



“十二五”普通高等教育车辆工程专业规划教材

# 汽车空气动力学

QICHE KONGQI DONGLIXUE

胡兴军 主 编

杨 博 王靖宇 娄 艳 副主编

范士杰 主 审



人民交通出版社  
China Communications Press

014037701

U461.1-43  
04



“十二五”普通高等教育车辆工程专业规划教材

要 容 内



# 汽车空气动力学

QICHE KONGQI DONGLIXUE

胡兴军 主 编

杨 博 王靖宇 姜 艳 副主编

范士杰 主 审



U461.1-43/04



北航

C1725804

人民交通出版社  
China Communications Press

016037101

“十二五”普通高等教育车辆工程专业规划教材



## 内 容 提 要

本书以汽车空气动力学理论及其相关的流体力学基础为出发点,详细介绍了轿车、客车及载货汽车等车型的气动特性,汽车尘土污染及气动噪声等汽车空气动力学专题,汽车发动机冷却及驾驶室通风等内流问题,汽车空气动力学试验技术及汽车空气动力学数值计算等问题。本书既有理论分析又有应用实例,叙述较为系统全面,为学生提供了汽车空气动力学理论及试验所必需的专业基础知识。

本书是高等院校汽车相关专业教材,也可供从事汽车设计、车身造型设计及汽车空气动力学试验、研究的工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

汽车空气动力学/胡兴军主编. — 北京:人民交通出版社, 2014. 2

ISBN 978-7-114-11136-5

I. ①汽… II. ①胡… III. ①汽车—空气动力学  
IV. ①U461.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 011140 号

“十二五”普通高等教育车辆工程专业规划教材

书 名: 汽车空气动力学

著 者: 胡兴军

责任编辑: 夏 韡

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.cpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 9

字 数: 231 千

版 次: 2014 年 3 月 第 1 版

印 次: 2014 年 3 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11136-5

定 价: 22.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# “十二五”普通高等教育车辆工程专业规划教材

## 编委会名单

### 编委会主任

龚金科(湖南大学)

### 编委会副主任(按姓名拼音顺序)

陈南(东南大学) 方锡邦(合肥工业大学) 过学迅(武汉理工大学)

刘晶郁(长安大学) 吴光强(同济大学) 于多年(吉林大学)

### 编委会委员(按姓名拼音顺序)

蔡红民(长安大学) 陈全世(清华大学) 陈鑫(吉林大学)

杜爱民(同济大学) 冯崇毅(东南大学) 冯晋祥(山东交通学院)

郭应时(长安大学) 韩英淳(吉林大学) 何耀华(武汉理工大学)

胡骅(武汉理工大学) 胡兴军(吉林大学) 黄韶炯(中国农业大学)

兰巍(吉林大学) 宋慧(武汉科技大学) 谭继锦(合肥工业大学)

王增才(山东大学) 阎岩(青岛理工大学) 张德鹏(长安大学)

张志沛(长沙理工大学) 钟诗清(武汉理工大学) 周淑渊(泛亚汽车技术中心)

2013年10月

# 前 言

随着汽车行业的飞速发展,世界能源形势日益严峻,石油价格不断上涨,提高汽车的燃油经济性成为整个汽车行业面临的重要课题。汽车空气动力学特性对汽车的动力性、经济性、操纵稳定性和乘坐舒适性都有重要影响,降低汽车的气动阻力是改善汽车燃油经济性的重要前提。

汽车空气动力学专家从航空空气动力学等相关学科获得启发和经验,再结合汽车自身的特点,在汽车空气动力学领域取得了巨大的成就。随着研究工作的日益深入,汽车空气动力学已经逐渐发展成了一门非常重要的独立学科。在现在激烈的汽车市场竞争中,具有最佳气动外形造型的汽车才更具生命力,因此可以说在汽车空气动力学方面的挑战是汽车面临的首要问题。

本书以汽车空气动力学理论及其相关的流体力学基础为出发点,详细介绍了几种车型的外形气动特性、汽车尘土污染及气动噪声等汽车空气动力学问题,汽车发动机冷却及驾驶室通风等内流问题,汽车空气动力学试验技术及汽车空气动力学数值计算等问题。本书参考了大量国内外专业资料,并结合近年来大量的气动造型设计的案例,既有理论分析又有应用实例,叙述较为系统全面。

本书的主编胡兴军副教授是吉林大学汽车工程学院的车身系专业教师及博士生导师,具有多年的汽车空气动力学教学经验及空气动力特性设计的实际经验。参加本书编写的还有杨博副教授、王靖宇副教授以及娄艳老师。

全书共9章,胡兴军副教授编写第1、5章,杨博副教授编写第6、9章,王靖宇副教授编写第3、4章,娄艳老师编写了第2、7、8章。

本书由范士杰高工主审,他对本书的初稿进行了认真审阅,并提出了宝贵的修改意见。本书编写过程中还得到了吉林大学汽车工程学院车身系从事汽车空气动力学教学的前辈老师的倾心指导。本书还得到了汽车空气动力学方向的朱云云、常静、王艳、杨博以及岳磊等多位研究生的大力支持。在此深表感谢。

