

国家自然科学基金资助课题

汽车
动力性
燃料经济性
模拟计算方法及
应用

何 仁 著



机械工业出版社

U461.8

431372

H34

国家自然科学基金资助课题

汽车动力性燃料经济 性模拟计算方法及应用

何 仁 著



机械工业出版社

11/15

本书着重叙述了应用计算机计算和研究汽车动力性燃料经济性的方法及应用,详细介绍了汽车动力性燃料经济性的评价方法、模拟计算方法,汽车多工况和实际行驶工况的模拟方法和研究方法,汽车结构参数和使用因素与汽车动力性燃料经济性间关系的分析方法和影响规律,汽车动力传动系统合理匹配与参数优化的理论和方法以及这些方法在实际中的应用。

本书讲究方法,注重实用,既可供从事汽车设计和研究的技术人员参考,也可用作汽车设计专业本科生、研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

汽车动力性燃料经济性模拟计算方法及应用/何仁著.

北京:机械工业出版社,1996.4

ISBN 7-111-05029-0

I. 汽… I. 何… II. 汽车-动力性-燃料消耗-计算机模拟-计算方法 N. U473

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第22567号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:孙慧波 杨民强 版式设计:王颖

责任校对:姚培新 封面设计:姚毅 责任印制:王国光

机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1996年5月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₃₂·4.125印张·1插页·88千字

0 001—1 000册

定价:8.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

汽车动力性与燃料经济性是汽车最重要、最基本的性能。通常对于动力性与燃料经济性水平，需要在完成汽车道路试验之后才能给予评价。这样做不但周期长、成本高，而且在产品设计阶段使整车及各总成方案的确定、结构参数的选取、传动系与发动机的匹配等都带有一定的盲目性，从而造成人财物力的浪费。

因此，为提高设计质量，缩短研制周期，在总体布置设计阶段，就应对汽车动力性与燃料经济性进行预测。近20年来，在国外，随着计算机的广泛应用，计算机模拟计算方法已成为汽车总体方案设计的有力工具。在我国，计算机模拟计算方法的应用尚处于起步阶段，随着计算机的普及，计算机模拟计算方法在汽车设计中的应用所发挥的作用将越来越大。

从1984年起，作者开始从事汽车动力性与燃料经济性模拟计算方法的研究，并将有关理论方法应用于产品开发，取得了初步成果，并先后发表了二十余篇有关学术论文。近年来通过为汽车专业本科生开设“汽车动力性与燃料经济性模拟计算方法”专题讲座，逐步形成了本书稿。

限于作者水平，书中难免会有错误或不当之处，恳切希望读者批评指正。

何 仁

1995年10月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 汽车动力性燃料经济性的评价	6
第一节 汽车动力性的评价	6
第二节 汽车燃料经济性的评价	7
第三节 汽车动力性燃料经济性的综合评价	9
第二章 汽车动力性燃料经济性模拟计算方法	18
第一节 发动机数学模型的建立	18
第二节 汽车换档规律的处理	22
第三节 汽车动力性模拟计算方法	23
第四节 汽车燃料经济性模拟计算方法	
第五节 汽车多工况燃料经济性模拟计算方法	32
第三章 汽车行驶工况的随机模拟	37
第一节 驾驶员模糊控制模型的建立	38
第二节 道路车速限制模型的建立	47
第三节 汽车行驶工况的随机模拟与统计分析	54
第四章 结构使用因素与汽车动力性燃料经济性间 关系分析	62
第一节 发动机使用特性的研究	62
第二节 确定发动机最佳经济区的数学方法	71
第三节 传动系参数与动力性燃料经济性间关系分析	77
第四节 结构参数对动力性燃料经济性的灵敏度分析	82
第五节 汽车加速滑行模式的模拟与优化	86

第五章 汽车动力传动系统的最优匹配与参数优化	95
第一节 汽车动力传动系与汽车使用工况的匹配	95
第二节 发动机性能指标的优化	100
第三节 汽车动力性与燃料经济性模糊优化方法	106
第四节 汽车驱动桥速比的优化	111
第五节 汽车传动系参数的模糊优化	115
参考文献	121

