

普通高等教育汽车车身设计学科方向规划教材

汽车 空气动力学

○ 傅立敏 著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育汽车车身设计学科方向规划教材

- ◆ 汽车人机工程学
- ◇ 汽车空气动力学
- ◆ 汽车车身设计
- ◆ 汽车车身制造工艺学
- ◆ 汽车车身试验学
- ◆ 汽车造型设计
- ◆ 汽车车身构造
- ◆ 汽车车身CAE基础
- ◆ 汽车模型制作
- ◆ 汽车碰撞安全与乘员保护
- ◆ 汽车内饰设计
- ◆ 汽车空调
- ◆ 汽车车身电子技术
- ◆ 汽车车身覆盖件模具设计
- ◆ 汽车车身曲面数值造型理论与算法
- ◆ 汽车车身CAD/CAM
- ◆ 汽车文化

杜子学
傅立敏
黄金陵
陈关龙
曹立波
李彦龙
夏长高
范子杰
王宏雁
周青
雷雨成
王若平
陈无畏
胡平
高翔
崔岸陈鑫
刘玉梅

ISBN 7-111-19736-4



9 787111 197362 >

ISBN 7-111-19736-4

策划编辑：赵爱宁

封面设计：王伟光

编辑热线：(010)88379711

定价：16.00 元

地址：北京市百万庄大街22号

联系电话：(010) 68326294

(010) 68993821

邮政编码：100037

网址：<http://www.cmpbook.com>

E-mail: online@cmpbook.com

普通高等教育汽车车身设计学科方向规划教材

汽车空气动力学

傅立敏 著
范士杰 审



机械工业出版社

本书系统介绍了汽车空气动力学基本原理及与其相关的流体力学基础,汽车的外部流场,汽车外形对空气动力特性的影响,汽车空气动力学设计,汽车发动机冷却、驾驶室通风和空调等内流问题,汽车空气动力噪声,汽车空气动力学试验以及汽车空气动力学数值计算等问题。本书是在作者多年研究工作和多项研究成果的基础上撰写的。

本书是高等学校车辆工程专业本科教材,对从事汽车设计、车身造型设计、汽车空气动力学试验研究的工程技术人员亦有重要的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车空气动力学/傅立敏著. —北京:机械工业出版社,2006.8
普通高等教育汽车车身设计学科方向规划教材
ISBN 7-111-19736-4

I. 汽... II. 傅... III. 汽车—空气动力学—高等学校—教材
IV. U461.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 093380 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:赵爱宁 版式设计:冉晓华 责任校对:王欣

封面设计:王伟光 责任印制:李妍

北京中兴印刷有限公司印刷

2006 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·10 印张·242 千字

定价:16.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线电话(010)88379711

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育汽车车身设计学科方向

教材编审委员会

- | | |
|------------|-----|
| 主任：北京理工大学 | 林逸 |
| 副主任：吉林大学 | 张君媛 |
| 清华大学 | 周青 |
| 重庆交通大学 | 杜子学 |
| 上海交通大学 | 陈关龙 |
| 机械工业出版社 | 林松 |
| 委员：湖南大学 | 曹立波 |
| 同济大学 | 高云凯 |
| 江苏大学 | 朱茂桃 |
| 合肥工业大学 | 张代胜 |
| 扬州大学 | 陈靖芯 |
| 燕山大学 | 韩宗奇 |
| 武汉理工大学 | 乐玉汉 |
| 中国农业大学 | 张红 |
| 河南科技大学 | 谢金法 |
| 南京林业大学 | 郑燕萍 |
| 秘书：机械工业出版社 | 赵爱宁 |
| 机械工业出版社 | 冯春生 |

序

汽车被称为“改变世界的机器”。由于汽车工业具有很强的产业关联度，因而被视为一个国家经济发展水平的重要标志。进入 21 世纪以来，随着国民经济的持续增长，轿车逐渐进入家庭，我国汽车工业进入空前的快速发展时期，已经成为国民经济的支柱产业。在“十五”末期，我国汽车年产量已达到 570 多万辆，在世界排名由第 11 位跃居第 3 位，已经成为世界汽车生产、消费和保有量大国。汽车工业正在成为拉动我国经济增长的发动机。汽车工业的繁荣，使汽车及其相关产业的人才需求量大幅度增长。与此相适应，作为高层次人才培养基地的汽车工业高等教育也得到了长足发展。据不完全统计，迄今全国开办汽车类专业的高等院校已达百余所。

虽然近几年中国汽车工业得到快速发展，市场需求稳步增长，汽车产能迅速扩大，技术水平不断提升，多元化资本进入汽车产业，但是从可持续发展的战略高度仔细分析我国汽车工业现状，仍然存在很多限制因素。中国汽车产品的质量和技术水平与国际水平存在着很大的差距，汽车产业自主开发能力十分薄弱。从未来发展趋势看，打造我国自主品牌、开发核心技术是我国汽车工业的必然选择。

十六大以来，党中央明确提出要把推动自主创新摆在全部科技工作的突出位置，把提高自主创新能力、建设创新型国家作为调整经济结构、转变增长方式、提高国家竞争力的中心环节，这对我国高等教育的办学体制、机制、模式和人才培养理念等都提出了全新的要求。