限于编者水平,本书无论在体系还是内容上,都难免存在错误和不足,恳请广大读者给予指正,并希望广大读者能多提宝贵意见,以便本书修订时得到补充和提升。

编 者

2013年10月

# 目 录

第1章 绪论	1
1.1 汽车空气动力学的作用	1
1.2 汽车空气动力学的发展	2
1.3 汽车空气动力学的研究范围	10
1.4 汽车空气动力学的发展趋势	12
练习题	15
第2章 流体力学基础	16
2.1 流体的性质	16
2.2 流体静力学	20
2.3 流体动力学	24
2.4 管中流动	31
2.5 边界层	33
2.6 流场、流线和流谱	34
练习题	35
第3章 汽车空气动力学概述	36
3.1 气动力和力矩	36
3.2 气动力对汽车性能的影响	37
3.3 汽车的气动阻力分类	42
3.4 汽车的流场及流场参数	49
3.5 汽车空气动力学的特点	55
练习题	56
第4章 轿车气动特性研究	57
4.1 轿车外形与气动阻力的关系	57
4.2 减小气动升力的主要措施	69
4.3 汽车总体参数对气动力的影响	75
4.4 轿车气动设计的整体趋势	76
练习题	78
第5章 商用车的气动特性研究	79
5.1 引言	79
5.2 大客车的气动特性	80
5.3 国产轻型客车的气动特性分析	81
5.4 货车的气动特性	83

5.5 货车空气动力附加装置	85
练习题	88
<b>第6章 汽车尘土污染及空气动力噪声</b>	<b>89</b>
6.1 汽车尘土污染	89
6.2 汽车气动噪声	92
练习题	97
<b>第7章 汽车发动机冷却性能及驾驶室通风特性</b>	<b>98</b>
7.1 发动机冷却系统分析	98
7.2 发动机冷却系统的设计原则	99
7.3 驾驶室的通风特性	100
练习题	101
<b>第8章 汽车空气动力学试验</b>	<b>102</b>
8.1 概述	102
8.2 汽车空气动力学试验的基本方法	104
8.3 汽车风洞	106
8.4 汽车风洞实验技术	110
8.5 风洞试验测量仪器	114
8.6 流态显示试验方法	118
8.7 汽车风洞试验模型	120
8.8 汽车空气动力学道路试验	122
练习题	123
<b>第9章 汽车空气动力学数值模拟</b>	<b>124</b>
9.1 CFD 概述	124
9.2 汽车空气动力学数值模拟流程	124
9.3 模拟实例	129
9.4 汽车空气动力学数值模拟的展望	132
练习题	132
<b>参考文献</b>	<b>133</b>

# 第1章 绪论

## 1.1 汽车空气动力学的作用

汽车空气动力学是研究空气与汽车相对运动时的现象、作用规律以及气动力对汽车各性能影响的一门科学。

汽车行驶中与空气产生复杂的相互作用而产生的气动六分力不仅影响汽车的行驶状态,同时反映汽车的性能。因此通过汽车空气动力学研究来改善汽车外形降低汽车气动阻力,提高发动机燃烧效率,改进发动机冷却效果,不仅可以改善汽车的动力性,而且可以提高汽车的燃油经济性。汽车在高速行驶时,来自空气的反作用力会对汽车产生很大的影响,包括因空气动力学作用而引起的汽车稳定性和操纵性问题,而良好的汽车稳定性和高速操纵稳定性对其保证安全行驶具有重要意义,所以通过空气动力学途径来改善侧风稳定性以及提高制动器制动效能,为汽车高速安全行驶提供保障。以人为本的今天,改善车身内部通风、取暖、除霜和空调气流等特性,减少尘土污染和降低气动噪声,是乘坐舒适性的基本保证。

提高汽车燃油经济性是汽车的发展趋势,用柴油机代替汽油机、改进现有的发动机和燃油品质、采用新燃料、采用复合动力装置等是比较有效的办法,但是这些方法的研究已经逐渐完善,而另一种有效方法是减小汽车行驶时的空气阻力。一方面,较低的气动阻力系数可直接使汽车高速时大大减少燃料消耗;另一方面,较低的气动阻力系数还可使汽车在装用功率较小的发动机时照样能达到满意的性能,这样发动机的功率较小,消耗的燃料也较少。此外,发动机尺寸的缩小导致传动系统各总成尺寸缩小和整车轻量化,又进一步导致悬架、轮胎等部件尺寸缩小,这种连锁反应涉及了汽车的大多数总成,因而大大提高了汽车的综合技术性能。较低的气动阻力系数所带来的好处是采用任何其他方法都难以达到的。

汽车车速的不断提高以及能源问题的日益严重,汽车空气动力学亦越来越受到重视,其研究工作日益深入,汽车空气动力学已发展成为流体力学一个专门的分支学科。空气动力学包括航空、船舶、建筑物、火车、汽车等方面,在研究气动力、流场、通风等方面,它们之间有相近之处,但是汽车行驶在地面上且行驶状态异常复杂,因而汽车空气动力学又区别于上述分支学科,具有自身的特点。其中汽车空气动力学和航空空气有诸多相似之处,如良好的驾驶或飞行特性、低气动阻力需求、各种作用力的平衡以及确保横向稳定性,此外,在采用运动方程式进行空气动力学计算和测量方面都十分相似。此外,汽车空气动力学又有区别于航空空气动力学的自身特点:汽车不是细长流线型,而是“钝性体”;它不离开地面,始终受气动特性的地面效应,而且由于地面和车轮的影响,汽车底部的气流状况与飞机底部完全不同;汽车行驶始终在亚音速范围内,其四周的气流分离和涡流多,远比翼型复杂;飞机要求阻力小同时获得足够升力,而汽车则要求两者都小,另外,现代飞机的设计主要依靠空气动力学计算,然后进行缩小比例模型风洞试验,最后进行样机飞行试验,汽车空气动力学设计则主要依靠试验,而且在模型风洞试验之后有可能采用整车风洞进行全面试验。总之,汽车空气动力学在吸取其他相关学