绪 论

人类的生活、经济、政治、文化和军事活动中，都含有人的出行和物的运输环节。随着社会的发展，出行与运输的范围越来越广，频率越来越高，节奏越来越快。所以人类对出行和运输所用的工具特别重视，不断地开发新品种。汽车就是人类开发出的杰出产品之一，并已成为人类社会活动中难以离开的必需品。进入20世纪以来，全世界的汽车保有量愈来愈多，特别是第二次世界大战以后汽车保有量增加很快，1950年为6897万辆，而在1986年达到5.033亿辆，预测到2000年将达到6.785亿辆。在汽车运输成本中，燃料消耗占20%~30%，而目前汽车发动机使用的仍是石油燃料，随着国民经济的进步和交通运输的发展，能源供给日趋紧张。因此，提高汽车的运输生产率，降低汽车的燃油消耗是目前汽车工业急需解决的重要课题之一。

自70年代世界范围的能源危机发生后，各国汽车界都被迫努力降低燃油消耗，围绕着汽车和发动机主要采取了以下措施：

1. 提高汽车行驶效率

(1) 减少行驶阻力——通过改进车身造型、改善车身结构来减少迎风面积和空气阻力；通过改进轮胎结构减少滚动阻力。

(2) 底盘轻量化——采用新型轻质材料，通过可靠性设计技术使整车质量轻量化，使各总成部件、附件紧凑；前置

发动机、前轮驱动化。

(3) 提高驱动效率——采用自动或无级变速系统,减少轴承与齿轮的摩擦损失,提高传动系统的传动效率。

2. 提高发动机性能

(1) 改进现有发动机——通过改善燃烧,减少冷却损失以提高热效率;采用可变气门定时、变排量技术以改善部分负荷性能;通过降低运转部件的摩擦损失和发动机辅助设备的损失以提高机械效率;采用汽油喷射、电子点火和微机控制使发动机工作过程最佳化。

(2) 提高能源利用率——利用涡轮增压回收废气能量;利用储能装置(飞轮)回收制动能量;提高附属装置(空调、电器装置等)的效率。

3. 开发利用新型动力

(1) 开发新一代发动机——研制高效率循环发动机;研制氢气发动机;研制利用电能的电动车;采用混合动力驱动系统。

(2) 利用代用燃料——采用外燃机燃烧低质燃油;利用液化天然气、石油气等燃料;利用乙醇、甲醇等合成燃料。

(3) 利用新能源——研制高效太阳能电池;应用氢气储存法和氢气混合燃烧法。

4. 优化匹配动力传动系统

(1) 发动机的选型——汽油机与柴油机的选择;发动机使用特性的选择;发动机排量的选择。

(2) 传动系型式及参数的选择——变速器的型式、速比范围、档位数、速比间隔;液力变矩器型式及尺寸;驱动桥的类型及尺寸。

汽车动力性与燃料经济性的好坏,在很大程度上取决于

发动机的性能和传动系统型式及参数的选择，即取决于汽车动力传动系统合理匹配的程度。即使一台发动机具有良好的性能，如果没有一个与之合理匹配的传动系，也不能充分发挥其性能。能与发动机合理匹配的传动系可以使发动机经常在其理想工作区附近工作。这样不仅可以减少燃料消耗，减轻发动机磨损，提高发动机的使用寿命，而且可以取得良好的排放效果。

然而，在汽车研制工作中，由于专业分工过细，往往存在着这样的情况，即发动机研制部门着重于改善发动机的工作过程，降低机械损失，以减少燃油消耗率；底盘研制部门则着重于提高传动效率，降低运行阻力等。这些工作无疑是很重要的，但如果不将发动机与底盘视为一个有联系的综合整体进行合理匹配，任何一个部件的性能改进完全有可能由于另一部件的匹配不当而造成整体性能未获得应有的改进。根据统计分析表明，目前汽车发动机使用工况多数是远离其最佳经济区域，未能实现动力传动系统的最佳匹配。因此，通过合理匹配汽车动力传动系统来提高汽车运输效率，降低燃油消耗具有较大的潜力，这是一个值得进一步研究的课题。

通常对汽车的动力性和燃料经济性水平，是在进行实车道路试验之后给予最后评价的。这样做不但周期长，成本高，而且在产品设计阶段对整车及各总成方案的确定、结构参数的选择、传动系参数与发动机的匹配等，就有一定的盲目性，可能会使较优的方案遗漏，使得产品的性能不令人满意，进而造成人财物力的浪费。