为了满足新形势下对汽车类高等工程技术人员培养的需求，在中国机械工业教育协会机械工程及自动化学科教学委员会车辆工程学科组的领导下，成立了教材编审委员会，组织制定了多个系列的普通高等教育规划教材。其中，为了解决车身开发方面的创新型人才培养中教材短缺、滞后等问题，组织编写了“普通高等教育汽车车身设计学科方向规划教材”。

本系列教材在学科体系上适应普通高等院校培养开发研究创新型人才的需求；在内容上除选择反映车身开发方面的基础理论和共性技术，如汽车车身设计、汽车造型设计、汽车车身试验学、汽车空气动力学、汽车人机工程学以外，还注重介绍反映当前国际汽车车身开发方面的新理论、新技术和新工艺，如汽车车身制造工艺学、汽车车身 CAD/CAM 技术、汽车车身 CAE 基础、汽车碰撞安全与乘员保护、汽车车身电子技术等；在教学上强调加强实践环节。

相信本系列教材的出版将对我国汽车类专业的高等教育产生积极的影响，为我国汽车行业创新型人才培养模式作出有益的探索。由于我国汽车工业还处于快速发展阶段，对人才不断提出新的要求，这也就决定了高等教育的人才培养模式和教材建设也处于不断变革之中。我们衷心希望更多的高等院校加入本系列教材建设的队伍中来，使教材体系更加完善，以更好地为培养汽车专业人才的高等教育事业服务。

中国汽车工程学会 常务理事
中国机械工业教育协会车辆工程学科组 副主任

林 逸

前 言

汽车空气动力特性对汽车的动力性、经济性、操纵稳定性和舒适性有重要影响，降低气动阻力是改善燃油经济性的重要前提。由于高等级公路的发展、燃油价格的上涨以及严格的相关法规，在激烈的市场竞争中，汽车空气动力特性占有越来越重要的地位。

在我国国民经济“以汽车工业为支柱产业”，“自主开发新车型”政策的指导下，汽车空气动力学日益受到重视。本书介绍了汽车空气动力学的基本原理以及与其相关的流体力学基础，汽车空气动力学设计原则，有关风洞和风洞试验的基础知识；分析了汽车外部流场，同时介绍了汽车外形对空气动力特性的影响；还介绍了发动机冷却和驾驶室内流及汽车空气动力噪声等问题；由于计算机的发展，汽车空气动力学数值计算已成为汽车空气动力学研究的重要研究手段，因此，本书还介绍了有关汽车空气动力学数值计算的基础知识。

作者长期从事汽车空气动力学研究和教学，曾完成本领域多项研究课题，获多项奖励。负责中国首座汽车风洞的建设；曾多次以访问学者和高级访问学者身份赴国外研修，并多次出席本领域国际会议做特邀学术报告；曾作为“21世纪国际优秀人才”（21 Century COE Program “Flow Dynamics International Research Educational Base”）被聘为日本东北大学客座教授，多次赴国外讲学。

作者于1998年曾出版《汽车空气动力学》一书并受到广泛的关注，被国内多所大学用作车辆工程专业教材。现应中国机械工业教育协会车辆工程学科组之约，作为车辆工程专业汽车车身设计规划教材出版本书。本书定位为大学本科教材，在原书基础上对内容作了较多删简。

在本书撰稿过程中，作者的学生吉林大学贺宝琴博士和吴允柱博士为书稿整理做了大量工作，吉林大学汽车风洞实验室全体同志给予了大力协助，在此一并致以谢意。

由于作者水平所限，本书内容难免有错误或不妥之处，望广大读者批评指正。

作 者

目 录

序		第一节 发动机冷却系分析	76
前言		第二节 发动机冷却系的 设计原则	80
第一章 绪论	1	第三节 驾驶室的通风特性	81
第一节 汽车空气动力学的 重要性	1	第六章 汽车空气动力噪声	83
第二节 汽车空气动力学的发展	5	第一节 流场中的声源	83
第二章 汽车空气动力学概述	22	第二节 汽车气动噪声分析	89
第一节 气动力和力矩	22	第三节 汽车周围的流场与汽车 的气动噪声	92
第二节 汽车的阻力特性	28	第七章 汽车空气动力学试验	94
第三节 与汽车相关的流场	30	第一节 汽车空气动力学试验 技术概述	94
第四节 汽车空气动力学特点	32	第二节 汽车风洞试验	97
第五节 汽车空气动力学的 相关学科	33	第三节 汽车风洞	107
第六节 汽车外形与空气动力 特性的关系	34	第四节 汽车空气动力学流态 显示试验	112
第七节 汽车最佳气动外形 的设计途径	41	第五节 汽车空气动力学道路 试验	116
第三章 汽车空气动力学基础	43	第六节 实车道路试验与实车风洞 试验的数据对比分析	118
第一节 流体的性质	43	第七节 驾驶室通风试验	118
第二节 流体阻力的理论	46	第八章 汽车空气动力学数值计算	120
第三节 汽车的绕流特性	52	第一节 空气动力学数值计算 概述	120
第四章 汽车空气动力学设计	65	第二节 CFD在汽车空气动力学中 的应用	125
第一节 汽车空气动力学 设计准则	65	第三节 非粘性流方法	128
第二节 汽车空气动力学 设计方法	66	第四节 N—S方程的简化	139
第三节 最佳气动外形	71	第五节 N—S方程的解法	145
第五章 汽车发动机冷却系的空气 动力特性以及驾驶室的通 风特性	76	第六节 结束语	147
		参考文献	149