科的基础上,主要是从航空空气动力学获得启发和经验,再结合车身自身的特点,现在已经逐渐发展成了一门独立而又非常重要的学科。

汽车空气动力学是汽车技术发展的先行官和基础,在能源、交通、环保领域发挥着重要作用。同时,在激烈的汽车市场竞争中,只有空气动力特性好的汽车,才能保证其良好的动力性、经济性、操纵稳定性以及舒适性,具有最佳气动外形的汽车才有生命力,因此可以说在汽车空气动力学方面的挑战是汽车面临的首要问题。

## 1.2 汽车空气动力学的发展

在汽车发明后的最初十几年,车速很低,空气动力学没有真正提到议事日程。在第一辆汽车发明后约 25 年,人们开始对汽车空气动力特性有了一定认识。

在 19 世纪汽车诞生前,流体力学理论就已经形成较完善的体系,随后在 1871 年,英国建成了风洞,为汽车空气动力学的萌芽奠定了基础。20 世纪 20 年代,空气动力学的概念和研究成果被引入到汽车设计中,从而形成了独特的汽车空气动力学学科。

汽车空气动力学是伴随着人们对汽车的完美艺术造型和卓越的性能追求而逐渐形成和发展起来的,甚至可以说,汽车造型变化的历史就是汽车空气动力学发展的历史,可以概括为三个发展时期。

### 1.2.1 基本型时期

20 世纪初期,设计师们根据自己的感性认识将自然界的流线体合理应用到汽车上。开始从外形上注意空气动力学特性,这个阶段称之为基本型时期,该时期包括了两个发展阶段:原始型阶段和基本型阶段。

#### 1. 原始型阶段

汽车问世后的十几年,汽车设计者们将更多的精力投入在底盘构造、零件及发动机的研制上。早期沿用马车造型进行改造,比如德国人卡尔·本茨 1886 年创造的世界上第一辆以内燃机为动力的现代汽车(图 1-1),没有形成完整的车身概念:外伸零件很多,并未形成连续光滑的表面。

在这一时期,通过对自然流线型的直观了解,设计者们还做了一些大胆尝试。1899 年比利时人卡米勒·詹那兹(Camille Jenatzy)采用空气动力学的观点设计并制造出了一辆电动车,该车首次突破了 100km/h 的速度并创造了 105.88km/h 的世界纪录。这是较早采用平整光滑外形的车辆(图 1-2)。这款“鱼雷型”汽车没有考虑地面影响,考虑了车身的流线形,但驾驶员和车轮露在外面,没有“一体化”,显然阻力很大。



图 1-1 1886 年卡尔·本茨创造第一辆现代汽车



图 1-2 1899 年詹那兹创造世界纪录的电动车

在“鱼雷型”汽车之后,德国人霍奇(A. Horch)于1912年研制出“船尾车”,如图1-3所示。此时,设计师还只是依靠直观的朴素见解而不是依靠周密的推导和试验来构建他们的车型,虽然在1913年和1914年连续在奥地利阿尔卑斯大赛中取得优异成绩,但气流在前端和翼子板处分离后不能再附合,从空气动力学的角度来看这种船尾造型毫无意义。

## 2. 基本型阶段

经过对前期原始型的探索,设计者逐渐开始从完整车身考虑,注重汽车的遮风挡雨和舒适性。1913年里科蒂(C. Ricotti)设计的“飞艇型”汽车,如图1-4所示。1912年伦普勒(E. Rumpler)设计的“泪滴车”(Teardrop cars)如图1-5所示,可见这个阶段确实从完整车身考虑,但并没有更深入考虑汽车空气动力学的问题。

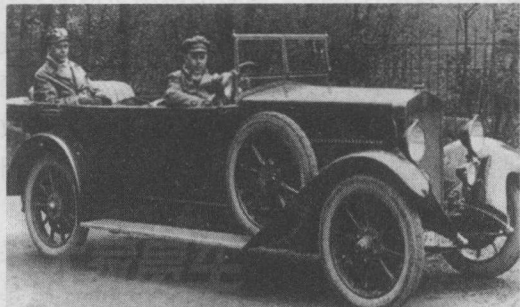


图 1-3 德国人霍奇 A. Horch 1912 年研制的船尾车

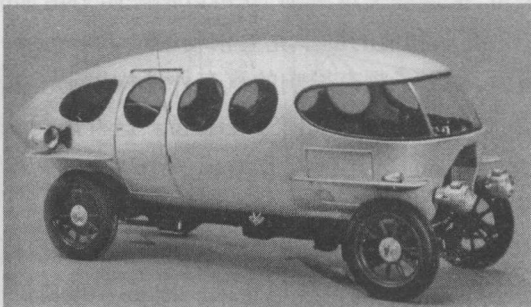


图 1-4 “飞艇型”汽车

综合看来该时期汽车空气动力学的研究工作基本尚未展开,所以在当时对汽车造型是影响较小的因素。值得一提的是,1908年,第一辆由福特(H. Ford)设计的T型车(图1-6)诞生于底特律 Piquette 工厂,开始了其辉煌又最具有影响力的19年,该车奠定了方箱式造型的基本格局:外形方整,车身各部分的界线十分明显,侧面的前翼子板、踏脚板、后翼子板与车身分离,前照灯、保险杠、备胎、门铰链等均暴露在外面。这样的车型不但形状阻力较大,干扰阻力也十分可观。直至20世纪30年代,由于方箱式造型不适应更高的车速要求才逐渐被淘汰。