以往动力传动系统的匹配，由于测试手段和计算工具的限制，一直都采用定性分析和简单的定量计算，靠大量积累的试验数据和反复测试的结果进行设计。例如要试验某种车

型,有三种整车总质量、四种发动机、三种变速器、三种驱动桥及两种轮胎可供选择,那么各种不同组合的试验方案可达216种。而每种方案都需要设计、制造一系列不同的零部件,需花费大量的时间和费用。

因此,为了提高设计质量,缩短研制周期,在设计阶段就需要根据有关设计参数,对汽车动力性和燃料经济性进行预测,随着计算机的广泛应用和现代计算方法的发展,计算机模拟计算方法为汽车动力性和燃料经济性预测提供了有效而准确的工具。

计算机模拟与一般的性能计算方法相比,有着许多优点:

1. 它可以考察出汽车结构参数是如何影响汽车动力性和燃料经济性的,特别是这些参数作微小变化时,实际车辆试验往往测量不出对动力性和燃料经济性的影响,而计算机模拟计算则可算出其微小的影响。

2. 它可以求解较复杂而精确的数学模型,过去无法求解的或需大量时间才能求解的线性或非线性系统的微分方程组,采用电子计算机和现代数值计算方法以后,就可以很快地求出其数值解。所以,在计算机模拟的情况下可以采用能准确描述所研究运动的较复杂模型,这就使计算结果更接近实际。

3. 它能按预定的程序模拟各种行驶工况,包括瞬变的非稳定工况,因而能全面地预测汽车在各种工况下的动力性和燃料经济性。

4. 它能在很短时间内对大量的设计方案进行运算,查明这些方案和参数对汽车性能的影响,有助于设计人员很快地找到比较有利的设计方案和参数匹配。

由此可见,计算机模拟计算方法是汽车总布置设计的有力工具,它不仅能分析和预测汽车的动力性和燃料经济性,

而且能运用于设计的综合,即根据预定的性能指标和技术要求找出最佳的设计参数。

1972年,美国通用汽车公司首先开发了汽车动力性与燃油经济性的通用预测程序GPSIM,该程序可以模拟汽车在任何行驶工况下的瞬时油耗、累积油耗、行驶时间和距离,预测汽车设计参数如重量、传动系速比、空气阻力系数等的变化对性能的影响。电子计算机的应用和测试手段的提高,使通过模拟计算和试验相结合的方法来研究汽车动力传动系统匹配问题成为可能。目前,国外各大汽车公司在这方面做了大量的研究工作,并开发了各自的模拟程序,除美国通用汽车公司的GPSIM外,还有福特汽车公司的TOEFP,康明斯公司的VMS,美国交通部的VEI SIM,日本日产汽车公司的CSVFEP,德国奔驰汽车公司的TRASCO等。这些程序的使用在样车制造前就能准确地对汽车动力性燃料经济性进行预测,并可以根据几种传动系速比的变化引起整车性能的变化,找到这种变化间的关系,形成“最佳动力性、燃料经济性曲线”和“c曲线”,从而找到能与所选发动机合理匹配的传动系,这样就可以节省大量的试验费用,缩短设计周期。

我国在这方面研究起步较晚,进入80年代后,长春汽车研究所、吉林工业大学、江苏理工大学等单位开展了一些工作,也取得了一些成果。目前,国内汽车界主要是围绕以下几个方面开展工作的:(1)汽车动力传动系数学模型的研究;(2)按给定工况模式的模拟研究;(3)按实际道路条件随机模拟的研究;(4)模拟程序的应用研究。

可以预见随着我国汽车工业的发展,汽车动力性燃料经济性模拟计算方法在提高汽车基本性能、缩短研制周期方面将发挥巨大作用。

第一章 汽车动力性燃料经济性的评价

第一节 汽车动力性的评价

汽车是一种高效率的运输工具，运输效率的高低在很大程度上取决于汽车的动力性。因为汽车行驶的平均速度越高，汽车的运输生产率越高，而影响平均速度的因素，除运输组织原因外，主要是汽车的动力性。

从获得尽可能高的平均行驶速度的观点出发，汽车的动力性主要由以下三方面的指标评定。

一、最高车速 $v_{\max}$

最高车速是指在水平良好的路面上汽车能达到的最高行驶速度。它仅仅反映汽车本身具有的极限能力，并不反映汽车实际行驶中的平均速度。

现代轿车的最高车速一般在140~250km/h之间，货车的最高车速一般在80~120km/h之间。

二、加速性能

加速性能对汽车平均行驶速度有着很大影响，它的评价指标很多，但通用和统一的评价准则还没有。欧美等多数国家的评价指标采用汽车油门全开时的加速距离和时间；而前苏联学者认为除此以外，还应包括汽车加速度系数（最大加速度与发动机最大功率之比）、汽车油门全开加速到最高车速一半的时间和距离。