第一章 绪 论

第一节 汽车空气动力学的重要性

汽车空气动力学是研究空气与汽车相对运动时的现象和作用规律的一门科学。它是汽车技术发展的先行官和基础，在能源、交通、环保等领域也发挥着十分重要的作用。

汽车空气动力特性是汽车的重要性能，它是指汽车在流场中所受到的以阻力为主的包括升力、侧向力的三个气动力及其相应的力矩（即六分力）的作用而产生的车身外部和内部的气流特性、侧风稳定性、气动噪声特性、泥土及灰尘的附着和上卷、刮水器上浮以及发动机冷却、驾驶室内通风、空气调节等特性。概括地说，汽车的流场包括车身外部流场和内部流场。

由于高等级公路的发展、汽车车速的提高对汽车的操纵稳定性、安全性、舒适性提出了越来越高的要求，特别是由于世界能源危机，石油价格上涨，使改善汽车的燃油经济性成为汽车技术的重要课题。汽车空气动力特性对汽车的动力性、经济性和操纵稳定性有直接的影响。设计空气动力特性良好的汽车，是提高汽车动力性、经济性的重要途径，而高速汽车的空气动力稳定性是汽车高速、安全行驶的前提。改善驾驶室的内流特性（发动机冷却系空气动力特性、驾驶室内通风及空调特性），在减阻的同时，提高发动机、制动器部件的效能，降低空气动力噪声，则是保障舒适性的前提。

关于空气动力特性对汽车性能的影响，本章将分别进行叙述，这里仅对空气动力特性与汽车动力性、经济性以及操纵稳定性的关系进行简要分析。

一、汽车空气动力特性对动力性的影响

汽车的最高车速、加速时间和最大爬坡度是评价汽车动力性的主要指标。

1. 气动阻力与最高车速

在水平路面上等速行驶的汽车，驱动力全部用来克服滚动阻力和气动阻力。假设汽车前后车轮的滚动阻力相同、汽车的重力和气动升力均匀地分布在四个车轮上，则汽车的最高车速可表示为

$$v_{\max} = \left[\frac{F_{\max} - Gf}{\frac{1}{2}\rho A(C_D - C_Lf)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-1)$$

式中 v_{\max} ——最高车速；

F_{\max} ——最大驱动力；

G ——汽车重力（车重）；

f ——滚动阻力系数；

ρ ——空气密度；



- A——汽车正面投影面积；
- C_D ——汽车气动阻力系数；
- C_L ——汽车气动升力系数。

可见在最大驱动力 F_{max} 时，在一定的车重 G 及其他因素不变的情况下，最高车速 v_{max} 取决于气动阻力系数 C_D 和气动升力系数 C_L 。减小气动阻力系数，可提高最高车速。由于升力对汽车操纵稳定性的影响，所以不能简单地用增大 C_L 来分析对 v_{max} 的影响。

2. 气动阻力与汽车加速度

汽车的加速度可表示为

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dP_t}{dt} \frac{\eta_T}{Gf + \frac{3}{2}\rho C_D A u_a^2} \quad (1-2)$$

式中 $\frac{dP_t}{dt}$ ——发动机功率随时间的增长率；

$\frac{dv}{dt}$ ——汽车的加速度 (m/s^2)；

P_t ——发动机功率 (kW)；

G ——汽车重力 (车重) (N)；

f ——摩擦系数；

ρ ——空气密度 (kg/m^3)；

C_D ——气动阻力系数；

A ——汽车正面投影面积 (m^2)；

u_a ——车速 (m/s)；

η_T ——汽车传动系效率。

由式 (1-2) 可见，汽车的加速能力首先取决于发动机的加速特性，同时还与汽车的气动阻力系数 C_D 近似成反比关系，减小汽车的气动阻力，就可增加汽车的加速度。

气动阻力增加，会导致加速能力下降。当汽车达到最大速度 v_{max} 时，其加速度的值就降低为零。

二、汽车空气动力特性对经济性的影响

1. 气动阻力占总阻力的比例

行驶汽车的总阻力 T 可表达为

$$T = \frac{1}{2}\rho v^2 A C_D + 2(G_F - L_F)f_F + 2(G_R - L_R)f_R \quad (1-3)$$

式中 $\frac{1}{2}\rho v^2 A C_D$ ——气动阻力；

$2(G_F - L_F)f_F + 2(G_R - L_R)f_R$ ——总的滚动阻力；

G_F 、 G_R ——分别为作用在前、后轴上的汽车重力分配值；

L_F 、 L_R ——分别为作用在前、后轴上的气动升力；

f_F 、 f_R ——分别为前、后轮胎的滚动阻力系数。

图 1-1 为气动阻力占总阻力的比例。图中表明，在车速 $v=80km/h$ 时，气动阻力与滚



动阻力几乎相等；当 $v=150\text{km/h}$ 时，气动阻力相当于滚动阻力的 2~3 倍。

2. 消耗于气动阻力的功率

汽车的气动阻力是由发动机产生的牵引力克服的。消耗于克服气动阻力的功率是发动机所做的功中相当大的一部分，因此气动阻力直接影响到所需的功率。这一点可用燃料消耗量来表示。