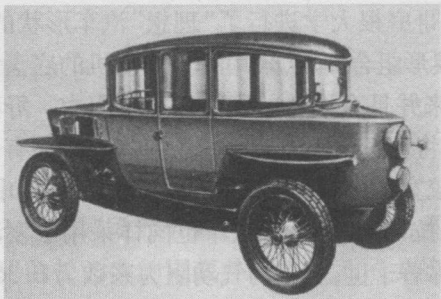


图 1-5 “泪滴车”

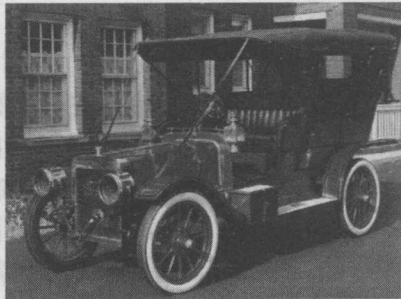


图 1-6 福特设计的 T 型车

### 1.2.2 流线型阶段

从20世纪20~50年代,空气动力学的研究工作逐渐发展,大量的研究成果应用到汽车上,对汽车造型产生较大的影响。设计师开始运用充分的理论依据和实验验证进行空气动力学设计。这个阶段地面效应已被人们所认识。人们用空气动力学观点指导汽车造型,试图降低气动阻力,并获得了很大的进展。同时,开始对内流阻力及操纵稳定性有了认识。

## 1. 长尾流线型阶段

自1911年的冯·卡门(F. Karman)发现在空气中运动的物体后面存在涡流后,寻求最低风阻的流线型体是流体力学的经典问题。1922年德国人杰瑞(P. Jaray)提出“最小阻力的外形是以流线体的一半构成的车身”(以下称“半车身”)。杰瑞认识到一个在自由流场中汽车是阻力系数很小的旋转体,在接近地面时,流体就不再是轴对称的了,因此造成了气动阻力系数增加。同时,尾部气流的分离也是气动阻力系数增加的原因并提出结论“只有消除汽车尾部气流分离,才能降低阻力”。最小阻力的外形是以流线体的一半构成的车身,这种“半车身”可由自身的镜像构成一个完整的旋转体,其长高之比为4:1,并将其设计成侧面形状为上面两角倒圆的矩形。对这种“半车身”离地间隙加大时,气动阻力系数也随之加大,原因是其下部有尖角,把这些尖角倒圆,就可以消除阻力增加的现象。

杰瑞和他的助手克兰柏勒(W. Klemperer)在进行一系列与汽车有关的几何形状的风洞试验后,提出了颇有影响的汽车外形构思:光洁、封闭的车身,以水平的流线体包围着发动机和底盘,而以侧卧的流线体盖住乘客。这种风行一时的所谓“J”型车身(图1-7)具有较小阻力系数( $C_D=0.30$ )的尾部都收缩成一个尖刃,提出了所谓“合成型车身”概念(或称J型车)认识到流场的三维特性。

1933年克莱斯勒在“J型车”基础上设计的车型,如图1-8所示,为减小气动阻力,当时采用了极为夸张的流线形轮罩。1936年瑞典绅宝(SAAB)(图1-9)汽车公司生产的Type92也是在“J型车”造型基础上设计的具有代表性的实用车型。杰瑞车(J型车)的时代到第二次世界大战时期就结束了,这段时期被称为“J型车”时代。

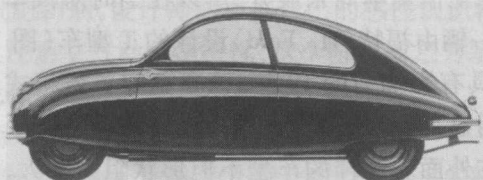


图 1-7 J型车

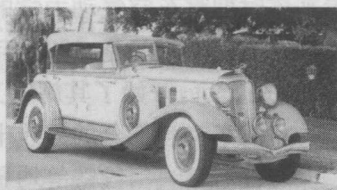


图 1-8 克莱斯勒帝王

在20世纪30年代末期,舒勒(I. Schlor)在德国哥庭根大学进行了“理想”汽车形状的研究,如图1-10所示。该车的纵向对称面是由两个航空翼形组合而成,采用后置发动机的底盘制成实车,并进行了试验。该车的车轮完全被车身罩盖起来并且有平整的底面以减少阻力。舒勒的另一项较重要的研究是发现了汽车底部离地间隙增大将使气动阻力减小的规律。该车还有一项成功的构思,亦即使发动机布置在长而尖的尾部而把较宽敞的前部和中部留给坐舱。例如图1-11所示,1938年由列德文卡(H. Ledwinka)设计的太脱拉(Tatra)87型汽车也同样采用了发动机布置在尾部的构思,该车以其成功的空气动力学设计称著于世,实车的气动阻力系数为0.36(后来在1979年由大众77公司整车风洞测出),还采用了尾翅提高空气动力稳定性。

