公交车实际行驶工况的开发及研究: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学汽车学院, 2003.11
- [22] 吴晓栋. 基于上海市道路运行条件的并联式混合动力汽车部件选型及控制策略设计研究: [博士学位论文]. 上海: 同济大学汽车学院, 2003.8
- [23] 马志雄, 李孟良, 朱西产等. 乘用车实际行驶工况开发方法的研究. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2004, 26(3)
- [24] 李江. 交通工程学. 北京: 人民交通出版社, 2002.7
- [25] 王炜, 杨新苗, 陈学武等著. 城市公共交通系统规划方法与管理技术. 北京: 科学出版社, 2002
- [26] 马志雄, 李孟良, 朱西产等. 公交车行驶工况开发过程中试验线路的提取研究. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004, 28 (4): 515
- [27] Hans Bruneel. Heavy Duty Testing Cycles Development:A New Methodology. SAE011860
- [28] Hanna Bratt, Eva Ericsson. Measuring vehicle driving patterns—estimating the influence of different measuring intervals. Lund University Department of Technology and Society
- [29] Swiss Agency for Environment,Forests and Landscape(SAEFL). Real-world driving cycles for emission measurements: ARTEMIS and Swiss cycles(final report),2001
- [30] 精通 MATLAB6.5 版. 张志涌等编著. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.3
- [31] 盛骤等. 概率论与数理统计. 北京: 高等教育出版社, 1996.3
- [32] 李庆扬等. 数值计算原理. 北京: 清华大学出版社, 2000.3
- [33] 范金城, 梅长林编著. 数据分析. 北京: 科学出版社, 2002
- [34] 何晓群编著. 多元统计分析. 北京: 中国人民大学出版社, 2004.4
- [35] 《现代应用数学手册》编委会. 现代应用数学手册·概率论与随机过程卷. 北京: 清华大学出版社, 1999
- [36] N.Dembksi, Y. Guezennec and A.Soliman. Analysis and Experimental Refinement of Real-World Driving Cycles. SAE010069
- [37] Kent,J,H.,Allen,G.H.,Rule,. A driving cycle for Sydney-Transport Research, 1978
- [38] Lansell,S.R., Waston,H.C., Milkins,E.E. Development of a Melbourne Cold Start Driving Cycle-Department of Mechanical and Industrial Engineering. University of Melbourne, Australie -Report T59/83,1986
- [39] R.E. Kruse and T.A. Huls. Development of the Federal Urban Driving Schedule. U.S. Environmental Protection Agency, SAE Paper No. 730553, May, 1973
- [40] Kuhler and Karstens. Improved Driving Cycle for Testing Automotive Exhaust Emissions. SAE paper 780650, 1978
- [41] 李东军, 郁增德等. 中国典型城市车辆行驶状况的测试统计. 汽车技术, 1998, 第 3 期: 13
- [42] 周溪召, 范炳全. 动态路线行程时间研究. 上海理工大学学报, 1999, 第 4 期: 385
- [43] 杨孝纶. 未来城市的动力明星—混和动力. 中国汽车工程学会内燃机分会, 中国内燃机学会联合学术会议论文集, 2003



## 致 谢

研究生生活很快就要结束了，我的论文得以顺利完成是与老师、同学、同事和亲人的支持、关心分不开的。

首先感谢我在武汉理工大学的导师乔维高副教授，乔老师对我的论文提出了很多宝贵的意见，使我的论文更加完善。

本文是在中国汽车技术研究中心李孟良高级工程师的指导下直接完成的。在我论文撰写期间，李高工为我做了很多指导帮助工作，对我个人生活也甚为关心。在论文完成之际，谨向李高工致以衷心的感谢！

感谢中国汽车技术研究中心的首席专家朱西产博士，朱博士对学问的严谨、认真以及专业方面的造诣给我留下了深刻印象。在我论文写作期间，朱博士提了很多建设性的意见。同时，朱博士对我的生活也十分关心。

感谢武汉理工大学我的师兄马志雄同学，同班艾国和同学，为了使我的论文能顺利撰写，他们做了大量的工作。

感谢华南理工大学交通学院的靳文舟教授和张全同学，以及同济大学汽车学院杜爱民教授和步曦同学，他们为试验的顺利完成做了大量的工作。

感谢中国汽车技术研究中首席专家方茂东研高、李广霞、冯琦等同事，以及武汉理工大学的徐勇、廖旭晖、李发宗、叶智博等同学。

还要特别感谢我的家人和亲友，是他们对我学习的一贯支持，才使我顺利完成研究生学业。