当今汽车界通常用原地起步加速时间与超车加速时间来

表示汽车的加速性能。原地起步的加速时间系指用一档或二档起步,按最佳换档时间逐次换至高档,油门开度保持全开,加速至某一预定的距离或车速所需要的时间。超车加速时间系指用最高档或次高档由某一较低车速在油门全开情况下,加速至某一高速所需用的时间。

三、爬坡性能

汽车的爬坡性能是用满载时汽车在良好路面上的最大爬坡度 $i_{\max}$ 表示的。显然,最大爬坡度是指一档最大爬坡度。

有的国家规定在常遇到的坡度上,以汽车必须保证的车速来表明它的爬坡能力。控制这个指标可以保证各种车辆的动力性相差不致太悬殊,以维持路面上各种车辆畅通行驶。例如,要求单车在坡度为3%的坡道上能以60km/h的车速行驶,汽车列车在坡度为2%的坡道上能以50km/h的车速行驶。

现有的汽车动力性的评价指标只是反映了汽车本身具有的极限能力,在一定程度上反映了汽车动力性的好坏,但由于未与复杂的实际使用工况统一考虑,因而往往与汽车实际使用效果相差很大。例如国内目前的城市公共汽车,尽管其最高车速设计在70km/h左右,而实际汽车运行平均车速只有20~30km/h。

第二节 汽车燃料经济性的评价

从以最少的燃油消耗完成尽可能多的运输量的观点出发,汽车燃料经济性常用一定运输工况下汽车行驶百公里的耗油量或一定燃油量能使汽车行驶的里程来衡量。

目前,一般采用等速燃料经济性和多工况燃料经济性来评价汽车燃料经济性。

一、等速燃料经济性

汽车等速燃料经济性是常用的一种评价指标,它指汽车在额定载荷下,以最高档在水平良好路面上等速行驶100km的燃油消耗量。通常测出每隔10km/h或20km/h速度间隔的等速百公里燃油消耗量,然后在图上连成曲线,称为等速燃料经济特性曲线,以它来评价汽车的燃料经济性,见图1-1。

但是,这种评价方法不仅没有反映出汽车实际行驶中受工况经常变化的影响,特别是市区行驶中频繁出现的加速、减速、怠速停车等行驶工况,而且在分析如图1-1所示的A、B两种汽车的经济特性时,难以确定究竟哪一种汽车在实际使用中燃料经济性较好。

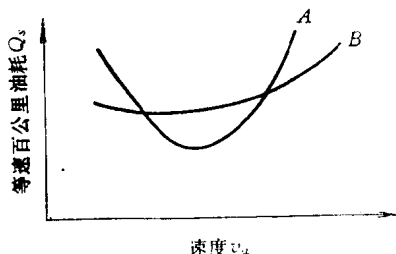


图1-1 两种汽车的燃料经济特性比较

二、多工况燃料经济性

汽车多工况循环模式,是在大量进行汽车实际行驶工况调研和统计的基础上获得的,因而采用多工况循环试验规范获得的汽车燃料经济性更接近实际行驶状况。

自70年代起,各国为了能正确地模拟汽车行驶工况,在测定汽车典型使用工况的基础上,制订了各种试验规范,如联合国欧洲经济委员会颁布的ECE15循环工况,美国环境保护局EPA制定的市区循环工况UDDS及公路循环工况HWFET,美国汽车工程师学会SAE制订的燃料经济性测量道路试验程序J1082b,日本的十工况和十一工况试验循环,中

国的载货汽车六工况试验循环JB3352、城市客车四工况试验循环JB3972等，并以这些试验循环的百公里燃油消耗量来评定相应行驶工况的燃料经济性。

现有的汽车燃料经济性的评价指标只是反映了汽车本身具有的极限能力，在一定程度上反映了汽车燃料经济性的优劣，但它并不能区别出动力传动系各部分（发动机的损耗、传动系的损耗、克服各种行驶阻力）所需的燃油消耗量，不能确定出影响燃油消耗量的主要因素和次要因素，从而不能查清提高燃料经济性的潜力。