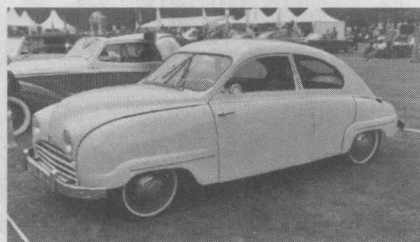


图 1-9 瑞典绅宝(SAAB)

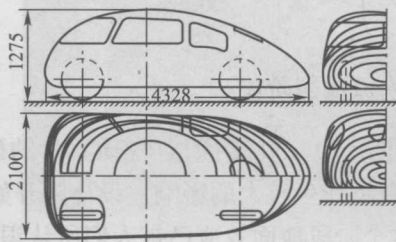


图 1-10 理想汽车形状

## 2. 短尾流线型阶段

1933年美国人雷(W. E. Lay)在密歇根大学进行可更换的各种头部和尾部组成的积木式汽车模型风洞试验,他使用了可更换的各种头部和尾部组成的积木模型(图1-12)。该试验指出有些20世纪30年代假流线型汽车所忽略的事实:如果头部不是干净利落的圆滑,良好的尾部就没有多大意义。这个结论可用图1-12的试验结果解释(表1-1):*F*式的风窗玻璃很陡,致使汽车周围的气流受到较大的扰动,因此各种尾部的影响就较小。另外还可以看出,*C*式与*D*式两种头部形状差别较大,但阻力系数的差别很少,这是气流在头部平顺过渡的结果。雷的试验还表明:追求水滴形(如*C*式)的汽车的阻力系数不见得比头部圆滑的现代汽车(如*D*式)更小,也明确了车身前部流场与尾部流场之间的相互关系及影响,同时得出的重要结论“短粗的尾部和长尾相比仅使气动阻力系数有较小的升高”成为空气动力学方面的又一大进步。

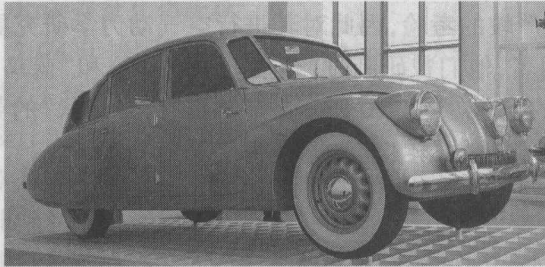


图1-11 1938年推出的捷克汽车太脱拉87型

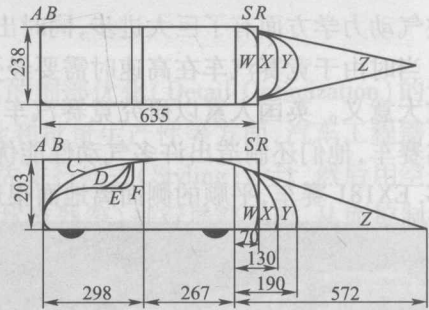


图1-12 雷的积木模型

雷的部分试验结果

表1-1

模型 $C_D$ 值		后部形状			
		W	X	Y	Z
前部形状	F	0.35	0.35	0.32	0.24
	E	0.32	0.26	0.25	0.17
	D	0.30	0.25	0.21	0.12
	C	0.30	0.24	0.20	0.12

1934年,德国人卡姆(W. Kamm)开始系统地研究车身尾部设计,通过风洞试验研究表明“J型车”的长而尖的尾部并不是必不可少的,而且汽车高速时侧风稳定性差,因而提出了有名的“短尾”造型概念(或称为“K型车”)如图1-13所示。“K型车”车身比“J型车”车身空气阻力系数小而且实用。

1934年起雷所提出的粗大后尾端的形状,逐渐发展成为“快背式”(Kamm-back),既有较大的后排座,前段外形又保持低的气动阻力系数。图1-14所示为快背式车,雷氏以及长尾型设计,由于气流在尽可能大的区域内保持连续,而获得了低的气动阻力系数。当切掉尾部截面逐渐减小的部分后,气流被迫分离,造成小的涡流,当车身有适当锥度时,气流在车身尾部造成压力升高,因而使汽车的“基本压力”相对升高,减小了总的阻力,同时也提高了侧向风稳定性。

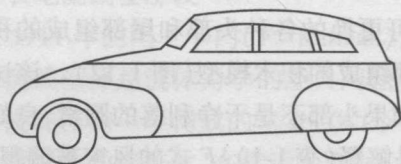


图 1-13 K 型车

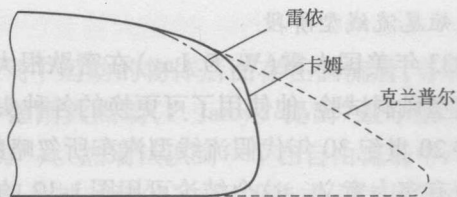


图 1-14 快背式车及两种杰瑞型车对比

1935 年,斯哥特技术大学汽车发动机研究院的 W. Kamm 系统地研究了车身尾部设计。随后,1938 年 W. Kamm 在戴姆勒-奔驰 170 底盘上装置的艾沃林车成为第一辆快背后尾车。

长尾流线型和短尾流线型阶段是流线型时期两个最为典型的发展阶段。“J 型车”和“K 型车”分别作为两个阶段的代表车型,对后来汽车的发展起了很大的影响。流线型阶段后期在空气动力学方面有了巨大进步,同时出现了很多在气动方面具有标志性的汽车。