消耗于气动阻力的功率 $P(\text{kW})$ 为

$$P = \frac{C_D \rho A u_a^3}{2\eta_T} \quad (1-4)$$

式中 ρ ——空气密度 (kg/m^3)；

C_D ——气动阻力系数；

A ——汽车正面投影面积 (m^2)；

u_a ——车速 (m/s)；

η_T ——汽车传动系效率。

可见，消耗于气动阻力的功率与速度的三次方成正比。图 1-2 为消耗于气动阻力的功率。

3. 气动阻力与燃料消耗量

图 1-3 为各种车辆每 100km 的燃料消耗量。小型客车用于克服气动阻力的燃油消耗量为 50% 左右，比例最大；其次是普通货车，占 32% 左右。

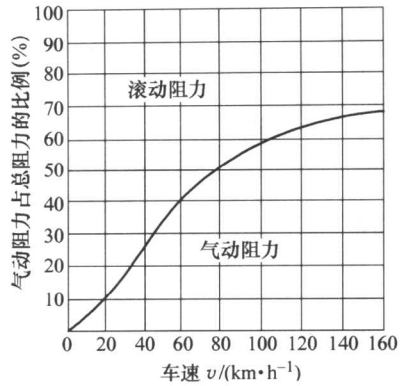


图 1-1 气动阻力占总阻力的比例

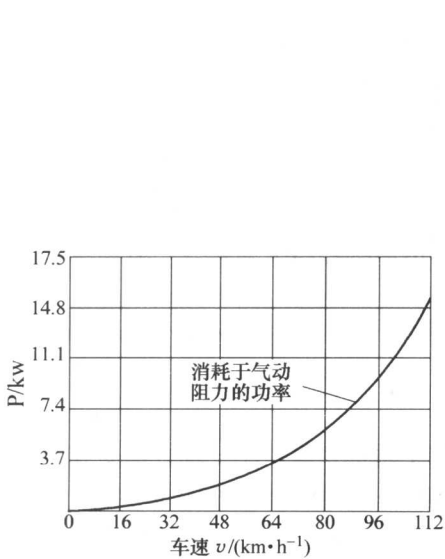


图 1-2 消耗于气动阻力的功率

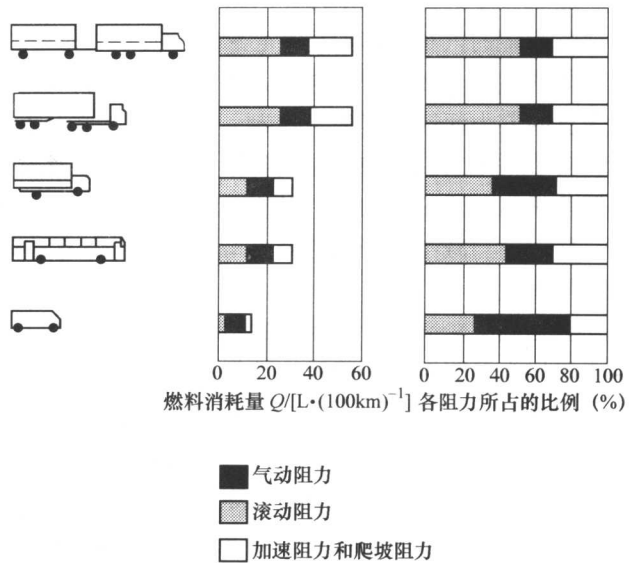


图 1-3 各种车辆每 100km 的燃料消耗量

本书作者曾进行过国产轿车、小公共汽车和载货汽车的降低气动阻力的研究。研究表明，国产汽车通过空气动力特性改进，使油耗降低的效果为：

大型载货汽车、全挂牵引车，当气动阻力系数降低 30%，并以 80km/h 的车速行驶时，可降低油耗 12%~13%；当气动阻力系数降低 20% 时，可降低油耗 7%~9%；当气动阻力