第三节 汽车动力性燃料经济性的综合评价

由内燃机理论和汽车理论可知，现有的汽车动力性和燃料经济性指标是相互矛盾的，因为动力性好，特别是汽车加速性和爬坡性好，一般要求汽车稳定行驶的后备功率大；但对于燃料经济性来说，后备功率增大，必然降低发动机的负荷率，从而使燃料经济性变差。从汽车使用要求来看，既不可脱离汽车燃料经济性来孤立地追求动力性，也不能脱离动力性来孤立地追求燃料经济性，最佳的设计方案应是在汽车的动力性与燃料经济性之间取得最佳折衷。

目前，在进行动力传动系统优化匹配时，一般应用多工况燃料经济性或用汽车原地起步连续换挡加速时间与多工况燃料经济性的加权值作为综合评价指标，而这些指标实际上是汽车基本性能指标，并不能定量反映汽车动力传动系统的匹配完善程度，也不能提示动力传动系统改善的潜力和途径。

作者认为汽车动力性燃料经济性的综合评价指标，应该能定量反映汽车动力传动系统匹配的程度，能够反映出发动机动力性与燃料经济性的发挥程度，能够提示汽车实际行驶

工况所对应的发动机工况与其理想工况的差异，能够提示动力传动系统改善的潜力和可能的途径。

在此提出了汽车动力性燃料经济性的综合评价体系和指标。

一、动力性能发挥程度的评价指标——驱动功率损失率
汽车驱动力 F_t 与车速 v_a 的关系如下：

$$F_t = \frac{M_e I_g I_0 \eta_t}{R_k} \quad (1-1)$$

$$v_a = \frac{0.377 n_e R_k}{I_g I_0} \quad (1-2)$$

式中 M_e ——发动机有效转矩 (N·m)；

I_g 、 I_0 ——分别为变速器和驱动桥的速比；

η_t ——传动系效率；

R_k ——轮胎滚动半径 (m)；

n_e ——发动机转速 (r/min)；

F_t ——汽车驱动力 (N)；

v_a ——汽车的行驶速度 (km/h)。

图1-2为装有四档变速器的汽车驱动力与车速关系图，曲线上方区域为因发动机功率所限汽车不能达到的工作范围，下方的阴影部分为汽车驱动力损失的工作区。

在汽车前进档数一定的条件下，优选变速器各档的传动比使汽车的实际驱动特性最接近理想特性，即上图阴影面积最小。

对于 n 档变速器，第 j 档时车轮驱动力：

$$F_{tj} = \frac{M_e I_j \eta_t}{R_k} \quad (1 \leq j \leq n) \quad (1-3)$$

其中 $I_j = I_{gj} \cdot I_0$ ，发动机转矩 M_e 可用多项式表示：

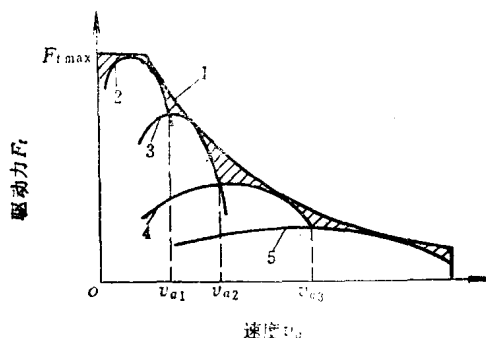


图1-2 装有内燃机和四档变速器的汽车与装有等功率发动机汽车的驱动特性曲线

1—装有等功率发动机汽车的驱动特性曲线 2、3、4、5—装有四档变速器汽车分别在一、二、三、四档时的驱动特性曲线

$$M_e = \sum_{k=1}^{m+1} a_k n_e^{k-1} \quad (1-4)$$

式中 m ——发动机转矩模型中多项式的阶数；

a_k ——多项式中系数。

则第 j 档时驱动力 F_t 在驱动力车速图中所围面积为

$$\begin{aligned} \int_{v_j}^{v_{j+1}} F_{tj}(v) dv &= \int_{v_j}^{v_{j+1}} \frac{\eta_i I_j n_e^{k-1} \sum_{k=1}^{m+1} a_k}{R_k} \cdot dv \\ &= \frac{0.377 \eta_i (n_{j+1}^k - n_j^k) \sum_{k=1}^{m+1} a_k}{k R_k} \end{aligned}$$

令 $b_k = \frac{0.377 \eta_i a_k}{R_k}$ ，则 n 档变速器各档驱动力曲线 F 的

面积和为：