当时由于竞赛汽车在高速时需要经受极严峻的考验,因此对其进行空气动力学研究更具有重大意义。英国人素以研究竞赛汽车而闻名,他们曾研制过“金箭”(图 1-15)和“蓝鸟”等著名赛车,他们还制造出许多气动性能优良的跑车。图 1-16 所示是一辆具有“半滴状”的英国 M. G. EX181 赛车,平顺的侧面离地面很近,下部用软裙围起来,阻力系数只有 0.12。

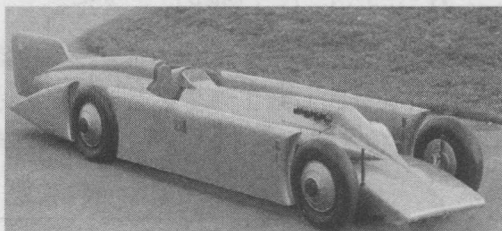


图 1-15 以 372.3km/h 的速度创造 1929 年世界纪录的英国赛车“金箭”

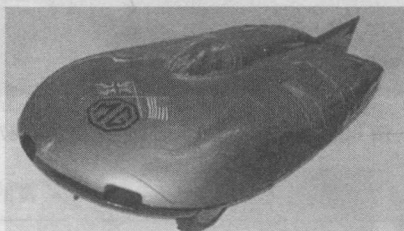


图 1-16 以 402.3km/h 的速度创造 1957 年 1500cc 级世界纪录的英国赛车 M. G. EX181

法国的安德里奥(J. Andreau)是早期汽车空气动力学研究方面较出色的工作者之一,也是较早地研究压力分布和稳定性的人之一。他在“标致牌”汽车的底盘上装置了一个带有翅的流线型车身,该车的气动阻力系数为 0.28,并且对强大的侧向风有良好的稳定性。安德里奥指导设计的“雷电”(图 1-17)曾是 1938 年竞赛的优胜者。

1934 年美国克莱斯勒汽车公司推出了新颖的“气流”型(Air Flow)汽车,此外,德国著名工程师波尔舍(F. Porsche)经过多年的设计和缜密的试验,于 1938 年也推出了十分畅销的大众甲壳虫型汽车,如图 1-18 所示。该两种汽车完全摆脱了方箱式造型的格局:前照灯、备胎等隐入车身之内,翼子板也与车身侧面联系起来,汽车外形圆滑流畅,线条连贯,成为这一阶段流线型造型的代表,对 20 世纪 30 年代末期和 40 年代的汽车造型产生了很大影响。两种车型之所以获得成功,一方面是采用了空气动力学的研究成果,另一方面还在于把空气动力学原理与艺术造型等因素巧妙地结合起来。

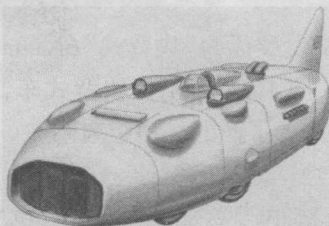


图 1-17 以 575.3km/h 创纪录的“雷电”汽车

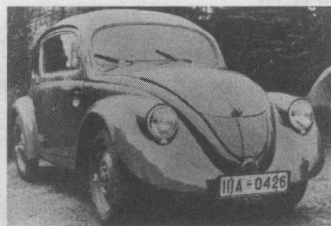


图 1-18 1938 年甲壳虫型汽车

20 世纪 50 年代的轿车,在外形上明显地形成了头部(装置发动机)、中部(客舱)和尾部(行李舱)三部分,这种形式称为船形或浮桥式(Pontoon type)。这种汽车在空气动力学方面的进步体现在:形体的转接平滑连贯,采用曲面玻璃和平顺的侧面,汽车的长度增加,高度降低。然而 20 世纪 50 年代后期,某些美国轿车体形硕大,过分夸张的造型无助于空气动力性能的改善。

20 世纪 50 年代后期,整车风洞大量出现,同时风洞开始采用真实汽车进行试验,除了研究空气动力外还研究了外部和内部各细节的空气流场,所得试验结果基本与实际相符。从此,模型风洞、整车风洞试验以及道路试验三者有机结合已成为新型汽车车型开发和研制过程必不可少的步骤。

### 1.2.3 最优化时期

#### 1. 细部最优化阶段

1974 年德国胡乔(W. H. Hucho)等人提出了著名的细部优化(Detail Optimization)的设计方法:在充分保证造型风格、内部布置、安全性、舒适性和批量生产性等方面,汽车工程需要提前设计出汽车外形,尔后进行空气动力修正。亦即首先进行样式(Styling)设计,然后用空气动力学观点对形体细部(如圆角半径、曲面弧度、斜度和扰流器等)进行局部修改,从而控制甚至防止气流的分离现象发生,以使气动阻力降到最低。这充分体现了“造型服务于性能”的设计思想,此方法取得了较大成功,曾使 VW - Scirocco I(1974 年型)汽车的气动阻力系数  $C_D$  由原型的 0.50 降至 0.41,如图 1-19 所示。而在当时主要依据流线型原理设计的 Opel GT(图 1-20),其  $C_D$  值也不过是 0.41,尽管前者具有坚挺的风格,但却具有与流线型汽车(Streamlined Car)相同的气动阻力系数。