系数降低 10% 时, 可降低油耗 3%~5%。气动阻力系数对燃料消耗的影响见图 1-4 和图 1-5。

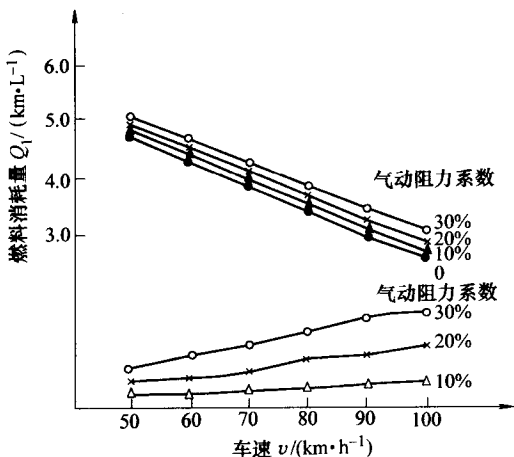


图 1-4 总质量 20t 的载货汽车 6 个月的燃料消耗量与气动阻力系数

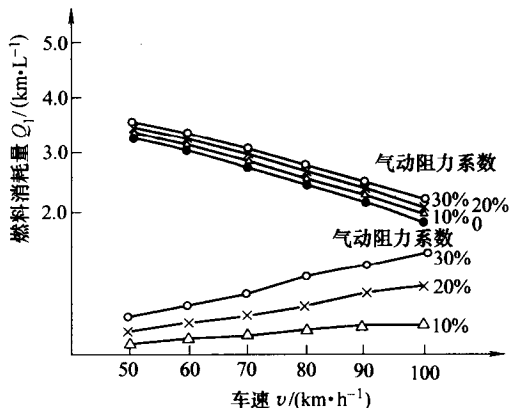


图 1-5 总质量 32t 的全挂牵引车 5 个月的燃料消耗量和气动阻力系数

三、汽车空气动力特性对操纵稳定性的影响

1. 升力与纵倾力矩对操纵稳定性的影响

升力和纵倾力矩都将减小汽车的附着力, 因而使转向轮失去转向力, 使驱动轮失去牵引力, 影响汽车的操纵稳定性。

质量轻的汽车, 特别是重心靠后的汽车, 对前轮的升力特别敏感。这个情况对行驶中的汽车非常危险, 即当前轮有升力使汽车上浮时, 升力又随着车速的增加而继续增加, 由于前轮失去附着力而使汽车失去控制。升力和纵倾力矩对于高速行驶汽车的操纵稳定性影响很大。对于轿车来说, 如果在设计阶段没有充分考虑升力的问题, 升力在强风时可达几百 N 甚至几千 N。这一附加的力使前轮减轻了负荷, 从而破坏了汽车的操纵性; 减少了后轮负荷, 使驱动力减小。产生的升力与侧向力的合力具有两次曲线式的增加趋势, 对侧风稳定性的影响很大。

为提高车辆高速行驶的直进性和侧风稳定性, 应减小升力。升力减小可防止汽车摆头, 并由于增大了附着力而使稳定性提高。

2. 侧向力及横摆力矩对操纵稳定性的影响

当汽车受到非正迎面风时, 气流的合成相对速度与 x 轴成 β 角, 在 y 轴方向受到了侧向力。如果侧向力的作用点与坐标原点有一个距离 (其值随车身形状和横摆角而变化), 即产生了绕 z 轴回轮的横摆力矩。如果侧向力的合力通过侧向反作用力中心, 车辆将保持直线行驶, 但相对原行驶方向会有偏移。如果侧向力的合力作用在侧向反作用力中心以前时, 车辆将顺着风的方向转向, 并且产生横摆力矩, 使车辆向着风的方向摆动, 造成稳定性恶化。

为提高汽车的方向稳定性, 不仅要减小侧向力, 而且应使侧向力的作用点移向车身后方。

3. 侧倾力矩对操纵稳定性的影响

由于来自车身侧面及其周围气流的影响, 产生了绕 x 轴的侧倾力矩。这个力矩通过悬



架系统至车架及左右车轮,引起了车轮负荷的变化。对应于力矩回转的方向,使一个车轮负荷增加,另一个车轮负荷减少,从而改变了汽车的转向特性。

综上所述,在激烈的市场竞争中,汽车所面临的首要问题是向汽车空气动力特性的挑战。因为只有空气动力特性好的汽车,才能保证其具有好的动力性、经济性和操纵稳定性以及舒适性,只有最佳气动外形的造型才有生命力。可以说,汽车空气动力特性是决定汽车在市场竞争中能否取胜的重要性能。

汽车空气动力学的发展在很大程度上依赖于试验设备和手段的发展。风洞试验是汽车空气动力学研究的重要手段。世界上许多国家不惜花费巨资建成了大量的全尺寸、全天候、实车环境风洞及模型风洞,以其作为开发高性能汽车的重要手段。目前世界上汽车专用风洞不下千座,但许多国家仍感到试验设备和能力不足,还在不断地建设新风洞,与此同时,汽车风洞试验技术也在不断完善。

近年来,伴随着计算机的发展,汽车空气动力学理论计算也取得了很大的进展。风洞试验和理论计算相互补充,推动了汽车空气动力学的发展。

汽车空气动力学的大量研究成果,使汽车性能大大改善,低阻新车型不断涌现。由于汽车空气动力学在汽车工程技术领域中发挥着极其重要的作用,因而受到愈来愈大的重视。

第二节 汽车空气动力学的发展

一、汽车空气动力学发展的历史阶段

汽车依据其外形和用途可分为三类:乘用车(轿车)、商用车(客车及货车)和赛车(高性能汽车)。

轿车的演变,反映了汽车空气动力学的发展过程。

从第一辆汽车问世,至今已有一百年的历史。由于人们的不断创造和改进,汽车从只有车架和车轮等简单的行驶系统,逐步地具备了较完善的传动机构和制动机构,并装上了发动机,汽车雏形终于发展成今天这样结构复杂而精密的现代汽车。道路车辆的雏形继承了马车形状,其设计只能先解决机械问题。由于这些汽车的速度很低,所以还不存在空气动力特性方面问题。把空气动力学的概念与研究成果引入汽车设计中,形成独特的汽车空气动力学学科,是从20世纪20年代开始的。