图 1-19 VW - Scirocco I 轿车



图 1-20 Opel GT 轿车

东风标致 307 对前照灯的细化造型,如图 1-21 所示。

在“细部优化阶段”,为降低气动阻力系数,空气动力学工作者和汽车设计师充分利用了风洞及烟流设备等工具,对汽车细部进行优化设计并取得了很大成效,如图 1-22 所示的汽车设计师手持烟流喷枪对敞篷车的前风窗倾角进行流场试验。



图 1-21 标致 307 对前照灯细化造型



图 1-22 前风窗的烟流试验

2013年奔驰CLA车身空气动力学改进项目负责人 Norbert Fecker 介绍：“要增强一辆车的空气动力学性能并减少其风阻系数需要在各个细节上做出改善，甚至每个细节部位仅改进千分之一，那么其合力也是非常可观的。”奔驰CLA工程师们利用风洞对车辆进行测试，对从车轮拱到后扰流板的任何可改善空气动力学的部件进行分别试验，不断地在各部件上进行持续的改进(图1-23)，例如行李舱盖调高一点，发动机罩条纹改变一些等。



图1-23 奔驰CLA在各细节部件寻求空气动力学性能改进

然而大量试验表明，对于 $C_D > 0.45$ 的汽车，该方法可取得明显效果，如果要进一步使产品车的 $C_D$ 值降为0.40以下，则必须做相当大的努力，甚至必须寻找更高级的技术。另外需要对每一个局部进行多次修改。

## 2. 整体最优化阶段

随着空气动力学研究以及风洞试验技术的发展，汽车空气动力学的设计又出现了一种新思路——从设计开始就十分重视汽车外形的整体气动功能。体现了“功能服务于造型”的设计思想，即首先确定一个符合总布置要求的理想的低阻形体，在其发展成实用化汽车的每一设计步骤中，都严格保证形体的光顺性，使气流不从汽车表面分离，这种新设计方法叫形体最优化，也叫整体最优化法。

其中奥迪100C3就是应用了整体最优化设计的典型例子。如图1-24所示，第一步是按照总布置要求制成具有阶梯背式造型风格，并具有较理想的流线体特征。例如具有极其光顺的曲面、圆滑的车头、大弧度的风窗等，其气动阻力系数 $C_D$ 值为0.18。第二步是将基本形体转变成基本汽车外形，所有与空气动力学相关的细部，如车底部件、冷却系统气流、保险杠、连接点和细缝等，都要进行细部最佳化处理， $C_D$ 值也剧增到0.24。第三步将基本汽车外形精制成式样模型，车身结构设计师参与大量细节工作，使模型车基本接近产品车， $C_D$ 值也进一步增加到0.29。第四步将基本模型试制成产品车， $C_D$ 值比式样模型略高一点(为0.30)。具有相当低的气动阻力且大量生产的轿车奥迪100C3便诞生了(图1-25)，其在同级别车中具有最佳空气动力学设计效果，引起了世界汽车界的轰动。

### 1.2.4 小结

汽车空气动力学经过了上述几个阶段的发展，使得普通轿车的气动阻力系数从20世纪20年代的0.8左右降到30~40年代的0.6左右，以后又降到0.45左右。特别是近几十年，汽车空气动力学的研究受到了极大重视，在降低气动阻力方面取得了很大进展，量产车平均气动阻力系数已降到0.35以下，一些先进气动设计的样车，气动阻力系数已降到0.15~0.20。一些车型也创造了低阻力系数的历史记录(图1-26)。1986年的福特Probe V概念车，其 $C_D$ 值仅有0.137；1996年的通用EV1电动车， $C_D$ 值为0.19；2008年美国Aptera 2e电动车，其 $C_D$ 也仅有0.15；另外，2009年经过大众1L概念车而改型过来的大众L1，其 $C_D$ 为0.195。虽然这几款车型大部分没有真正投入市场，但其在空气

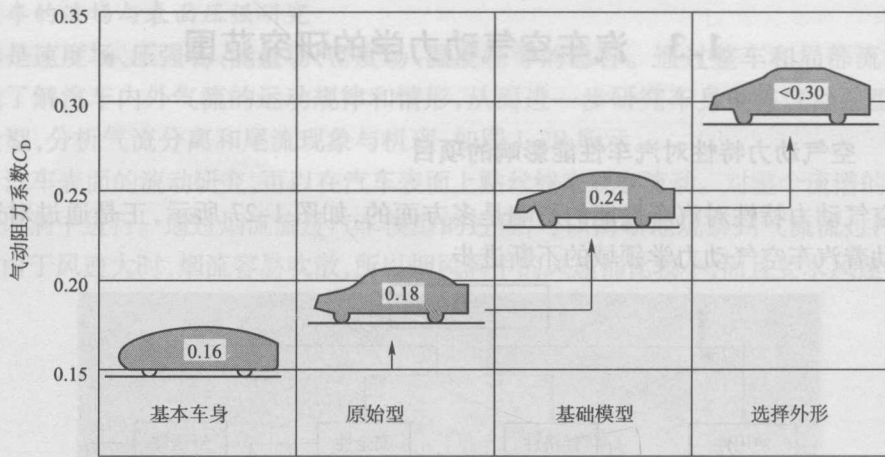
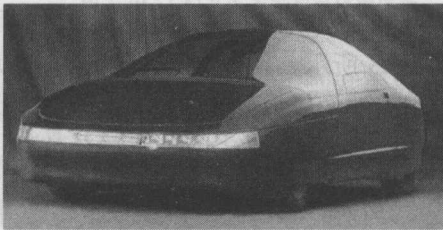