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的认识。最初只注意降低气动阻力,随着车速的提高,人们开始注意到气动升力及侧风稳定性问题。近期汽车空气动力学的发展又注意了驾驶室内流、发动机冷却、空气动力噪声及消除车身上泥土附着等问题。

汽车空气动力学的发展历史表明,它是伴随着由于道路状况的变化和使用要求的提高而引起汽车造型的变化而发展起来的,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。

汽车空气动力学经历了如图1-6所示的四个发展阶段。

汽车空气动力学是一门工程应用科学或所谓经验科学(Empirical Science),大量汽车空气动力学方面的重要结论来自对工程试验数据的分析和推理。能源危机和高速公路的发展是



推动汽车空气动力学发展的重要因素。由于市场的激烈竞争以及人们对汽车舒适性、安全性的要求，促使制造厂商在寻求最佳气动外形设计的同时，寻求更为人们所接受的美的造型。在汽车设计过程中，人们通过大量的风洞试验，不断地改进汽车设计，而风洞试验又不断地揭示各种气动现象，推动汽车空气动力学研究的发展。

(一) 基本形状化造型阶段

汽车空气动力学发展的第一阶段是从 20 世纪初期开始的，人们从外形上注意了空气动力特性，把它总结为基本形状化造型阶段。

基本形是人们直接将水流和气流中的合理外形应用到汽车上，采用了鱼雷形、船尾形、汽艇形等水滴形汽车外形。早期的汽车外形在考虑了流线形化后，相对于马车来说，其气动阻力系数明显地改善了。但当时的一个通病是没有认识到气流流经这种旋转体时已不再是轴对称的，因为把旋转体靠近地面，又加上了车轮及行驶系统，与单纯水滴形的流场已不再相同。由于早期的汽车造型实用性不强，并且难以被人们的审美要求所接受，因而没有获得广泛应用。


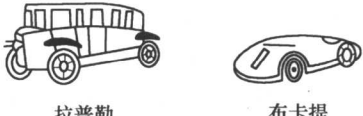


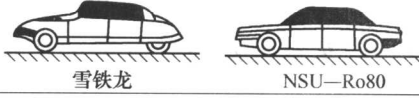
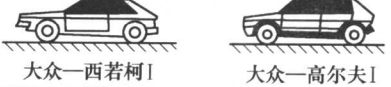

特征	年份	车 型
基本形状化	1900 ~ 1930	 鱼雷形 船尾形 汽艇形
	1921 ~ 1923	 拉普勒 布卡提
流线形化	1922 ~ 1939	 杰瑞
	1934 ~ 1939	 康贝 舒勒
	1955	 雪铁龙 NSU-Ro80
细部优化	1974	 大众-西若柯 I 大众-高尔夫 I
整体优化	1983	 奥迪 100 III 福特-雪拉

图 1-6 汽车空气动力学的四个发展阶段

图 1-7 是 1899 年由 Camille Jenatzy 按空气动力学观点设计的最早的汽车，车身形状为

鱼雷形，长宽之比为 4:1，它虽然考虑了车身的流线形，但驾驶员与车轮都露在外边，没有“一体化”，显然气动阻力很大。

图 1-8 是 1913 年问世的具有飞艇形状的汽车。图 1-9 是早期采用船形外形的汽车，气流在前端和翼子板处分离后，不能再附着，从空气动力学观点来看，这

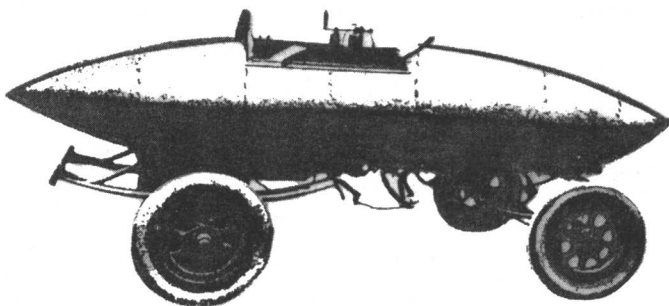


图 1-7 最早按空气动力学观点设计的汽车



是一种不合理的设计。

(二) 流线形化造型阶段

1. 用空气动力学观点指导汽车造型

空气动力学理论被用于汽车设计中，经历了一个很缓慢的发展历程。1911年 Riedle 对汽车的行驶阻力所作的分析，是人们对汽车空气动力学认识的基础。随着 Prandel 和 Eiffel 进一步揭示了气动阻力的本质，空气动力学也越来越多地应用于汽车设计中。

在这一阶段，汽车外形已不是简单的水滴形，地面效应也已被人们所认识。这期间，人们力图降低气动阻力，并获得了可观的进展。

在这个时期，杰瑞 (Jaray) 的理论对汽车空气动力学的发展作出了贡献。他把空气动力学理论应用在汽车设计中，使汽车外形设计取得了巨大的进步，出现了气动阻力系数 $C_D=0.28$ 的低阻汽车 (1924 年的拉普勒 Rumlper)。

杰瑞等卓越的空气动力学家，对汽车空气动力学的贡献可概括为以下几点：

(1) 杰瑞提出了“最小阻力的外形是以流线形的一半构成的车身” (以下称“半车身”) 杰瑞认识到，一个在自由流场中气动阻力系数很小的旋转体，在接近地面时，流动就不再是轴对称的，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。最小气动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”进行风洞试验表明，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，就可消除阻力增加的现象，如图 1-10 所示。

杰瑞把单个符合空气动力学原理的部分组合在一起构成“半车身”进行组合模型的减阻试验。“半车身”后来不断地被一些设计

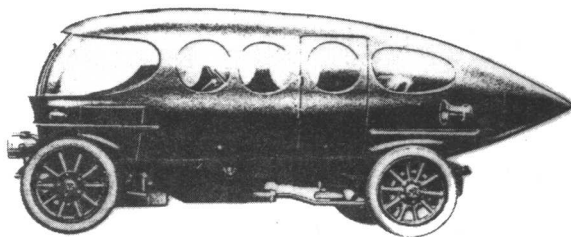


图 1-8 1913 年问世的具有飞艇形状的阿尔法·罗密欧汽车

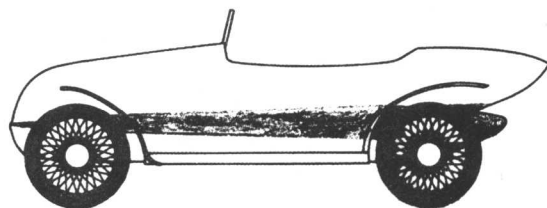


图 1-9 采用船形外形的高速敞篷车 (1912 年 N·A·G)

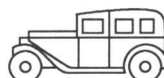



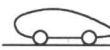
车 型	$A_{1:1}/m^2$	C_D
	2.99	0.64
 大杰瑞	2.86	0.30
 小杰瑞	1.87	0.29
 无车轮半车身	2.99	
	前端非尖角，未修圆	0.15
	前端尖角	0.13
 有车轮半车身	前端修圆	0.09

图 1-10 杰瑞汽车及其“半车身”阻力测定 (W. Klemperer 1922 年的试验)



师采用。

(2) 认识到流场的三维性能 第一次世界大战后，几个地方同时开始生产流线形豪华轿车，其中最著名的是拉普勒豪华轿车。

拉普勒轿车采用了后置发动机型式，利用了后部的狭小空间，车身的俯视图如同一飞艇，车顶也是流线形的。这表明拉普勒轿车的设计者已经了解了流场的三维特性，如图 1-11 所示。

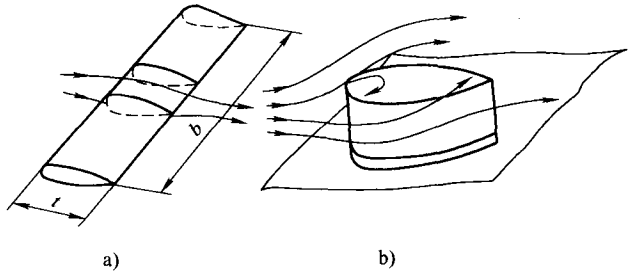


图 1-11 流场特性

a) 二维流动 b) 一个靠近地面形状的三维流动

1979 年 Buchneim 在 VW 风洞中对慕尼黑的道义奇 (Deuesches) 博物馆提供的拉普勒原车进行试验表明，该车正面投影面积 $A=2.57\text{m}^2$ ，气动阻力系数 $C_D=0.28$ 。

(3) 罩住车轮 随着汽车空气动力特性的改进，车轮外露的问题日益突出。早在 1922 年由 Klempeer 做的试验表明，在拉普勒轿车上，车轮未加罩会使气动阻力增加 50% 之多，因此采用了罩住车轮的设计。

(4) 杰瑞提出了“只有消除尾部的分离，才能降低阻力”的理论 图 1-12 表明了杰瑞用翼型截面和旋转体对汽车造型设计的构思。杰瑞通过分析发现，为控制赛车下部的气流，应尽可能把车身向下延伸，同时利用弧形罩罩住车轮。但不管怎样改进设计，车身尾部的气流都明显地出现了分离。

杰瑞认为，只有消除尾部的分离才能降低阻力，这是汽车空气动力学的又一个重大进步。如图 1-13 所示，杰瑞的两个构思方案的基础车身均由相等的截面体构成。第一例是把等截面体垂直地加在基础车身上，第二例是在基础车身上加了一个半旋转体，这两种车身后来就被称为“合成型式”。当后部采用“半车身”形状时，只有在长尾状态下才能消除气流分离；而在“合成型式”中，尾部的斜面被分成两个平面，以防止由于压力过度升高引起的气流分离。但是这种型式只有在尾部极狭长的情况下，才能防止分离。