图 1-24 奥迪 100C3 型轿车的形体最佳化步骤

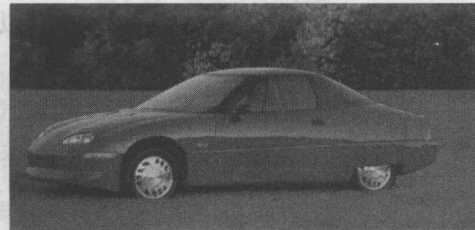


图 1-25 1982 年奥迪 100C3 以  $C_D$  为 0.30 创造了轿车空气动力学的世界纪录

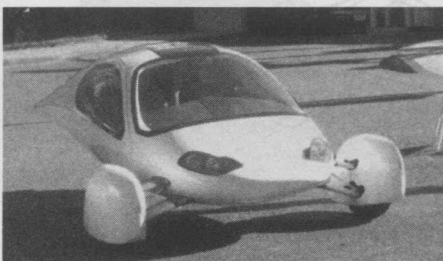
动力学方面所追求的完美境界还是值得去借鉴的,从这几款车型可看出,减少后视镜等附件、平滑化车门把手、覆盖车轮、关闭格栅等一系列的措施可以减小阻力系数。



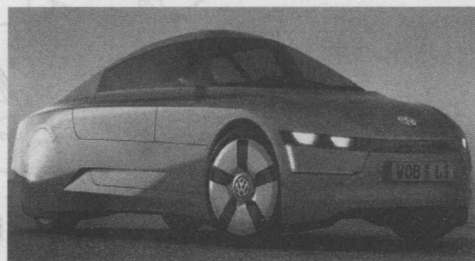
1986 年福特 Probe V 概念车( $C_D=0.137$ )



1996 年通用 EV1 电动车( $C_D=0.190$ )



2008 年美国 Aptera 2e 电动车( $C_D=0.15$ )



2009 年大众 L1 轿车( $C_D=0.195$ )

图 1-26 典型阻力系数的车型



## 1.3 汽车空气动力学研究范围

### 1.3.1 空气动力特性对汽车性能影响的项目

汽车空气动力特性对汽车性能的影响是多方面的,如图 1-27 所示,正是通过对这些性能的改善推动着汽车空气动力学领域的不断进步。

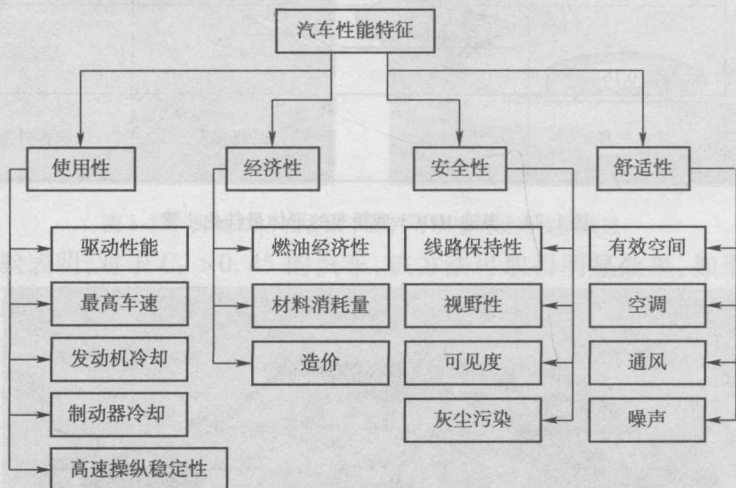


图 1-27 空气动力对汽车性能影响的项目

### 1.3.2 汽车空气动力学的研究内容

需要改善的性能决定了汽车空气动力学的发展方向,进而决定了其所要研究的问题,通常可以分为下面五个方面。

#### 1. 汽车空气动力及其对汽车性能的研究

这种问题的研究,要求在风洞里很好地模拟汽车周围的气流流动条件,以便于在风洞里能较真实地测得作用在汽车上的三个力和三个力矩,如图 1-28 所示。其中重要的是升力、阻力和纵倾力矩。为了研究气动力现象,有时还要测量汽车外表面上的压力分布。试验要求汽车风洞能很好地模拟汽车的车速和侧风条件,必要时,最好还要能模拟某些不稳定流场的特殊情况。

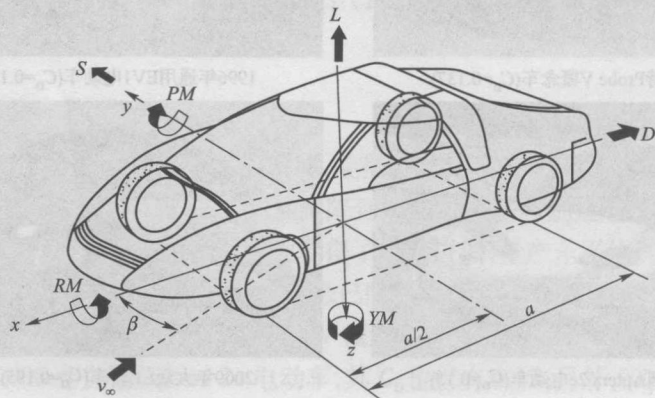


图 1-28 空气动力以及对汽车性能的研究