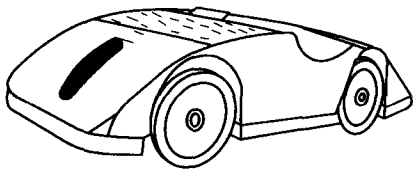


图 1-12 1923 年 Bagatei 按三维理论设计的 Sterassburg Grand Pnix

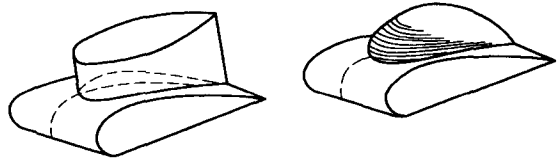


图 1-13 杰瑞的两种“合成型式”简图

1922 年，杰瑞首先发表了用“合成型式”构成汽车外形的想法。1935 年，杰瑞发表了“以空气动力学的观点可能构成的车身形状”的论文。用他的“合成型式”，竟可以把气动阻力系数降低至 0.3。然而，这一科研成果经历了 60 年的时间，直至 1982 年，Audi 100 III 型



车问世，才把 C_D 值为 0.3 的预见变为现实。杰瑞的“合成型式”的车身气动阻力系数 $C_D = 0.30$ ，仍是带车轮的“半车身” ($C_D = 0.15$) 的两倍。

大批生产的杰瑞车型是 1937 年问世的太脱拉 87 型。该车发动机后置，乘客座位前移，获得了更多的空间。后来在 VW 风洞中对慕尼黑的道义奇博物馆提供的原车进行试验表明，该车 $C_D = 0.361$ 。

由于杰瑞车过于狭长，而没有获得成功。有些仿杰瑞车，如 1934 年的克莱斯勒的气流 (Airflow) 牌和 VW 甲壳虫型汽车，都因尾部造型过陡而出现一对方向相反的纵涡，使纵向中间断面的气流在相当长的一段时间保持连续。这种伪流线形的车身气动阻力系数为 0.4~0.5，比气动阻力系数为 0.6~0.8 的箱形车有所进步。

在这一段空气动力学发展的曲折过程中，由于人们过分拘泥于杰瑞的基本原理，各车型过于相似，如奥迪和迪克尔 (1922~1924) 以及克莱斯勒 (1927~1928) 这些车型都未被大众所接受。当时的杰瑞车长高比为 2.1:1，车身高是杰瑞车的又一缺点 (现今汽车的长高比为 3.0:1)。1934 年，杰瑞开发了长高比为 3.3:1 的车，如 1934~1935 年的阿德勒胜利车，这种车形状狭长，尾部倾斜，使内部空间难以利用，亦未被大众所接受。

(5) 认识到车身前部流场与尾部流场之间强烈的相互影响 杰瑞车的时代到第二次世界大战时期结束了，朗日

(Lange) 在杰瑞车的基础上开发了朗日车。如图 1-14 所示，该车长高比为 3.52:1，底部由等截面体构成，上部

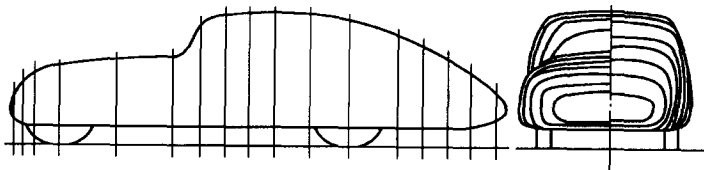


图 1-14 朗日车

从风窗处开始加一个水平等截面体，从俯视图看，等截面体的前端由圆角构成，1:5 模型风洞试验结果 $C_D = 0.14$ 。

20 世纪 30 年代，密执根大学 W. E. Lay 的研究，使空气动力学在汽车上的应用前进了一大步。W. E. Lay 系统地研究了车身前部和后部外形，分离出各部件的空气动力学影响因素，研究了主要车身参数对气动阻力的影响以及它们之间的相互作用 (图 1-15)。他的重要研究成果在于明确了车身前部流场与尾部流场之间强烈的相互作用及影响。要使长尾车型获得低的气动阻力系数，必须保持车身后端的流场平顺和连续。当气流在陡的风窗处分离时，气动阻力系数明显升高；但如果极大的尾部使气动阻力系数已经很高，则陡的风窗的影响就不明显了。遗憾的是，雷 (Lay) 的由组合体构成的车型，侧壁的平行平面及四周的尖角导致了相当大的气动阻力系数。

雷的研究的重要结论是：短粗的尾部与长尾相比，仅使气动阻力系数有较小的升高。

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-

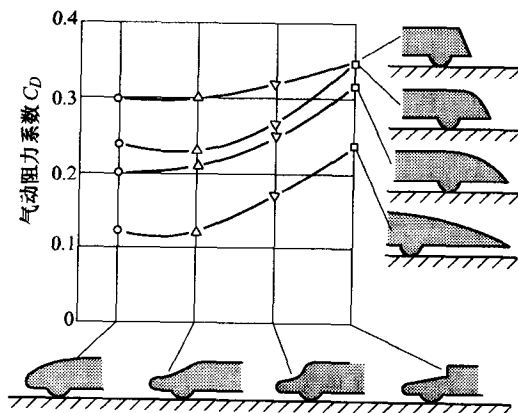


图 1-15 主要车身参数对气动阻力的影响及它们之间的相互作用